



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

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

NATALIA LORENA ARAVENA FARAY

PROFESORA GUÍA

MARISOL LARA CASTILLO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA

SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE GEÓLOGA
POR: NATALIA LORENA ARAVENA FARAY
FECHA: NOVIEMBRE 2017
PROF. GUÍA: MARISOL LARA CASTILLO

ANÁLISIS 3D DEL DESLIZAMIENTO DE ROCA DE PUNTA COLA GENERADO POR EL TERREMOTO DEL FIORDO AYSÉN DEL 2007

El terremoto de Aysén, ocurrido en abril del año 2007, cuyo epicentro se ubica dentro del Fiordo Aysén, de magnitud Mw 6.2, es un terremoto cortical de baja profundidad (aprox.10 km) que generó diversas remociones en masa en las cercanías del epicentro. Entre ellas se encuentra el deslizamiento de roca en la localidad de Punta Cola, que luego evoluciona a avalancha de roca. Además, el impacto con el mar que tuvieron los fragmentos de roca, detritos, entre otros, producto de las remociones en el fiordo, desencadena un tsunami tras el evento que provocó diversas consecuencias entre las que se destacan las muertes de diez locatarios y destrucción de criaderos de salmones, principal actividad de la zona. Por otro lado, los instrumentos de medición sísmica quedaron inhabilitados después del tsunami, por lo que no se cuenta con información adicional del evento.

El avance de los estudios con modelamiento numérico y geotécnico ha facilitado la mejora y precisión en el análisis de estabilidad de taludes, permitiendo un mejor entendimiento de procesos desencadenados por sismos, como las remociones en masa -que será el tema de este estudio-, y el riesgo que éstos conllevan a sectores poblados.

El siguiente trabajo tiene como objetivo realizar un modelamiento numérico en 3D con el software 3DEC de ITASCA para analizar la estabilidad de laderas rocosas en la zona de Punta Cola en el Fiordo Aysén, afectadas por el deslizamiento durante el terremoto de Aysén del año 2007.

Los métodos utilizados para este estudio integran la representación de la geometría de la zona en tres dimensiones, mediante la programación en lenguaje *FISH*, la caracterización geológica y geotécnica, y la integración de discontinuidades.

Posteriormente, se analizan los modelos bajo el escenario estático para validar el programa con los parámetros obtenidos de información bibliográfica. Luego se realizan los análisis dinámicos con sismos que cuenten con características similares al ocurrido en Aysén el 2007, como el terremoto de Parkfield (2004) y el terremoto de Morgan Hill (1984).

Los resultados principales se resumen en desplazamientos de hasta 25 metros concentrados en los sectores más altos del talud con amplificaciones de PGA registrados en los distintos puntos de control.

Se concluye que el software es competente para representar geometrías extensas (mayores a 1 km) tanto en el caso estático como en el dinámico. El comportamiento más cercano a lo ocurrido el 2007, en base a los desplazamientos generados, es el modelo con el terremoto Morgan Hill, estación Anderson Dam como input.

Agradecimientos

Primero que todo, quiero agradecer a los miembros de la comisión, el profesor Sergio Sepúlveda, la profesora Sofía Rebolledo y especialmente a mi profesora guía, Marisol Lara. Agradezco por todo el apoyo y dedicación brindados durante estos meses de trabajo. Además, al proyecto FONDECYT n° 1140317 por hacer esto posible.

A Manuel García, por su apoyo e infinita ayuda. Gracias por el tiempo invertido y consejos para hacer de éste un trabajo mejor. También a los otros memoristas de la profesora Marisol, que me brindaron su apoyo en el desarrollo de la memoria.

A los amigos y amigas que hice durante plan común, con los que compartí esos años de sufrimiento, pero también de muchas alegrías. Gracias a ustedes, el paso por la universidad estuvo lleno de hermosos recuerdos. En especial a Sole, Cote y Meli, con las que compartí muchos momentos especiales.

A las amigas que conservo desde colegio y que entramos juntas a la universidad, Alejandra y Fernanda, gracias por los años de amistad. Valen mucho para mí.

A mi generación de geología, con quienes compartí los terrenos de la carrera, y en especial a los amigos que hice en este paso: Sergio, las Geoniñas: Cote, Les, Lore y Naty, Juanito, etc. Gracias por las conversaciones, las salidas, la compañía, consejos y muchas cosas más.

A Christian, gracias por tanto...no tengo palabras para describir lo feliz que me has hecho durante estos años. Tu apoyo, en los momentos buenos y malos los agradeceré por siempre. Me siento muy afortunada a tu lado.

Finalmente, a mi familia: mi madre Lorena, mi padre Alexis y mi hermana Bárbara. Ustedes son mi todo. Gracias por el amor, las enseñanzas, las risas y la linda relación de familia que tenemos. Lo que soy hoy en día se lo debo a ustedes. Este es un ciclo más que cumplo en el camino de la vida y como siempre ustedes están allí, en primera fila, apoyándome y creyendo plenamente en mí. Esto va especialmente dedicado a ustedes.

Tabla de contenido

.....	II
Agradecimientos	III
Índice de Ilustraciones	VI
Índice de tablas	XIII
1 Introducción.....	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo General.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
1.2 Metodología.....	3
2 Área de estudio	4
2.1 Ubicación y vía de acceso.....	4
2.2 Marco Geológico	5
2.2.1 Geomorfología.....	7
2.2.2 Litología y Estratigrafía.....	7
2.3 Marco Tectónico	10
2.3.1 Evolución Paleogeográfica y tectónica.....	10
2.3.2 Configuración Geotectónica.....	11
2.3.3 Actividad sísmica	14
2.3.4 Terremoto de Aysén del 2007	15
2.4 Remociones en masa.....	18
2.4.1 Deslizamiento de Punta Cola.....	20
3 Implementación del modelo	26
3.1 Software 3DEC	26
3.2 Métodos de elementos distintos.....	26
3.3 Modelamiento en 3DEC	27
3.3.1 Topografía del modelo en base a prismas triangulares.....	27
3.3.2 Zonas de baja calidad de roca: Discontinuidades mayores	29
3.3.3 Discontinuidades menores.....	33
3.3.4 Materiales	38
3.3.5 Modelamiento estático.....	42
3.3.6 Modelamiento dinámico.....	43

3.3.7	Sismos utilizados en el modelamiento dinámico.....	44
4	Resultados.....	51
4.1	Caso estático	51
4.1.1	Modelo 1.....	52
4.1.2	Modelo 2.....	55
4.2	Caso dinámico.....	58
4.2.1	Terremoto de Parkfield.....	58
4.2.2	Terremoto de Morgan Hill.....	66
5	Discusiones.....	90
5.1	Caso estático	90
5.2	Caso Dinámico.....	91
5.2.1	Terremoto de Parkfield.....	91
5.2.2	Terremoto de Morgan Hill, estación AND.....	98
5.2.3	Terremoto de Morgan Hill, estación CAP.....	102
5.2.4	Terremoto de Morgan Hill, estación GMR	106
6	Conclusiones.....	114
7	Bibliografía.....	116
8	Anexos.....	122
8.1	Anexo A: Construcción de topografía del modelo en base a prismas triangulares	122
8.1.1	Código 1	123
8.1.2	Código 2	124
8.2	Anexo B: Obtención de parámetros para zonas en donde hubo deslizamiento	124
8.3	Anexo C: Código casos estáticos.....	125
8.4	Anexo D: Código casos dinámicos.....	130

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: a) Ubicación a nivel regional de la zona de estudio. Fuente: Lastras et al. 2016. b) Ubicación del fiordo Aysén y su cercanía a la ciudad de Puerto Aysén y Coyhaique. Fuente: Sepúlveda et al. 2010.....	4
Ilustración 2: Ubicación del Fiordo Aysén y Punta Cola. También se muestra la ciudad de Puerto Aysén y los volcanes Macá y Cay. Fuente: (Modificada) Google Earth.	5
Ilustración 3: Distribución del Basamento metamórfico (1), Batolito Norpatagónico (2) y Unidades metavolcánicas (3) en el sector de Chiloé y Aysén insular. El recuadro rojo indica la zona de estudio, el Fiordo Aysén. Fuente: Hervé et al. 2010.	6
Ilustración 4: (Arriba) Mapa geológico de Chile, zona sur (entre 44°S y 56°S) en el recuadro se indica la zona de estudio. (Abajo) Zoom de la zona de estudio, Fiordo Aysén. La cruz muestra la ubicación de Punta Cola. Fuente: SERNAGEOMIN 2003	8
Ilustración 5: Geometría a escala regional de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui en donde se observan los lineamientos principales N-S y las fallas NE en échelon. Los círculos negros representan a los volcanes cuaternarios que se encuentran alineados con respecto a la falla. Los triángulos muestran la unión de la placa de Nazca y Sudamericana y el triángulo mayor, al punto triple que une estas dos placas con la placa Antártica. Fuente: Cembrano et al. 1996.	12
Ilustración 6: Zonas de fracturas y segmentos de la dorsal (líneas delgadas negras) y vectores de movimiento de las placas Antártica y Nazca (flechas rojas). Los triángulos invertidos muestran las estaciones activas de CRSP. La estrella representa la ubicación del epicentro del enjambre sísmico del 2007. Fuente: Mora et al. 2010.....	13
Ilustración 7: Zona de estudio (círculo rojo) y su relación espacial con la rama principal del LOFZ. Fuente: Redfield et al. 2011.....	14
Ilustración 8: Mecanismos focales de los sismos del enjambre de Aysén 2007. Fuente: Mora et al. 2010	16
Ilustración 9: Enjambre sísmico registrado desde el 23 de enero. Como se observa, cinco eventos con $M_w > 5$ antecedieron al terremoto principal ($M_w = 6.2$). Registro obtenido del Coyhaique GEOSCOPE station. Fuente: Legrand et al. 2011	17
Ilustración 10: Zona epicentral del terremoto de Aysén del 2007. Además, se indican las fuentes del Tsunami producido en el mismo evento, que afectaron a locatarios y a los criaderos de salmones, actividad principal de la zona. Fuente: Naranjo et al. 2009.....	18
Ilustración 11: Remociones en masa ocurridas en el fiordo Aysén. Los colores clasifican a la remoción según el inventario mostrado anteriormente. Fuente: Sepúlveda et al. 2010	20
Ilustración 12: a) Vista tridimensional de la sección del fiordo afectada por el terremoto del 2007, donde se observa la avalancha de Punta Cola. Fuente: Lastras et al 2013. b) Zoom al deslizamiento de Punta Cola. El escarpe principal corresponde a lo indicado en rojo. Fuente: Google Earth. (Imagen del año 2013)	21
Ilustración 13: Depresión subacuática (Inner depression) y anillos de sedimentos comprimidos (Deformation ring) generados por el impacto de detritos y rocas de la remoción de Punta Cola con el fondo del fiordo. Fuente: Lastras et al. 2016.	25

Ilustración 14: Secuencia de deslizamiento ocurrido en Punta Cola desencadenado por el terremoto de Aysén (2007). Fuente: Oppikofer et al. (2012).	25
Ilustración 15: DEM utilizado para crear la topografía pre-deslizamiento. a) DEM inicial del área de estudio. b) Polígono para delimitar la zona. c) DEM final con un área más acotada y aristas ortogonales. Fuente: Oppikofer et al. 2012.	28
Ilustración 16: Topografía pre-deslizamiento obtenida en base a prismas triangulares a partir del DEM con tamaño de pixel de 40 metros. Vista desde tres ángulos distintos.	29
Ilustración 17: Avalancha de Punta Cola con vista en planta y la ubicación de la Highly Fracture Zone (HFZ) junto a sus dimensiones representada como el área de color rojo. Las áreas verdes muestran las zonas de Lateral Release Surface (LRS) y Basal Failure Surface (BFS). Fuente: (Modificado) Redfield et al. 2011	30
Ilustración 18: Vista en planta del deslizamiento de Punta Cola y las estructuras mayores consideradas en el modelo: Falla Punta Cola (línea verde), HFZ (zona beige). Además, se muestran la Superficie de falla basal (BFS) y Superficie lateral de liberación (LRS). Fuente: (Modificado) Escudero. 2017	31
Ilustración 19: Modelamiento de la HFZ. A la izquierda se muestra como fue modelada al principio como un DEM independiente. A la derecha, la forma final de la HFZ, que fue construida y separada como estructura en el mismo DEM que el resto de la topografía.	32
Ilustración 20: Topografía del modelo vista en planta. Se pueden observar las estructuras mayores integradas: FPC (celeste) y HFZ (azul)	32
Ilustración 21: Estructuras locales de Punta Cola obtenidas con el escaneo TLS. En a) se tienen las discontinuidades de BFS y en b) se tiene las discontinuidades del LRS. Fuente: Redfield et al. 2011	33
Ilustración 22: Modelo de Punta Cola propuesto en el trabajo de Vejar, 2016. a): Modelo actual que se analizará en este trabajo. El recuadro sobre éste indica el área abarcada en el trabajo de Vejar. b): Modelo propuesto ubicado en la misma orientación que a). Imágenes a y b incluyen base y remoción. Imágenes c) d) e) f): Modelo propuesto en donde se muestran los volúmenes de base (post-deslizamiento) y remoción (pre-deslizamiento) orientados en distintas direcciones. La remoción pareciera estar controlada por una superficie de falla de bajo ángulo. (Vejar, 2016) ...	35
Ilustración 23: Modelo 1. a) y c): Topografía del modelo con las discontinuidades mayores y menores orientada en distintas direcciones. b) y d): Planos de las discontinuidades menores de a) y c) respectivamente.	37
Ilustración 24: Modelo 2. a) y c): Topografía del modelo con las discontinuidades mayores y menores orientada en distintas direcciones. b) y d): Discontinuidades menores de a) y c) respectivamente.	38
Ilustración 25: Ubicación de Punta Grafiti, al sur de Punta Cola. Fuente: Glueer y Loew. 2015. 40	
Ilustración 26: Modelo 1. a) Geometría usada en el modelo. b) Geometría después de aplicar gen Edge que hace a los bloques deformables.	43
Ilustración 27: (Izq): Mapa de Estados Unidos. Ubicación de la ciudad de Parkfield, en el estado de California. (Der): Ubicación del epicentro del terremoto de Parkfield, 2004. Fuente: www.eachtown.com y USGS	45

Ilustración 28: (izq): Mapa de Estados Unidos. Ubicación de la localidad de Morgan Hill, en el estado de California. (der): Ubicación del epicentro del sismo en las coordenadas 37°19.02'N, 121°40.89'W (círculo rojo), a 20 km al este de la ciudad de San José, California. Fuente: www.eachtown.com y USGS	47
Ilustración 29: Localización de las estaciones usadas en este estudio respecto al epicentro del terremoto de Morgan Hill. Fuente: Google Earth	49
Ilustración 30 : Ubicación de la falla Calaveras dentro del sistema de fallas San Andrés. CFZ: Falla Calaveras, SAFZ: Falla San Andrés. Fuente: Hoose, 1987.....	50
Ilustración 31: Deslizamiento de Punta Cola. a): Imagen satelital del deslizamiento. Fuente: Google Earth. 2013. b): Modelo de Punta Cola realizado en este trabajo junto a los puntos de control considerados en los modelamientos. El contorno de la remoción es aproximado y se realizó en base de observaciones de imágenes satelitales.	51
Ilustración 32: Contornos de desplazamiento. Caso estático Modelo 1.	52
Ilustración 33: Balance de fuerzas en el tiempo. Modelo 1.....	53
Ilustración 34: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo del Modelo 1. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).	53
Ilustración 35: Contornos de desplazamiento. Caso estático Modelo 2.	55
Ilustración 36: Balance de fuerzas en el tiempo. Modelo 2.....	55
Ilustración 37: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo del Modelo 2. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).	56
Ilustración 38: Contornos de desplazamiento a los 5, 15, 25 y 48 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Caso dinámico con input del terremoto Parkfield. Modelo 1 con escala fija de máximo 25 m. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.	58
Ilustración 39: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 1 dinámico con input de sismo Parkfield.	59
Ilustración 40: Caso dinámico con input del terremoto Parkfield. Modelo 2. Contornos de desplazamiento a los 5, 15, 25 y 48 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.....	62
Ilustración 41: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 2 dinámico con input de sismo Parkfield.	63
Ilustración 42: Caso dinámico con input del terremoto Morgan Hill, estación AND. Modelo 1. Contornos de desplazamiento a los 5, 10, 15 y 53 segundos de compilación en el modelo	

(imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.	66
Ilustración 43: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 1 dinámico con input de sismo Morgan Hill, estación AND.	67
Ilustración 44: Caso dinámico con input del terremoto Morgan Hill, estación AND. Modelo 2. Contornos de desplazamiento a los 5, 10, 15 y 53 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.	70
Ilustración 45: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 2 dinámico con input de sismo Morgan Hill, estación AND.	71
Ilustración 46: Caso dinámico con input del terremoto Morgan Hill, estación CAP. Modelo 1. Contornos de desplazamiento a los 5, 10, 20 y 53 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.	74
Ilustración 47: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 1 dinámico con input de sismo Morgan Hill, estación CAP.	75
Ilustración 48: Caso dinámico con input del terremoto Morgan Hill, estación CAP. Modelo 2. Contornos de desplazamiento a los 5, 10, 20 y 53 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.	78
Ilustración 49: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 2 dinámico con input de sismo Morgan Hill, estación CAP.	79
Ilustración 50: Caso dinámico con input del terremoto Morgan Hill, estación GMR. Modelo 1. Contornos de desplazamiento a los 5, 10, 20 y 53 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.	82
Ilustración 51: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y	

(N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 1 dinámico con input de sismo Morgan Hill, estación GMR.....	83
Ilustración 52: Caso dinámico con input del terremoto Morgan Hill, estación GMR. Modelo 2. Contornos de desplazamiento a los 5, 10, 20 y 53 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.	86
Ilustración 53: Resultados de PGA y amplificación de los puntos de control estudiados con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 2 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación GMR de input.....	87
Ilustración 54: Comparación de los casos estáticos de los modelos 1 y 2, contornos de desplazamiento.	90
Ilustración 55: Gráfico de desplazamiento del punto de control 4 Modelo 1. Se puede observar la estabilidad alcanzada en todos los ejes y la caída del eje z (vertical) debido al efecto de la gravedad. Este fenómeno ocurre en todos los puntos de control de ambos modelos. Series1 corresponde al eje x (E-W), Series2 al eje y (N-S) y Series3 al eje z (vertical).....	91
Ilustración 56: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 1, estación Parkfield luego de 48 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.....	92
Ilustración 57: Puntos de control del modelo realizado por Escudero (2017). La discontinuidad mayor que se encuentra a la izquierda corresponde a la Falla Punta Cola (FPC) y la discontinuidad de la derecha corresponde a la Zona altamente fracturada (HFZ). Fuente: (Modificado) Escudero (2017).	93
Ilustración 58: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 2, estación Parkfield luego de 48 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.....	95
Ilustración 59: a) Vista en planta del estado final del Modelo 2, estación Parkfield luego de 48 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo desprendimiento y deslizamiento de roca y, la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.	96
Ilustración 60: Modelo realizado en el trabajo de Escudero (2017). a) Vista en planta del deslizamiento de Punta Cola. La línea color rojo indica el perfil de estudio. b) Perfil modelado con los contornos de desplazamiento.	97

Ilustración 61: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 1, estación AND luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.....	99
Ilustración 62: a) Vista en planta del estado final del Modelo 1, estación AND luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo desprendimiento y deslizamiento de roca y, la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.	100
Ilustración 63: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 2, estación AND luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.....	101
Ilustración 64: a) Vista en planta del estado final del Modelo 2, estación AND luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo desprendimiento y deslizamiento de roca y, la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.	102
Ilustración 65: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 1, estación CAP luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.....	103
Ilustración 66: a) Vista en planta del estado final del Modelo 1, estación CAP luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo desprendimiento y deslizamiento de roca y, la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.	104
Ilustración 67: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 2, estación CAP luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.....	105

Ilustración 68: a) Vista en planta del estado final del Modelo 2, estación CAP luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo desprendimiento y deslizamiento de roca y, la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.	106
Ilustración 69: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 1, estación GMR luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.....	107
Ilustración 70: a) Vista en planta del estado final del Modelo 1, estación GMR luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo desprendimiento y deslizamiento de roca, y la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.	108
Ilustración 71: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 2, estación GMR luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.....	109
Ilustración 72: a) Vista en planta del estado final del Modelo 2, estación GMR luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo deslizamiento de roca y la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.	110
Ilustración 73: Relaciones entre los registros de las estaciones de Parkfield, AND, CAP y GMR respecto a distintos aspectos. Las estaciones se encuentran ordenadas de mayor a menor.....	111
Ilustración 74: Cuadro comparativo de los contornos de desplazamiento de todos los modelos analizados. Con escala fija de máximo 25 m. Los modelos se encuentran ordenados de mayor desplazamiento (arriba) a menor desplazamiento (abajo).	113
Ilustración 75: Parámetros ingresados a RocLab	125
Ilustración 76: Parámetros Mohr-Coulomb resultantes.....	125

Índice de tablas

Tabla 1: Datos de dip y dip direction para discontinuidades presentes en BFS. Fuente: Redfield et al. 2011.	34
Tabla 2: Datos de dip y dip direction para discontinuidades presentes en LRS. Fuente: Redfield et al. 2011.	34
Tabla 3: Datos de dip y dip direction utilizados en el primer modelo.	34
Tabla 4: Datos de dip y dip direction utilizados en el segundo modelo.....	35
Tabla 5: Parámetros de discontinuidades usados en los modelos 1 y 2	36
Tabla 6: Modelos constitutivos incluidos en el software 3DEC junto a sus aplicaciones. El área oscurecida corresponde al modelo usado en este trabajo, debido a que se acomoda tanto a los materiales usados como a las aplicaciones. Fuente: (modificado) http://www.itascacg.com/software/products/udec/features/material-models	39
Tabla 7: Valores de parámetros geotécnicos para la zona de estudio obtenido de información bibliográfica.....	41
Tabla 8: Parámetros de Hoek-Brown para zonas del fiordo en donde ocurrió deslizamiento (Obtenido de Serey 2011).....	42
Tabla 9: Parámetros Mohr Coulomb para zonas de baja calidad de roca (estructuras mayores) obtenidos con Rocscience.....	42
Tabla 10: Parámetros de las discontinuidades menores usados en el modelamiento. Fuente: Glueer y Loew. 2015.	42
Tabla 11: Valores de PGA originales y amplificadas del terremoto de Parkfield, estación CE36414.....	45
Tabla 12: Parámetros principales del registro del sismo Parkfield, estación CE31416.	46
Tabla 13: Parámetros principales del terremoto Morgan Hill. Fuente: PEER Ground Motion. ...	47
Tabla 14: Parámetros principales de los registros de estaciones del sismo Morgan Hill. Fuente: PEER Ground Motion.	48
Tabla 15: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 1 dinámico con el sismo Parkfield de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).	61
Tabla 16: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 2 dinámico con el sismo Parkfield de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).	65
Tabla 17: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 1 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación AND de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).	69

Tabla 18: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 2 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación AND de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).	73
Tabla 19: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 1 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación CAP de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).	77
Tabla 20: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 2 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación CAP de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).	81
Tabla 21: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 1 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación GMR de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).	85
Tabla 22: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 2 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación GMR de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).	89
Tabla 23: PGA y factor de amplificación medidos en los puntos de control del modelo realizado por Escudero (2017). Fuente: (Modificado) Escudero (2017).	94
Tabla 24: PGA y factor de amplificación medidos en los puntos de control del modelo realizado en este trabajo. Modelo 1, Terremoto de Parkfield.	94
Tabla 25: PGA y factor de amplificación medidos en los puntos de control del modelo realizado por Escudero (2017). Fuente: (Modificado) Escudero (2017).	98
Tabla 26: PGA y factor de amplificación medidos en los puntos de control del modelo realizado en este trabajo. Modelo 2, Terremoto de Parkfield.	98

1 Introducción

Las remociones en masa se definen como el movimiento descendente de una masa de roca, suelo o detritos, a lo largo de una pendiente (Cruden et al. 1991) bajo los efectos de la gravedad (Highland, 2008). Existen diversos factores que pueden condicionar la generación de una remoción en masa y son aquellos quienes forman un escenario potencialmente inestable (Hauser, 1993). Entre estos factores se encuentran la geomorfología, geología, geotecnia y vegetación de la zona (Lara y Sepúlveda, 2008). Por otro lado, existen factores gatillantes de una remoción en masa, éstos son agentes externos que generan abruptos cambios de esfuerzos o resistencia del material de la ladera (Wieczorek, 1996). Ejemplos de estos factores son las lluvias, los sismos, erupciones volcánicas, etc. (Lara y Sepúlveda. 2008).

Entre las remociones en masa desencadenadas por efecto de los sismos, se encuentran las avalanchas. En este trabajo se estudia el deslizamiento de roca, que posteriormente evoluciona a avalancha, generada por el terremoto de Aysén, ocurrido en abril del 2007 en la localidad de Punta Cola, ubicada en el Fiordo Aysén, principal acceso marítimo de las ciudades circundantes: Puerto Chacabuco, Coyhaique y Puerto Aysén.

Las avalanchas de roca son remociones en que las rocas se van fragmentando a medida que van cayendo, formando un flujo de fragmentos que pueden viajar varios kilómetros a velocidades de cientos de kilómetros por hora (Sepúlveda y Serey. 2010).

El terremoto de Aysén, de origen cortical (con hipocentro a menos de 10 km de profundidad), tuvo lugar en las cercanías de Punta Cola producto de un enjambre sísmico que comenzó en enero del 2007, siendo la máxima expresión de este enjambre. Este evento se manifiesta el 21 de abril con una magnitud M_w 6.2. El terremoto de Aysén generó cientos de remociones en masa a lo largo del Fiordo Aysén, debido a su cercanía a la zona epicentral (Serey. 2011). La avalancha de Punta Cola fue la remoción en masa de mayor volumen generada por el evento, con un valor de 22.4 Mm^3 (Oppikofer et al. 2012).

Debido al impacto de sedimentos y rocas al mar, se produjo un tsunami en la zona del fiordo que ocasionó la destrucción de criaderos de salmones, principal actividad de la zona. Otras consecuencias de este evento fueron las muertes de habitantes de la zona (Sepúlveda et al. 2010). Además, el tsunami destruyó las herramientas sísmicas instaladas en la zona, causando la pérdida de los datos sísmicos de este terremoto.

En este trabajo, se realiza el estudio del deslizamiento de Punta Cola, ubicada en el Fiordo Aysén, mediante un modelamiento numérico tridimensional. El software utilizado para el modelamiento de Punta Cola es 3DEC (de la empresa ITASCA), que se basa en el método de elementos distintos (para más detalles, ver Capítulo 3, sección 2). 3DEC está idealmente adaptado para analizar modos de falla relacionados con la presencia de discontinuidades (Itasca, 2013). El estudio consiste en representar la superficie del sector Punta Cola de manera tridimensional, con sus características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas, agregar las discontinuidades presentes (obtenidas de Redfield et al. 2011) y agregar inputs sísmicos (en modos de velocidades) que ayuden a determinar las características pertenecientes al terremoto del 2007 a partir de las respuestas que entregue el modelo. Las características sísmicas que se

consideran en este trabajo son: *Peak Ground Acceleration* (PGA), Intensidad de Arias (Ia), Magnitud de momento (Mw), profundidad del hipocentro y distancia epicentral.

Los terremotos corticales, como el de Aysén, cuyas rupturas se presentan a nivel de superficie, junto a la amplificación de aceleraciones sísmicas debido a la topografía, son las principales razones de la formación de remociones en masa y tsunami dentro del Fiordo Aysén, además de la cercanía epicentral como se menciona anteriormente (Vargas. 2017).

Los eventos que incluyen la remoción en masa en varios sectores del Fiordo Aysén, junto a la generación del tsunami, son ejemplos de un tipo de peligro geológico que no había sido previamente detectado ni estudiado en la zona de fiordos patagónicos, por lo que es necesario el estudio y evaluación de peligros en la región (Sepúlveda y Serey 2010).

La validación del software para este tipo de estudio abre la posibilidad de futuros estudios similares, aplicable tanto a la zona de fiordos patagónicos como a otras zonas y a investigaciones de peligro sísmico.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Modelar en 3D el deslizamiento de roca de Punta Cola afectado por el terremoto de Aysén del año 2007.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Representar en 3D la información geológica, geotécnica y geomorfológica de la ladera pre-deslizamiento en estudio.
- Validar el modelo tridimensional analizando el escenario estático en Punta Cola.
- Analizar en 3D la deformación de la ladera afectada por el deslizamiento ante escenarios sísmicos y estáticos.
- Encontrar características sísmicas responsables de producir el deslizamiento en estudio, las cuales deben ser concordantes con la sismicidad local.

1.2 Metodología

Este estudio consiste estrictamente en trabajo de gabinete.

La primera parte de este trabajo consiste en la construcción de la topografía de la zona. Para ello, se utilizó un mapa satelital con datos de levantamiento (Oppikofer et al. 2012), que fue trabajado en ArcGis para obtener así una grilla de coordenadas x , y y z , que indican la ubicación y la altura de los centroides de cada pixel del DEM (*Digital Elevation Model*) trabajado. Así, estos datos se pueden ingresar a 3DEC mediante el lenguaje de programación *FISH*.

La segunda parte consiste en la recopilación bibliográfica de publicaciones anteriores, y libros (Glueer y Loew. 2015; Serey. 2011; G. de Vallejo. 2002; Escudero. 2017) que contengan las características geotécnicas y geológicas del macizo y las discontinuidades presentes en Punta Cola.

Luego, mediante el uso de 3DEC, se representa la información geológica, geotécnica y geomorfológica de la ladera en estudio, obtenida a partir de los pasos anteriores.

Posteriormente se realiza un análisis de validación que consiste en la ejecución del modelo en escenario estático. Con esto, se busca comprobar que el modelo entregue los resultados esperados, coherentes con la situación real.

Al finalizar esta etapa, se realiza el proceso de elección los sismos que cumplan con características acorde a la zona de estudio, en este caso la elección fue en base a la magnitud (M_w), el mecanismo focal y la profundidad del hipocentro.

En el siguiente paso se ejecutan los modelos dinámicos (con las velocidades de los sismos integradas al modelo) donde fueron llevados a cabo dos escenarios principales, Modelo 1 y Modelo 2 (véase Capítulo 3, sección 3), que permiten analizar la deformación de la ladera afectada.

Finalmente se analizan los modelos para cada sismo y escenario integrado. A partir de los resultados obtenidos, se escogen los parámetros sísmicos relevantes, como la magnitud (M_w), PGA (*Peak Ground Acceleration*), Intensidad de Arias, profundidad del hipocentro y mecanismo focal, que mejor representaron al fenómeno real y se analizan los deslizamientos ocurridos en la ladera de estudio.

2 Área de estudio

2.1 Ubicación y vía de acceso

El Fiordo Aysén pertenece a la XI Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo y se encuentra ubicado en la zona Archipelágica de la Patagonia, al oeste de la ciudad de Puerto Aysén, en las coordenadas 45.25° S y 73.0°W (ver ilustración 1). Es el principal acceso marítimo a Puerto Aysén y Puerto Chacabuco. Además, se encuentra aproximadamente a 80 km al oeste de Coyhaique, capital regional (Naranjo et al. 2009). En las cercanías del fiordo, por el lado norte, se ubican los volcanes Macá y Cay (ver ilustración 2).

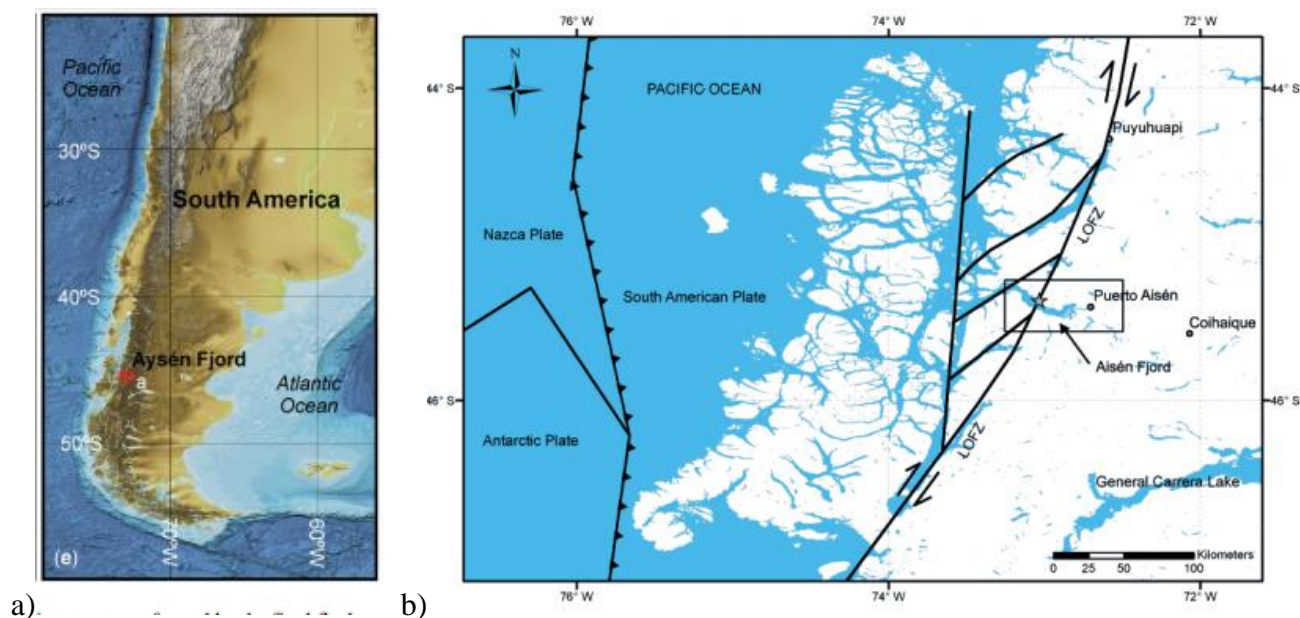


Ilustración 1: a) Ubicación a nivel regional de la zona de estudio. Fuente: Lastras et al. 2016. b) Ubicación del fiordo Aysén y su cercanía a la ciudad de Puerto Aysén y Coyhaique. Fuente: Sepúlveda et al. 2010.

En la ladera norte de este fiordo está ubicada Punta Cola (ver ilustración 2), uno de los varios valles glaciales presentes en la zona, cuyas laderas son altamente empinadas, con una altura de 220 a 750 metros de altura. Su punto más alto se ubica a una distancia de 2 km aproximadamente de la línea de costa (Lastras et al. 2013).

Para acceder a las ciudades de Puerto Aysén y Puerto Chacabuco se debe tomar la ruta CH-240, que se inicia en el Paso Fronterizo Coyhaique y finaliza en Puerto Chacabuco. Se puede acceder a la ruta CH-240 a través de la Carretera Austral (CH-7), que parte en la ciudad de Puerto Montt y finaliza en Villa O'Higgins (Serey. 2011). Para llegar a Punta Cola o recorrer el Fiordo Aysén se debe tomar una embarcación desde Puerto Chacabuco, como transbordadores o barcas disponibles en el lugar.



Ilustración 2: Ubicación del Fiordo Aysén y Punta Cola. También se muestra la ciudad de Puerto Aysén y los volcanes Macá y Cay. Fuente: (Modificada) Google Earth.

2.2 Marco Geológico

La zona de estudio está localizada en el Batolito Nor-patagónico de composición diorítica a granítica (Jurásico Medio-Oligoceno). Este intruye al Basamento Metamórfico (pre-Mesozoico) y a las unidades metavolcánicas del Mesozoico, separando la geología de la zona en dos franjas paralelas, elongadas de norte a sur (ver ilustración 3). Cada franja siguió una historia geológica diferente a partir del Jurásico (SERNAGEOMIN. 1984).

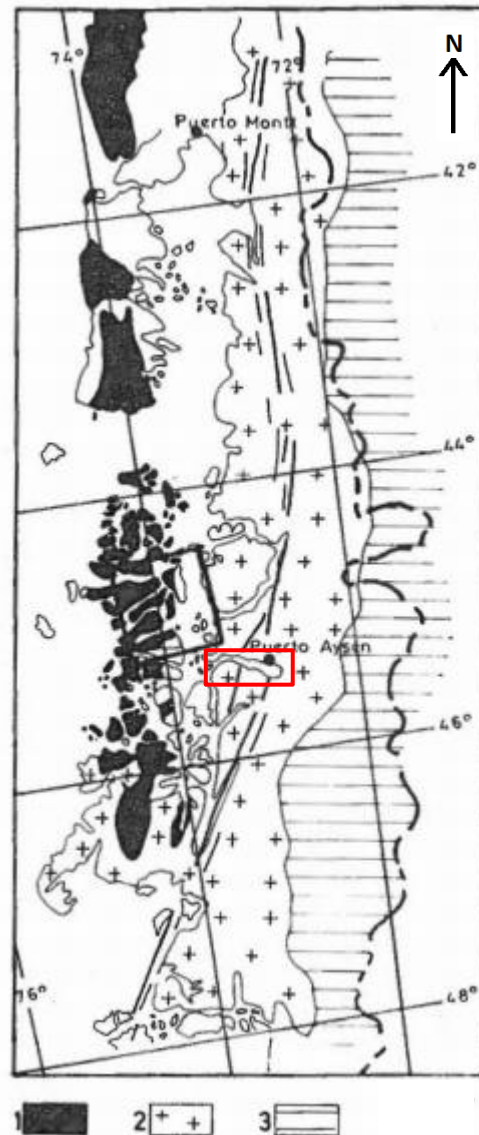


Ilustración 3: Distribución del Basamento metamórfico (1), Batolito Norpatagónico (2) y Unidades metavolcánicas (3) en el sector de Chiloé y Aysén insular. El recuadro rojo indica la zona de estudio, el Fiordo Aysén. Fuente: Hervé et al. 2010.

El interés particular que presenta la zona, además de la presencia activa de subducción que recorre todo el país, es la presencia de la Unión Triple entre las placas de Nazca, Sudamericana y Antártica, situada aproximadamente en los $46^{\circ}30'S$ (ver ilustración 5), junto a la Península de Taitao, al suroeste del sector de estudio. En el aspecto tectónico, la estructura de mayor influencia es la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (LOFZ), un sistema de rumbo dextral (Delgado, 2004) (ver ilustración 1 b).

2.2.1 Geomorfología

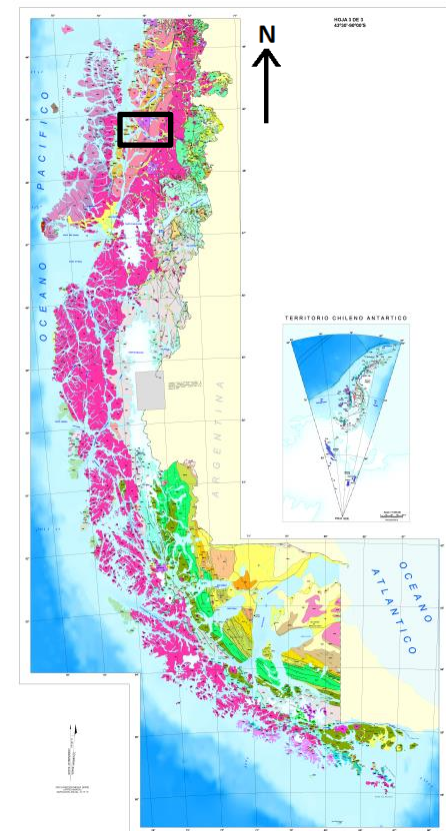
A escala regional, se pueden distinguir cuatro unidades morfoestructurales principales: La zona extra-Andina, la precordillera, la cordillera principal y la zona de archipiélagos (nombrados de Este a Oeste) (U. de Chile. 2009).

El Fiordo Aysén está localizado en la Cordillera Principal de los Andes, cuya altitud en sus cercanías ronda los 2000 msnm. La presencia del punto triple, en la Península de Taitao y sistemas de dúplex de fallas de rumbo (LOFZ), genera movimientos diferenciales de las placas que modelan la geomorfología de la zona (U. de Chile, 2009). Por lo tanto, el control de primer orden de la geomorfología de la región está dada por un origen tectónico, en el cual se le superpone un modelamiento de origen glaciar, junto a procesos fluviales y remociones en masa. Esta combinación da como resultado abruptos relieves en valles con forma de “U”, que están orientados según la tendencia tectónica del LOFZ, circos glaciales y depósitos morrénicos (U. de Chile, 2009), además de la presencia de complejas redes de canales y fiordos, que caracterizan a la zona costera de la región (Delgado, 2004).

Las laderas del fiordo y de los valles mantean con ángulos superiores a los 30° y están cubiertos por material piroclástico de volcanes cercanos. Estos mantos de suelo piroclástico en las laderas empinadas, producen frecuentes deslizamientos superficiales (U. de Chile, 2009). Los elementos geomorfológicos más recientes del sector incluyen remociones en masa, abanicos aluviales, depósitos volcánicos, depósitos de morrena y erosión fluvial (Sepúlveda et al. 2010), condicionados por un control tectónico y volcánico asociado al LOFZ (U. de Chile, 2009).

2.2.2 Litología y Estratigrafía

La información de las unidades estratigráficas es obtenida de la Carta Geológica de la Península Taitao y Puerto Aysén (SERNAGEOMIN. 1984) y el Mapa Geológico de Chile (SERNAGEOMIN. 2003). Las unidades estratigráficas que abarcan la zona de estudio se aprecian a continuación (ver ilustración 4).



Leyenda

Q1	Depósitos no diferenciados (Pleistoceno-Holoceno)
Q3i	Aparatos volcánicos (Cuaternario)
Mg	Batolito Norpatagónico franja central (Mioceno)
OM2m	Formación Traiguén (Oligoceno-Mioceno)
Kig	Batolito Norpatagónico fraja oriental (Cretácico inf.)
PzTr4	Complejo Metamórfico (Paleozoico-Triásico)

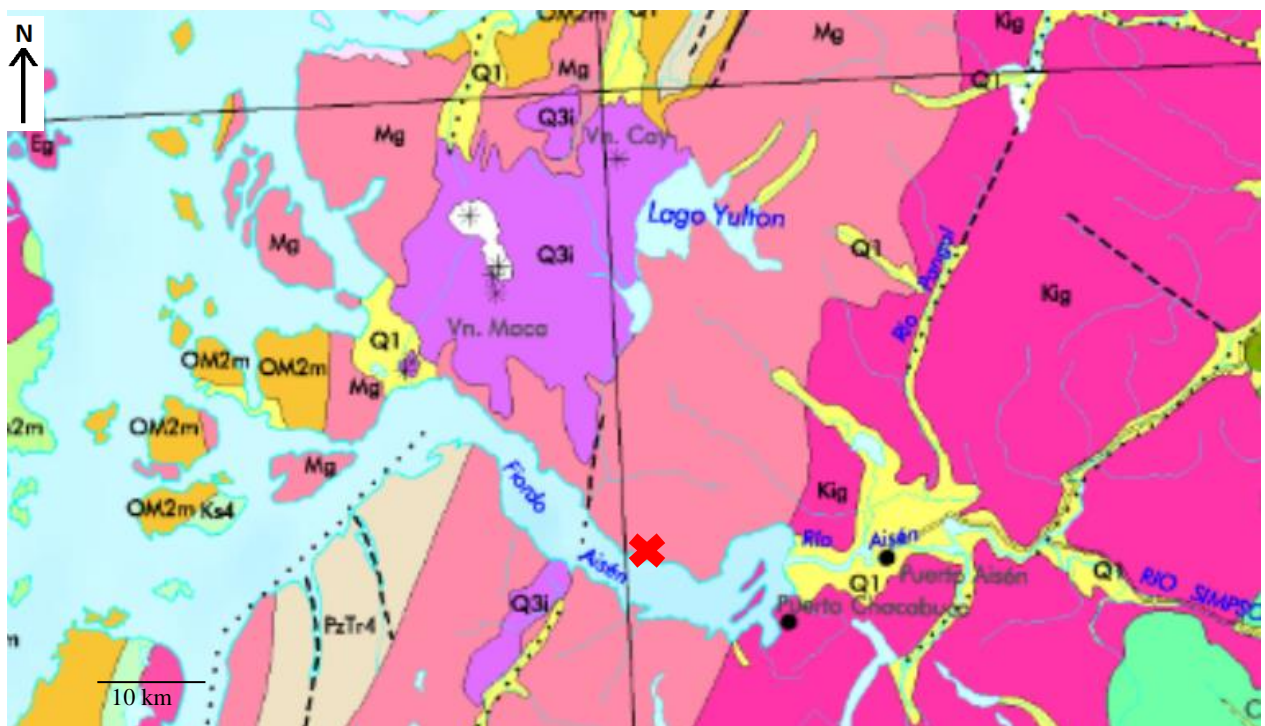


Ilustración 4: (Arriba) Mapa geológico de Chile, zona sur (entre 44°S y 56°S) en el recuadro se indica la zona de estudio. (Abajo) Zoom de la zona de estudio, Fiordo Aysén. La cruz muestra la ubicación de Punta Cola. Fuente: SERNAGEOMIN 2003

Las unidades mostradas en la ilustración 4 se detallan a continuación.

2.2.2.1 Estratigrafía de la Cordillera Principal

2.2.2.1.1 Depósitos Indiferenciados (Q1), Pleistoceno-Holoceno

Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvio-glaciales, deltáicos, litorales o indiferenciados.

2.2.2.1.2 Aparatos volcánicos (Q3i), Cuaternario

Los aparatos volcánicos corresponden al de los cerros Macá, Cay y Hudson (al sur de la zona de estudio). Corresponden a lavas y depósitos piroclásticos de gran afinidad calcoalcalina.

2.2.2.2 Estratigrafía de la zona de los archipiélagos

2.2.2.2.1 Formación Traiguén (OM2m), Oligoceno-Mioceno

Cherts, areniscas y lutitas marinas con intercalaciones de brechas volcánicas y coladas andesíticas.

Consiste en una secuencia volcano-sedimentaria expuesta en el sector oriental de la Zona de Archipiélagos. Sus sectores más occidentales están en contacto por falla con rocas del Basamento Metamórfico, al oriente, sur y suroccidente. Se encuentra intruída por el Batolito Patagónico.

2.2.2.3 Rocas Plutónicas

2.2.2.3.1 Batolito Norpatagónico, franja central (Mg), Mioceno

Granodioritas, dioritas y tonalitas.

2.2.2.3.2 Batolito Norpatagónico, franja oriental (Kig), Cretácico Inferior

Granitos, granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita.

Las rocas del batolito ocupan gran parte de la Cordillera Principal de esta zona. Forma parte de una extensa franja de rocas graníticas, que ocupa el eje de la Cordillera Patagónica, desde el sector de Puerto Montt hasta el Cabo de Hornos.

El batolito intruye al Basamento Metamórfico en el flanco oriental junto la Formación Ibáñez, e intruye al Basamento Metamórfico y a la Formación Traiguén en la zona occidental.

2.2.2.4 Rocas Metamórficas

2.2.2.4.1 Complejo Metamórfico (PzTr4), Paleozoico-Triásico

Metapelitas, metacherts, metabasitas y, en menor proporción, neises y rocas ultramáficas con protolitos de edades desde el Devónico al Triásico y metamorfismo del Pérmico al Jurásico.

2.3 Marco Tectónico

La información del Marco Tectónico es obtenida de Carta Geológica de la Península Taitao y Puerto Aysén (SERNAGEOMIN. 1984).

2.3.1 Evolución Paleogeográfica y tectónica

2.3.1.1 Evolución Pre-Mesozoica

Las rocas del Basamento Pre-Mesozoico, en la Zona de Archipiélagos, debido a su estilo de deformación progresivo, pueden ser consideradas como parte de un prisma de acreción, originado por un proceso de subducción. La historia deformacional del Basamento permanece sin resolverse. Diversos autores indican, considerando rocas equivalentes, que la deformación ocurrió durante la Orogénesis Gondwánica, aunque faltan datos cronológicos para establecer correlaciones en la deformación (SERNAGEOMIN. 1984).

2.3.1.2 Evolución Mesozoica

Existe la posibilidad de que el Batolito Patagónico haya formado raíces de una cadena volcánica debido a las relaciones espaciales y temporales en ambos flancos con rocas volcánicas, volcanoclásticas y calcoalcalinas (SERNAGEOMIN. 1984).

La existencia de este complejo volcánico-plutónico calcoalcalino, estaría condicionada por una zona de subducción inclinada al este, cuya actividad habría comenzado en el Jurásico Medio-Superior (SERNAGEOMIN. 1984).

Se propuso una reconstrucción paleogeográfica para el Neocomiano que considera de oeste a este: 1) una sedimentación en mar abierto, que recibió los productos volcánicos del arco en su margen este, 2) un arco volcánico activo y 3) una cuenca marina con depositación de lutitas y areniscas. Una variante de este modelo considera a un segundo arco volcánico al oeste perteneciente a la Formación Traiguén (SERNAGEOMIN. 1984).

El volcanismo se habría intensificado posterior al Neocomiano. Este volcanismo cubrió extensas zonas de la Patagonia y pudo deberse al aumento de la velocidad de subducción (SERNAGEOMIN. 1984).

2.3.1.3 Evolución Cenozoica

Dataciones radiométricas revelaron tres pulsos principales de extensión, relacionados con dos unidades estratificadas de basaltos, en el sector oriental de la Precordillera. La actividad volcánica relacionada con el último pulso se mantiene hasta el presente (SERNAGEOMIN. 1984).

En el sector occidental de la Cordillera Principal, el volcanismo cenozoico está representado por brechas volcánicas y también por algunos cuellos volcánicos del mismo lugar. El volcanismo se relacionaría con la Dorsal de Chile, en el punto donde enfrenta al continente sudamericano (SERNAGEOMIN. 1984).

La actividad volcánica de la Cordillera Principal reciente es de carácter calcoalcalino y comenzó a desarrollarse desde el Cuaternario, ligada a la subducción. Además, la zona de estudio fue cubierta casi en totalidad por glaciares, que depositaron grandes morrenas y que modelaron los principales valles y cumbres de la región (SERNAGEOMIN. 1984).

2.3.2 Configuración Geotectónica

Tal como se menciona anteriormente, la principal estructura presente en el área de estudio y que atraviesa al Fiordo Aysén, es la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (LOFZ), que corresponde a un sistema de fallas de rumbo dextral de intra-arco con una orientación NNE casi vertical, de 1000 km de longitud, ubicado entre 39°S y 48°S, esta estructura se relaciona con la subducción oblicua de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana y acomoda el componente paralelo de la convergencia (Mora et al. 2010)

La ubicación de fajas plutónicas y volcanes recientes (cuaternarios), que se encuentran en el sector norte de la falla, están alineadas con respecto a la estructura principal NNE, mientras que los volcanes que se encuentran en la zona de las fallas en *échelon*, tienen un lineamiento más hacia el NE (Cembrano et al. 1996), El lineamiento de los volcanes respecto al sistema de fallas, indica que la estructura ejerce un control en el ascenso y emplazamiento de magma (ver ilustración 5) (Sepúlveda et al. 2010; Oppikofer et al. 2012).

La geometría regional general del LOFZ consiste en dos lineamientos principales dextrales-transpresionales con rumbo NNE unidas por una serie de fallas en *échelon* con orientación NE, también dextrales entre las coordenadas 43° y 46° S, formando una estructura de dúplex (ver ilustración 5) (Legrand et al. 2011).

El LOFZ atraviesa el Batolito Norpatagónico, de edad jurásica superior, cretácica y miocena, y La Zona Volcánica de los Andes Australes (Arancibia et al. 1999). La zona sur del LOFZ se encuentra cercano al Punto triple de la Península de Taitao, donde la Placa de Nazca subduce a la Placa Sudamericana a una tasa de 66 mm/año y la Placa Antártica a una tasa de 22 mm/año (Mora et al. 2010). Segmentos separados por zonas de fractura han subducido durante estos últimos 15 m.a, generando así la migración del Punto Tiple desde los 58°S hasta su posición actual en los 46°S. Las diferencias de la velocidad de subducción provocan, además, la partición del esfuerzo entre los 38°S y los 45°S (Mora et al. 2010) (ver ilustración 6).

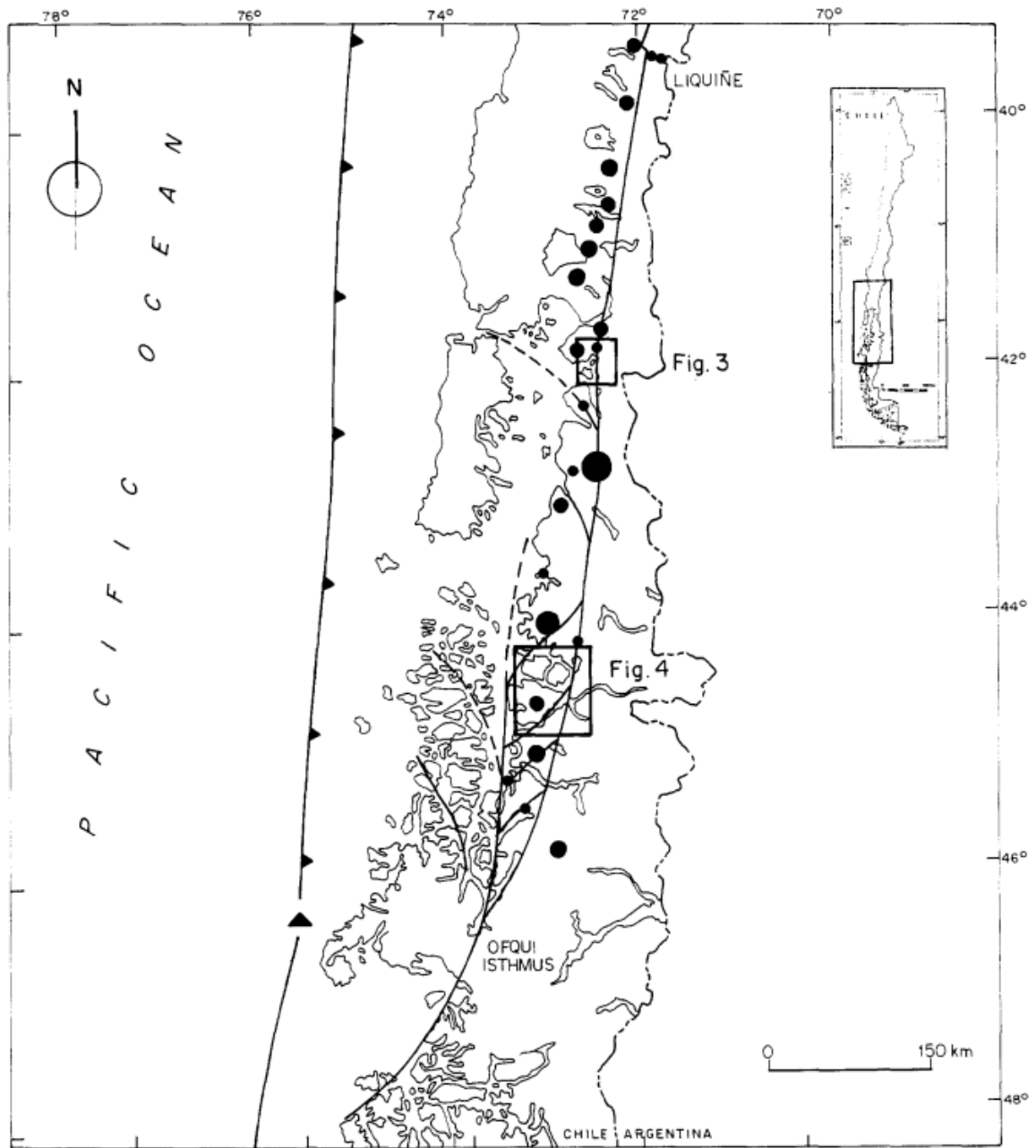


Ilustración 5: Geometría a escala regional de la Zona de Falla Lique-Ofqui en donde se observan los lineamientos principales N-S y las fallas NE en *échelon*. Los círculos negros representan a los volcanes cuaternarios que se encuentran alienados con respecto a la falla. Los triángulos muestran la unión de la placa de Nazca y Sudamericana y el triángulo mayor, al punto triple que une estas dos placas con la placa Antártica. Fuente: Cembrano et al. 1996.

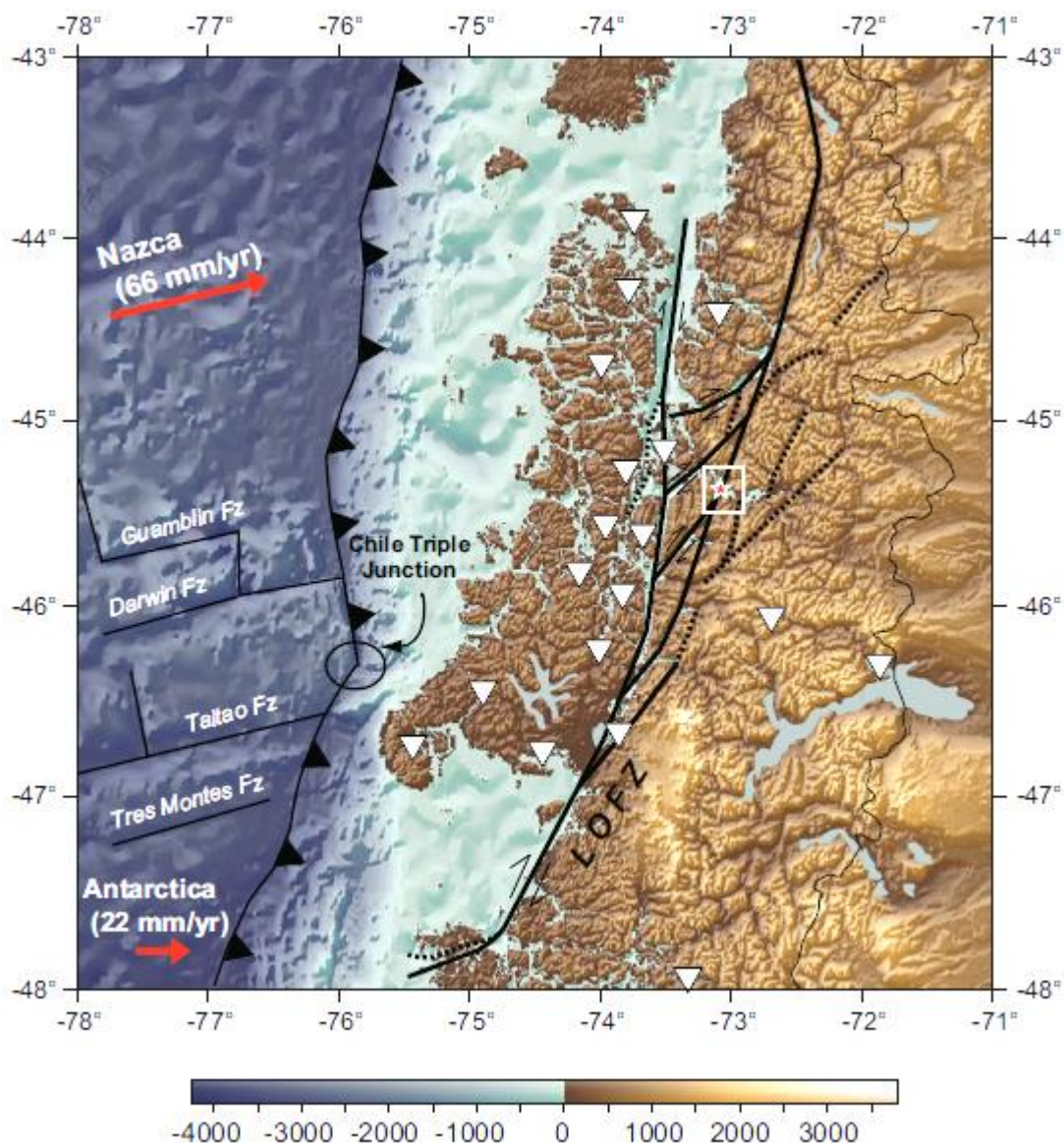


Ilustración 6: Zonas de fracturas y segmentos de la dorsal (líneas delgadas negras) y vectores de movimiento de las placas Antártica y Nazca (flechas rojas). Los triángulos invertidos muestran las estaciones activas de CRSP. La estrella representa la ubicación del epicentro del enjambre sísmico del 2007. Fuente: Mora et al. 2010.

El movimiento dextral de este sistema contrasta con lo obtenido en estudios de zonas antiguas y extensas de milonitas, en donde el movimiento registrado era sinistral. Con esto se tiene que esta estructura podría ser una zona activa de cizalle que acomoda la deformación a escala continental de la placa de Nazca y Sudamericana (Cembrano et al. 1996).

Sin embargo, la sismicidad a lo largo del LOFZ ha sido muy poco estudiada, debido principalmente a la falta de registros constantes en las cercanías del fiordo (Mora et al. 2010).

El peligro geológico de la zona de estudio, relacionado a las remociones en masa ocurridas en el Fiordo Aysén, está asociado directamente con la extensión del LOFZ. Este estudio se enfocará en el gran deslizamiento de roca ubicado en las cercanías de Punta Cola, el cual tuvo

lugar en una zona de deformación asociada a la rama principal del LOFZ (ver ilustración 7) (Redfield et al. 2011)

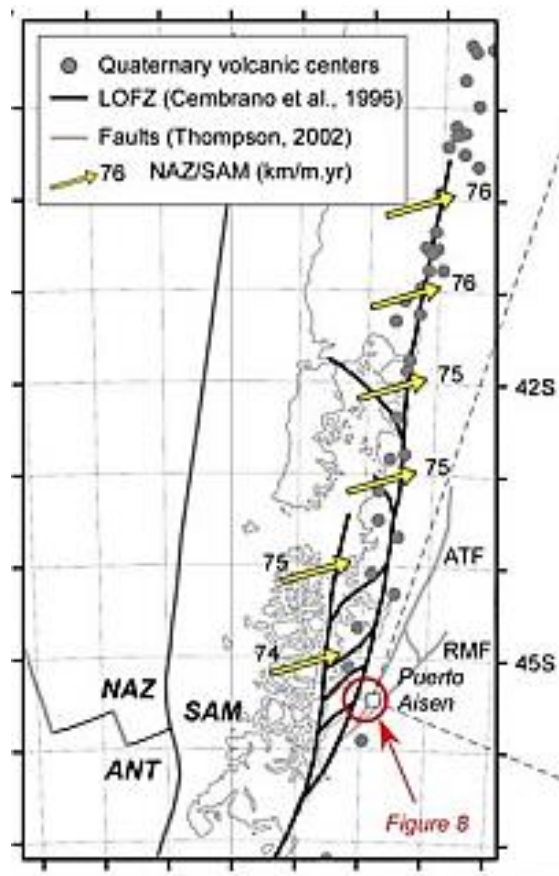


Ilustración 7: Zona de estudio (círculo rojo) y su relación espacial con la rama principal del LOFZ. Fuente: Redfield et al. 2011

2.3.3 Actividad sísmica

Los fiordos del sector Patagónico fueron recién colonizados en los comienzos del siglo XX, por lo que la historia sísmica se limita a los eventos ocurridos el 21 de noviembre de 1927 y 3 de marzo del 2002, ubicado al oeste de Puerto Aysén (M_w 5.3; profundidad 33 km) y en la Laguna San Rafael (M_w 5.2; profundidad 33 km) respectivamente. Monitoreos muestran un acercamiento a la superficie de los focos sísmicos a lo largo del LOFZ, lo que aumentaría los peligros sísmicos de la región considerablemente (Naranjo et al. 2009).

Los hechos ocurridos en el terremoto de 1927 fueron obtenidos a partir de relatos de pobladores que vivieron el evento personalmente. Los testimonios obtenidos de este estudio indican que todo el sector norte de los fiordos patagónicos, desde Chiloé hasta Aysén, fueron fuertemente afectados por al menos dos meses, debido a la crisis sísmica. Un testimonio en particular, indica la existencia de un terremoto ocurrido en noviembre de 1927, el cual generó importantes deslizamientos de roca y tsunamis en los fiordos. Greve (1964), localiza el epicentro

de este terremoto alrededor del Canal Moraleda (44.5° S y 73° W) y estimó una magnitud de Mw 7.1 del evento. (Naranjo et al. 2009).

El registro de actividad sísmica a lo largo del LOFZ ha comenzado formalmente desde finales de la década de 1980, cuyos reportes se relacionan con la actividad volcánica del extremo norte de la zona de falla, principalmente en la región de Palena (42° - 43° S), con magnitudes sísmicas mayores a Mw 3.8. En la misma área, según el Servicio Sismológico chileno, cerca del fiordo Comau, en la ciudad de Hornopirén (42.3° S, 72.5° W) hubo un enjambre sísmico con magnitudes máximas mayores a Mw 5.3 comenzado en mayo del 2008 cuyas intensidades y frecuencias fueron disminuyendo con el tiempo. (Sepúlveda et al. 2010)

El terremoto del 21 de abril de 2007 es uno de los primeros eventos de gran magnitud monitoreados que está claramente relacionado con el LOFZ, junto a los terremotos de 1927 y 2002 nombrados anteriormente.

2.3.4 Terremoto de Aysén del 2007

El 23 de enero del 2007, un sismo de magnitud Mw 5.3, de mecanismo de rumbo, marca el inicio del enjambre sísmico ocurrido en el Fiordo Aysén, que afectó la zona hasta enero del año siguiente, cuya máxima actividad se presenta entre los meses de enero y abril del 2007 (Mora et al. 2010). El mecanismo focal de los eventos del enjambre es de rumbo (strike slip) dextral (ver ilustración 8) en dirección de rumbo Norte-Sur (Mora et al. 2010).

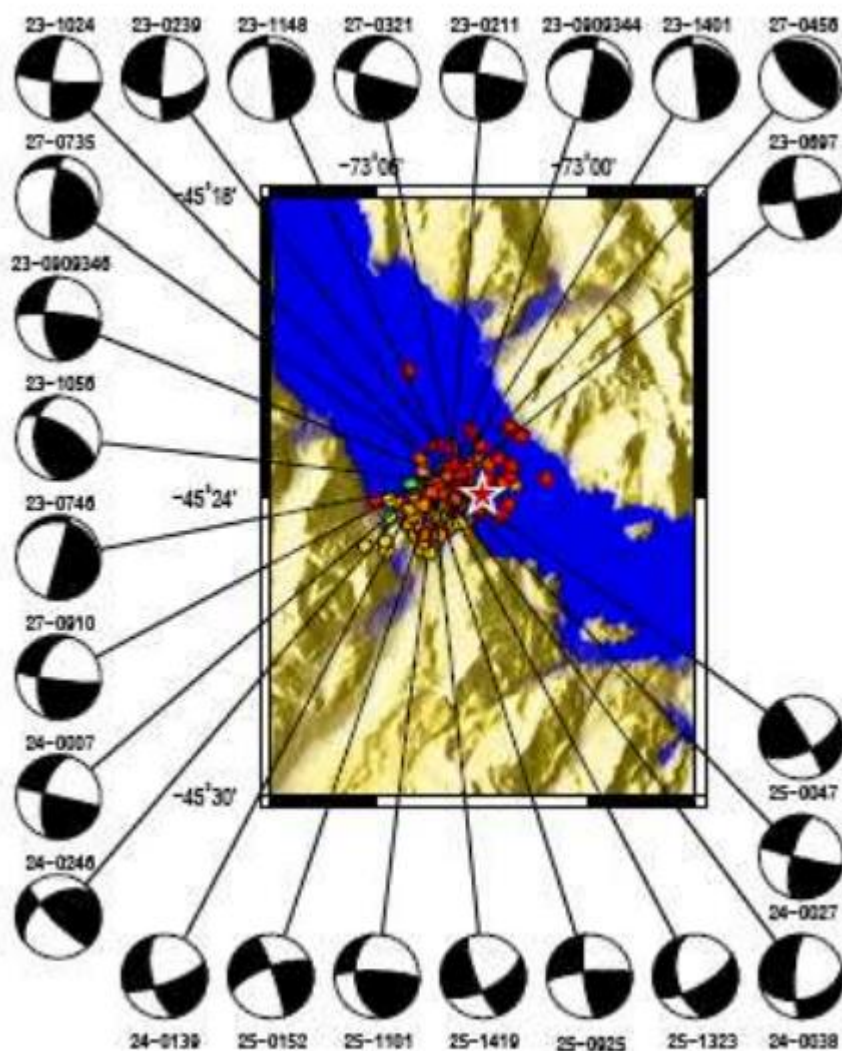


Ilustración 8: Mecanismos focales de los sismos del enjambre de Aysén 2007. Fuente: Mora et al. 2010

El clímax de este enjambre se manifestó el 21 de abril con el terremoto de Aysén de magnitud Mw 6.2. La profundidad de la sismicidad durante este enjambre abarca entre los 8 a 9 km (Vargas et al. 2009) El enjambre manifestó más de 7200 sismos entre enero y junio del 2007. Después de mayo del mismo año, la actividad disminuyó significativamente, registrándose sólo algunos temblores cada mes (Legrand et al. 2011).

Cinco movimientos mayores a Mw 5 antecedieron al terremoto principal (Legrand et al. 2011); (Sepúlveda et al. 2010) (ver ilustración 9) que produjeron algunos daños menores a las instalaciones de empresas salmoneras cercanas al epicentro (Naranjo et al. 2009). El mecanismo focal de rumbo N-S, que coincide con la naturaleza de una de las ramas del LOFZ, lo siguieron los otros sismos de gran intensidad, a excepción de un sismo ocurrido el 2 de abril del 2007, cuyo mecanismo focal fue de un movimiento normal (Legrand et al. 2011). Con esta evidencia, se tiene que el enjambre sísmico y el terremoto guardan relación directa con el sistema de fallas Liquiñe-Ofqui.

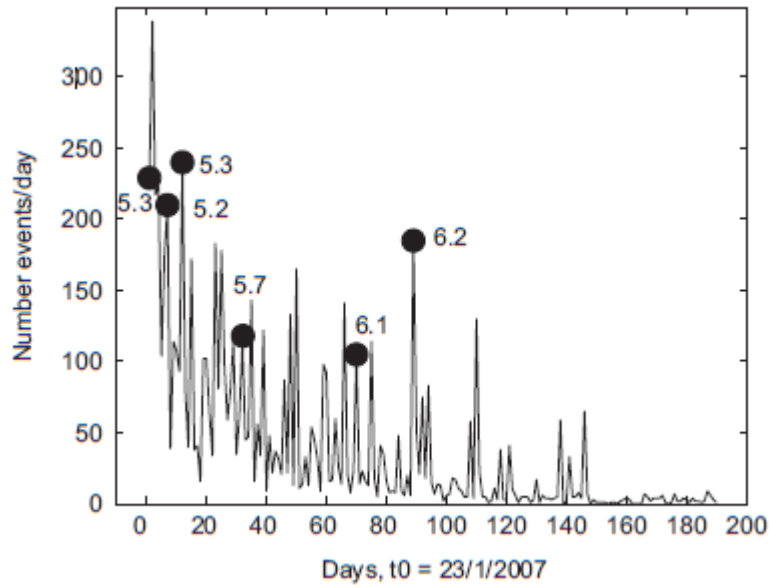


Ilustración 9: Enjambre sísmico registrado desde el 23 de enero. Como se observa, cinco eventos con $M_w > 5$ antecedieron al terremoto principal ($M_w = 6.2$). Registro obtenido del Coyhaique GEOSCOPE station. Fuente: Legrand et al. 2011

Las intensidades de los movimientos previos al evento principal fueron entre IV y V en escala de Mercalli en las ciudades de Aysén y Chacabuco (Sepúlveda et al. 2010).

Resultados de estudios realizados a este enjambre sísmico, indican un origen tanto tectónico como volcánico (ya que hay una serie de volcanes cuaternarios que se ubican alineados al LOFZ), el cual no manifestó erupciones en superficie (Legrand et al. 2011)

El evento principal, ocurrió a las 13:50 hrs. el día 21 de abril, con una intensidad Mercalli de VII (ciudades de Chacabuco y Aysén, ubicados a 20 km y 25 km del epicentro respectivamente) y un M_w de 6.2 (Sepúlveda et al. 2010). El epicentro de este terremoto se situó al oeste de Punta Cola, cerca de la desembocadura del Río Cuervo (ver ilustración 10). No se tienen más registros de los movimientos posteriores, debido a que cuatro estaciones sísmicas fueron destruidas a causa del tsunami generado por el mismo evento. (Sepúlveda et al. 2010; Legrand et al. 2011; Oppikofer et al. 2012). Las consecuencias de este terremoto fueron fatales; consistieron en la muerte de tres personas, siete desaparecidos y grandes daños a la industria de salmones, actividad principal de la región (Naranjo et al. 2009).

Este evento generó muchas remociones en masa debido a la morfología del fiordo. Las remociones principales del evento corresponden a los deslizamientos de roca ocurridos al norte de Isla Mentirosa, al este del sector Aguas Calientes y Quebrada Sin Nombre en las cercanías de Punta Cola, que evolucionó finalmente a avalancha de roca. Este último es el deslizamiento de mayor tamaño (Naranjo et al. 2009), con un volumen calculado de 22.4 Mm^3 (Oppikofer et al. 2012) y será el objeto principal de este estudio. Los tsunamis fueron generados por las

remociones en masa mencionadas, debido a la gran y súbita introducción de rocas y detritos en las aguas del fiordo. Las olas del maremoto alcanzaron velocidades entre 150 y 200 km/h y alturas entre 5 y 10 metros (Naranjo et al. 2009)

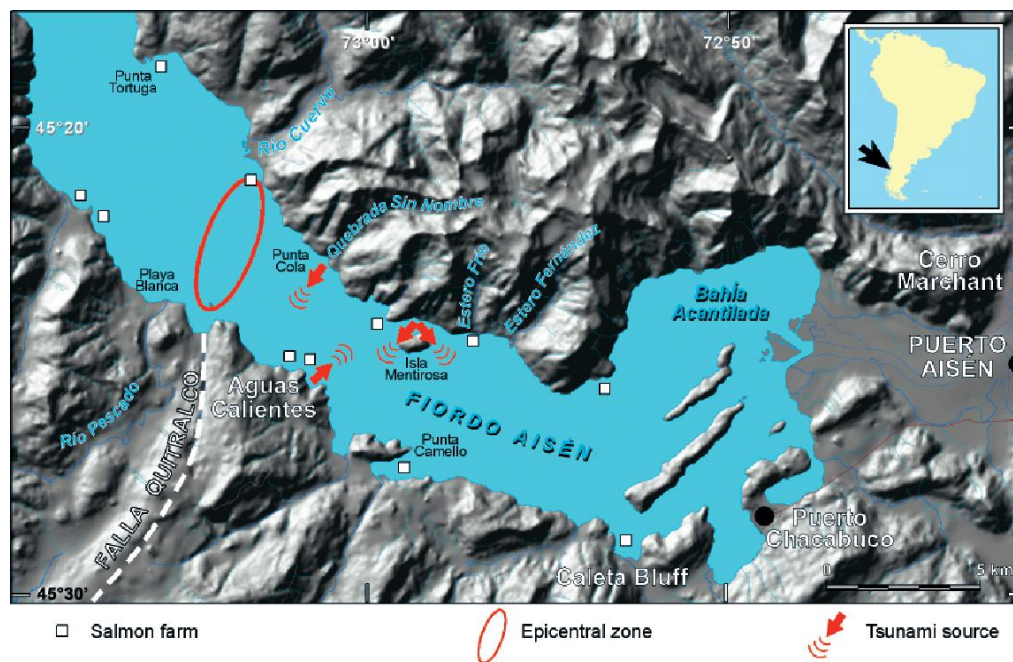


Ilustración 10: Zona epicentral del terremoto de Aysén del 2007. Además, se indican las fuentes del Tsunami producido en el mismo evento, que afectaron a locatarios y a los criaderos de salmones, actividad principal de la zona. Fuente: Naranjo et al. 2009

2.4 Remociones en masa

El terremoto de Aysén del 2007 generó un total de 538 remociones en masa dentro de un área de 1450 km² aproximadamente (Serey 2011).

Dentro de estas remociones, dos grandes deslizamientos de roca evolucionaron a avalanchas, ocurridos en los alrededores de Isla Mentirosa y Punta Cola, las remociones poseían volúmenes de 8 y 22.4 Mm³ (Oppikofer et al. 2012) en cada lugar respectivo. Las avalanchas (junto a la remoción ocurrida en Aguas Calientes) generaron posteriores tsunamis (ver ilustración 10), que impactaron la línea de costa, destruyendo hogares, criaderos de salmones y vidas humanas. (Sepúlveda et al. 2010)

Las remociones en masa ocurridas en la zona del fiordo Aysén, debido al terremoto del 21 de abril de 2007 se clasifican en: deslizamientos de suelo (135), deslizamientos de suelo y roca (282), deslizamientos de roca y avalancha (34), caída de roca (80) y flujo de detritos (7) (ver ilustración 11), y se describen a continuación (Serey 2011):

Deslizamientos de suelo superficiales

Son remociones traslacionales superficiales ocurridos dentro de cubiertas de suelo volcánico o depósitos glaciales, pueden ocurrir en los flancos de fiordos o al interior de valles. Pueden llegar a un espesor máximo de 2 metros (Sepúlveda et al. 2010).

Deslizamientos de suelo y roca superficiales

Es la remoción más común a causa de terremotos, su espesor tiene un valor máximo de 3 metros de altura y cubren grandes áreas (cientos de miles de metros cuadrados). Estas remociones involucran todo el suelo y comúnmente involucran parte del *bedrock* que se encuentra altamente meteorizado. Las superficies de cizalle expuestas son generalmente de roca fresca, y en muchos casos, muestran un plano de cizalle que indica el control estructural generado por la descarga de glaciares (Sepúlveda et al. 2010).

Deslizamientos de roca y avalanchas

Son la remoción con mayor magnitud y están restringidos por las altas pendientes de las laderas del fiordo. Se desencadenan en grandes pendientes con un masivo movimiento traslacional. En muchas ocasiones, la remoción de deslizamiento evoluciona a avalancha durante su trayecto. Su espesor puede variar entre 5 a 20 metros, aunque en cercanías del escarpe principal pueden alcanzar decenas de metros. Los deslizamientos más significativos de este tipo fueron los ocurridos en Isla Mentirosa y en una quebrada cerca de Punta Cola, ambas en la costa norte del fiordo. La avalancha de Punta Cola se detallará más adelante (Sepúlveda et al. 2010).

Caída de roca

Ocurridas en sectores de gran pendiente como quebradas empinadas, en algunos casos en cuñas de roca, o más comúnmente, por el despegue de bloques de roca de acantilados. Algunas de estas caídas de roca se llevaron a cabo en el sector norte de la línea de costa del fiordo, mientras otras se han observado en los ríos de los valles (Sepúlveda et al. 2010).

Flujos de detritos

La combinación de detritos con el agua que corre en los ríos y la fluidización del material debido al movimiento puede desencadenar la formación de flujos. Estos deslizamientos se reportan inmediatamente luego del evento mayor, son cosísmicos (Sepúlveda et al. 2010).

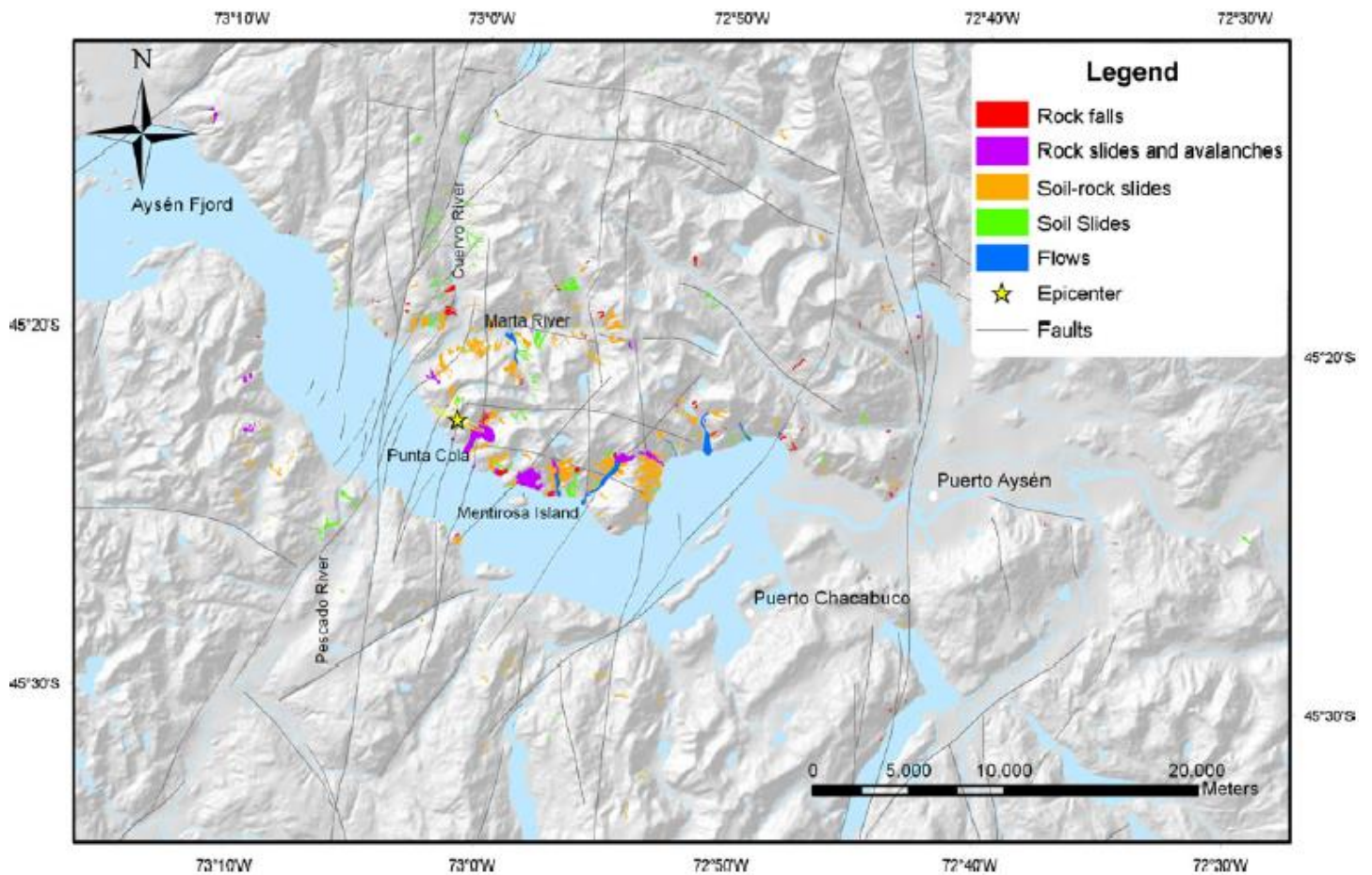


Ilustración 11: Remociones en masa ocurridas en el fiordo Aysén. Los colores clasifican a la remoción según el inventario mostrado anteriormente. Fuente: Sepúlveda et al. 2010

2.4.1 Deslizamiento de Punta Cola

Esta remoción en masa, que tuvo lugar en las cercanías de Punta Cola, fue la más significativa y de mayor tamaño desencadenada por el terremoto del 2007 (Sepúlveda and Serey. 2010), con un volumen total de 22.4 Mm^3 (Oppikofer et al. 2012) (ver ilustración 12). El escarpe principal, en donde ocurrió el primer fallamiento, que da origen al deslizamiento de roca, miente al NW, y se encuentra a una distancia aproximada de 1.5 km de la línea de costa (ver ilustración 12 b). Posterior al primer fallamiento, el deslizamiento impacta a la ladera norte, evolucionando la remoción a avalancha. Ésta continúa avanzando a lo largo de la pendiente, impactando finalmente al fiordo y desencadenando uno de los tsunamis ocurridos en el lugar. (Sepúlveda et al. 2010).

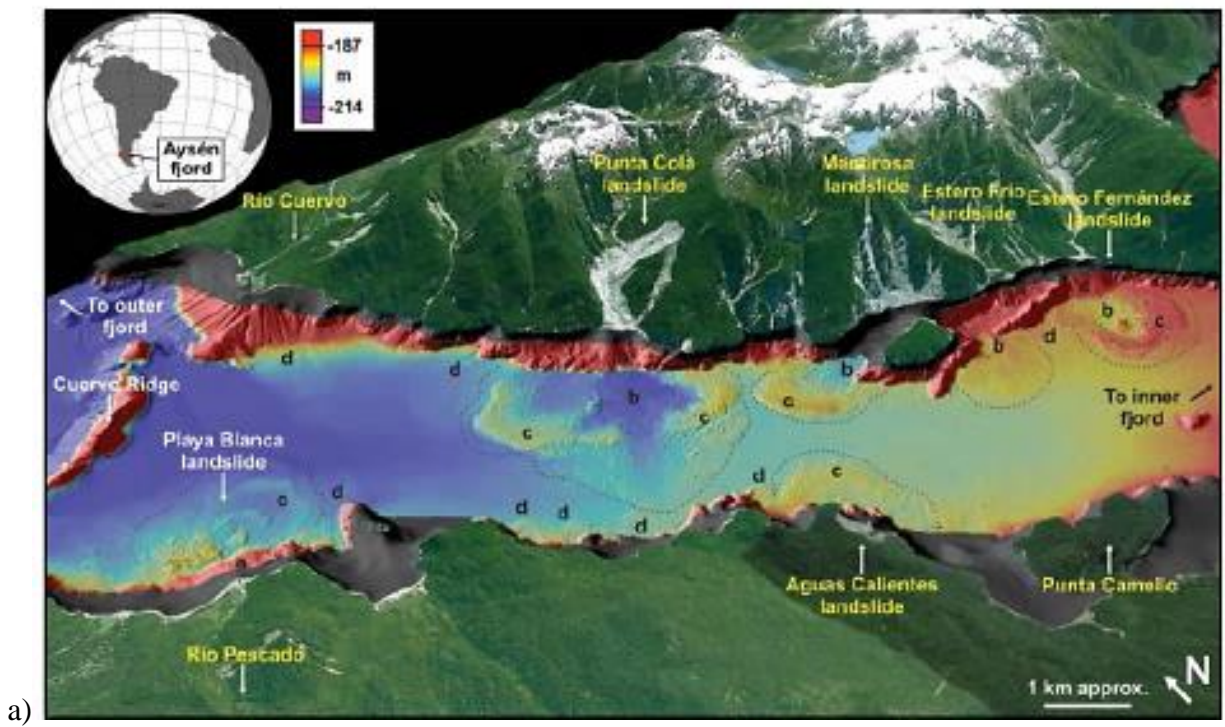


Ilustración 12: a) Vista tridimensional de la sección del fiordo afectada por el terremoto del 2007, donde se observa la avalancha de Punta Cola. Fuente: Lastras et al 2013. b) Zoom al deslizamiento de Punta Cola. El escarpe principal corresponde a lo indicado en rojo. Fuente: Google Earth. (Imagen del año 2013)

Existen diversos trabajos en donde se ha estudiado el deslizamiento de Punta Cola. Entre ellos, se incluyen los trabajos de Naranjo (2009), Sepúlveda y Serey (2010), Sepúlveda (2010), Redfield (2011), Serey (2011), Oppikofer (2012), Lastra (2013 y 2016) y Escudero (2017).

En el trabajo realizado por Naranjo (2009), se menciona la generación de remociones en masa en las costas del fiordo desencadenadas por el Terremoto de Aysén, en donde las de mayor volumen generaron un tsunami tras el evento. Los flujos de detrito y las olas del tsunami causaron la muerte de tres habitantes y severos daños a las instalaciones salmoneras, además de la pérdida de las instalaciones de monitoreo sísmico, por lo que no hay información completa del evento sísmico. (Naranjo et al. 2009).

Con respecto a las remociones en masa, éstos ocurrieron en laderas de alta pendiente, en las zonas al este del epicentro y a lo largo de la costa norte del fiordo. Los detritos y rocas que impactaron al fiordo y causaron el tsunami, pertenecen a las remociones ocurridas en Isla Mentirosa, Punta Cola y Aguas Calientes (ver ilustración 10) (Naranjo et al. 2009).

En el trabajo de Sepúlveda y Serey (2010), se estudian las remociones que incluyen a los deslizamientos, caídas y avalanchas de roca desencadenados por el terremoto de Aysén del 2007. Se menciona que las remociones se concentran en la zona epicentral del evento y que los modos de falla que generaron los deslizamientos están controlados por la geomorfología y geotecnia, asociados a la presencia de fallas y abruptos relieves en las laderas rocosas de la zona. El deslizamiento de roca que posteriormente evoluciona a avalancha en el sector de Punta Cola, es delimitado por las laderas escarpadas de gran altura en el angosto valle cercano a la costa (Sepúlveda y Serey. 2010).

El deslizamiento de roca de Punta Cola, presentó depósitos sobre los 20 m de altura. Las marcas de depósitos de estas dimensiones a lo largo de la quebrada (sobre los 10 m) indica un mecanismo de avalancha, por lo que esta remoción comienza como un deslizamiento de roca que finalmente evoluciona a avalancha, recorriendo 1 km antes de impactar el fiordo (Sepúlveda y Serey. 2010).

Los deslizamientos de roca de mayor tamaño (los ocurridos en Punta Cola e Isla Mentirosa), se concentraron en zonas cerca del epicentro y en donde el intrusivo se encuentra más fracturado debido a la presencia de discontinuidades relacionadas al LOFZ. Además, estos deslizamientos tienen características similares, como el movimiento traslacional de baja profundidad, ruptura de la masa de roca y la ubicación de la corona de la remoción, que es en los sectores más altos del talud. Estas características se asemejan a las remociones afectadas por la amplificación topográfica de las ondas sísmicas. La amplificación topográfica es un efecto de sitio que genera grandes aceleraciones en la cresta de un talud, el cual puede generar remociones en masa (Sepúlveda y Serey. 2010).

En el trabajo de Sepúlveda (2010) se realiza un estudio de las remociones en masa desencadenadas por el terremoto de Aysén, en donde se clasificaron durante una campaña de terreno que se llevó a cabo pocos días después del evento sísmico, además de trabajos de mapeos, análisis de imágenes satelitales y de fotografías aéreas previos y posteriores al terremoto del 21 de abril. La clasificación de las remociones se detalla en el Capítulo 2, sección 4 (ver 2.4 Remociones en masa).

Las ubicaciones de las remociones coinciden en general con las fallas mayores del LOFZ, ya que son taludes en donde la roca presenta menor calidad geotécnica debido a las fallas mayores que además poseen estructuras asociadas (Sepúlveda et al. 2010).

En el trabajo de Redfield (2011), se identifican las zonas BFS (Superficie de falla basal) y LRS (Superficie lateral de liberación), las discontinuidades asociadas al LOFZ, el escarpe principal y la zona altamente fracturada (HFZ) (ver ilustración 17 y 18). Se menciona que el deslizamiento de Punta Cola contribuyó a la generación del tsunami tras el Terremoto de Aysén. El fallamiento del principal cuerpo de roca ocurrió a lo largo del BFS. El escarpe principal tiene una longitud de 1 km y está delimitado por el sur por el LRS (Redfield et al. 2011). En este trabajo además se clasifican las discontinuidades mapeadas dependiendo de su ubicación (BFS o LRS) (más detalles en Capítulo 3, sección 3.3).

Hipotéticamente el primer fallamiento fue controlado por una estructura de bajo ángulo, con manteo hacia el W, y posteriormente por estructuras de mayor manteo hacia el norte pertenecientes a la LRS. También se menciona la zona altamente fracturada (HFZ), que está expuesta en la parte más alta de la LRS, donde la resistencia de la roca está altamente reducida en comparación al macizo en general. Este trabajo además propone un mecanismo de falla en cuña para el deslizamiento de Punta Cola en base a las estructuras estudiadas. La cuña es formada por la intersección de discontinuidades superficiales que mantean al W expuestas en la BFS y una discontinuidad subvertical observada en la LRS (Redfield et al. 2011) (ver ilustración 21).

En el trabajo de Serey (2011), se determinaron las propiedades geológicas y geotécnicas del macizo rocoso y suelo superficial presente en las laderas del fiordo a partir de ensayos geotécnicos de muestras de roca. Para las muestras de Punta Cola, que corresponden a tonalita de biotita, se realizó un ensayo de carga puntual con lo que se obtuvo el valor de la resistencia a compresión simple (σ_{ci}). Los valores geológicos y geotécnicos obtenidos de este trabajo y usados para la caracterización del talud, se detallan en el capítulo 3 (ver sección 3.3.4 Materiales).

También se realiza un análisis de la distribución geográfica de las remociones en masa generadas en el Fiordo Aysén, indicando que éstas se concentraron en el área epicentral, especialmente concentradas al este y al norte del epicentro del terremoto de Aysén y en las laderas del sector norte del fiordo, ya que éstas presentan mayores relieves. La mayor susceptibilidad en las laderas donde hubo mayores deslizamientos se debe a que estos sectores son cruzados por trazas de falla o se encuentran cercanas a estructuras, disminuyendo así su calidad geotécnica. Luego de análisis en laderas donde se generaron deslizamiento de roca y avalancha, se sugiere la existencia de amplificación topográfica de las ondas sísmicas (Serey 2011).

La morfología del deslizamiento ocurrido en Punta Cola está descrita en el trabajo de Oppikofer (2012). El estudio se basa en el uso de un modelo digital de alta resolución del terreno, creado a partir de un escaneo láser terrestre. En este trabajo se logra establecer la secuencia de eventos que dieron origen al deslizamiento de roca y posterior avalancha en Punta Cola.

Posterior al primer fallamiento, el deslizamiento de roca evoluciona a avalancha, recorriendo el angosto valle e impactando finalmente el fiordo. La avalancha tuvo una gran movilidad, alcanzando flujos de hasta 150 m de altura, pero el deslizamiento tuvo una altura promedio de 52.2 m. En este trabajo además se estima el volumen del deslizamiento, 22.4 Mm^3 (Oppikofer et al. 2012).

El mapeo geomorfológico realizado en este estudio indica que el sector sureste del talud en estudio (ver A en ilustración 14) se caracteriza por presentar un deslizamiento de mayor espesor comparado con el sector noreste del mismo (ver B en ilustración 14). El tercer sector, que corresponde a la parte este (ver C en ilustración 14) se caracteriza por ser una zona altamente fracturada.

La hipótesis de la secuencia de deslizamiento para este trabajo indica que el sector de roca A comenzó a deslizarse debido al terremoto de Aysén. Este fallamiento creó una cara libre que generó el deslizamiento de roca del sector B y posteriormente, el sector C (ver 1 en ilustración 14). Los fallamientos de los sectores A y B generaron la evolución de este deslizamiento de roca a avalancha. La avalancha cruzó el valle hasta la ladera opuesta al norte (2 en ilustración 14) y arrancó la vegetación y el suelo presente en el sector 3 de la ilustración 14 (ver ilustración 14). Posteriormente la avalancha vuelve a cruzar el valle hasta llegar a la ladera sur (ver 4 en ilustración 14). Luego avanza hasta el sector 5, cubriéndolo con depósitos de bajo espesor (ver 5 en ilustración 14). En este punto, la avalancha pudo haber perdido movilidad, que permitió la depositación de detritos de más de 50 m cerca de la línea de costa (ver 6 en ilustración 14). Finalmente, la avalancha impactó el fiordo desencadenando el tsunami (ver 7 en ilustración 14). La avalancha generada por el sector C presentó menor energía generando depósitos en el sector 8 de la ilustración 14 (ver ilustración 14). Las remociones menores mapeadas en Punta Cola se muestran en el sector 9. Los depósitos respectivos de estas remociones menores se presentan en el sector 10 (ver 9 y 10 en ilustración 14) (Oppikofer et al. 2012).

El trabajo de Lastras (2013) apunta a los deslizamientos submarinos desencadenados por el tsunami. La remoción de Punta Cola se originó por la liberación de una cara orientada al NW del talud y dando lugar a un movimiento complejo, compuesto por varias fases. Los deslizamientos que impactaron al fiordo (en Punta Cola, Isla Mentirosa y Aguas Calientes) (ver ilustración 10) propagaron el desplazamiento hasta el suelo submarino generando así remociones que avanzaron hasta 200 m bajo el nivel del mar (Lastras et al. 2013). En el trabajo de Lastras (2016) además se agrega que el impacto de los detritos de Punta Cola con el fiordo generó una erosión de 1 a 10 m de sedimento en el suelo del fiordo, creando una depresión subacuática (ver ilustración 13). El sedimento removido de la depresión subacuática fue apartado radialmente formando anillos de sedimentos comprimidos (Lastras et al. 2016) (ver ilustración 13).

Otro trabajo que estudia el fenómeno ocurrido en Punta Cola es el de Escudero (2017), en donde se realiza el modelamiento estático y dinámico del talud en dos dimensiones con el software UDEC (de la empresa ITASCA). En este trabajo se caracteriza geológica y geotécnicamente el talud a partir de revisión bibliográfica de los trabajos de Serey (2011) y Glueer y Loew (2015) principalmente. Además, se menciona que la amplificación topográfica de ondas sísmicas en el modelo es un factor de primer orden en el deslizamiento (Escudero. 2017).

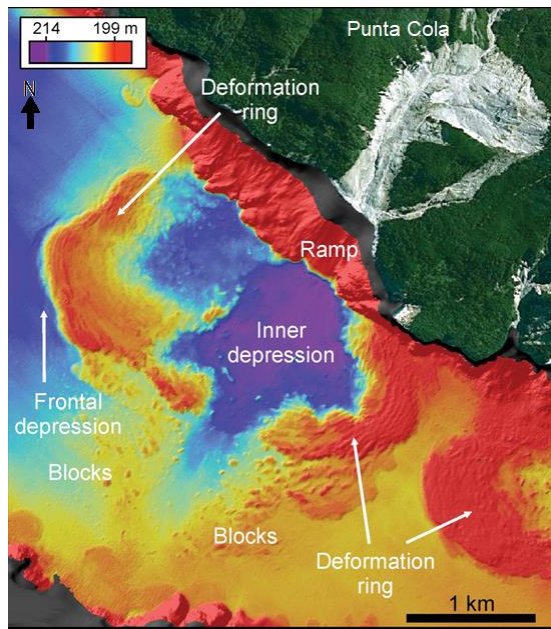


Ilustración 13: Depresión subacuática (Inner depression) y anillos de sedimentos comprimidos (Deformation ring) generados por el impacto de detritos y rocas de la remoción de Punta Cola con el fondo del fiordo. Fuente: Lastras et al. 2016.

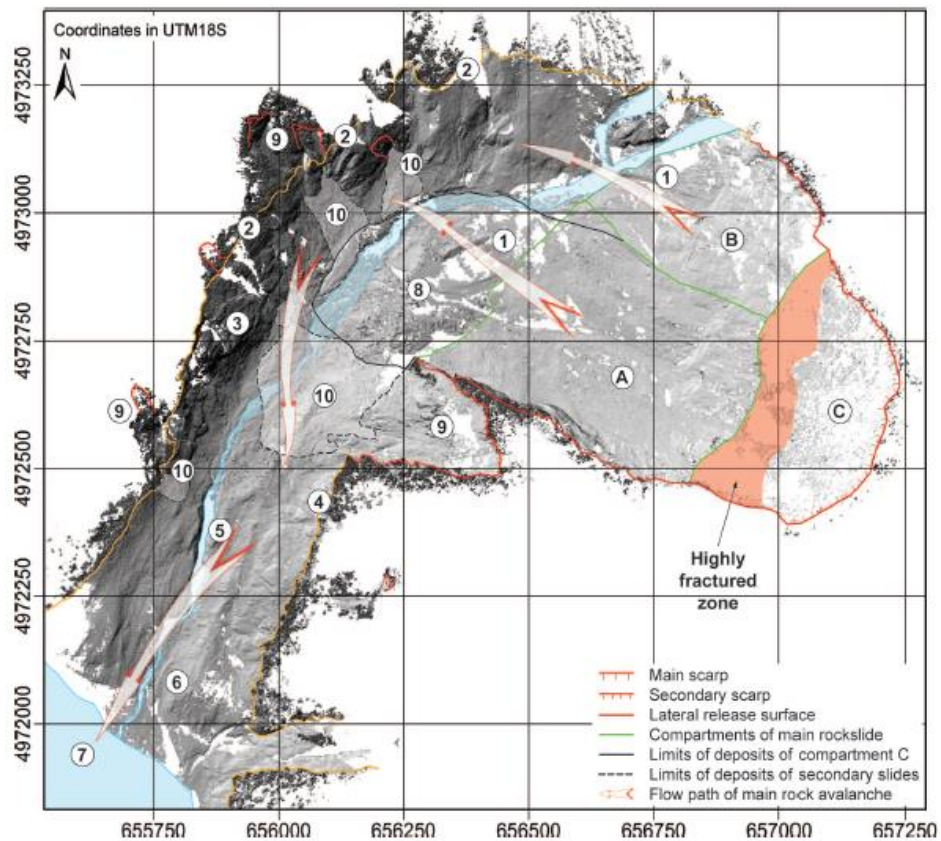


Ilustración 14: Secuencia de deslizamiento ocurrido en Punta Cola desencadenado por el terremoto de Aysén (2007). Fuente: Oppikofer et al. (2012).

3 Implementación del modelo

3.1 Software 3DEC

3DEC es una herramienta de análisis geotécnico de gran precisión y eficiencia, que simula en tres dimensiones la respuesta de macizos rocosos que contienen múltiples discontinuidades que se intersecan, y son sujetas a cargas estáticas o dinámicas. El programa está basado en el método de elementos distintos (MED) para modelos discontinuos (Israelsson, 1996). Este programa es ideal para el estudio de proyectos de ingeniería, como análisis de fracturamiento en laderas de roca, evaluaciones de fallas y diaclasas, excavaciones subterráneas, etc. El modelo discontinuo es representado como una unión de bloques discretos, en donde las discontinuidades, son manejadas como condiciones de borde entre los bloques (Itasca, 2013).

Para mejorar los resultados y detalles del análisis, es recomendable que las estructuras estén bien definidas, lo que puede realizarse a partir de observaciones en terreno y mapeo geológico. Sin embargo, 3DEC puede generar patrones de discontinuidades a partir de métodos estadísticos. Además, el software, incorpora modelos de comportamientos de varios materiales, tanto para roca intacta como para las discontinuidades (Vejar, 2016) (Itasca, 2013).

Los bloques del macizo pueden ser definidos como rígidos o deformables. Los bloques deformables, son divididos en una serie de elementos finitos, en los cuales cada elemento posee una ecuación de estrés-deformación que rige su comportamiento. Esto brinda una gran ventaja en el modelamiento de macizos y estructuras al software. El movimiento y comportamiento de discontinuidades también se basa en ecuaciones de fuerza-desplazamiento, tanto para movimientos normales como de cizalle. (Itasca, 2013).

3DEC acepta la programación en lenguaje FISH, donde se pueden escribir las funciones para extender las cualidades y funcionalidades del software.

3.2 Métodos de elementos distintos

El término “Métodos de elementos distintos” (MED) fue propuesto por Cundall en 1971, como una técnica numérica para modelar la mecánica de rocas. Se basa en la representación del macizo como un grupo de bloques o partículas (método discreto). Esta técnica ha sido adoptada por otras áreas, científicas e ingenieriles principalmente, las cuales han desarrollado nuevos modelos y códigos para estudios que se centran mayormente en el modelamiento geomecánico (Lemos, 2013).

Los programas de métodos distintos utilizan un esquema explícito en el tiempo de ejecución para resolver ecuaciones de movimiento directamente. Los cuerpos pueden ser rígidos o deformables y los contactos entre los cuerpos son deformables (Vejar, 2016).

Las discontinuidades son consideradas como condiciones de borde entre los bloques, esto permite desplazamiento a lo largo de discontinuidades o movimientos rotacionales entre bloques. Cada bloque responde a la deformación de acuerdo con las ecuaciones prescritas (Vejar, 2016).

3.3 Modelamiento en 3DEC

3DEC es un software de programación en lenguaje *FISH*. Es decir, se basa en el ingreso de códigos y comandos para que el programa ejecute lo pedido por el usuario. Para realizar el modelo de Punta Cola, se realizaron los siguientes pasos:

- Topografía de la zona a partir de un modelo de bloques. Esto definirá la geometría del problema
- Determinación de discontinuidades mayores
- Determinación de discontinuidades menores
- Propiedades de los materiales
- Comportamiento constitutivo, para obtener una respuesta del modelo consistente con la realidad
- Condiciones iniciales, para definir el estado in situ en el caso estático

3.3.1 Topografía del modelo en base a prismas triangulares

La información para construir la geometría del modelo se obtuvo a partir de un DEM (*Digital Elevation Model*) de 7 metros de resolución (Oppikofer et al. 2012). El DEM del área a estudiar (ver ilustración 15 a) corresponde al estado pre-deslizamiento, que posteriormente se exportó a 3DEC para la creación de bloques (Vejar 2016).

El DEM se trabajó en ArcGis, para obtener mediante una serie de pasos que se detallarán a continuación, los datos de coordenadas de cada pixel y así traspasarlos a 3DEC.

1. Primero, se creó un polígono para delimitar la zona utilizada en el modelo (ver ilustración 15 b), ya que, al utilizar toda la zona designada por el DEM, se creaba un modelo muy pesado que demoraba en implementarse y no era óptimo en la compilación de éste. Por ello, la zona delimitada se centra al sector en donde ocurrió la remoción. Para un óptimo funcionamiento del modelo, el polígono debe tener sus aristas ortogonales entre sí (un rectángulo o un cuadrado), como lo indica la ilustración 15 c.

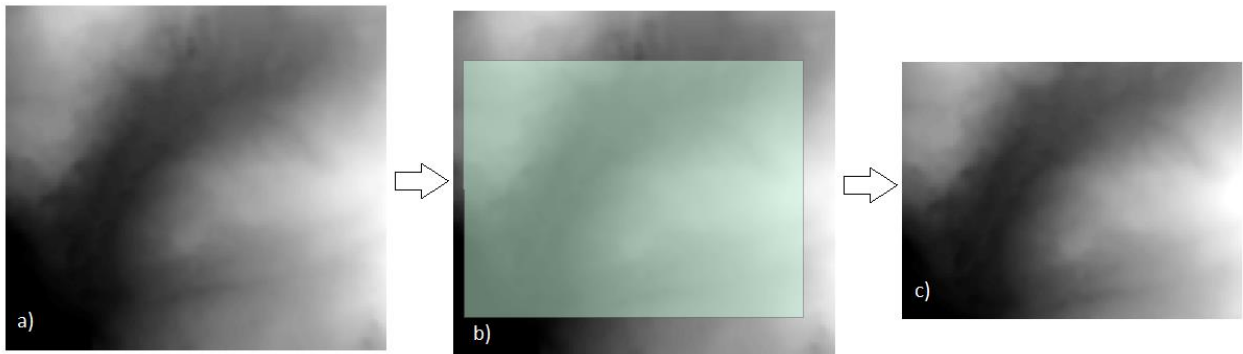


Ilustración 15: DEM utilizado para crear la topografía pre-deslizamiento. a) DEM inicial del área de estudio. b) Polígono para delimitar la zona. c) DEM final con un área más acotada y aristas ortogonales. Fuente: Oppikofer et al. 2012.

2. Posteriormente, para efectos de bajar la resolución del modelo y hacer la compilación más rápida, se agrandaron los pixeles del DEM. En este caso se pasó a tener un DEM con pixeles de 7 metros de arista a pixeles de 40 metros de arista. El tamaño del pixel es a elección, mientras mayor es el valor, menos pesado será, pero pierde precisión. En este caso se usó el tamaño de pixel igual a 40 m debido a que agiliza la compilación del modelo sin perder la representatividad de la topografía general de la zona.
3. El paso siguiente consiste en pasar cada pixel del DEM a un *shapefile* de puntos, con la información de las coordenadas del centroide de cada pixel.
4. Finalmente se obtiene un archivo de texto con las coordenadas (x , y , z) del centroide de los pixeles de la zona.
5. Importar el archivo de texto con las coordenadas a AutoCAD (el software debe tener la extensión de CivilCAD).
6. Realizar triangulación al terreno
7. Exportar el terreno triangulado como archivo *.dxf*
8. En la página oficial de ITASCA (<http://www.itascacg.com/software/product-manager/extruded-geometries-in-3dec>) están presentes los códigos para descargar de forma libre que sirven para importar el terreno triangulado (con extensión *.dxf*) a 3DEC. En el Anexo A se muestran estos códigos y los procedimientos realizados con mayor detalle.

El resultado de esta topografía se muestra en la siguiente ilustración (ver ilustración 16).

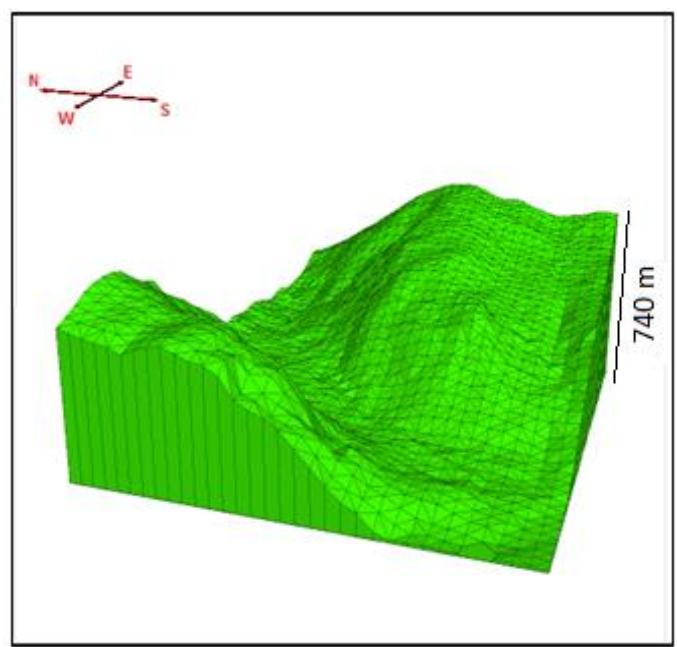
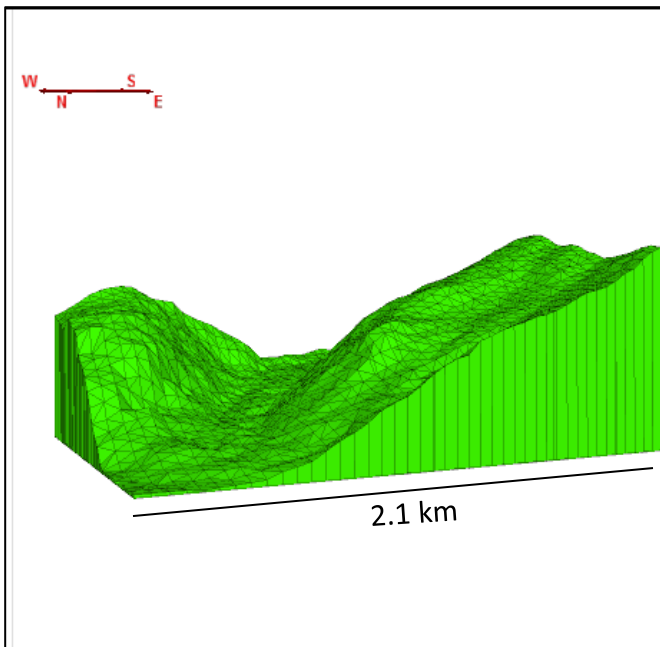
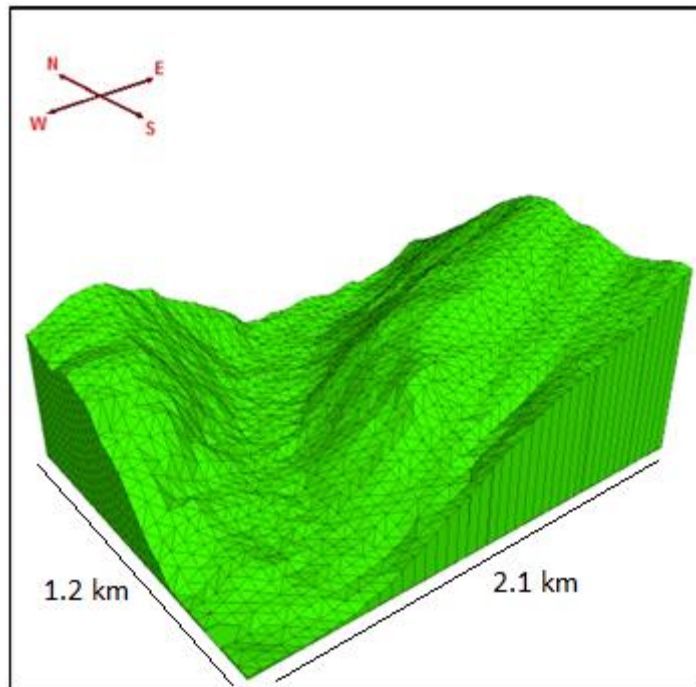


Ilustración 16: Topografía pre-deslizamiento obtenida en base a prismas triangulares a partir del DEM con tamaño de pixel de 40 metros. Vista desde tres ángulos distintos.

3.3.2 Zonas de baja calidad de roca: Discontinuidades mayores

Una de las discontinuidades mayores es definida en el trabajo de Redfield (2011). Este trabajo define una zona altamente fracturada, que a partir de ahora será nombrada como HFZ (de las iniciales en inglés para *Highly Fractured Zone*) cuyas características principales son un espaciamiento centimétrico de estructuras y una mala calidad de roca (Escudero 2017). La

ubicación del HFZ es bajo el escarpe principal. En superficie se manifiesta como una zona de 80 metros de ancho en promedio y 540 metros de largo aproximadamente. Una rama del LOFZ pasa a través de esa zona por lo que se relaciona a este gran sistema de fallas (Oppikofer, 2012). En la ilustración 17 se muestra su ubicación en planta

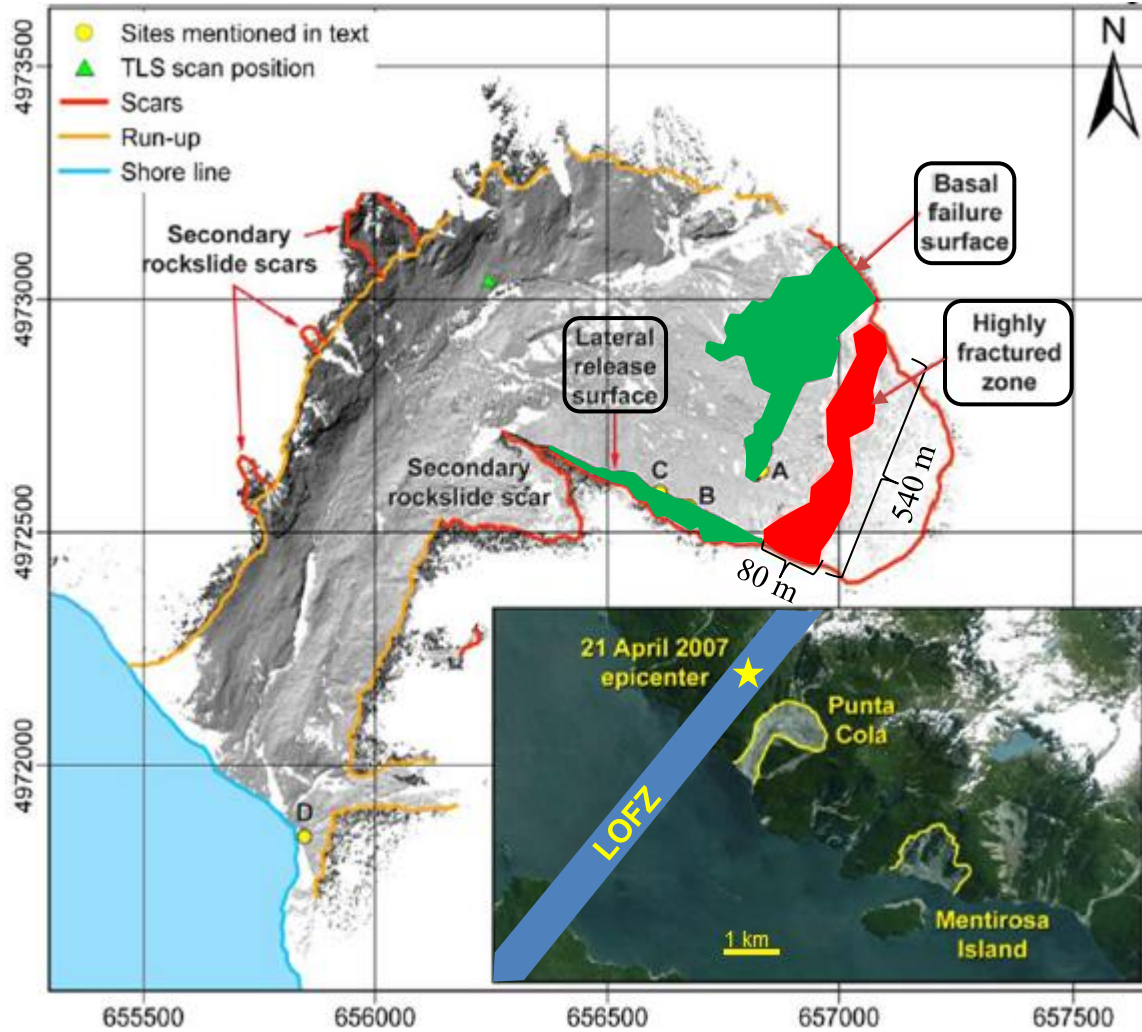


Ilustración 17: Avalancha de Punta Cola con vista en planta y la ubicación de la Highly Fracture Zone (HFZ) junto a sus dimensiones representada como el área de color rojo. Las áreas verdes muestran las zonas de *Lateral Release Surface* (LRS) y *Basal Failure Surface* (BFS). Fuente: (Modificado) Redfield et al. 2011

La segunda discontinuidad mayor que se considera en el modelo es la Falla Punta Cola (FPC), una estructura de 15-20 kilómetros de longitud, de rumbo N-S, con movimiento dextral y manteo 80° - 85° W (Legrand et al. 2011); (Vargas et al. 2013). El deslizamiento de Punta Cola está controlado por la FPC, que es donde también se ubicaron la mayoría de los epicentros del enjambre sísmico del 2007 (Vargas et al. 2013) debido a su directa relación con el LOFZ. En la ilustración 18, se muestra la ubicación de esta falla en planta, que se expresará en el modelo como una zona de baja calidad de roca al igual que HFZ. Esto es debido a que la FPC tiene estructuras asociadas, por lo que no puede ser representado por una individual.



Ilustración 18: Vista en planta del deslizamiento de Punta Cola y las estructuras mayores consideradas en el modelo: Falla Punta Cola (línea verde), HFZ (zona beige). Además, se muestran la Superficie de falla basal (BFS) y Superficie lateral de liberación (LRS). Fuente: (Modificado) Escudero. 2017

Inicialmente, la HFZ iba a ser integrada en el modelo como un DEM independiente, uniéndose como una pieza de un rompecabezas a 3DEC. El problema que surgió fue que los píxeles de la HFZ no coincidían de manera perfecta con el resto de la topografía, quedando así espacios vacíos que se expresaban como agujeros en el modelo. Esta situación podría causar desperfectos en el modelamiento, por lo que se optó por modelarlo de forma diferente.

Finalmente, la HFZ fue integrada al modelo como una estructura de bordes rectos, ya que, al ser irregular en su forma, iba a resultar complejo el separar esta zona mediante el código del programa sin crear estos “errores de píxeles”, por lo que la separación realizada fue simplificar la geometría del modelo. En la siguiente ilustración se puede observar la forma en que estaba modelada inicialmente y como queda finalmente (ver ilustración 19).

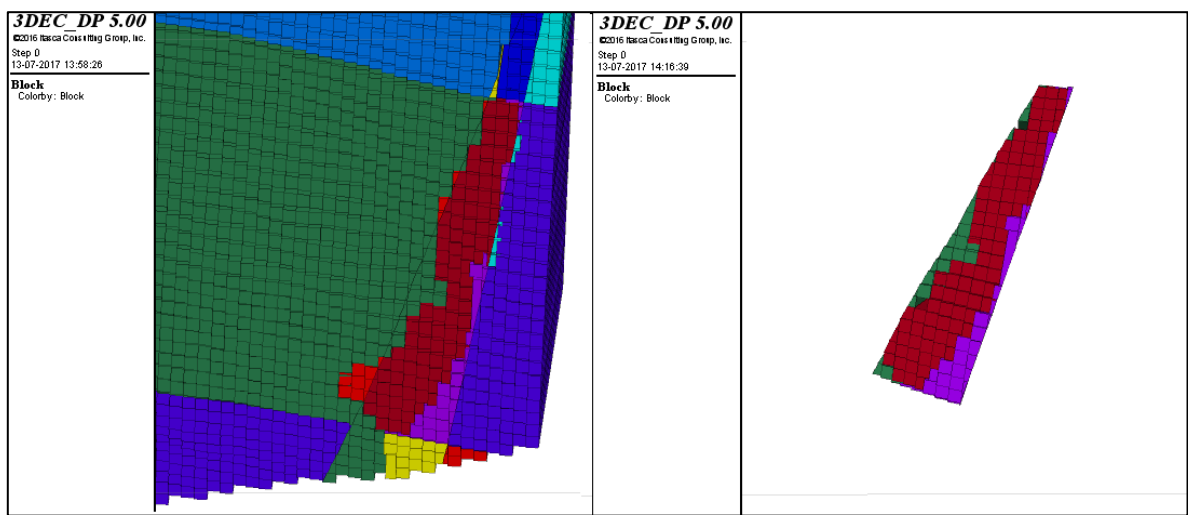


Ilustración 19: Modelamiento de la HFZ. A la izquierda se muestra como fue modelada al principio como un DEM independiente. A la derecha, la forma final de la HFZ, que fue construida y separada como estructura en el mismo DEM que el resto de la topografía.

Por otro lado, la FPC es una estructura aproximadamente recta, de rumbo cercano al N-S, por lo que se separó esta zona mediante programación del código, posterior a creada la topografía inicial del modelo (ver ilustración 20).

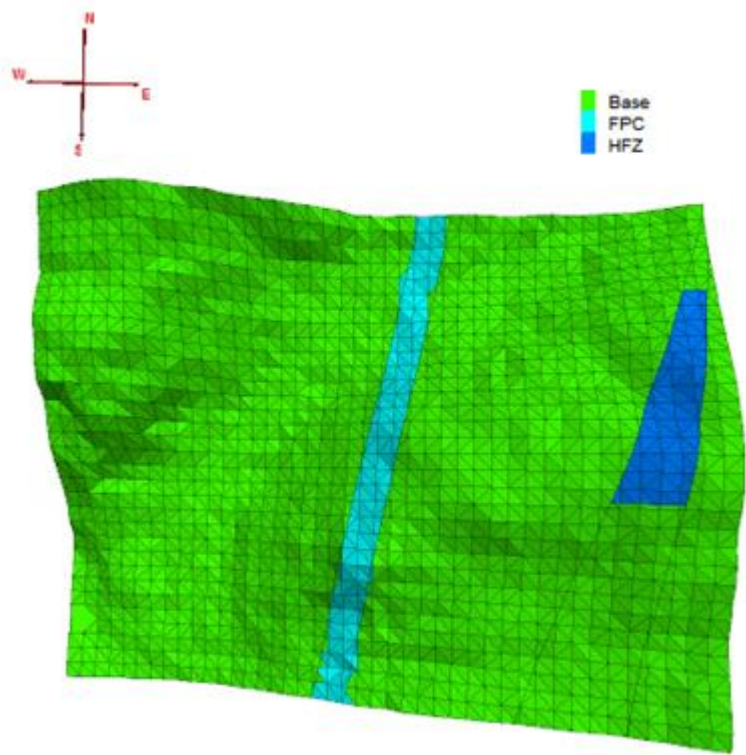


Ilustración 20: Topografía del modelo vista en planta. Se pueden observar las estructuras mayores integradas: FPC (celeste) y HFZ (azul)

3.3.3 Discontinuidades menores

En el caso de las discontinuidades menores, Redfield et al. (2011), realizó el estudio de estas estructuras a partir de un escaneo láser (TLS) en la zona de estudio cuyos datos fueron posteriormente analizados con el software *Coltop3D*. Se identificaron dentro del área del deslizamiento de Punta Cola dos unidades, la superficie de falla basal (BFS) y la superficie lateral de liberación (LRS) (ver ilustración 17). Las discontinuidades representativas que fueron analizadas se dividen en estas dos zonas y están mostradas en la ilustración 21.

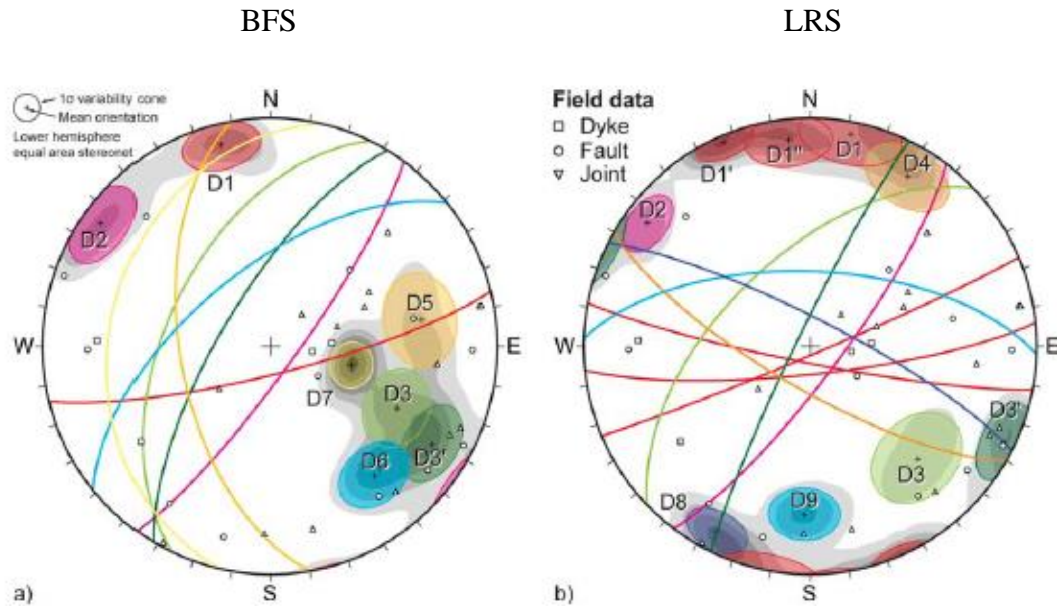


Ilustración 21: Estructuras locales de Punta Cola obtenidas con el escaneo TLS. En a) se tienen las discontinuidades de BFS y en b) se tiene las discontinuidades del LRS. Fuente: Redfield et al. 2011

La Superficie de falla basal (BFS) está definida en el trabajo de Redfield (2011) como la superficie de falla del cuerpo principal de roca en el deslizamiento de Punta Cola y la Superficie lateral de liberación (LRS) es una superficie lateral que limita al escarpe por el sur (ver ilustración 17).

Para este modelamiento, se escogieron los sets de estructuras que estuviesen tanto en la BFS como en la LRS. Para los sets que se encontraron en ambos sectores, es decir, los sets D1, D2, D3 y D3', los valores tanto de dip como de dip direction fueron promediados para ser aplicados al modelo. (ver ilustración 21)

Los datos de los sets de la BFS y de la LRS se muestran en las tablas a continuación (ver tablas 1 y 2)

Tabla 1: Datos de dip y dip direction para discontinuidades presentes en BFS. Fuente: Redfield et al. 2011.

Set	Dip	Dip direction
D1	79	166
D2	79	125
D3	50	296
D3'	69	302
D5	53	260
D6	58	321
D7	27	283

Tabla 2: Datos de dip y dip direction para discontinuidades presentes en LRS. Fuente: Redfield et al. 2011.

Set	Dip	Dip direction
D1	82	191
D1'	87	156
D1''	79	174
D2	78	126
D3	56	316
D3'	85	296
D4	72	210

Los valores finales de dip y dip direction que se obtuvieron promediando los valores de BFS y LRS, se muestran en la siguiente tabla (ver tabla 3)

Tabla 3: Datos de dip y dip direction utilizados en el primer modelo.

Set	Dip	Dip direction
D1	81	178
D2	79	125
D3	53	306
D3'	76	300

Se construye un segundo modelo, en donde se agregará el set D7 (BFS) ya que el modelo de deslizamiento propuesto por Vejar, 2016 (ver ilustración 22), muestra una superficie de falla de bajo ángulo, por lo que este modelo servirá si este último set de estructuras controla de alguna forma la remoción.

Por lo tanto, los sets implementados al segundo modelo son los siguientes (ver tabla 4).

Tabla 4: Datos de dip y dip direction utilizados en el segundo modelo

Set	Dip	Dip direction
D1	81	178
D2	79	125
D3	53	306
D3'	76	300
D7	27	283

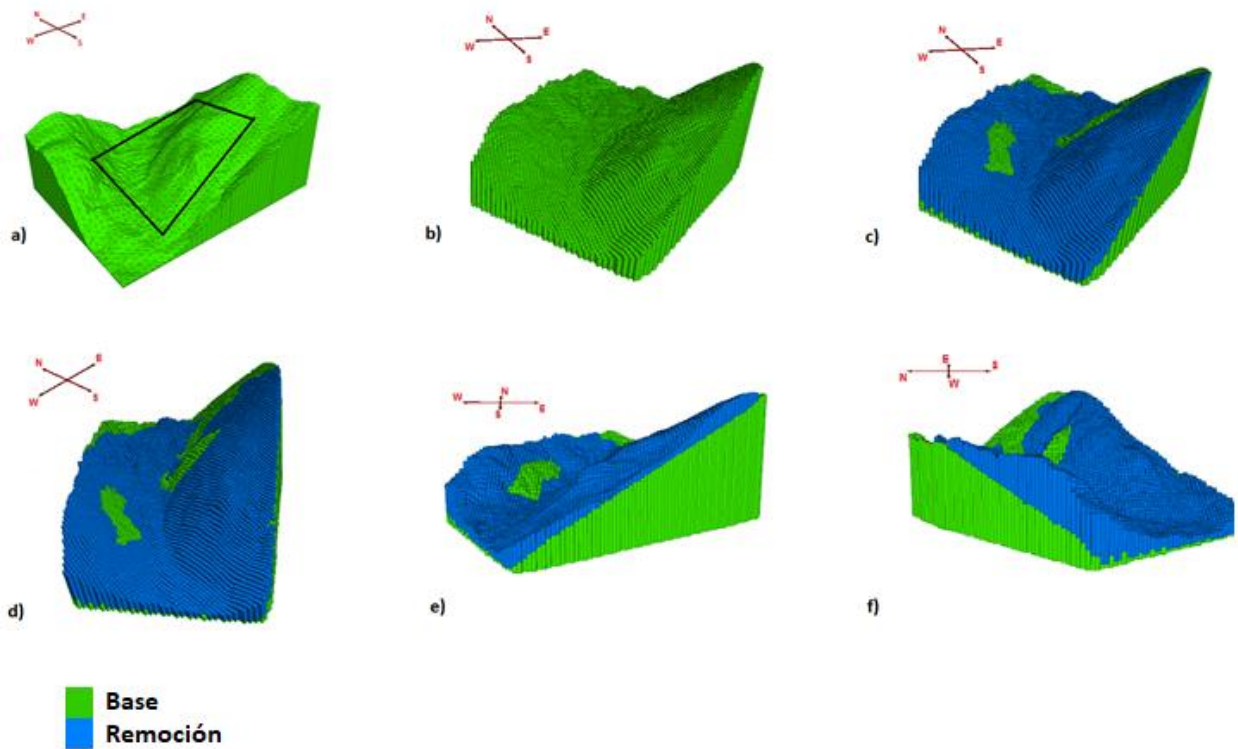


Ilustración 22: Modelo de Punta Cola propuesto en el trabajo de Vejar, 2016. a): Modelo actual que se analizará en este trabajo. El recuadro sobre éste indica el área abarcada en el trabajo de Vejar. b): Modelo propuesto ubicado en la misma orientación que a). Imágenes a y b incluyen base y remoción. Imágenes c) d) e) f): Modelo propuesto en donde se muestran los volúmenes de base (post-deslizamiento) y remoción (pre-deslizamiento) orientados en distintas direcciones. La remoción pareciera estar controlada por una superficie de falla de bajo ángulo. (Vejar, 2016)

Para generar las discontinuidades en 3DEC, se emplea un código generador de sets de discontinuidades que recibe los siguientes parámetros:

- Dip
- Dip direction
- Espaciamiento entre estructuras
- Número de estructuras en un set

- Punto de origen de la discontinuidad central del set

En la siguiente tabla (ver tabla 5) se muestran los parámetros de las discontinuidades usados en ambos modelos (referidos desde aquí en adelante como “Modelo 1” (sin set D7) y “Modelo 2” (con set D7))

Tabla 5: Parámetros de discontinuidades usados en los modelos 1 y 2

Set	Dip	Dip direction	Espaciamiento	Número	Origen
D1	81	178	200	4	X: 656834 Y: 4.97266e+06 Z: 581.471
D2	79	125	100	4	X: 656885 Y: 4.9726e+06 Z: 566.014
D3	53	306	100	4	X: 657019 Y: 4.97231e+06 Z: 589.045
D3'	76	300	100	4	X: 656829 Y: 4.97266e+06 Z: 534.078
D7*	27	283	----	1	X: 656674 Y: 4.9726e+06 Z: 387.874

*Discontinuidad exclusiva del modelo 2

En las imágenes a continuación (ver ilustración 23 y 24) se encuentran los modelos 1 y 2 con los parámetros de la tabla 5 ingresados (discontinuidades menores) y con las discontinuidades mayores.

Los espaciamientos de las discontinuidades fueron obtenidos en base al trabajo de Escudero (2017), en donde se promediaron los valores que variaban entre 88 m a 110 m para tener así un valor simplificado y único de 100 m, que fue finalmente ingresado a los modelos. En el caso del set D1, se ingresó un espaciamiento de 200 metros. Esto es para que el set abarque más área de la topografía sin tener que aumentar el número de discontinuidades que podría resultar en una disminución de la rapidez de compilación.

El número de cuatro discontinuidades por cada set fue escogido para que abarcara una zona considerable dentro de los modelos, pero sin perder la simplicidad de éste. Además, más número de discontinuidades se traduce en mayor tiempo de compilación en ambos modelos. En el caso de D7, se optó por ingresar sólo una discontinuidad, ya que con eso bastaría para crear una superficie de falla.

Los puntos de origen de cada set fueron distribuidos aleatoriamente pero que abarcaran lo más posible la zona del escarpe principal y la HFZ.

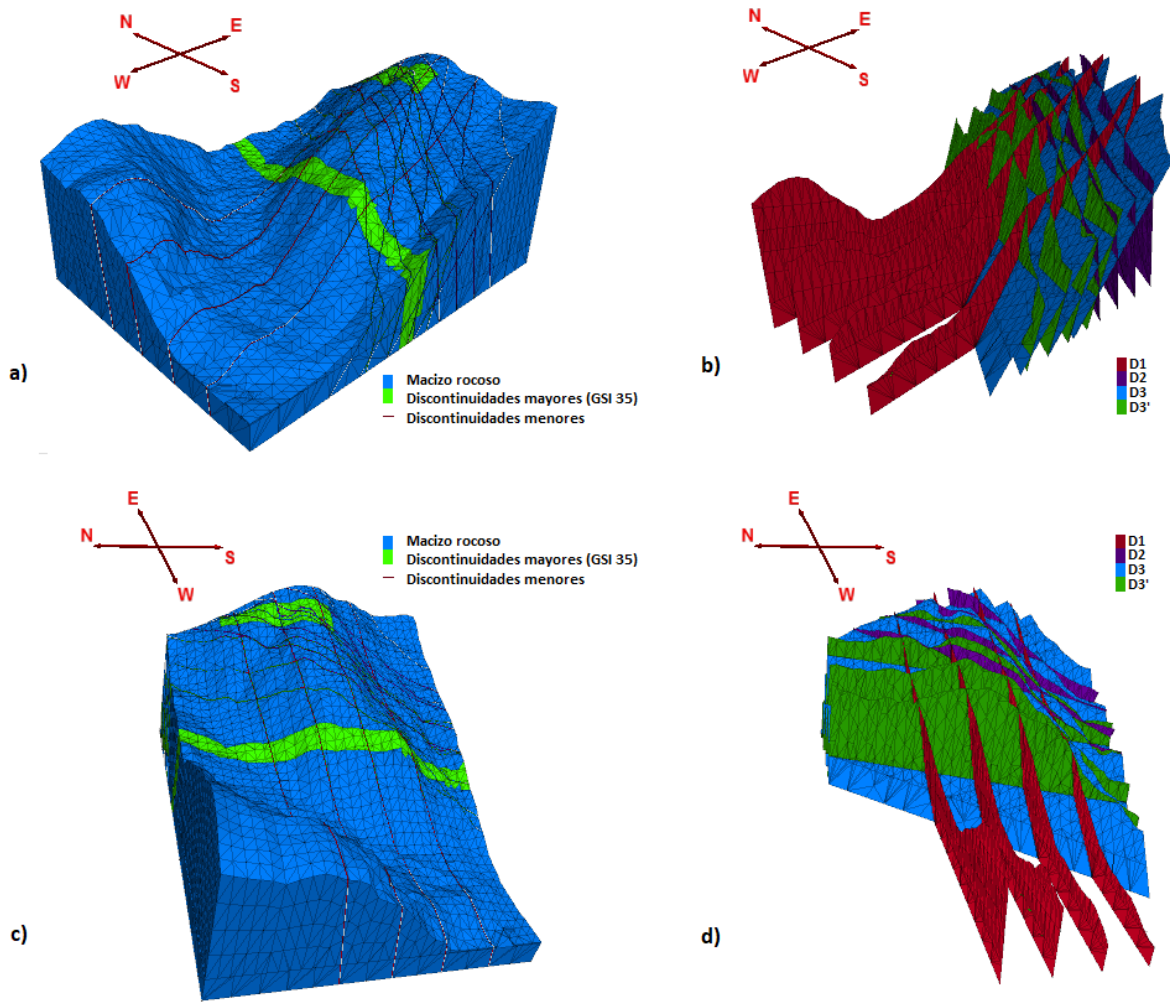


Ilustración 23: Modelo 1. a) y c): Topografía del modelo con las discontinuidades mayores y menores orientada en distintas direcciones. b) y d): Planos de las discontinuidades menores de a) y c) respectivamente.

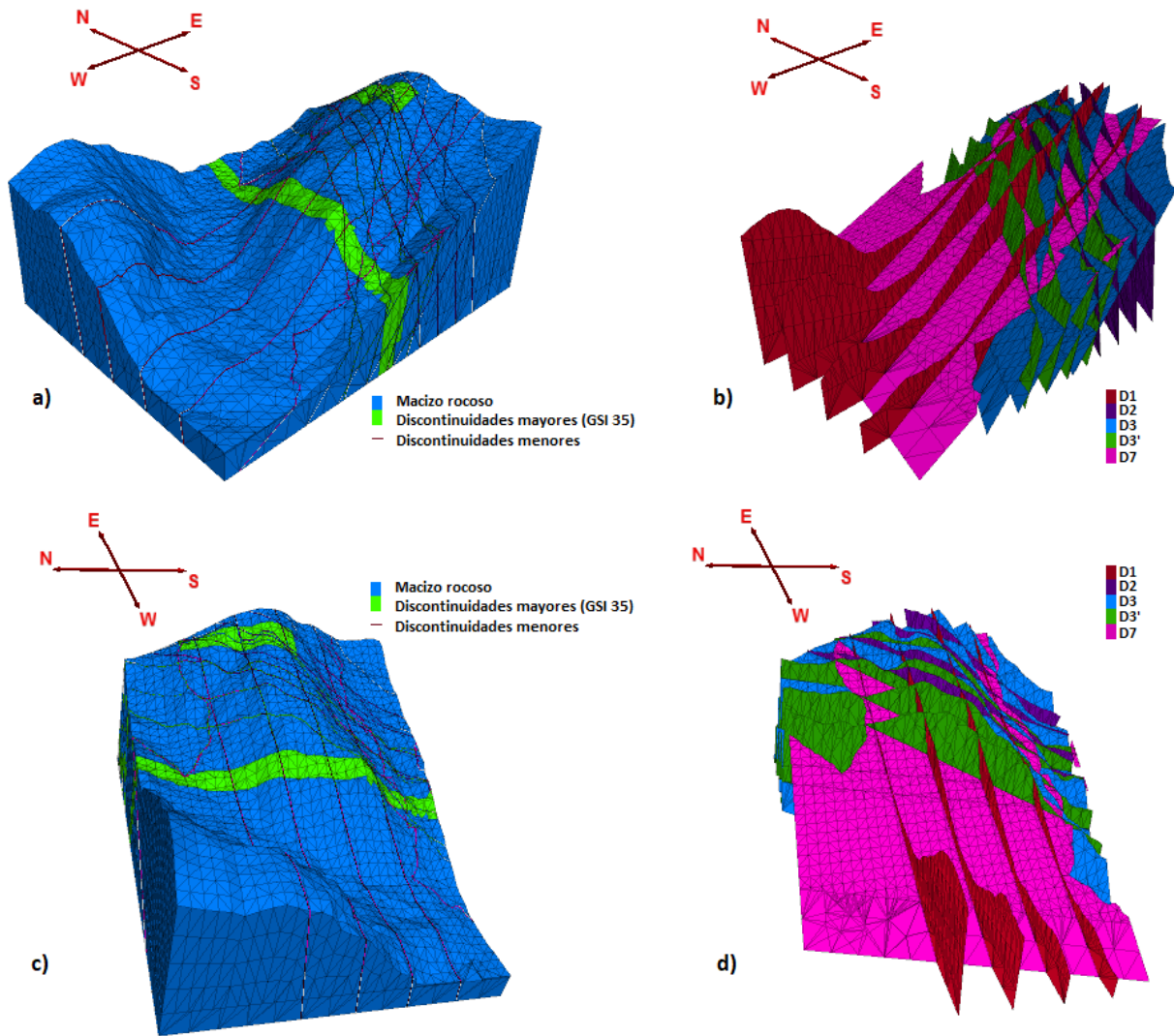


Ilustración 24: Modelo 2. a) y c): Topografía del modelo con las discontinuidades mayores y menores orientada en distintas direcciones. b) y d): Discontinuidades menores de a) y c) respectivamente.

Los modelos, por lo tanto, se diferencian en el set D7, que fue agregado al Modelo 2 para observar la influencia de este set en el deslizamiento del talud.

3.3.4 Materiales

Para generar un modelo representativo, es fundamental agregar las propiedades de los materiales al código. Para ello, se consideran tres propiedades de materiales distintas: las propiedades del macizo rocoso, de las zonas de baja calidad de roca (discontinuidades mayores) y de las discontinuidades menores.

Para el macizo rocoso, se realizó la recopilación de material bibliográfico y publicaciones de la zona en donde se determinaron las propiedades del macizo. El criterio de rotura utilizado en

este trabajo es el de Mohr Coulomb, debido a que es aplicable para medir resistencia de macizos rocosos de alta resistencia (la zona de estudio corresponde al batolito Norpatagónico con litologías de granodiorita y tonalita principalmente) y en determinados casos, puede ser empleado para macizos resistentes en los que la rotura se produzca a favor de las superficies de discontinuad (González de Vallejo, 2002). En la siguiente tabla, se puede apreciar los distintos modelos constitutivos incluidos en el software 3DEC, junto a sus materiales representativos y aplicaciones. El modelo Mohr-Coulomb es el que se acomoda mejor al modelamiento realizado (ver tabla 6).

Tabla 6: Modelos constitutivos incluidos en el software 3DEC junto a sus aplicaciones. El área oscurecida corresponde al modelo usado en este trabajo, debido a que se acomoda tanto a los materiales usados como a las aplicaciones. Fuente: (modificado) <http://www.itascacg.com/software/products/udec/features/material-models>

	Modelo	Material representativo	Aplicación (ejemplo)
Elástico	Nulo	Vacío	Agujeros, excavaciones, etc.
	Isótropo	Homogéneo, comportamiento lineal de stress-strain	Materiales manufacturados (ej.: acero) con cargas menores a la carga límite
	Transversalmente isótropo	Material finamente laminado, mostrando anisotropía elástica (ej.: pizarra)	Materiales laminados con cargas inferiores a la carga límite
Plástico	Drucker-Pager	Aplicación limitada: Arcillas suaves de baja fricción	Modelo común para comparación de programas de elementos finitos implícitos
	Mohr-Coulomb	Materiales granulares sueltos y cementados: suelos, roca y concreto	Mecánica general de suelo o roca (estabilidad de taludes o excavaciones subterráneas)
	Ubiquitous-Joint	Material finamente laminado, mostrando anisotropía de fuerzas (ej.: pizarra)	Excavaciones cerca de estratos horizontales
	Strain-Hardening/Softening	Materiales granulares que exhiben endurecimiento/ablandamiento no lineal	Estudios post fallamiento (ej.: colapso progresivo)
	Bilinear Strain-Hardening/Softening Ubiquitous-Joint	Materiales laminados que exhiben endurecimiento/ablandamiento no lineal	Estudios post fallamiento de materiales laminados
	Double-Yield	Material granular levemente cementado en donde la presión causa una disminución permanente de volumen	Rellenos agregados hidráulicamente
	Cam-clay modificado	Materiales en los cuales la deformación y cizalle están en función del cambio de volumen	Construcciones geotécnicas en arcillas
	Hoek-Brown	Material de roca isótropo	Construcciones geotécnicas en roca
	Hoek-Brown modificado	Material de roca isótropo	Construcciones geotécnicas en roca con cálculos de factor de seguridad
	Cysoil (cap-yield)	Materiales que presentan decrecimiento de rigidez como desarrollo de la deformación plástica	Construcciones geotécnicas en suelos blandos

	Cysoil simplificado	Versión simplificada para simular el comportamiento hiperbólico de la deformación (strain)	Construcciones geotécnicas en suelos blandos
--	---------------------	--	--

Los datos recopilados para el macizo fueron obtenidos a partir de los trabajos de Glueer y Loew (2015), Serey (2011), Escudero (2017) y González de Vallejo (2002).

En Glueer y Loew (2015), los parámetros fueron obtenidos a partir de muestras de roca intacta en la localidad de Punta Grafiti, ubicado a 1 km aprox. al sur de Punta Cola (ver ilustración 25) en donde se realizaron ensayos de compresión simple. El *bedrock* de este sector corresponde a rocas con composiciones graníticas a granodioríticas con diques de tonalita y andesita.

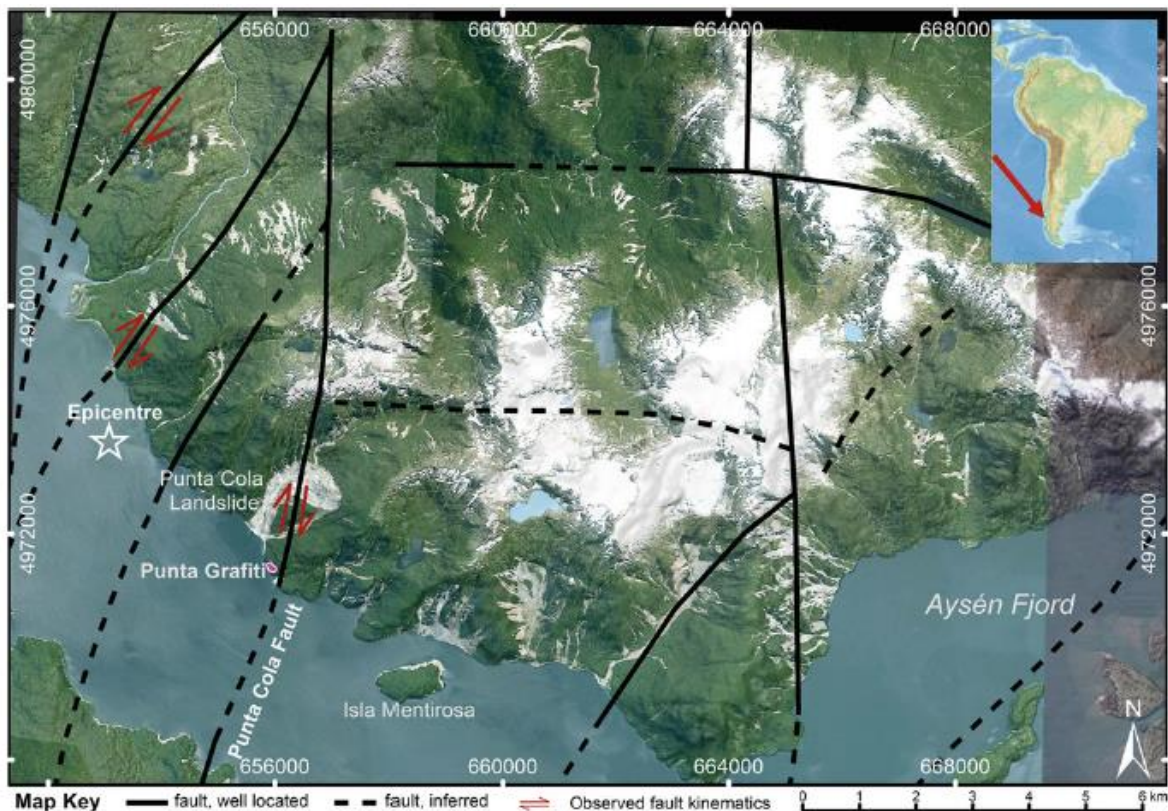


Ilustración 25: Ubicación de Punta Grafiti, al sur de Punta Cola. Fuente: Glueer y Loew. 2015

En el trabajo de Serey (2011) se estudiaron muestras de distintos sectores del Fiordo Aysén. Uno de aquellos sectores, corresponde a Punta Cola. Se realizaron ensayos triaxiales y uniaxiales a las muestras obtenidas en el fiordo. Para la muestra de Punta Cola, que corresponde a una tonalita de biotita, se hizo una prueba de carga puntual. La roca intacta de las zonas estudiadas corresponde en su mayoría a granodioritas y tonalitas de biotita de buena calidad.

En el libro *Ingeniería Geológica* de González de Vallejo, se obtuvieron valores de cohesión (c) y ángulo de fricción (ϕ) para diorita y granito, litologías que se asemejan a las presentes en el macizo de Punta Cola.

En el trabajo de Escudero (2017) se obtuvo el valor de la densidad del macizo rocoso.

Los valores obtenidos de cada trabajo se resumen en la siguiente tabla (ver tabla 7).

Tabla 7: Valores de parámetros geotécnicos para la zona de estudio obtenido de información bibliográfica.

	Glueer (2015)	Serey (2011)	G. de Vallejo (2002)	Escudero (2017)	Seleccionado para modelo
c [MPa]	7.5	17-43	15 (diorita) 15-50 (granito)	----	17
ϕ [grados]	64	49-58	50-55 (diorita) 45-58 (granito)	----	54
Densidad [kg/m^3]	----	----	----	2800	2800
Coef. Poisson	0.3	----	----	----	0.3
GSI	85	40 a 70*	----	50 (macizo rocoso)	50 (macizo rocoso) 35 (para zonas de baja calidad)
Resistencia a compresión simple (UCS) [MPa]	170	210	----	----	210
Módulo de Young [MPa]	49 e^3	----	----	----	49 e^3
Módulo de Bulk [MPa]	40.8 e^3	----	----	----	40.8 e^3
Módulo de Shear [MPa]	18.8 e^3	----	----	----	18.8 e^3

*GSI en zonas de escarpe en donde ocurrió deslizamientos de roca y avalancha es de 35 a 45.

El valor de cohesión escogido para el modelamiento es de 17 MPa, que se encuentra dentro del criterio conservador, ya que es el mínimo dentro de los parámetros obtenidos por Serey (2011) y es cercano a los valores teóricos de González de Vallejo para las dioritas y también está dentro del rango de los granitos.

El valor de ϕ usado es de 54° . Se obtuvo promediando los valores de Serey (2011). Además, este valor se encuentra dentro del rango tanto de la diorita como del granito del trabajo de González de Vallejo (2002).

El valor de GSI para las zonas de baja calidad de roca corresponde al valor mínimo de las zonas en donde ocurrió deslizamiento de roca y avalancha propuesto por Serey (2011). El GSI para el macizo rocoso fue obtenido del trabajo de Escudero (2017), que además se encuentra dentro de los rangos de Serey (2011).

También a partir de Serey (2011) se obtuvieron los parámetros de Hoek-Brown para sectores en donde hubo deslizamiento (ver tabla 8). Esto se usará para determinar los parámetros c y ϕ de las zonas de baja calidad del modelo (Falla Punta Cola y HFZ) (ver Anexo B).

Tabla 8: Parámetros de Hoek-Brown para zonas del fiordo en donde ocurrió deslizamiento (Obtenido de Serey 2011)

GSI	35-45
m_i	22
m_b	3.083
s	0.0022
a	0.508
σ_{ci}	210

Analizando estos datos con el programa RocLab de Rocscience, y considerando un GSI de 35 y D de 0,5 (ya que se consideran sectores con baja calidad de roca), se obtuvieron los parámetros c y ϕ para las zonas de estructuras mayores (ver tabla 9).

Tabla 9: Parámetros Mohr Coulomb para zonas de baja calidad de roca (estructuras mayores) obtenidos con Rocscience

c [MPa]	8
ϕ [grados]	26

Los valores de los parámetros para las discontinuidades menores fueron obtenidos a partir del trabajo de Glueer y Loew (2015) (ver tabla 10)

Tabla 10: Parámetros de las discontinuidades menores usados en el modelamiento. Fuente: Glueer y Loew. 2015.

	Glueer (2015)
JKN [MPa/m]	32000
JKS [MPa/m]	3200
ϕ [grados]	33
c [MPa]	0.01
R. tracción [MPa]	0.001

3.3.5 Modelamiento estático

El primer modelamiento realizado en este trabajo es en el escenario estático. Esto es para comprobar que el talud es estable antes del evento sísmico y se comporta acorde a la realidad. Este análisis corresponde a la calibración del modelo en el software, que busca comprobar que las leyes de la física actúen de forma coherente.

Para realizar de manera óptima el modelamiento estático, se consideraron algunos factores esenciales que se nombran continuación:

Bloques deformables: Para realizar el modelamiento estático, se consideraron a los bloques de la topografía como deformables (ver Capítulo 3, sección 2). Esta característica es

utilizada bajo el comando *gen Edge* y su función es crear tetraedros dentro de cada bloque en donde cada uno tendrá comportamiento independiente (ver ilustración 26).

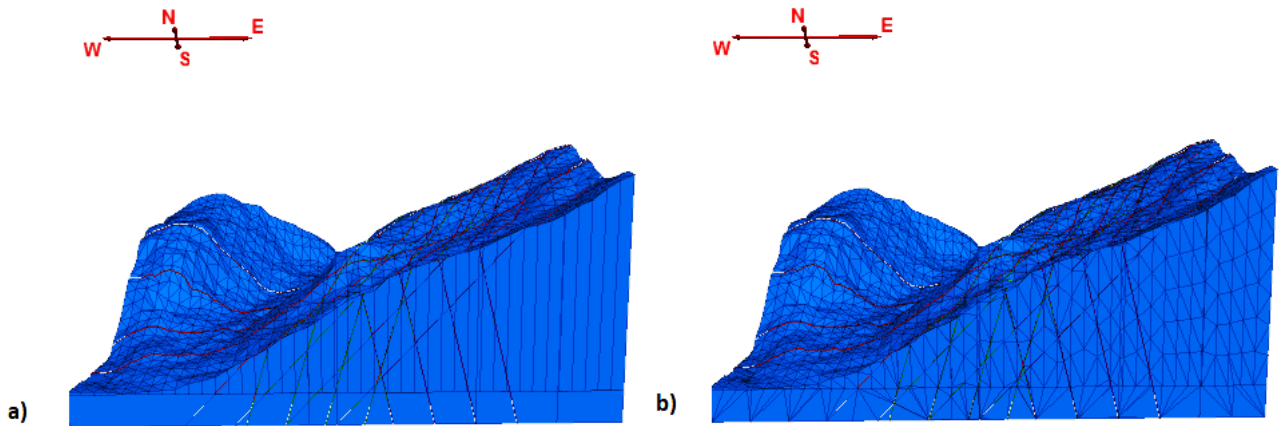


Ilustración 26: Modelo 1. a) Geometría usada en el modelo. b) Geometría después de aplicar *gen Edge* que hace a los bloques deformables.

Base inmóvil: También fue necesario establecer las condiciones de borde, en este caso se realizó una base de cien metros de grosor que fue considerada como piso. Esto es para que, al agregarse la gravedad al modelo, la topografía no cayera por efecto de ésta. A este piso de bloques se le determinó una velocidad nula y así no es afectada por la fuerza gravitacional.

Gravedad: Tal como el punto anterior lo indica, la gravedad debe ser agregada, ya que el programa no lo considera automáticamente.

Modelo constitutivo: Es uno de los componentes a considerar en un medio continuo. Son ecuaciones constitutivas que dependen de cada material. Éstas son las que relacionan los parámetros de los materiales añadidos al código, relacionan las tensiones con las deformaciones para finalmente determinar los criterios de falla (Vanegas, 2010). Este trabajo está bajo el modelo constitutivo Mohr Coulomb (integrado en el programa con el parámetro 2), tanto en el macizo como en las discontinuidades. Para agregarlas al código, se hizo uso del comando *cons* (de constitutivo).

3.3.6 Modelamiento dinámico

Para el modelo dinámico, se usará como condición inicial el estado final del modelamiento estático, sin embargo, se realizaron modificaciones a las condiciones de borde que son mostradas a continuación:

Condiciones de borde lateral: Esta configuración fue obtenida del trabajo de García (2016), en donde se aplica el comando *free field* en los bordes laterales del modelo. Esto último hace que el modelo considere los extremos laterales como infinitos. La modificación de las condiciones de borde es para representar de una forma más realista la respuesta del terreno al input sísmico.

Base móvil: Fue utilizada la misma base del caso estático. Sobre esta base es donde se importan las características del sismo, en este caso, se agregaron las velocidades en dirección N-S (eje y), E-W (eje x) y vertical (eje z) obtenidas a partir de los registros sísmicos.

Amortiguamiento: Para representar la disipación de energía del modelo, se utiliza el amortiguamiento de Rayleigh. El amortiguamiento de Rayleigh se expresa mediante la siguiente ecuación (ver ecuación 1) (Chowdhury y Dasgupta. 2003):

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

En donde [C] es la matriz de amortiguamiento del sistema, [M] es la matriz de masa del sistema y [K] corresponde a la matriz de rigidez. α y β son constantes. Realizando la transformación ortogonal de la matriz de amortiguamiento [C] se obtiene la ecuación 2 (Chowdhury y Dasgupta. 2003):

$$\zeta_i = \alpha/2\omega_i + \beta\omega_i/2 \quad (2)$$

ζ_i corresponde al factor de amortiguamiento y ω_i a la frecuencia natural. Los valores usados en el modelo son:

- $\omega_i = 2.2$ Hz. Es la frecuencia en donde el amortiguamiento es mínimo (Gischig et al. 2015; García. 2016 y Escudero. 2017).
- $\zeta_i = 0.005$. Factor de amortiguamiento crítico (Gischig et al. 2015; García. 2016 y Escudero. 2017).

3.3.7 Sismos utilizados en el modelamiento dinámico

Debido a la falta de información del terremoto de Aysén del 2007 a causa del tsunami que dañó instrumentos sismológicos, para modelar el caso dinámico, se ingresaron registros de dos sismos, el terremoto de Parkfield (2004) y el terremoto de Morgan Hill (1984). El software recibe como input las velocidades de los registros en sus tres componentes (x, y, z).

3.3.7.1 Terremoto de Parkfield, 2004

Este sismo se sitúa en el contexto tectónico de la Falla San Andrés, a 11 km al SSE de Parkfield, California (ver ilustración 27). Ocurrió un 28 de septiembre del año 2004, con un hipocentro que se localizó a 8 km de profundidad. El evento fue de magnitud Mw 6 y presentó un mecanismo focal strike-slip (Goel et al. 2004), sobre la falla dextral San Andrés que marca el contacto de la placa Norteamericana con la placa Pacífico (Unsworth et al. 2004) (Escudero, 2017).

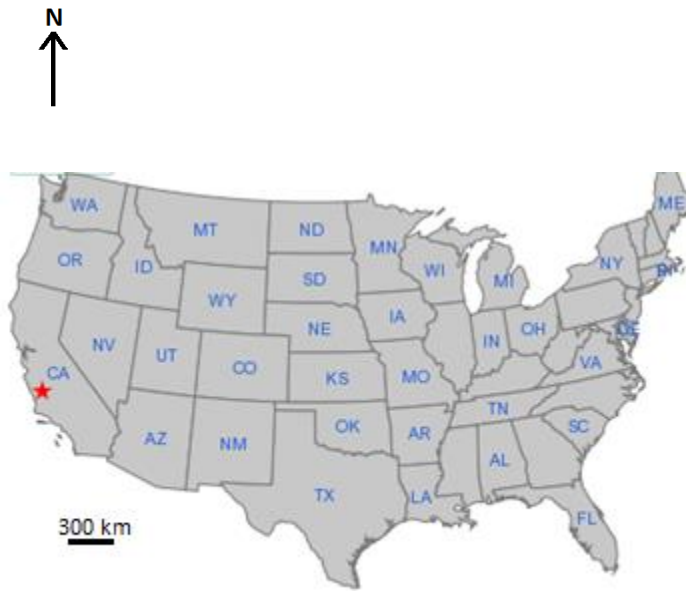


Ilustración 27: (Izq): Mapa de Estados Unidos. Ubicación de la ciudad de Parkfield, en el estado de California. (Der): Ubicación del epicentro del terremoto de Parkfield, 2004. Fuente: www.eachtown.com y USGS

El registro utilizado para este estudio, es el de la estación CE31416, a 500 m del epicentro, que fue modificado por Escudero (2017), en donde se amplifica las ondas de velocidad y aceleración de los tres componentes (x, y, z) por un factor de 5, para obtener un PGA horizontal (N-S, E-W) cercano a 0.6 g (valor calculado con la ley de atenuación para este deslizamiento) y así replicar características más realistas acorde a sector de Punta Cola (Escudero. 2017). Los valores originales y amplificados se observan en la siguiente tabla (ver tabla 11).

Tabla 11: Valores de PGA originales y amplificados del terremoto de Parkfield, estación CE36414.

Unidades	PGA original eje x	PGA amplificado eje x	PGA original eje y	PGA amplificado eje y	PGA original eje z	PGA amplificado eje z
m/s ²	0.99	4.94	1.05	5.27	0.68	3.42
g	0.10	0.50	0.11	0.55	0.07	0.35

En la siguiente tabla (ver tabla 12) se muestran los parámetros principales del registro ingresado.

Tabla 12: Parámetros principales del registro del sismo Parkfield, estación CE31416.

Parámetro	Valor	Unidad
Mw	6	--
Hipocentro	8-9	km
Mecanismo focal	Strike-slip dextral	--
Distancia al epicentro	500	m
PGA eje x	0.50	g
PGA eje y	0.55	g
PGA eje z	0.35	g
Ia eje x	0.300	m/s
Ia eje y	0.249	m/s
Ia eje z	0.083	m/s
V_s^{30}	221	m/s
Duración del registro	21.3	s

Los criterios de elección de este sismo para el modelamiento, que se asemejan al terremoto de Punta Cola, son:

- Mw cercano a 6.2
- Mecanismo focal *strike slip dextral*
- Profundidad hipocentral menor a 10 km
- Registro de una estación a menos de 1 km del epicentro

3.3.7.2 Terremoto de Morgan Hill, 1984

Este terremoto ocurrió el 24 de abril de 1984 con una magnitud Mw 6.2. El epicentro se localizó en las cercanías de Halls Valley, 20 km al este de San José, California, en las coordenadas 37°19.02'N, 121°40.89'W (Bakun et al. 1984). Debido a la concentración de daños en la ciudad de Morgan Hill, a 30 km al sureste de San José aproximadamente, este sismo ha sido llamado como Terremoto de Morgan Hill (ver ilustración 28).

El terremoto ocurrió en la falla Calaveras, perteneciente al sistema de fallas de San Andrés y su hipocentro se localizó a 8.7 km de profundidad.

La falla Calaveras es una de las fallas activas que componen el sistema de fallas San Andrés (ver ilustración 30), que corresponde al límite transformante de las placas Norteamericana y Pacífico en la región de la Bahía San Francisco.

Tanto la falla Calaveras como la de San Andrés tienen un mecanismo focal strike-slip dextral. Ambas fallas difieren en un ángulo de 10° con respecto a su orientación, siendo la falla San Andrés paralela al límite de las placas. (Hoose, 1987)

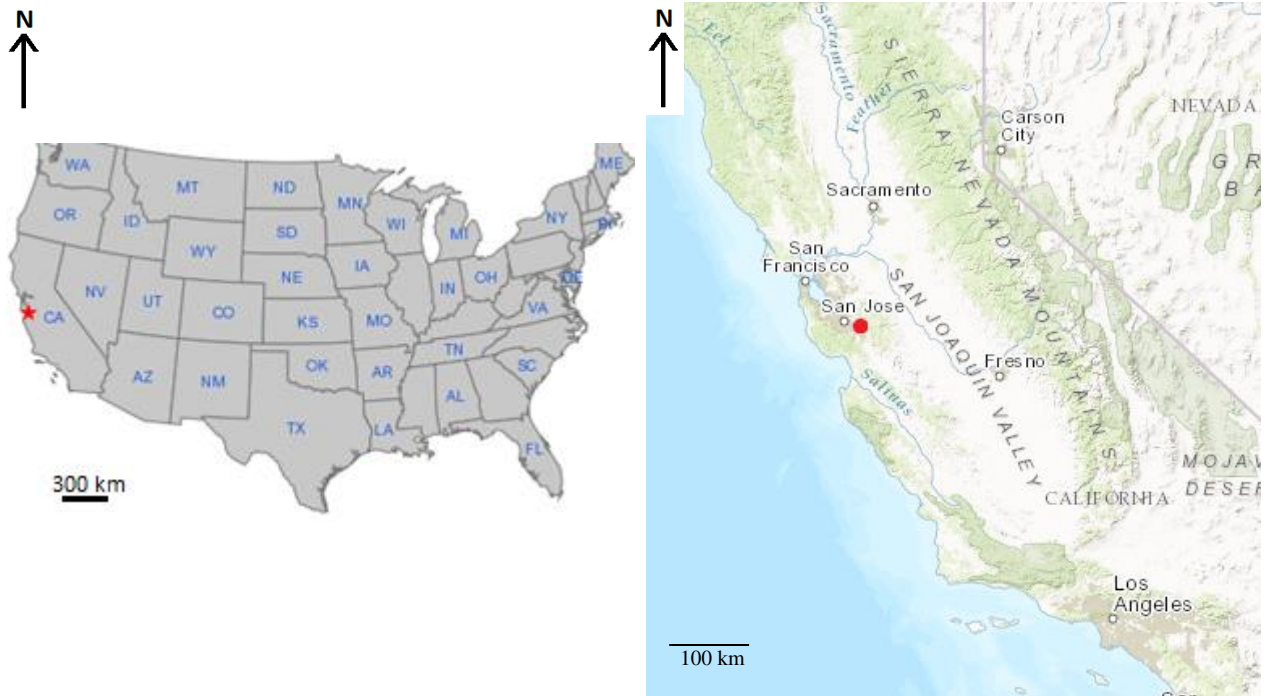


Ilustración 28: (izq): Mapa de Estados Unidos. Ubicación de la localidad de Morgan Hill, en el estado de California. (der): Ubicación del epicentro del sismo en las coordenadas 37°19.02'N, 121°40.89'W (círculo rojo), a 20 km al este de la ciudad de San José, California. Fuente: www.eachtown.com y USGS

En la siguiente tabla (ver tabla 13) se encuentran los parámetros principales del sismo ingresado.

Tabla 13: Parámetros principales del terremoto Morgan Hill. Fuente: PEER Ground Motion.

Parámetro	Valor
Mw	6.2
Hipocentro	8.7 [km]
Mecanismo focal	Strike-slip dextral

Los criterios de elección de este sismo para el modelamiento, que se asemejan al terremoto de Punta Cola, son:

- Mw igual a 6.2
- Mecanismo focal *strike slip dextral*
- Profundidad hipocentral menor a 10 km

De este sismo, se ingresan los datos de velocidad de 3 estaciones, que se encuentran a diferentes distancias del epicentro y cuyos parámetros se muestran en la tabla 14

Tabla 14: Parámetros principales de los registros de estaciones del sismo Morgan Hill. Fuente: PEER Ground Motion.

Estación	Parámetro	Valor	Unidad	Distancia al epicentro (km)	Duración del registro (s)
Anderson Dam (AND)	PGA eje x	0.423	g	17	28
	PGA eje y	0.283	g		
	PGA eje z	0.175	g		
	Ia eje x	0.681	m/s		
	Ia eje y	0.844	m/s		
	Ia eje z	0.288	m/s		
	V_s^{30}	488.77	m/s		
Capitola (CAP)	PGA eje x	0.142	g	45	29
	PGA eje y	0.094	g		
	PGA eje z	0.044	g		
	Ia eje x	0.232	m/s		
	Ia eje y	0.159	m/s		
	Ia eje z	0.032	m/s		
	V_s^{30}	288.62	m/s		
Gilroy Array #7 (GMR)	PGA eje x	0.113	g	38	29
	PGA eje y	0.190	g		
	PGA eje z	0.348	g		
	Ia eje x	0.203	m/s		
	Ia eje y	0.282	m/s		
	Ia eje z	0.160	m/s		
	V_s^{30}	333.85	m/s		

En todos los modelamientos dinámicos, se compilan 25 segundos adicionales a la duración real del sismo. Esta medida es para asegurar que el movimiento en el talud se haya manifestado en su totalidad y que no ocurran desplazamientos remanentes que puedan ser cortados por la duración del sismo.

En la siguiente imagen, se muestran las ubicaciones de las estaciones respecto al epicentro (ver ilustración 29).

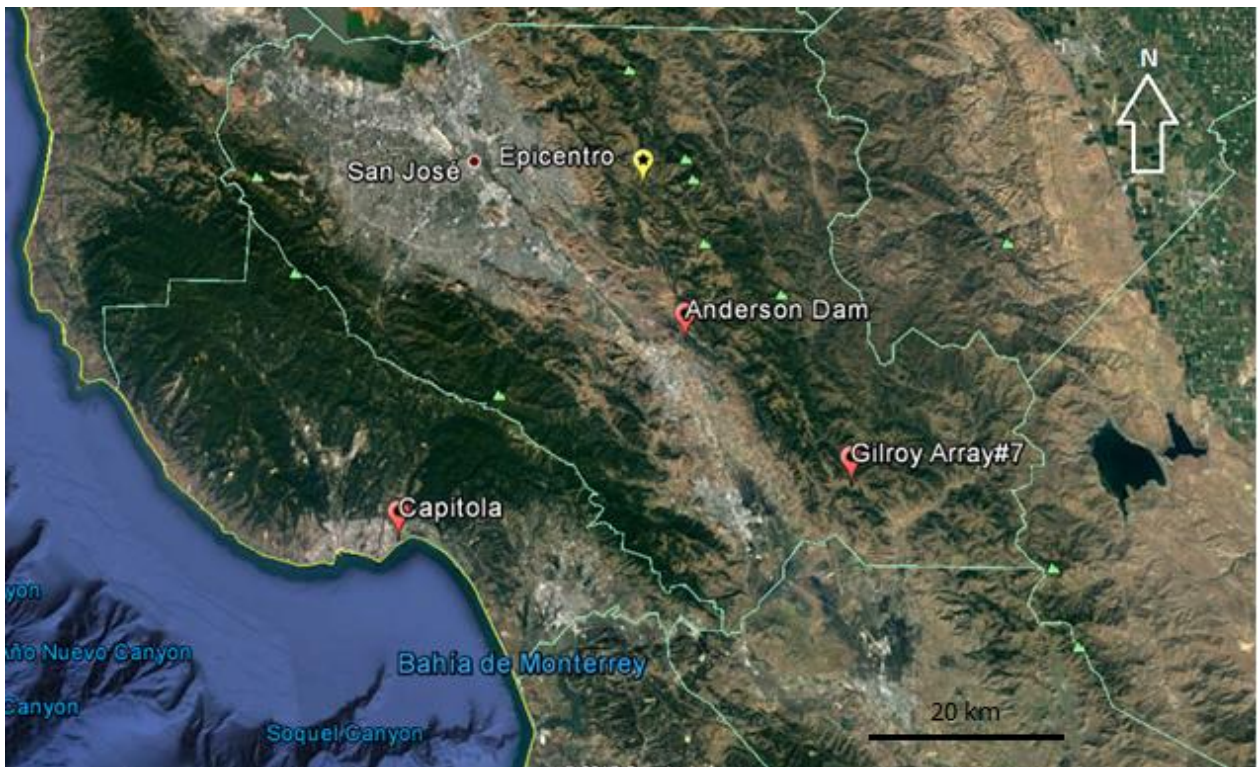


Ilustración 29: Localización de las estaciones usadas en este estudio respecto al epicentro del terremoto de Morgan Hill. Fuente: Google Earth

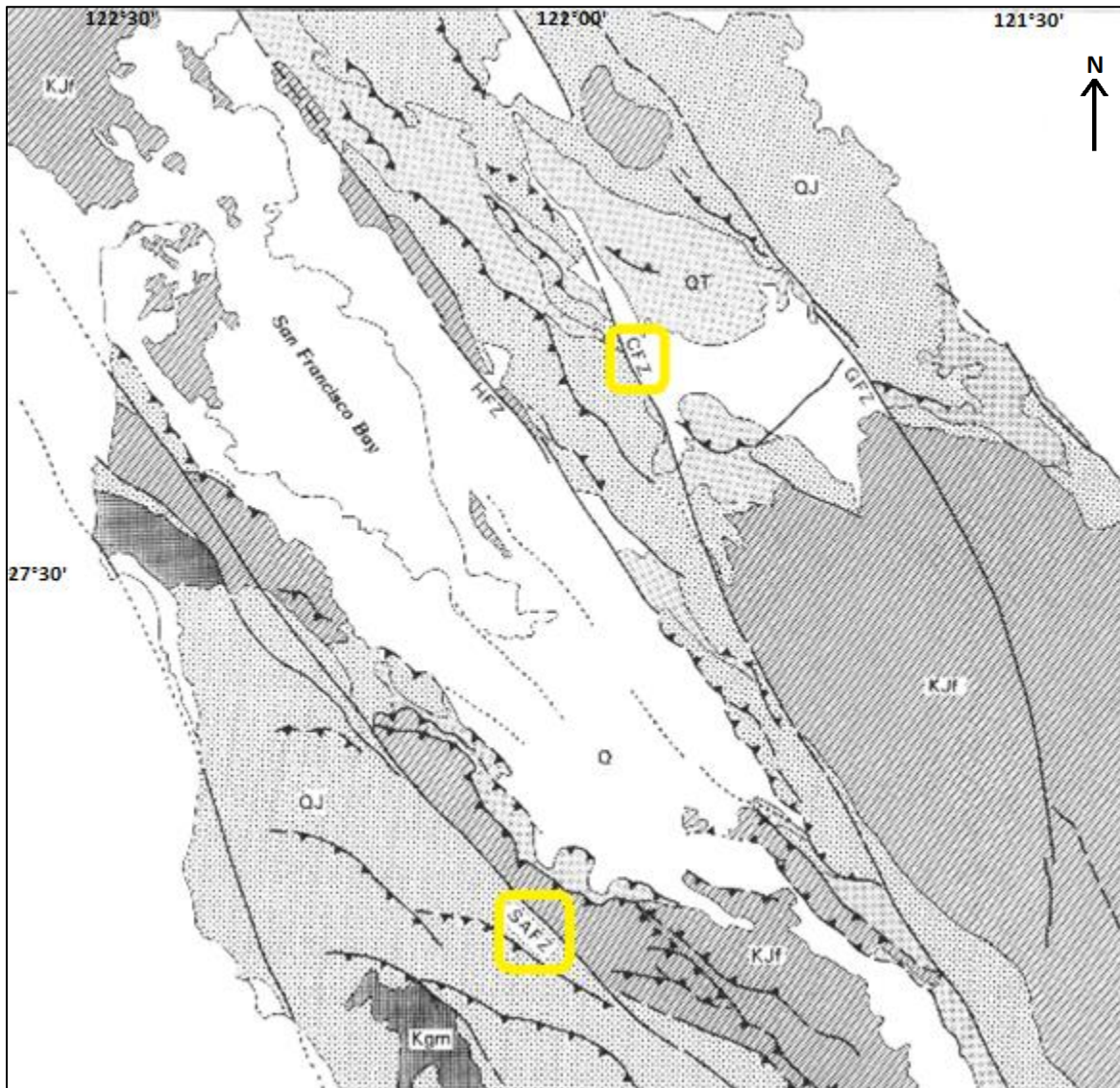


Ilustración 30 : Ubicación de la falla Calaveras dentro del sistema de fallas San Andrés. CFZ: Falla Calaveras, SAFZ: Falla San Andrés. Fuente: Hoose, 1987

4 Resultados

4.1 Caso estático

Los modelos fueron analizados bajo el modelo constitutivo Mohr-Coulomb tanto para el macizo rocoso como las discontinuidades, estas últimas distribuidas aleatoriamente en el talud, concentradas principalmente en las zonas de mayor altura, el escarpe y la HFZ. Los códigos de los análisis estáticos se encuentran detallados en el Anexo C. Ambos modelos fueron compilados durante 36 segundos en donde la única fuerza que actúa es la gravitacional. Como se menciona anteriormente, el modelo estático se realiza para comprobar la respuesta coherente del talud modelado, es decir, que no presente deslizamientos y se mantenga estable, tal como sucede en el caso real.

Los puntos de control considerados tanto para los modelamientos estáticos como los dinámicos, son los que se muestran en la ilustración a continuación (ver ilustración 31 b). Estos puntos de control considera a la zona HFZ, la falla Punta Cola (discontinuidades mayores) y va bajando en altura hasta llegar al punto 9, cercano a la base del talud. El punto 8 se usará para analizar el comportamiento fuera de la zona de remoción.

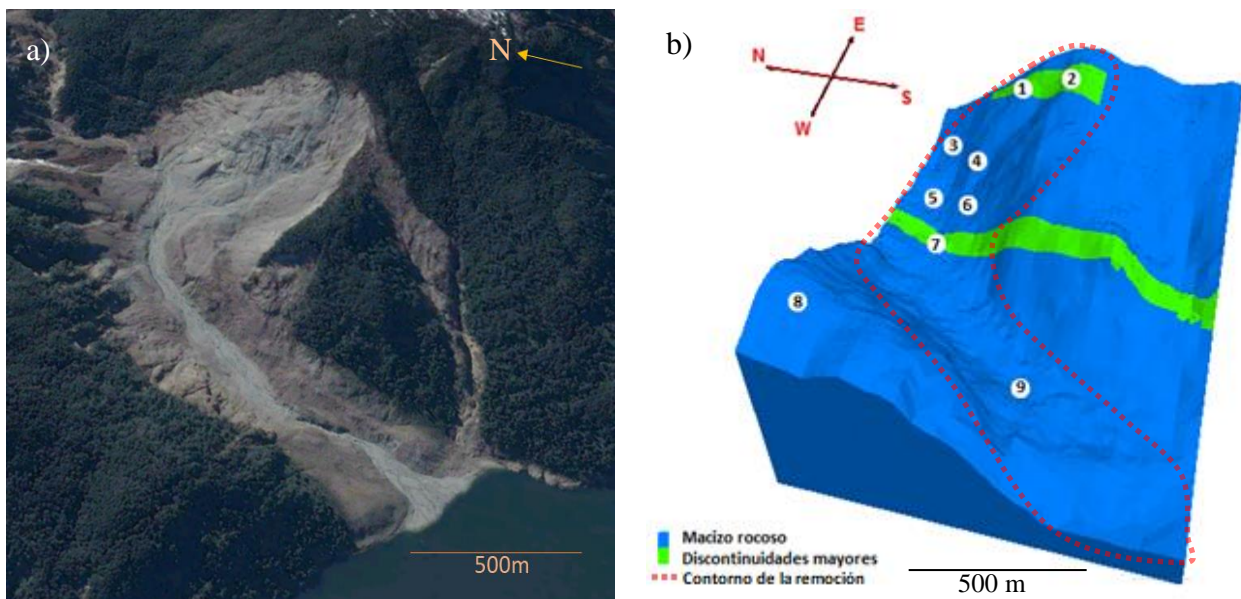


Ilustración 31: Deslizamiento de Punta Cola. a): Imagen satelital del deslizamiento. Fuente: Google Earth. 2013. b): Modelo de Punta Cola realizado en este trabajo junto a los puntos de control considerados en los modelamientos. El contorno de la remoción es aproximado y se realizó en base de observaciones de imágenes satelitales.

4.1.1 Modelo 1

Luego de compilar 36 segundos el modelo, el resultado final, como contornos de desplazamiento, es el que se observa en la ilustración 32.

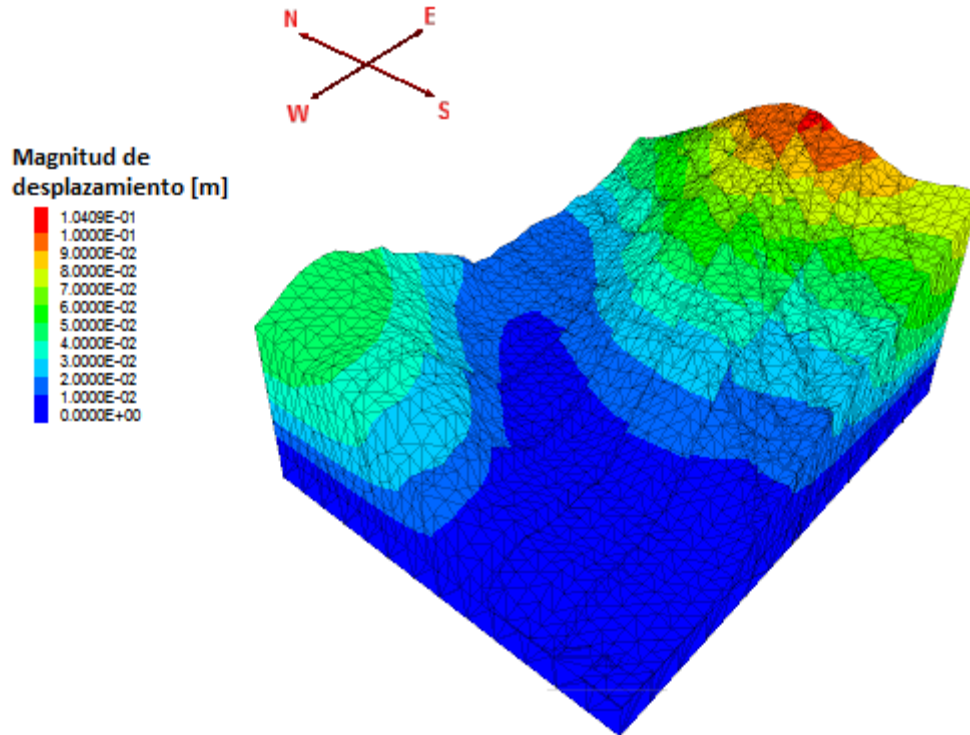


Ilustración 32: Contornos de desplazamiento. Caso estático Modelo 1.

El criterio de estabilidad utilizado en este trabajo es el balance de fuerzas, que corresponde a la razón de las fuerzas en desequilibrio dentro del modelo (Vejar, 2016). El estado de equilibrio estará dado cuando el vector resultante de fuerza neta del centroide de cada elemento en el modelo es cero. Para efectos de este estudio, se considera el equilibrio estático cuando el balance de fuerzas es menor a 10^{-5} . Los resultados obtenidos para el Modelo 1 estático se muestran en la siguiente imagen (ver ilustración 33).

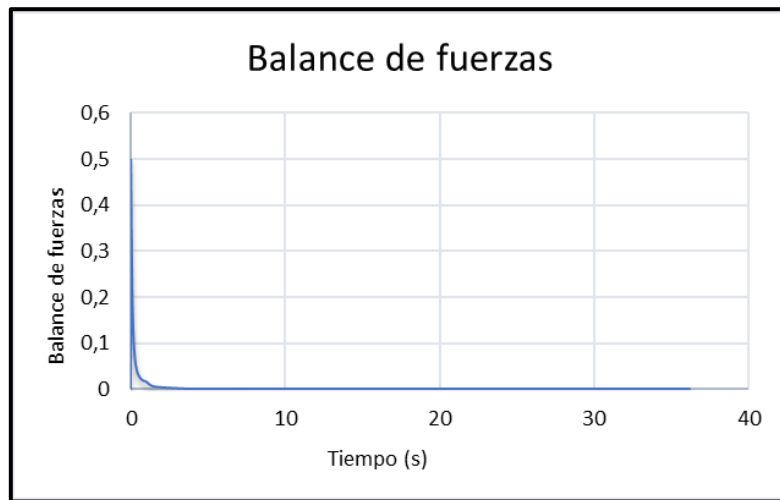


Ilustración 33: Balance de fuerzas en el tiempo. Modelo 1

Otro criterio utilizado para conocer la estabilidad del talud es el desplazamiento neto de cada punto de control. El equilibrio estático se dará cuando el movimiento de cada punto de la zona de estudio converja y se estabilice. En la ilustración 34, se muestran estos desplazamientos netos de los puntos de control analizados.

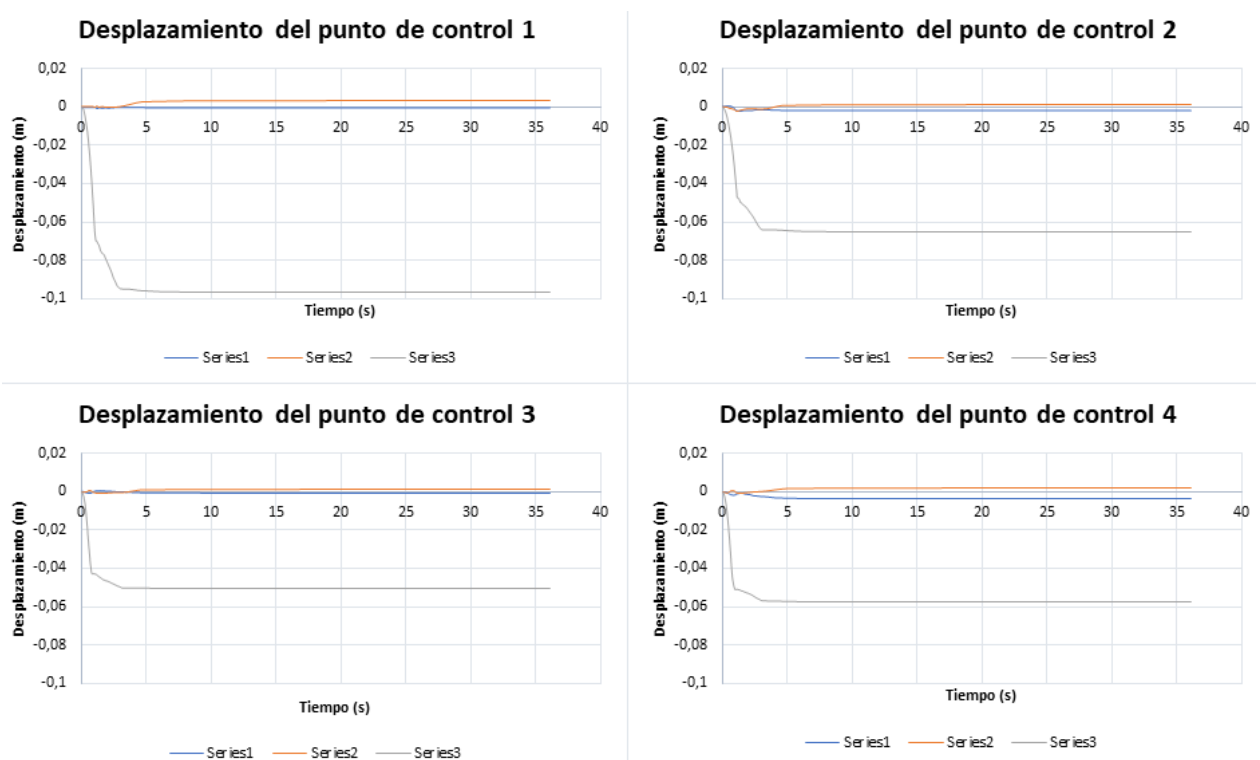


Ilustración 34: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo del Modelo 1. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).

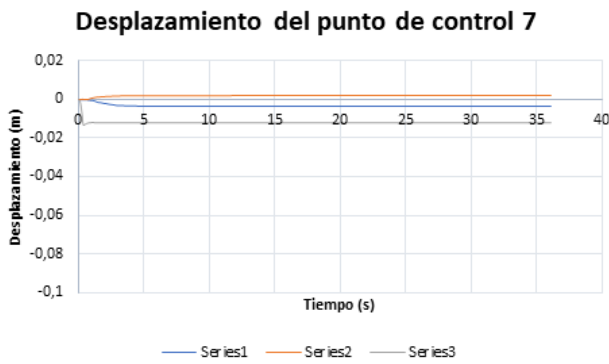


Ilustración 34 (continuación)

4.1.2 Modelo 2

Al igual que en el Modelo 1, se muestran los contornos de desplazamiento al finalizar los 36 segundos de modelamiento (ver ilustración 35), el balance de fuerzas (ver ilustración 36) y los desplazamientos de cada punto de control en el tiempo de compilación (ver ilustración 37).

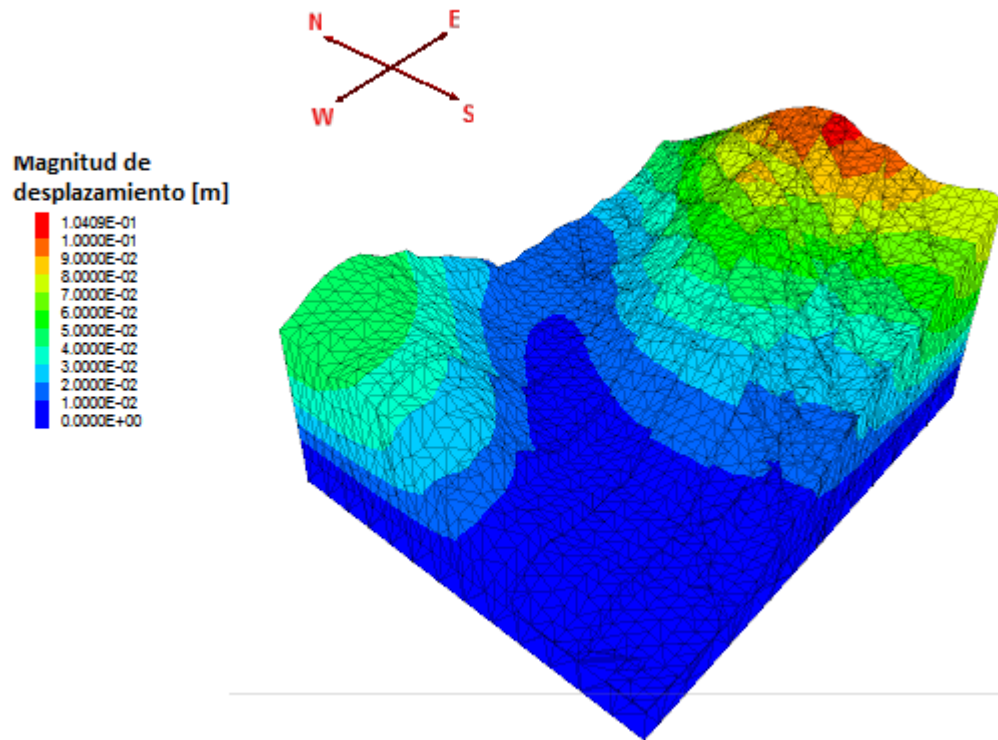


Ilustración 35: Contornos de desplazamiento. Caso estático Modelo 2.

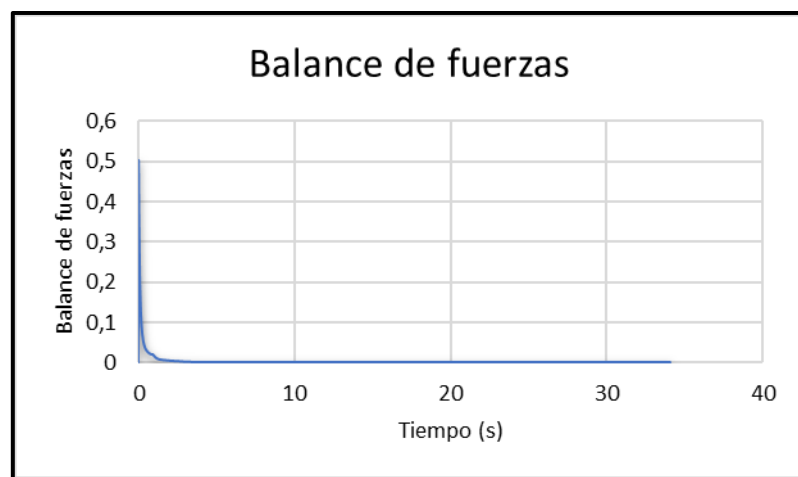


Ilustración 36: Balance de fuerzas en el tiempo. Modelo 2

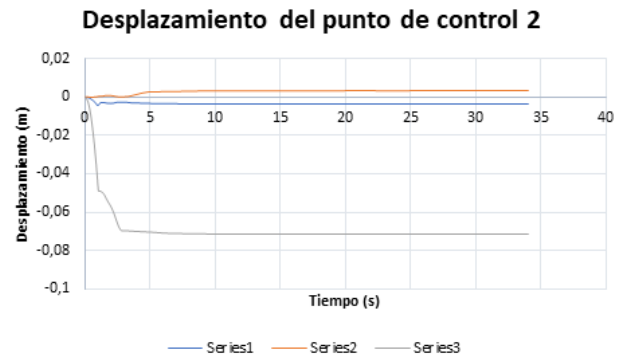
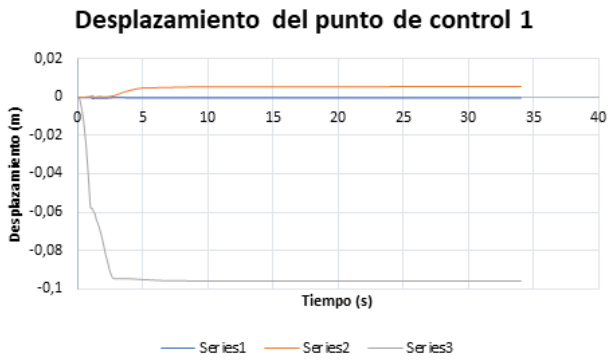


Ilustración 37: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo del Modelo 2. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).

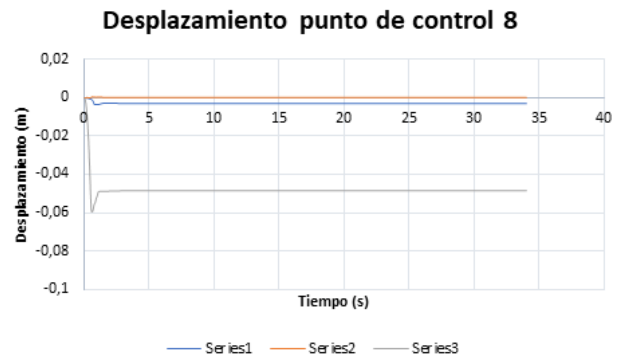


Ilustración 37 (continuación)

4.2 Caso dinámico

4.2.1 Terremoto de Parkfield

4.2.1.1 Modelo 1

A continuación, en la ilustración 38, se muestra la geometría de estudio con los contornos de desplazamiento al finalizar el modelamiento, que tuvo una duración de 48 segundos (el sismo tuvo una duración de 21,3 segundos). En la ilustración 39 se observan los gráficos de desplazamientos con respecto al tiempo de los puntos de control. En esta ocasión no se realiza el análisis del balance de fuerzas, ya que este modelo de por sí es inestable.

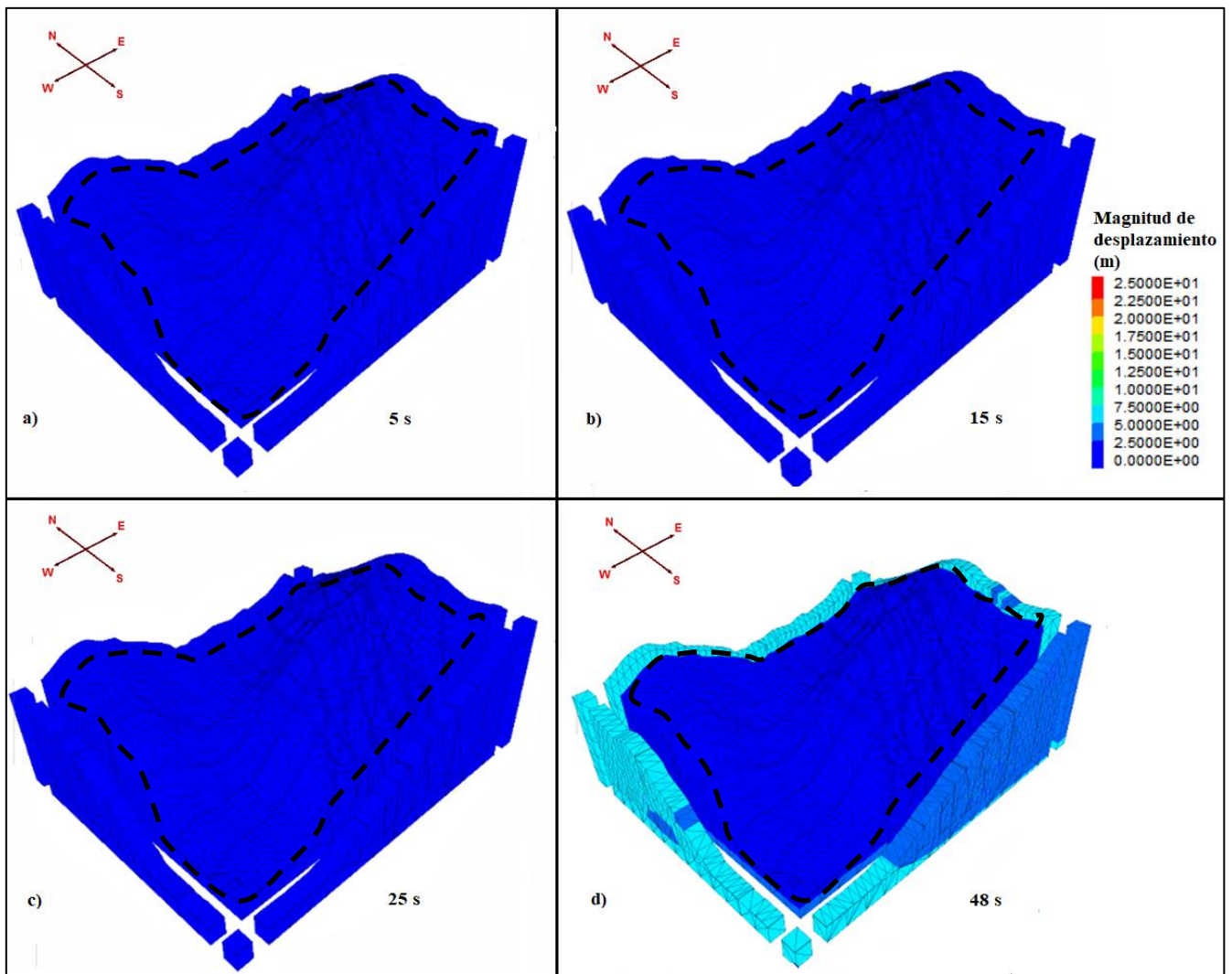


Ilustración 38: Contornos de desplazamiento a los 5, 15, 25 y 48 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Caso dinámico con input del terremoto Parkfield. Modelo 1 con escala fija de máximo 25 m. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.

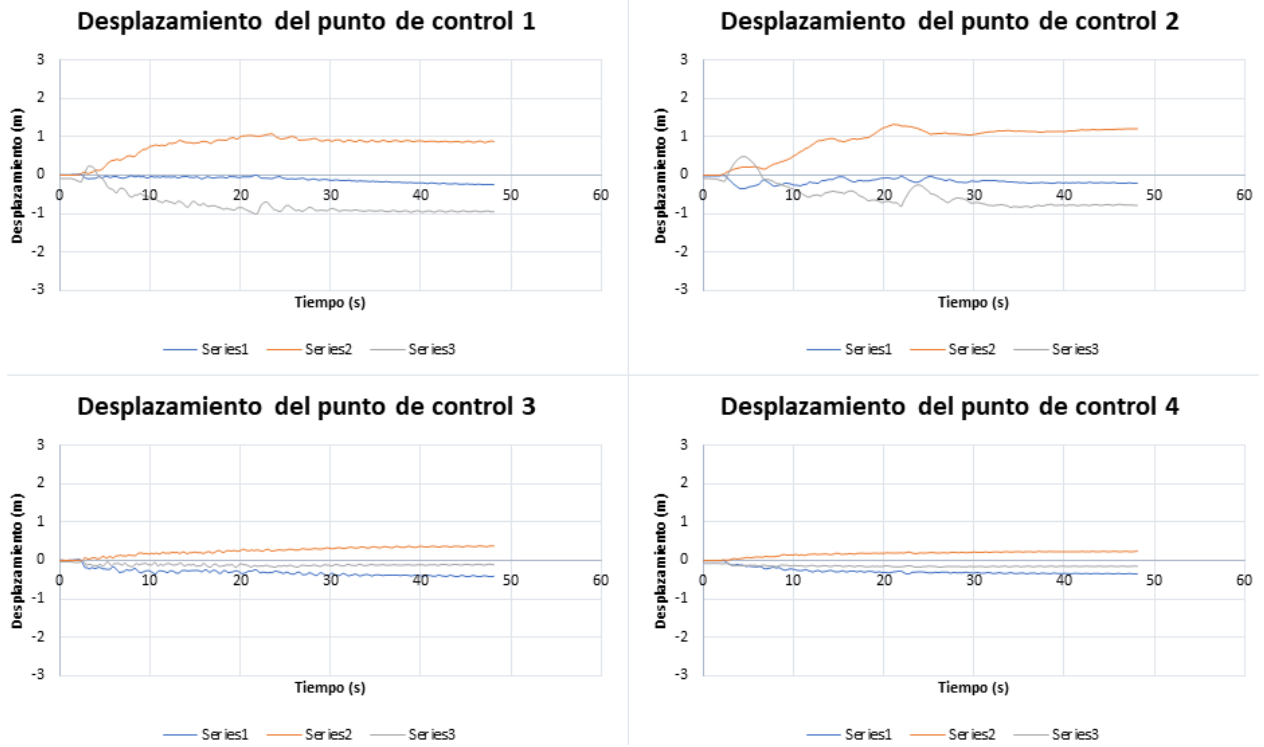


Ilustración 39: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 1 dinámico con input de sismo Parkfield.

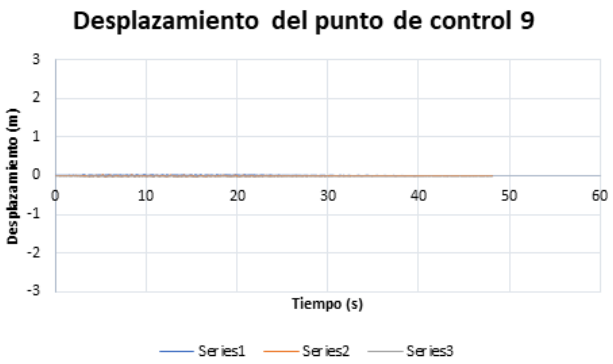
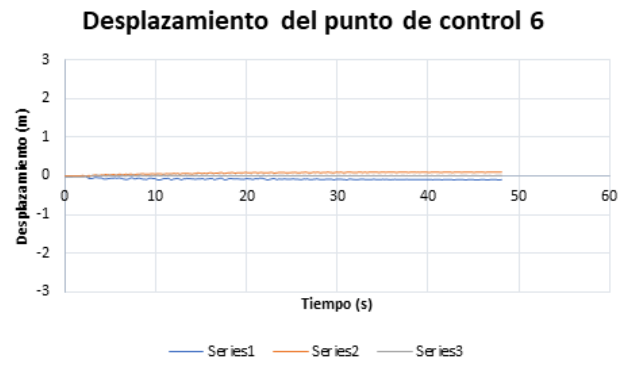
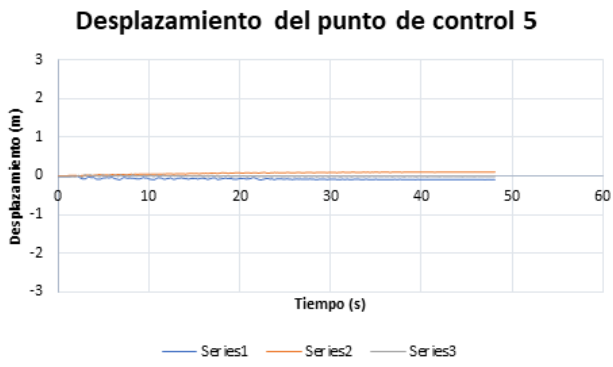


Ilustración 39 (continuación)

En la siguiente tabla (ver tabla 15) se muestran los valores de PGA (*Peak Ground Acceleration*) y el desplazamiento total de cada punto de control analizado.

Tabla 15: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 1 dinámico con el sismo Parkfield de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).

Punto de control	Componente	PGA (g)	PGA (m/s ²)	Factor de amplificación	Desplazamiento (m)
1	E-W (x)	0.39	3.83	0.72	-0.23
	N-S (y)	0.39	3.81	0.78	0.88
	UP (z)	0.53	5.17	1.51	-0.95
2	E-W (x)	0.43	4.21	0.85	-0.20
	N-S (y)	0.61	6.00	1.14	1.22
	UP (z)	0.60	5.92	1.73	-0.80
3	E-W (x)	0.62	6.1	1.24	-0.41
	N-S (y)	0.66	6.43	1.22	0.38
	UP (z)	0.86	8.47	2.48	-0.12
4	E-W (x)	0.36	3.54	0.72	-0.35
	N-S (y)	0.39	3.78	0.72	0.24
	UP (z)	0.26	2.59	0.76	-0.13
5	E-W (x)	0.36	3.58	0.73	-0.02
	N-S (y)	0.21	2.06	0.40	0.09
	UP (z)	0.39	3.83	1.12	-0.01
6	E-W (x)	0.37	3.65	0.74	-0.09
	N-S (y)	0.28	2.76	0.52	0.09
	UP (z)	0.36	3.52	1.03	0.00
7	E-W (x)	0.44	4.36	0.88	0.03
	N-S (y)	0.36	3.52	0.67	0.03
	UP (z)	0.50	4.88	1.43	-0.01
8	E-W (x)	1.35	13.26	2.69	0.09
	N-S (y)	0.41	4.02	0.76	0.03
	UP (z)	1.27	12.41	3.63	-0.06
9	E-W (x)	0.65	6.36	1.29	-0.01
	N-S (y)	0.86	8.45	1.60	0.00
	UP (z)	0.80	7.83	2.29	0.00

4.2.1.2 Modelo 2

En la siguiente ilustración (ver ilustración 40) se muestran los contornos de desplazamiento del Modelo 2. En la ilustración 41 se pueden observar los gráficos de desplazamiento de cada punto de control con respecto al tiempo.

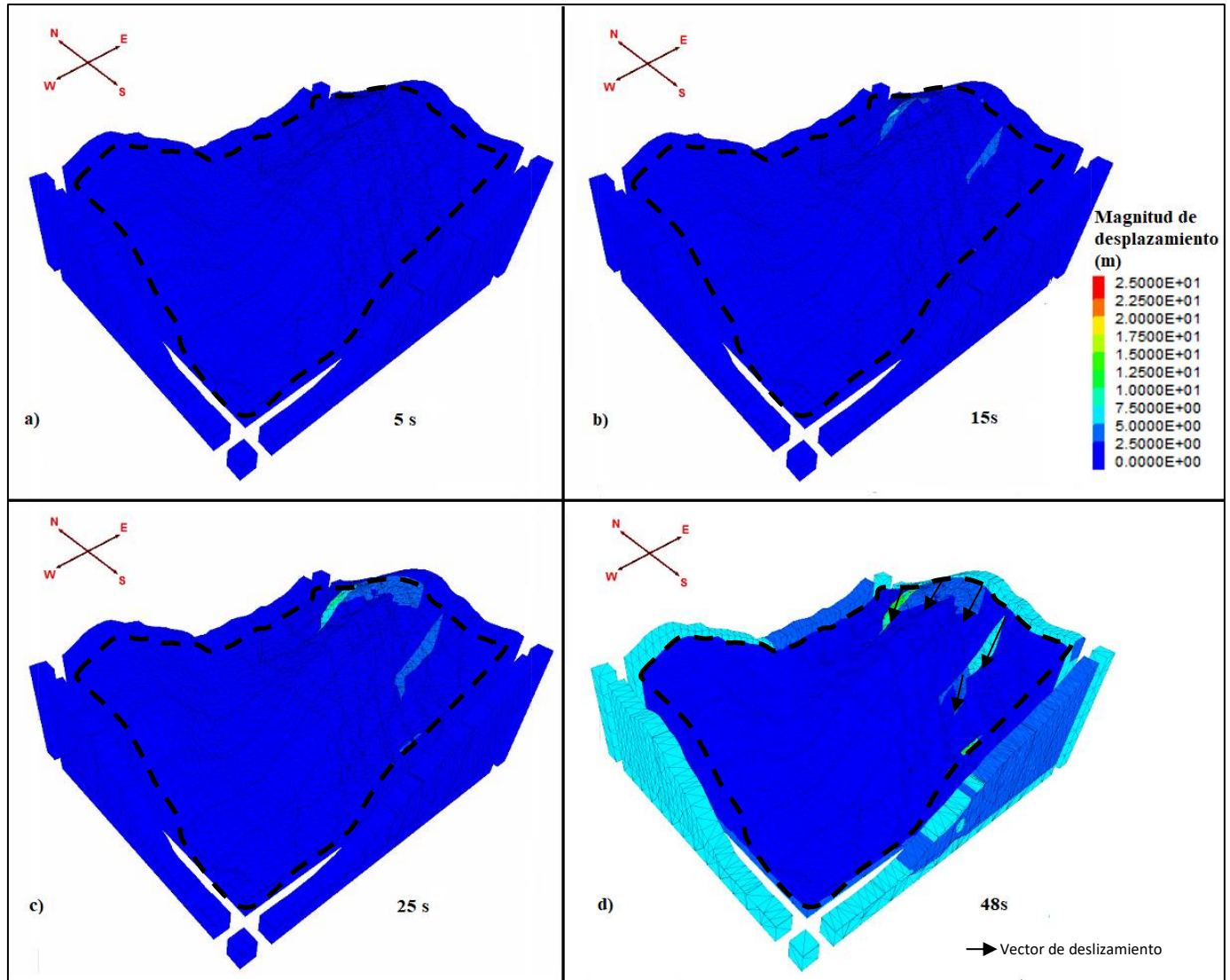


Ilustración 40: Caso dinámico con input del terremoto Parkfield. Modelo 2. Contornos de desplazamiento a los 5, 15, 25 y 48 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.

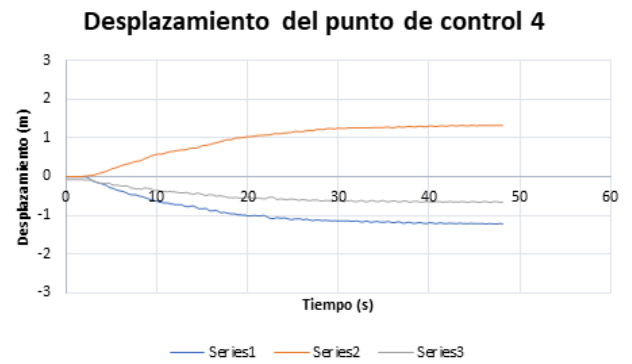
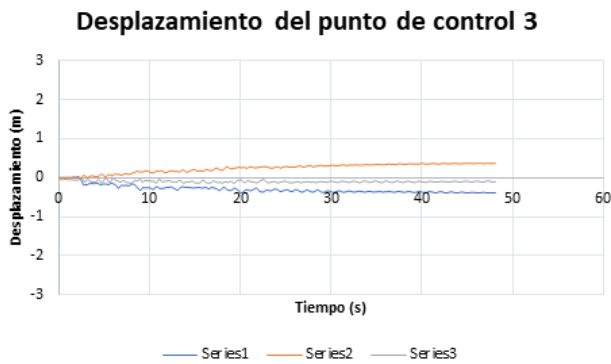
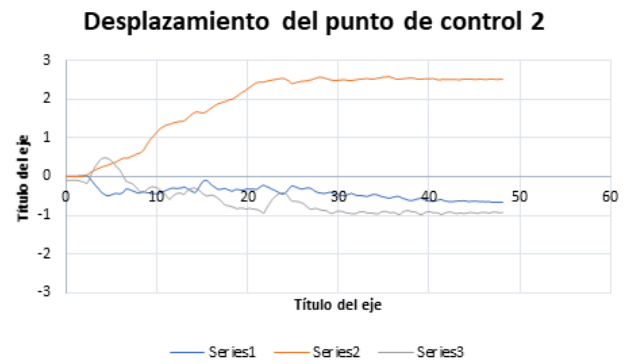
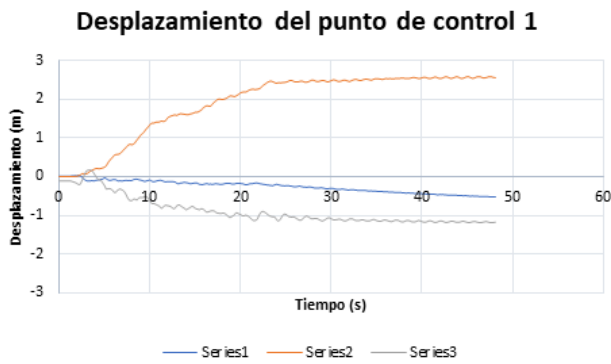


Ilustración 41: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 2 dinámico con input de sismo Parkfield.

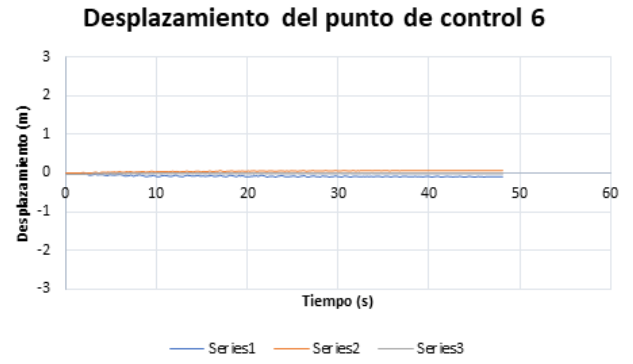
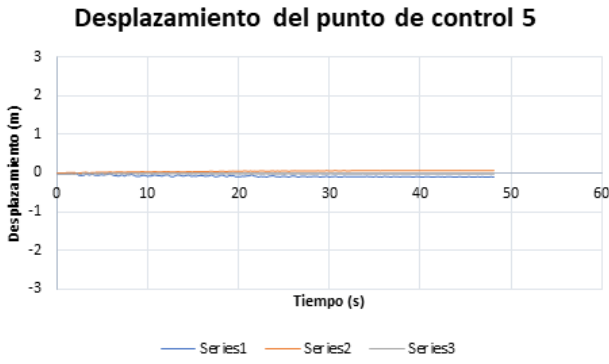


Ilustración 41 (continuación)

En la siguiente tabla (ver tabla 16) se muestran los valores de PGA (*Peak Ground Acceleration*) y el desplazamiento total de cada punto de control analizado.

Tabla 16: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 2 dinámico con el sismo Parkfield de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).

Punto de control	Componente	PGA (g)	PGA (m/s ²)	Factor de amplificación	Desplazamiento (m)
1	E-W (x)	0.46	4.47	0.91	-0.53
	N-S (y)	0.37	3.65	0.69	2.58
	UP (z)	0.78	7.70	2.30	-1.18
2	E-W (x)	0.47	4.64	0.94	-0.70
	N-S (y)	0.33	3.26	0.62	2.51
	UP (z)	0.56	5.50	1.61	-0.93
3	E-W (x)	0.75	7.36	1.49	-0.39
	N-S (y)	0.83	8.19	1.55	0.38
	UP (z)	0.96	9.43	2.76	-0.01
4	E-W (x)	0.41	3.99	0.80	-1.20
	N-S (y)	0.35	3.43	0.65	1.31
	UP (z)	0.60	5.90	1.72	-0.68
5	E-W (x)	0.34	3.34	0.68	-0.1
	N-S (y)	0.23	2.28	0.43	0.08
	UP (z)	0.42	4.11	1.20	-0.01
6	E-W (x)	0.32	3.15	0.64	-0.08
	N-S (y)	0.28	2.79	0.53	0.07
	UP (z)	0.49	4.85	1.42	0.00
7	E-W (x)	0.75	7.39	1.50	-0.01
	N-S (y)	0.85	8.36	1.59	0.16
	UP (z)	1.08	10.57	3.09	-0.03
8	E-W (x)	1.44	14.16	2.87	-0.09
	N-S (y)	0.41	3.99	0.76	0.00
	UP (z)	1.14	11.88	3.47	-0.06
9	E-W (x)	0.67	6.57	1.33	0.00
	N-S (y)	0.87	8.58	1.63	0.00
	UP (z)	0.78	7.63	2.23	0.00

4.2.2 Terremoto de Morgan Hill

4.2.2.1 Estación AND, Modelo 1

El sismo presenta registros de velocidades durante un tiempo de 28 segundos. Para efectos de este estudio, se realizó una compilación de 53 segundos en todas las estaciones. A continuación, en la ilustración 42, se muestran los contornos de desplazamiento para el Modelo 1. En la ilustración 43, se presentan los gráficos que indican el desplazamiento de los puntos de control.

En la tabla 17, se muestran los valores de PGA y desplazamiento total de cada punto de control analizado.

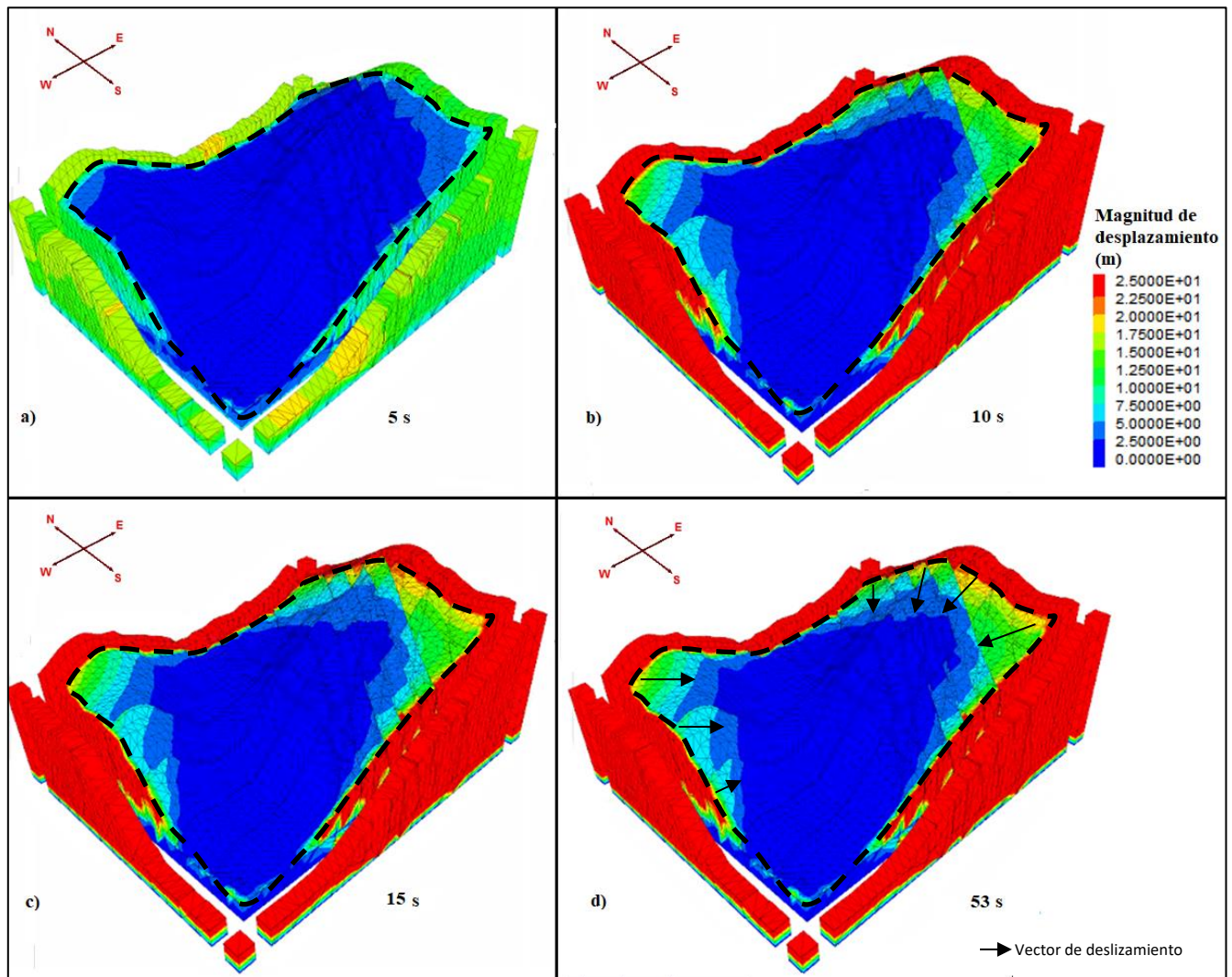


Ilustración 42: Caso dinámico con input del terremoto Morgan Hill, estación AND. Modelo 1. Contornos de desplazamiento a los 5, 10, 15 y 53 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El desplazamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.

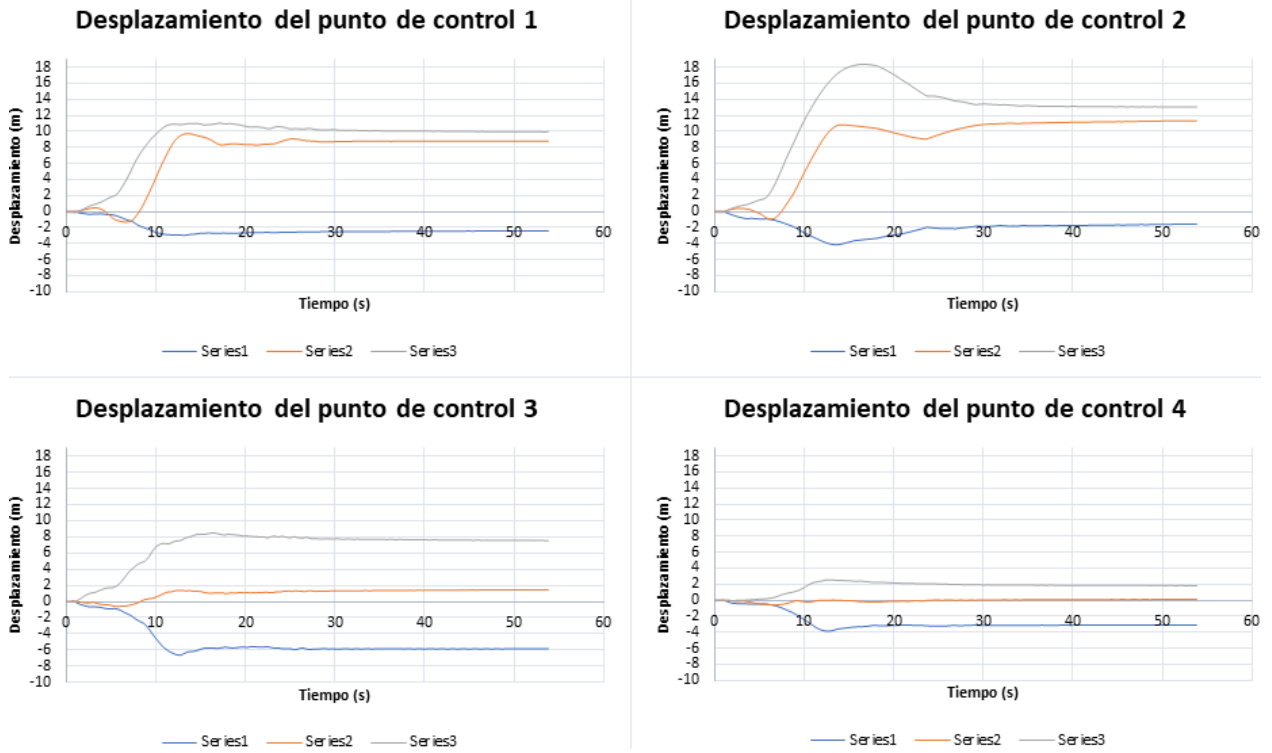
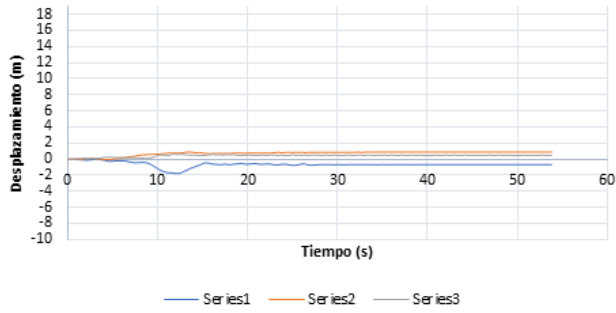
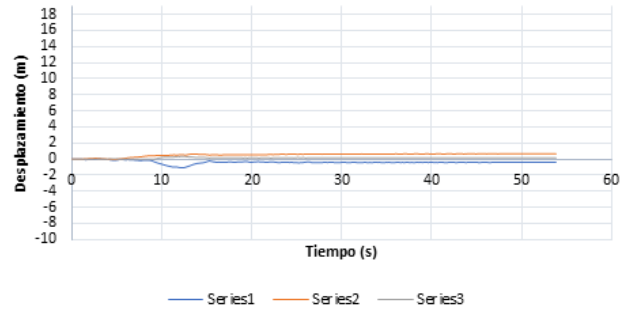


Ilustración 43: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 1 dinámico con input de sismo Morgan Hill, estación AND.

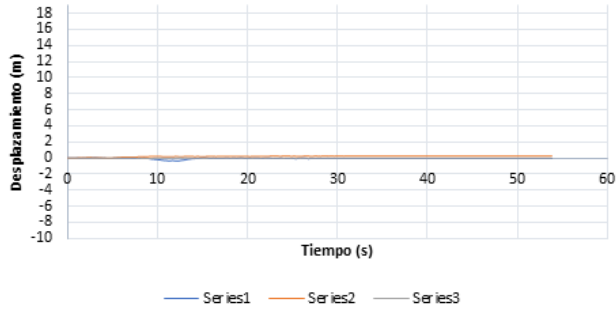
Desplazamiento del punto de control 5



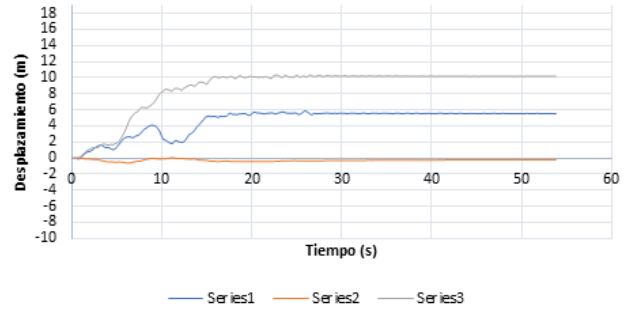
Desplazamiento del punto de control 6



Desplazamiento del punto de control 7



Desplazamiento del punto de control 8



Desplazamiento del punto de control 9

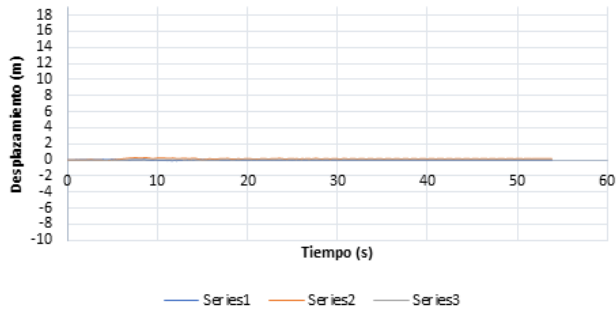


Ilustración 43 (continuación)

Tabla 17: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 1 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación AND de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).

Punto de control	Componente	PGA (g)	PGA (m/s ²)	Factor de amplificación	Desplazamiento (m)
1	E-W (x)	0.27	2.64	0.64	-2.40
	N-S (y)	0.20	1.92	0.71	8.79
	UP (z)	0.30	2.98	1.71	9.94
2	E-W (x)	0.72	7.1	1.70	-1.58
	N-S (y)	0.68	6.67	2.40	11.32
	UP (z)	0.92	9.02	5.26	13.06
3	E-W (x)	0.28	2.75	0.66	-5.86
	N-S (y)	0.27	2.66	0.95	1.46
	UP (z)	0.25	2.43	1.43	7.54
4	E-W (x)	0.15	1.51	0.35	-3.09
	N-S (y)	0.16	1.57	0.57	0.10
	UP (z)	0.14	1.34	0.80	1.83
5	E-W (x)	0.19	1.91	0.45	-0.70
	N-S (y)	0.24	2.39	0.58	0.89
	UP (z)	0.33	3.24	1.89	0.47
6	E-W (x)	0.14	1.41	0.33	-0.40
	N-S (y)	0.14	1.41	0.49	0.65
	UP (z)	0.16	1.53	0.91	0.15
7	E-W (x)	0.15	1.47	0.35	-0.05
	N-S (y)	0.25	2.46	0.88	0.23
	UP (z)	0.16	1.54	0.91	0.02
8	E-W (x)	0.47	4.63	1.11	5.53
	N-S (y)	0.45	4.41	1.60	-0.21
	UP (z)	0.97	9.55	5.54	10.16
9	E-W (x)	0.15	1.43	0.35	-0.01
	N-S (y)	0.17	1.67	0.60	0.15
	UP (z)	0.14	1.35	0.80	0.02

4.2.2.2 Estación AND, Modelo 2

Los resultados del Modelo 2 se muestran de manera análoga al Modelo 1 (ver ilustración 44, 45 y tabla 18).

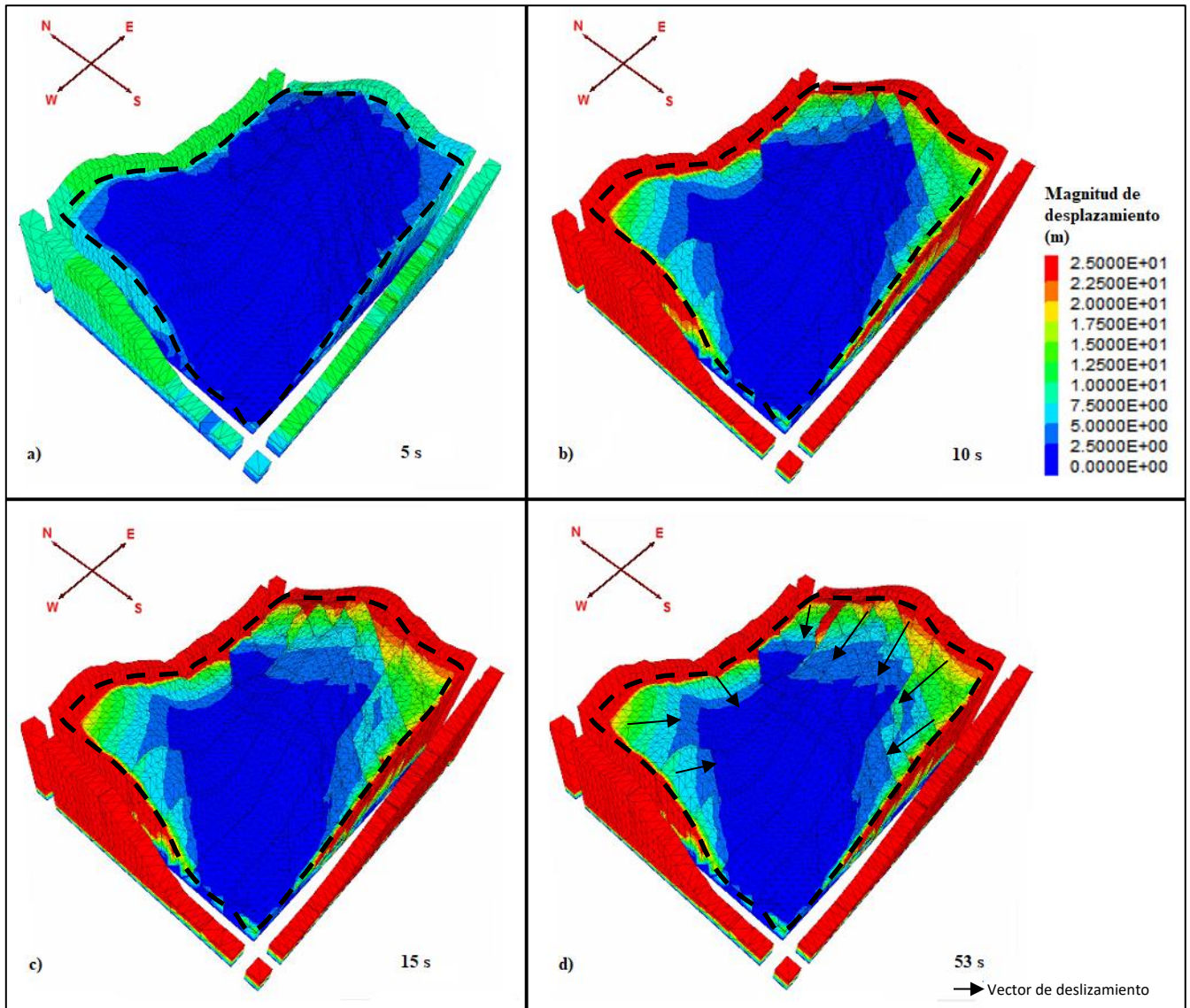


Ilustración 44: Caso dinámico con input del terremoto Morgan Hill, estación AND. Modelo 2. Contornos de desplazamiento a los 5, 10, 15 y 53 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El desplazamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.

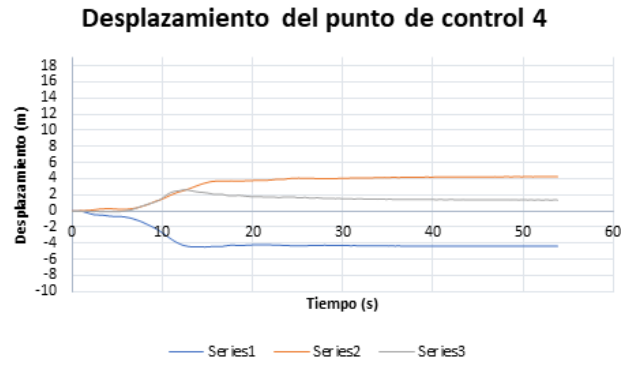
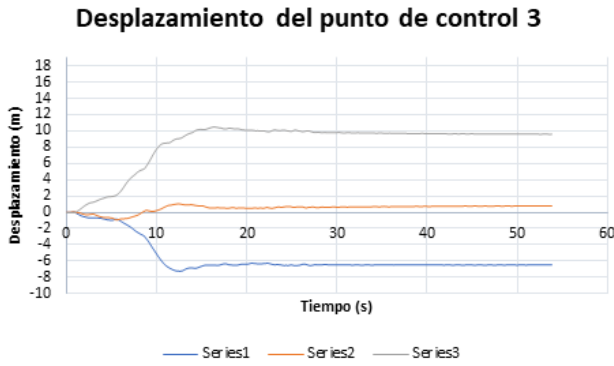
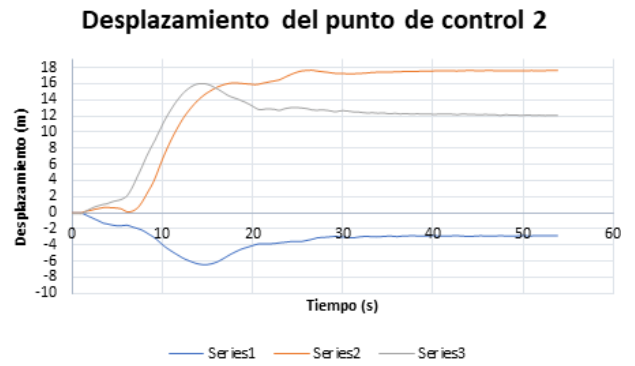
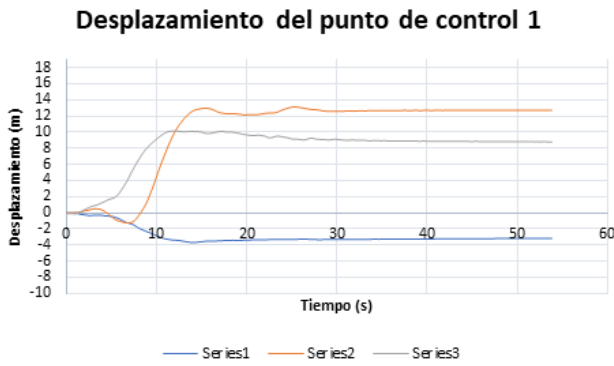
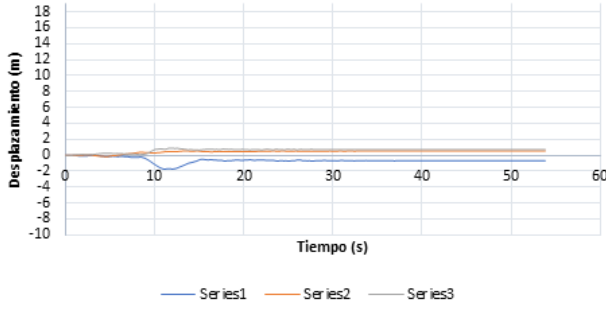
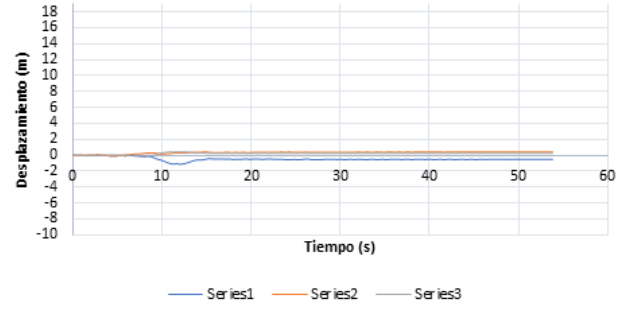


Ilustración 45: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 2 dinámico con input de sismo Morgan Hill, estación AND.

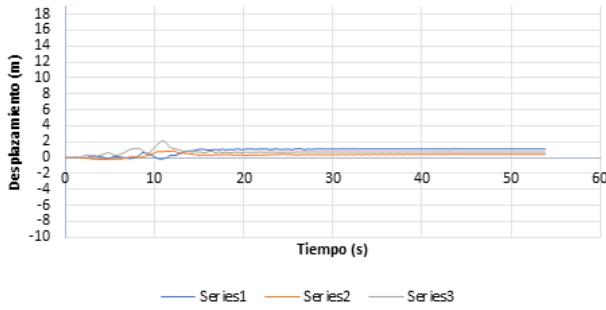
Desplazamiento del punto de control 5



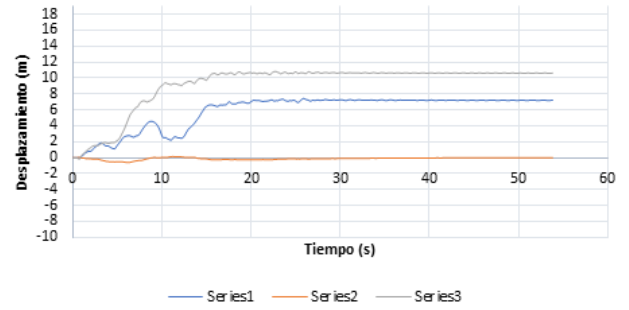
Desplazamiento del punto de control 6



Desplazamiento del punto de control 7



Desplazamiento del punto de control 8



Desplazamiento del punto de control 9

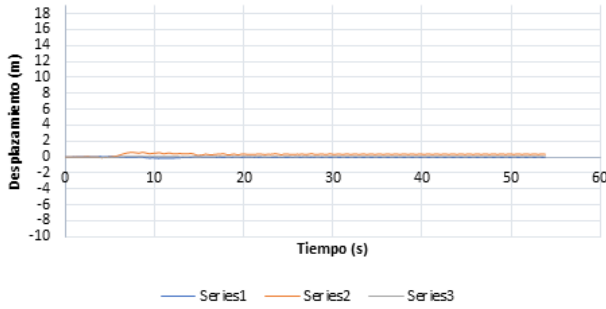


Ilustración 45 (continuación)

Tabla 18: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 2 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación AND de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).

Punto de control	Componente	PGA (g)	PGA (m/s ²)	Factor de amplificación	Desplazamiento (m)
1	E-W (x)	0.28	2.79	0.67	-3.16
	N-S (y)	0.18	1.74	0.63	12.71
	UP (z)	0.31	3.02	1.76	8.80
2	E-W (x)	1.03	10.11	2.44	-2.86
	N-S (y)	0.83	8.14	2.93	17.65
	UP (z)	1.18	11.54	6.71	12.06
3	E-W (x)	0.62	6.10	1.47	-6.48
	N-S (y)	0.45	4.37	1.57	0.77
	UP (z)	0.38	3.74	2.17	9.59
4	E-W (x)	0.15	1.43	0.34	-4.37
	N-S (y)	0.15	1.46	0.53	4.25
	UP (z)	0.19	1.86	1.08	1.35
5	E-W (x)	0.15	1.51	0.36	-0.70
	N-S (y)	0.29	2.88	1.04	0.55
	UP (z)	0.43	4.20	2.44	0.70
6	E-W (x)	0.16	1.56	0.38	-0.53
	N-S (y)	0.11	1.11	0.40	0.40
	UP (z)	0.29	2.83	1.65	0.24
7	E-W (x)	0.53	5.23	1.26	1.07
	N-S (y)	0.42	4.16	1.50	0.40
	UP (z)	1.43	14.03	8.16	0.70
8	E-W (x)	0.51	5.00	1.20	7.20
	N-S (y)	0.34	3.33	1.20	0.00
	UP (z)	1.07	10.51	6.11	10.62
9	E-W (x)	0.19	1.90	0.46	-0.03
	N-S (y)	0.22	2.14	0.77	0.37
	UP (z)	0.21	2.09	1.22	0.05

4.2.2.3 Estación CAP, Modelo 1

El registro de la estación CAP tuvo una duración de 29 segundos y se realizó una compilación de 53 segundos. Los resultados del Modelo 1 se exponen de manera análoga a los casos anteriores, en donde se muestran los contornos de desplazamiento, los gráficos de desplazamiento y los valores de PGA de los puntos de control (ver ilustración 46, 47 y tabla 19 respectivamente).

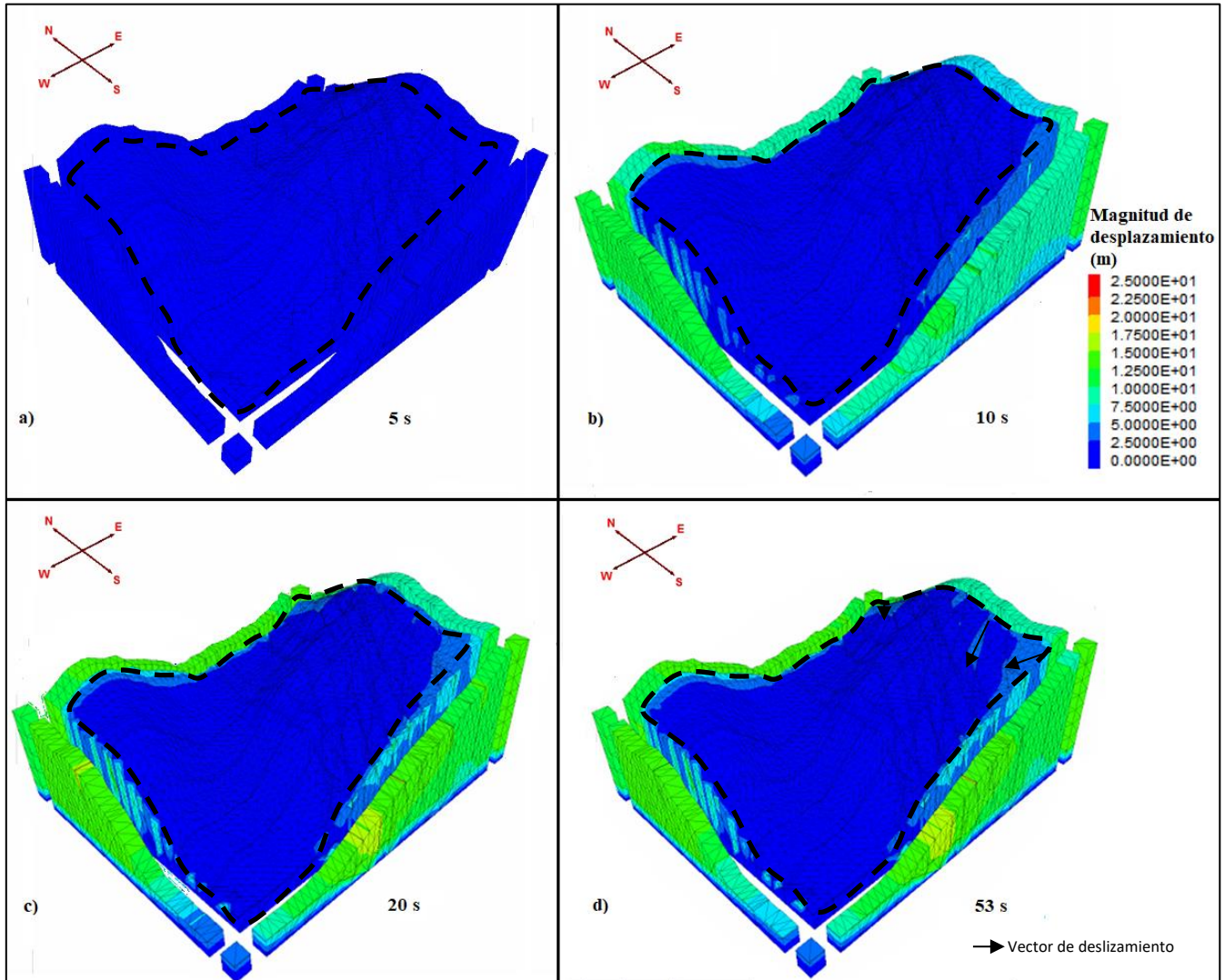


Ilustración 46: Caso dinámico con input del terremoto Morgan Hill, estación CAP. Modelo 1. Contornos de desplazamiento a los 5, 10, 20 y 53 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El desplazamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.

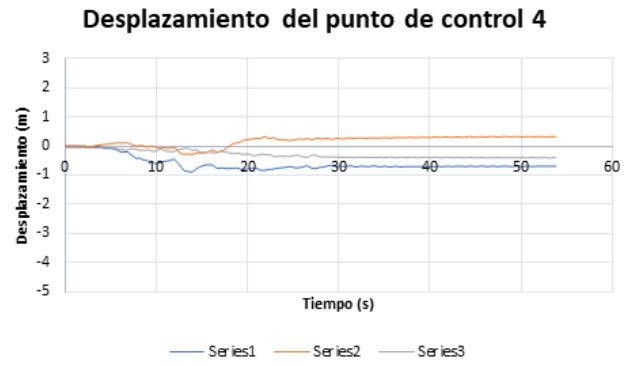
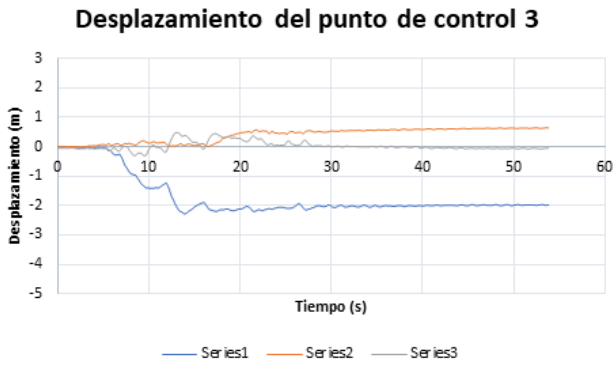
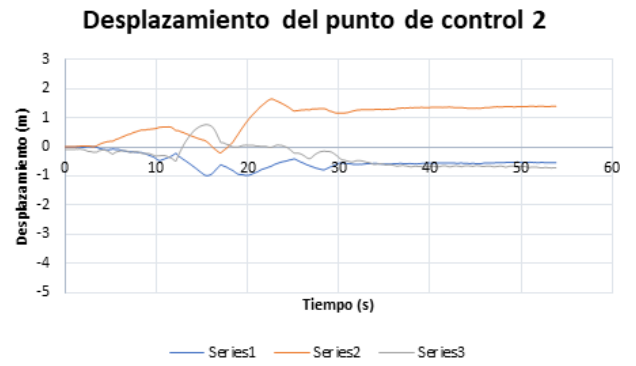
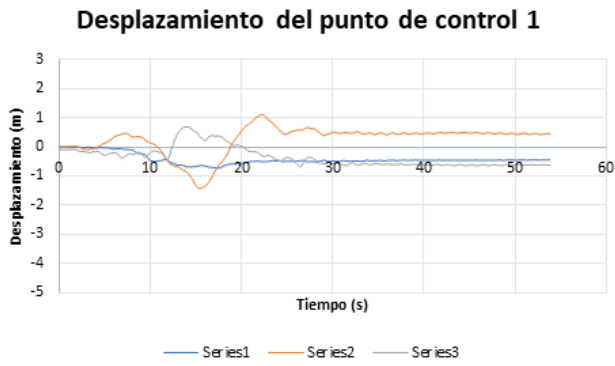


Ilustración 47: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 1 dinámico con input de sismo Morgan Hill, estación CAP.

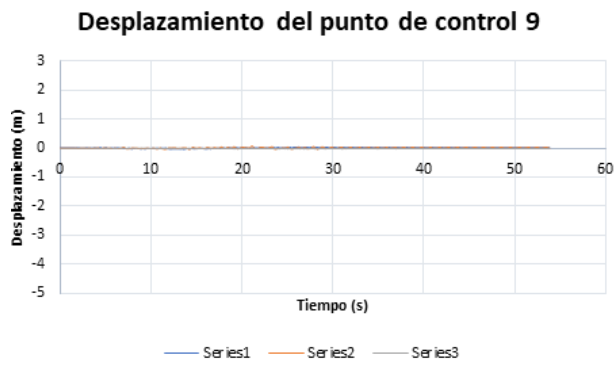
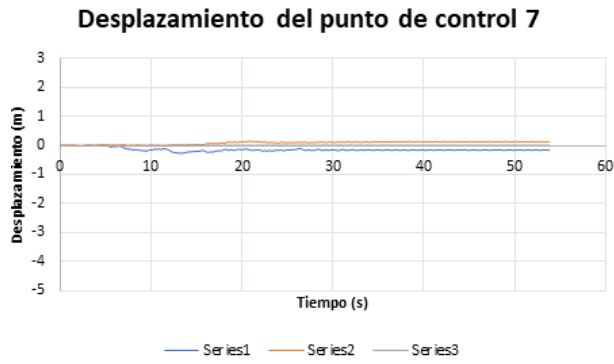
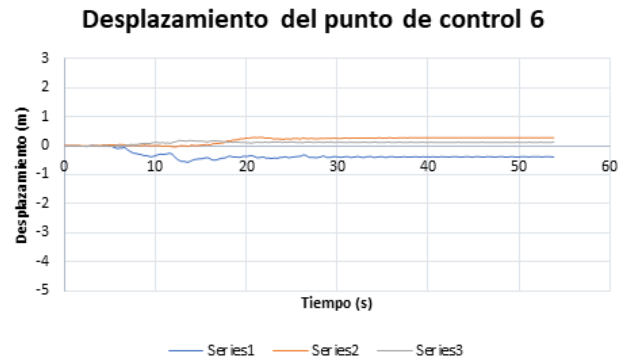
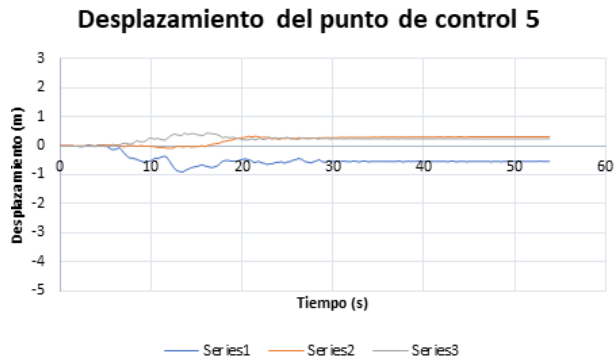


Ilustración 47 (continuación)

Tabla 19: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 1 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación CAP de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).

Punto de control	Componente	PGA (g)	PGA (m/s ²)	Factor de amplificación	Desplazamiento (m)
1	E-W (x)	0.62	6.11	4.40	-0.45
	N-S (y)	0.49	4.80	5.22	0.46
	UP (z)	1.17	11.49	26.72	-0.62
2	E-W (x)	1.56	15.30	11.01	-0.54
	N-S (y)	0.92	9.07	9.86	1.40
	UP (z)	2.05	20.07	46.67	-0.72
3	E-W (x)	0.57	5.55	3.99	-2.00
	N-S (y)	0.24	2.38	2.59	0.64
	UP (z)	0.29	2.81	6.53	-0.05
4	E-W (x)	0.17	1.65	1.19	-0.70
	N-S (y)	0.13	1.31	1.42	0.32
	UP (z)	0.12	1.21	2.81	-0.39
5	E-W (x)	0.21	2.09	1.50	-0.54
	N-S (y)	0.18	1.76	1.91	0.31
	UP (z)	0.18	1.80	4.19	0.24
6	E-W (x)	0.21	2.03	1.46	-0.38
	N-S (y)	0.16	1.61	1.75	0.27
	UP (z)	0.14	1.33	3.09	0.11
7	E-W (x)	0.14	1.36	0.98	-0.16
	N-S (y)	0.15	1.47	1.60	0.12
	UP (z)	0.21	2.02	4.70	0.01
8	E-W (x)	0.53	5.17	3.72	-2.27
	N-S (y)	0.36	3.49	3.79	-0.07
	UP (z)	0.67	6.60	15.35	2.27
9	E-W (x)	0.27	2.61	1.88	0.02
	N-S (y)	0.27	2.66	2.89	0.02
	UP (z)	0.20	1.98	4.60	-0.01

4.2.2.4 Estación CAP, Modelo 2

Los resultados del Modelo 2 se muestran de manera análoga a los casos anteriores, en donde se muestran los contornos de desplazamiento, los gráficos de desplazamiento y los valores de PGA de los puntos de control (ver ilustración 48, 49 y tabla 20 respectivamente).

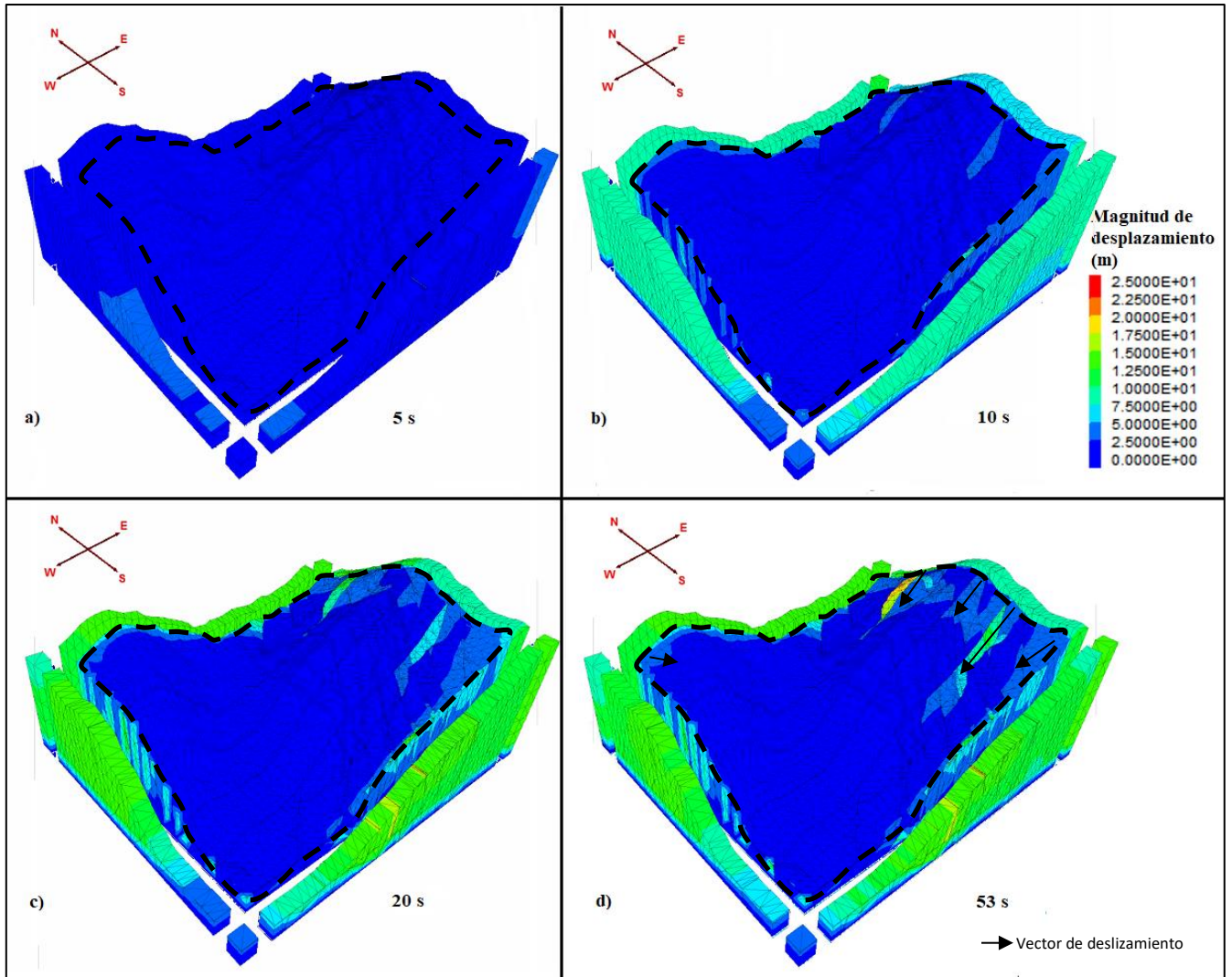


Ilustración 48: Caso dinámico con input del terremoto Morgan Hill, estación CAP. Modelo 2. Contornos de desplazamiento a los 5, 10, 20 y 53 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El desplazamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.

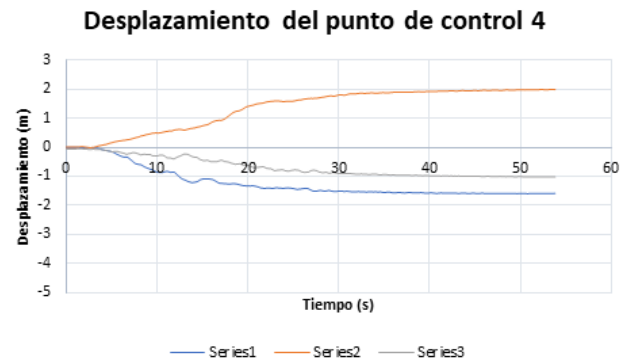
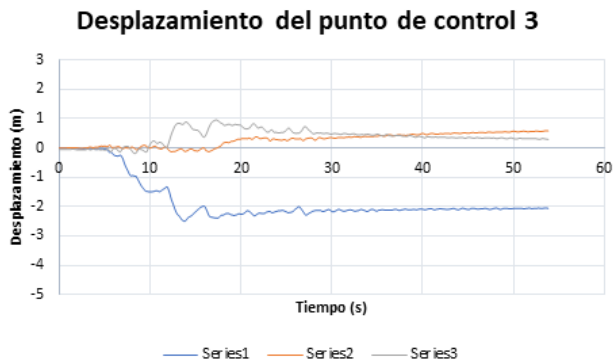
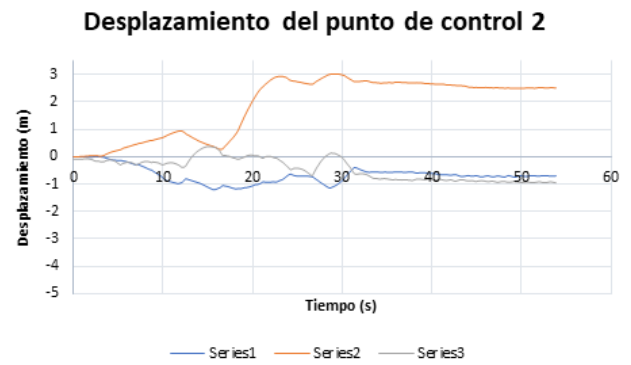
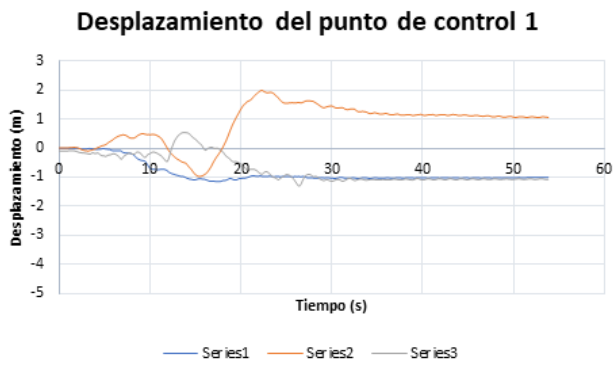


Ilustración 49: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 2 dinámico con input de sismo Morgan Hill, estación CAP.

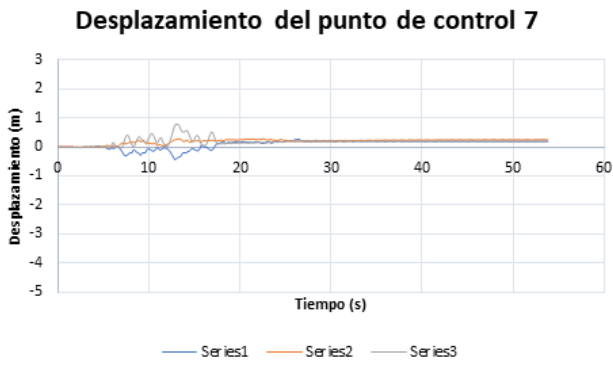
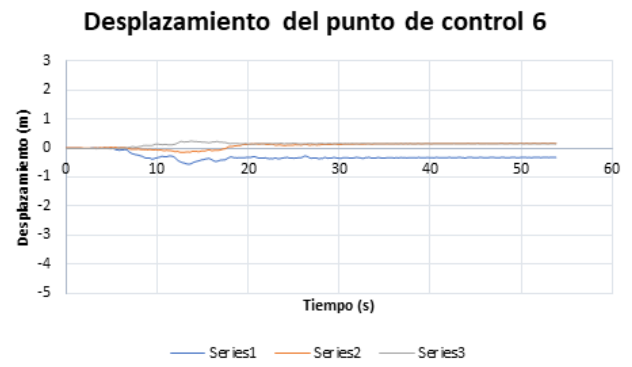
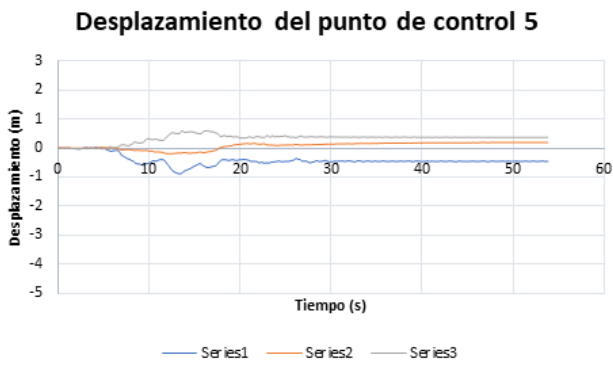


Ilustración 49 (continuación)

Tabla 20: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 2 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación CAP de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).

Punto de control	Componente	PGA (g)	PGA (m/s ²)	Factor de amplificación	Desplazamiento (m)
1	E-W (x)	0.16	1.58	1.14	-1.00
	N-S (y)	0.12	1.21	1.32	1.06
	UP (z)	0.29	2.89	6.72	-1.06
2	E-W (x)	1.23	12.09	8.70	-0.71
	N-S (y)	0.58	5.66	6.15	2.51
	UP (z)	1.36	13.33	31.00	-0.94
3	E-W (x)	0.38	3.75	2.70	-2.06
	N-S (y)	0.29	2.87	3.12	0.59
	UP (z)	0.34	3.38	7.86	0.29
4	E-W (x)	0.18	1.79	1.29	-1.60
	N-S (y)	0.18	1.79	1.95	1.99
	UP (z)	0.38	3.73	8.67	-1.02
5	E-W (x)	0.15	1.50	1.08	-0.46
	N-S (y)	0.15	1.43	1.55	0.20
	UP (z)	0.25	2.41	5.60	0.37
6	E-W (x)	0.17	1.62	1.17	-0.32
	N-S (y)	0.14	1.33	1.45	0.16
	UP (z)	0.30	2.90	6.74	0.15
7	E-W (x)	0.85	8.33	5.99	0.19
	N-S (y)	0.47	4.65	5.05	0.25
	UP (z)	1.58	15.51	36.07	0.20
8	E-W (x)	0.57	5.59	4.02	-1.02
	N-S (y)	0.43	4.19	4.55	-0.07
	UP (z)	0.66	6.51	15.14	2.06
9	E-W (x)	0.25	2.47	1.78	0.02
	N-S (y)	0.28	2.75	2.99	0.01
	UP (z)	0.23	2.23	5.19	-0.01

4.2.2.5 Estación GMR, Modelo 1

Se realiza una compilación de 53 segundos y el registro de esta estación tiene una duración de 29 segundos.

Los resultados del Modelo 1 se mostrarán de manera análoga a los casos anteriores, en donde se muestran los contornos de desplazamiento, los gráficos de desplazamiento y los valores de PGA de los puntos de control (ver ilustración 50, 51 y tabla 21 respectivamente)

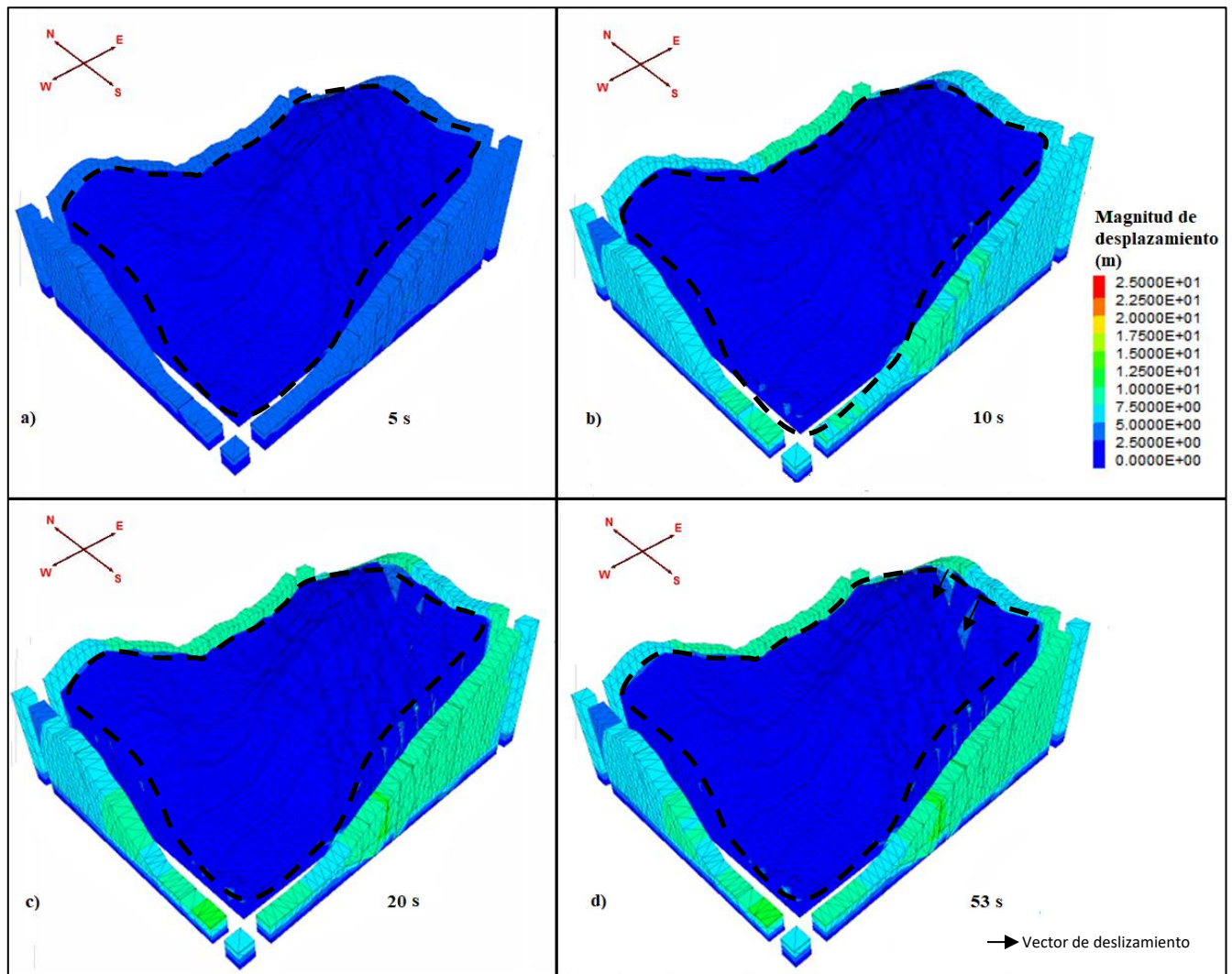


Ilustración 50: Caso dinámico con input del terremoto Morgan Hill, estación GMR. Modelo 1. Contornos de desplazamiento a los 5, 10, 20 y 53 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El desplazamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.

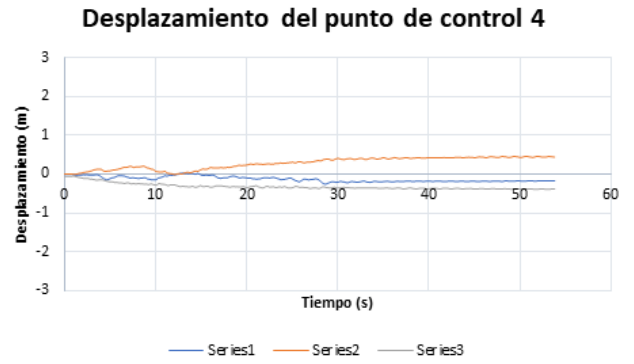
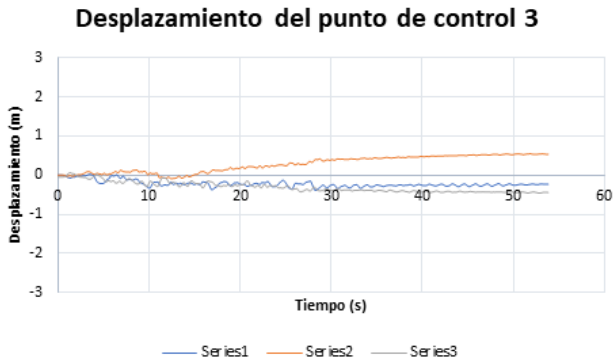
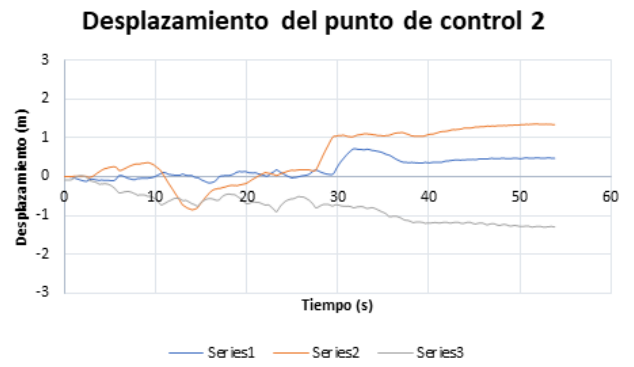
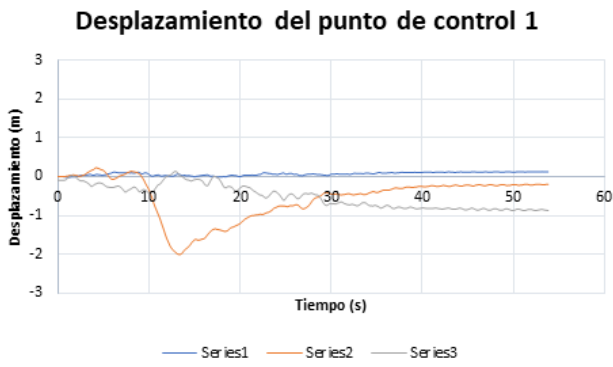


Ilustración 51: Desplazamiento neto de los puntos de control con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 1 dinámico con input de sismo Morgan Hill, estación GMR.

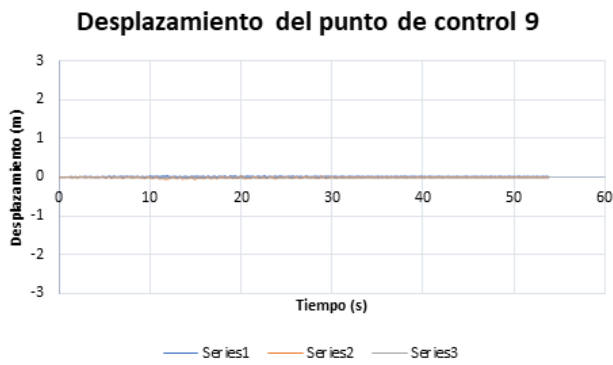
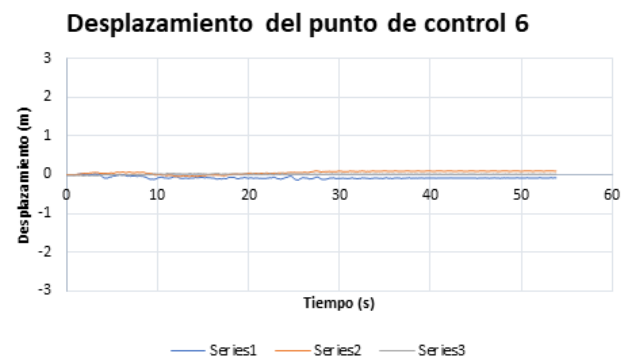
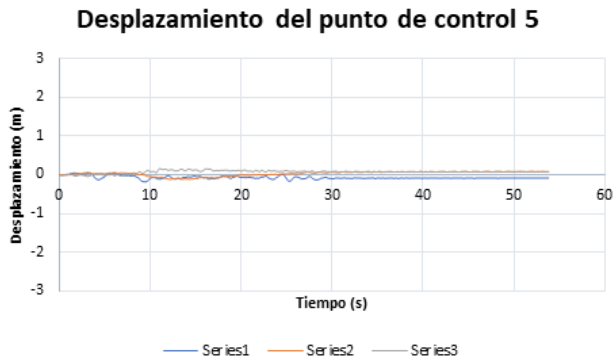


Ilustración 51 (continuación)

Tabla 21: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 1 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación GMR de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).

Punto de control	Componente	PGA (g)	PGA (m/s ²)	Factor de amplificación	Desplazamiento (m)
1	E-W (x)	0.31	3.05	2.75	0.13
	N-S (y)	0.13	1.29	0.69	-0.20
	UP (z)	0.36	3.57	1.05	-0.87
2	E-W (x)	0.72	7.1	6.40	0.47
	N-S (y)	0.42	4.1	2.20	1.34
	UP (z)	0.85	8.32	2.44	-1.29
3	E-W (x)	0.53	5.19	4.68	-0.23
	N-S (y)	0.31	3.07	1.65	0.53
	UP (z)	0.25	2.47	0.72	-0.45
4	E-W (x)	0.17	1.64	1.48	-0.17
	N-S (y)	0.19	1.87	1.00	0.45
	UP (z)	0.13	1.31	0.38	-0.38
5	E-W (x)	0.20	2	1.80	-0.08
	N-S (y)	0.22	2.16	1.16	0.08
	UP (z)	0.36	3.54	1.04	0.07
6	E-W (x)	0.18	1.78	1.60	-0.08
	N-S (y)	0.13	1.31	0.70	0.09
	UP (z)	0.15	1.5	0.44	0.01
7	E-W (x)	0.21	2.08	1.87	-0.03
	N-S (y)	0.17	1.67	0.90	0.04
	UP (z)	0.24	2.35	0.69	-0.01
8	E-W (x)	0.56	5.45	4.91	0.55
	N-S (y)	0.43	4.21	2.26	0.01
	UP (z)	0.87	8.53	2.50	1.07
9	E-W (x)	0.23	2.21	1.99	0.01
	N-S (y)	0.28	2.76	1.48	0.00
	UP (z)	0.27	2.62	0.78	-0.01

4.2.2.6 Estación GMR, Modelo 2

Los resultados del Modelo 2 se muestran de manera análoga a los casos anteriores, en donde se muestran los contornos de desplazamiento, los gráficos de desplazamiento y los valores de PGA de los puntos de control (ver ilustración 52, 53 y tabla 22 respectivamente).

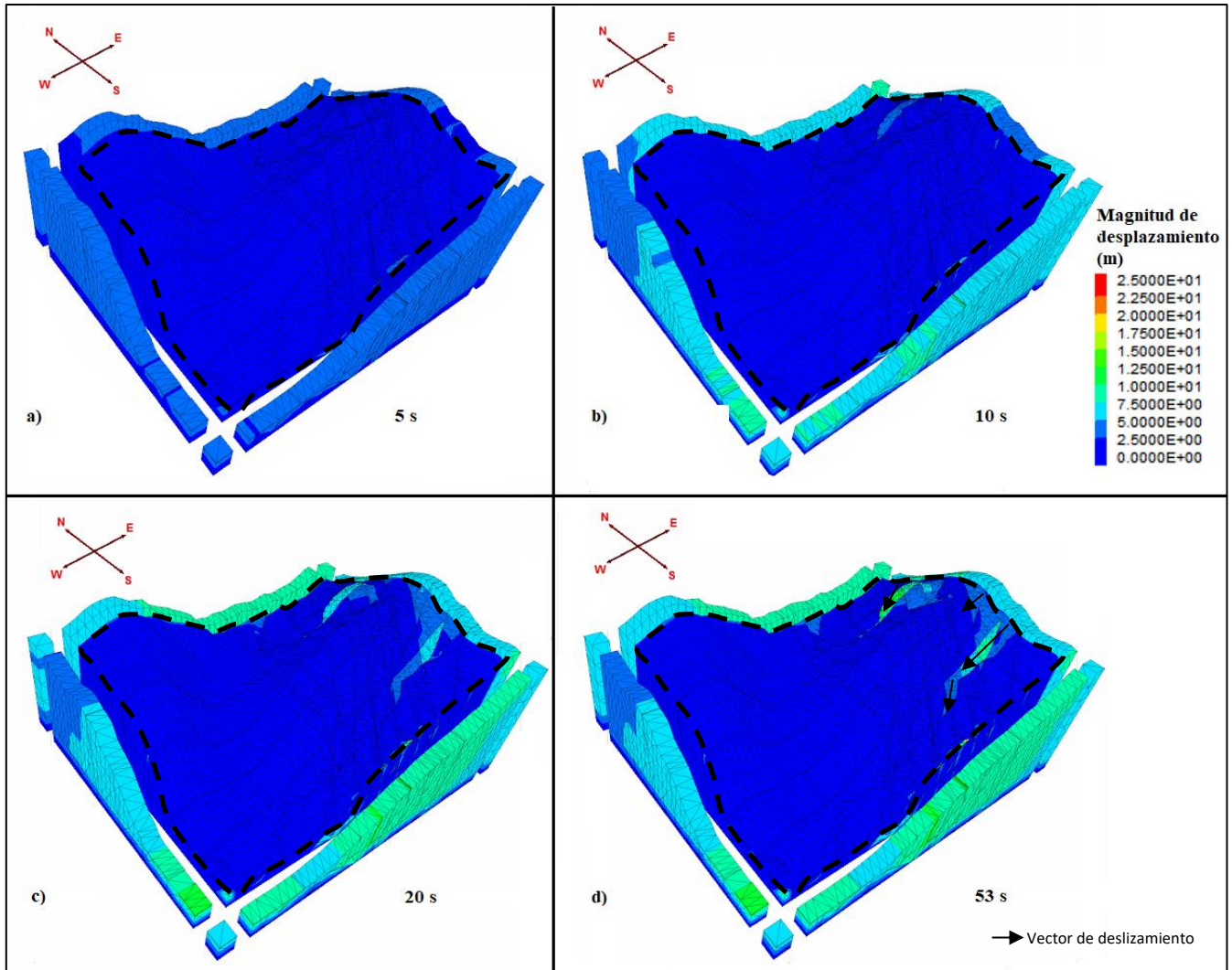


Ilustración 52: Caso dinámico con input del terremoto Morgan Hill, estación GMR. Modelo 2. Contornos de desplazamiento a los 5, 10, 20 y 53 segundos de compilación en el modelo (imágenes a, b, c y d respectivamente). Con escala fija de máximo 25 m. El desplazamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde.

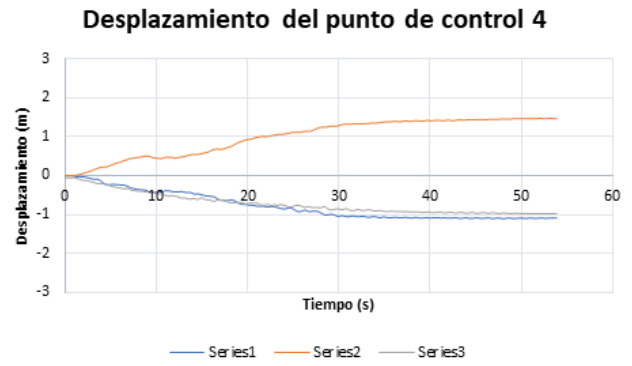
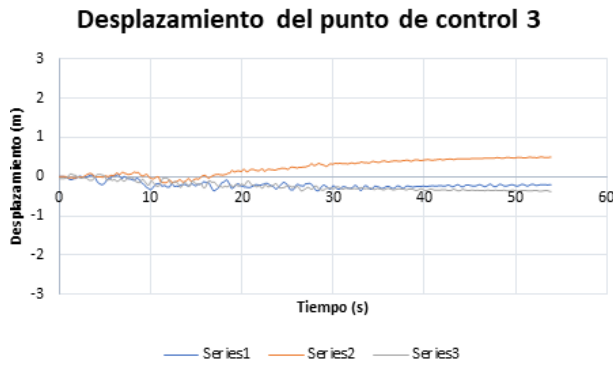
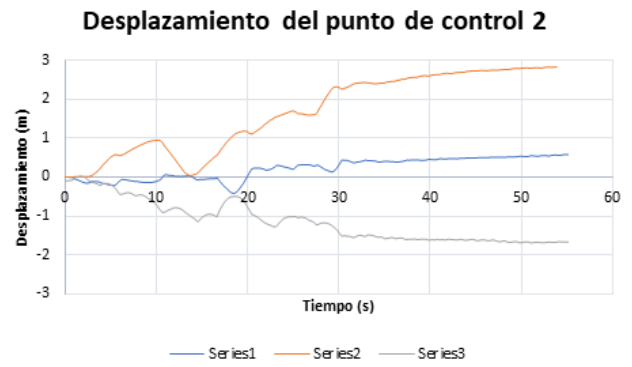
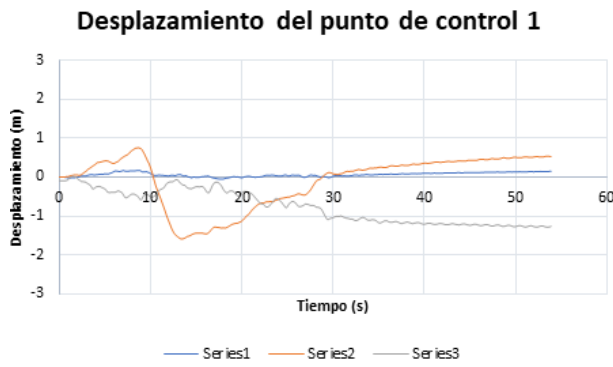


Ilustración 53: Resultados de PGA y amplificación de los puntos de control estudiados con respecto al tiempo. Series1 corresponde al eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Series2 corresponde al eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Series 3 corresponde al eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)). Modelo 2 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación GMR de input.

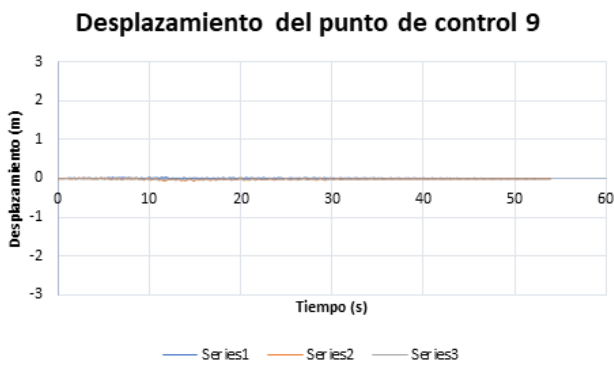
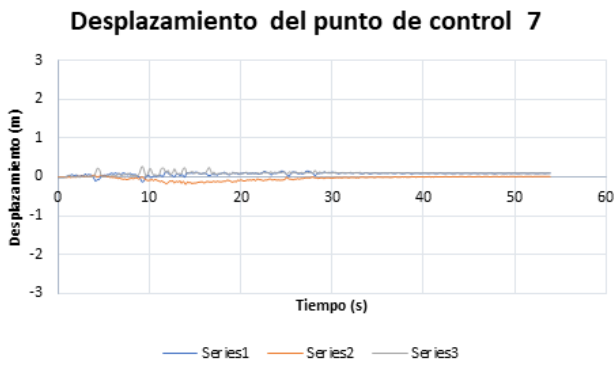
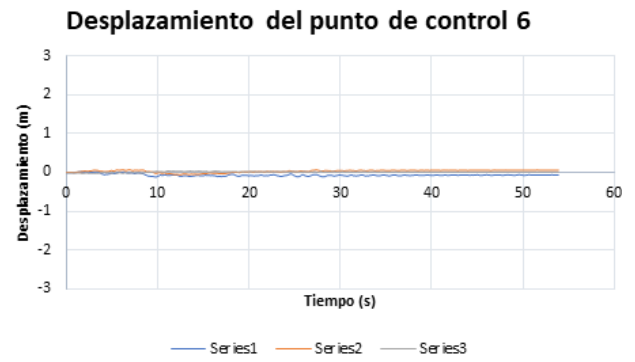
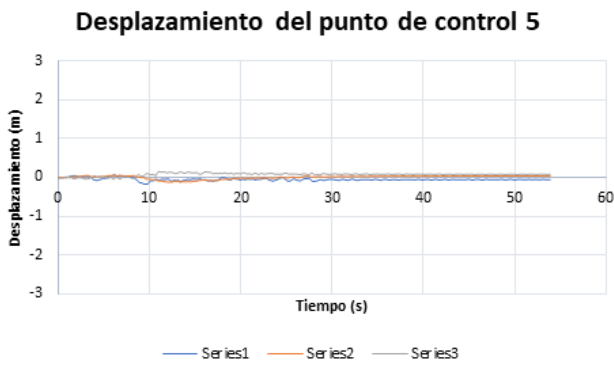


Ilustración 53 (continuación)

Tabla 22: Resultados de PGA, amplificación y desplazamiento total (diferencia entre desplazamiento inicial y final) de los puntos de control estudiados. Modelo 2 dinámico con el sismo Morgan Hill, estación GMR de input. El factor de amplificación corresponde a la razón entre el PGA medido y el PGA inicial. Eje x (Componente E(positivo)-W(negativo)), Eje y (N(positivo)-S(negativo)) y Eje z (vertical, arriba (positivo), abajo (negativo)).

Punto de control	Componente	PGA (g)	PGA (m/s ²)	Factor de amplificación	Desplazamiento (m)
1	E-W (x)	0.14	1.38	1.24	0.16
	N-S (y)	0.12	1.21	0.65	0.53
	UP (z)	0.22	2.19	0.64	-1.27
2	E-W (x)	1.27	12.46	11.23	0.58
	N-S (y)	0.94	9.25	4.97	2.83
	UP (z)	1.34	13.1	3.84	-1.66
3	E-W (x)	0.37	3.65	3.29	-0.21
	N-S (y)	0.32	3.16	1.70	0.51
	UP (z)	0.29	2.8	0.82	-0.38
4	E-W (x)	0.14	1.41	1.27	-1.10
	N-S (y)	0.15	1.47	0.79	1.47
	UP (z)	0.29	2.8	0.82	-0.98
5	E-W (x)	0.22	2.12	1.91	-0.05
	N-S (y)	0.17	1.65	0.89	0.04
	UP (z)	0.28	2.75	0.81	0.07
6	E-W (x)	0.18	1.72	1.55	-0.06
	N-S (y)	0.18	1.8	0.97	0.06
	UP (z)	0.27	2.68	0.79	0.01
7	E-W (x)	0.88	8.67	7.81	0.10
	N-S (y)	0.56	5.54	2.98	0.01
	UP (z)	1.71	16.74	4.91	0.09
8	E-W (x)	0.61	6	5.41	0.79
	N-S (y)	0.31	3.09	1.66	0.03
	UP (z)	0.89	8.75	2.57	0.98
9	E-W (x)	0.24	2.36	2.13	0.00
	N-S (y)	0.31	3.01	1.62	0.00
	UP (z)	0.35	3.41	1	-0.01

5 Discusiones

5.1 Caso estático

Ambos modelos mostraron estabilidad luego de la compilación. El primer criterio a evaluar es el balance de fuerzas, en donde se considera como estable cuando este balance alcanza un valor de 10^{-5} o menor. En el caso del Modelo 1, la estabilidad se alcanza a los 5.72 segundos (ver ilustración 33) y el Modelo 2, a los 5.85 segundos (ver ilustración 36). El segundo criterio que se analiza es el desplazamiento de los puntos de control con respecto al tiempo. Al revisar los gráficos mostrados en la ilustración 34 para el Modelo 1, se observa una clara tendencia a la estabilidad en todos los ejes de los puntos de control, alcanzándose una estabilidad completa antes de los 5 segundos. Los desplazamientos de los puntos de control de más altura dentro del talud se muestran mayores, y en todos los casos, el mayor desplazamiento lo tiene el eje vertical (z), en donde se manifiestan caídas a valores negativos, pero estabilizándose rápidamente (ver ilustración 55). Esto puede deberse al efecto de la gravedad que comienza a actuar al momento de correr el modelo.

El Modelo 2 muestra prácticamente el mismo comportamiento, cuya diferencia observable con respecto al modelo anterior, es el mayor desplazamiento del eje z en el punto de control 2 (ver ilustración 37).

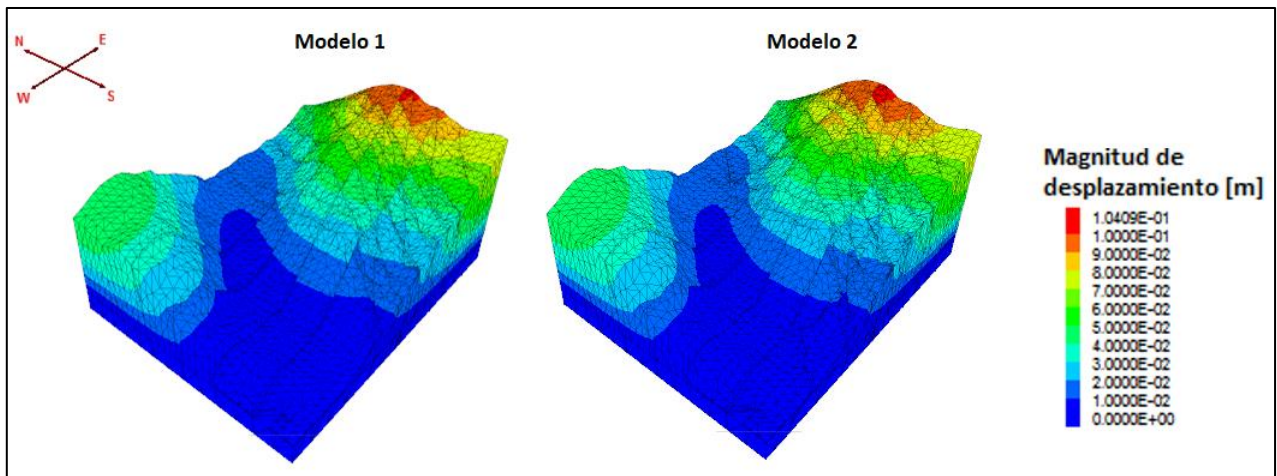


Ilustración 54: Comparación de los casos estáticos de los modelos 1 y 2, contornos de desplazamiento.

Los contornos de desplazamiento muestran bastante similitud en ambos modelos con diferencias prácticamente imperceptibles, siendo las zonas más altas las afectadas. El desplazamiento entre 4 y 6 cm es el que cubre la mayor área en ambos casos y los mayores valores rondan los 10 cm (ver ilustración 54).

Los desplazamientos no superan los 10.4 cm, y tomando en cuenta las dimensiones del talud (2 km de largo), se consideran como reacomodamientos de los bloques debido al efecto de la gravedad que actúa al correr los modelos y no como deslizamientos en el talud propiamente tal.

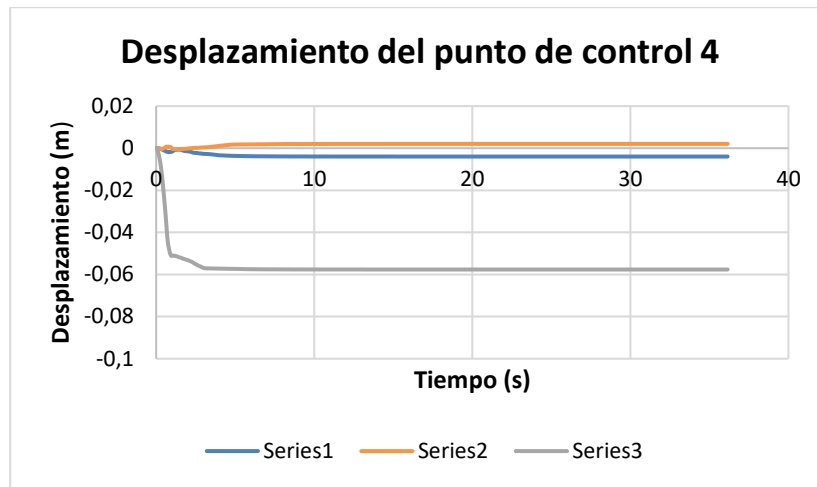


Ilustración 55: Gráfico de desplazamiento del punto de control 4 Modelo 1. Se puede observar la estabilidad alcanzada en todos los ejes y la caída del eje z (vertical) debido al efecto de la gravedad. Este fenómeno ocurre en todos los puntos de control de ambos modelos. Series1 corresponde al eje x (E-W), Series2 al eje y (N-S) y Series3 al eje z (vertical).

Con esto se tiene que ambos modelos -tras los reacomodamientos de los bloques- muestran una estabilidad que se alcanza a los pocos segundos en el escenario estático, resultando la calibración como se tenía estimado.

5.2 Caso Dinámico

Tal como se mencionó anteriormente en el Capítulo 3, se analizaron dos modelos, los cuales poseen las estructuras obtenidas de Redfield (2011). El Modelo 1 posee los sets de estructuras D1, D2, D3, D3' (ver ilustración 23 y tabla 3) y el Modelo 2 tiene los sets recién nombrados del modelo anterior, junto al set D7 que fue adicionalmente integrado (ver ilustración 24 y tabla 4).

5.2.1 Terremoto de Parkfield

5.2.1.1 Modelo 1

Luego de compilarse este modelo durante 48 segundos, se observa que no presenta respuestas apreciables a la escala usada en los contornos de desplazamiento (ver ilustración 56 b). Además, al observar la tabla 15, se muestran que los desplazamientos de todos los puntos de control no superan el metro, a excepción del máximo valor presente en el modelo, ubicado en el punto de control 2 con 1.22 m de movimiento en la componente N-S.

Observando los gráficos de desplazamiento con respecto al tiempo (ver ilustración 39), se tiene que los puntos de control con mayor respuesta son los números 1 y 2, y, a partir del punto de control 5 (ver ilustración 56 a), el movimiento es prácticamente nulo, ya que sus valores no alcanzan los 10 centímetros.

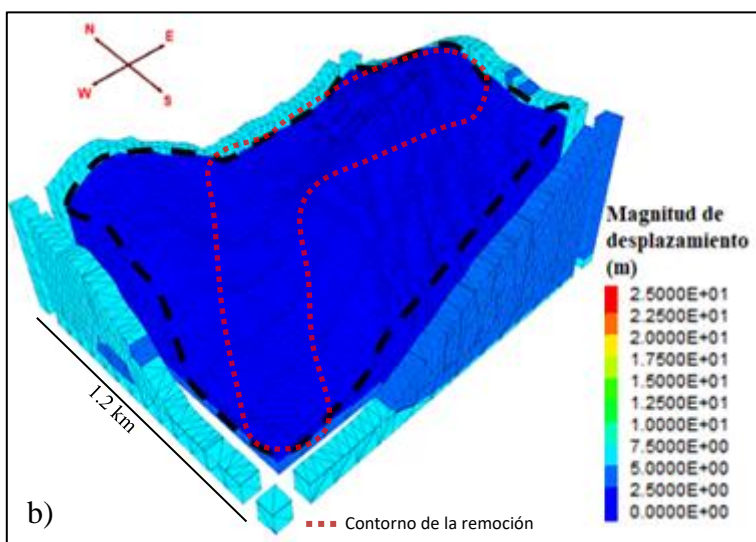
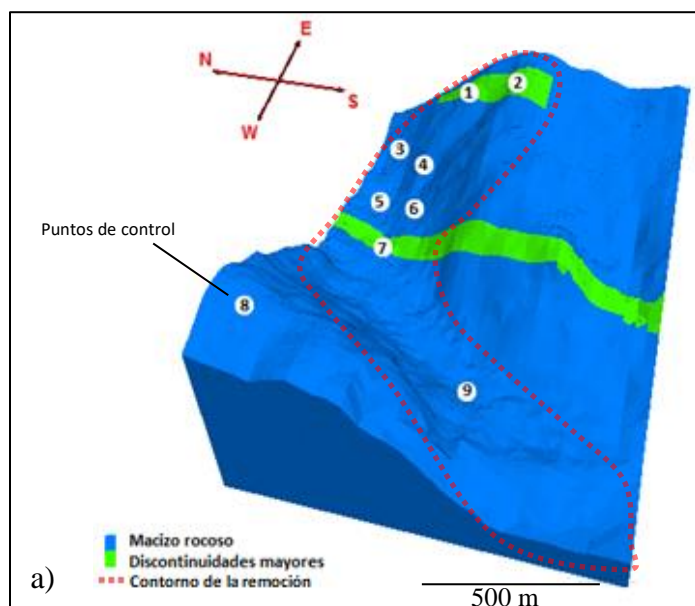


Ilustración 56: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 1, estación Parkfield luego de 48 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b).
Fuente: Google Earth. 2013.

Con respecto a las aceleraciones, los mayores valores de factor de amplificación se observan en los puntos de control 3, 8 y 9, cuyos resultados varían entre 2.5 y 3.6 aproximadamente. No todos los puntos estudiados amplifican ni tampoco se ve una relación con la altura del talud. El máximo PGA registrado se encuentra en el punto 8 con un valor de 1.35 g (ver tabla 15 e ilustración 56 a).

Para realizar una comparación de los valores de PGA obtenidos en este trabajo con el trabajo realizado por Escudero (2017), en donde se realiza el modelamiento con el mismo input sísmico utilizando el software UDEC -a diferencia de este trabajo en donde se hace uso del software 3DEC- (para más detalles, ver Capítulo 2, sección 4.1), se tiene que establecer la relación entre los puntos de control de su modelo con el realizado en este trabajo. Como se puede observar en la ilustración 60 a, el perfil de estudio de Escudero (2017), se encuentra en la mitad

del ancho de la remoción aproximadamente, por lo que el punto de control 3, que es el que se encuentra a mayor altura, estaría más próximo a lo que es el punto de control 2 en el trabajo presente. El punto de control 2 del trabajo de Escudero, se aproximaría al punto de control 4 de este trabajo debido a la cercanía de sus alturas y el punto de control 1 de Escudero, que es de baja altura y se encuentra cercano a la FPC, sería análogo a lo que es el punto de control 6 de este trabajo (ver ilustración 56a y 57).

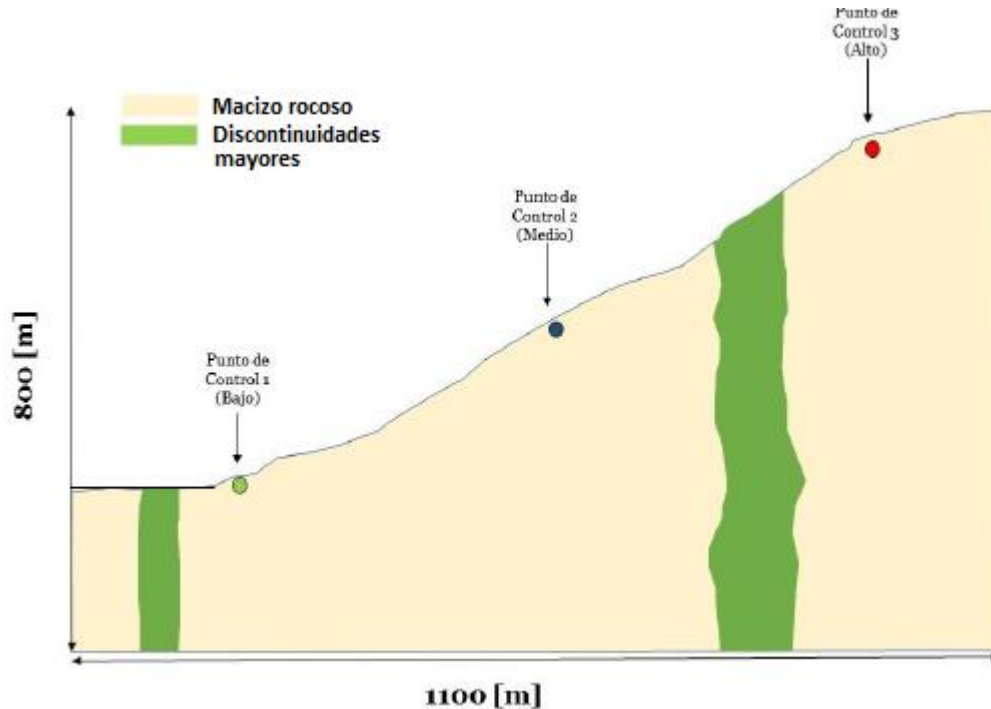


Ilustración 57: Puntos de control del modelo realizado por Escudero (2017). La discontinuidad mayor que se encuentra a la izquierda corresponde a la Falla Punta Cola (FPC) y la discontinuidad de la derecha corresponde a la Zona altamente fracturada (HFZ). Fuente: (Modificado) Escudero (2017).

En las tablas 23 y 24, se muestran los valores de PGA y factor de amplificación obtenidos en ambos trabajos. Se puede observar que los valores de aceleración de la tabla 23 son mayores en todos los puntos en comparación con los de la tabla 24. En el eje x (E-W) los valores de PGA obtenidos de Escudero (2017), superan hasta en 7 veces los medidos en este trabajo. En el eje z (vertical) los valores de Escudero (2017) superan hasta en 6 veces los valores de PGA (ver tablas 23 y 24). Se considera en esta parte de la discusión sólo dos componentes (E-W y vertical o *UP*) debido a que en el trabajo de Escudero (2017) el modelamiento es realizado en dos dimensiones.

Estas diferencias pueden deberse a la distinta configuración de condición de borde entre ambos trabajos. En Escudero (2017), se considera una capa viscosa basal cuya función es atenuar la reflexión e interferencia de la onda sísmica vertical y así evitar una reflexión sobre amplificada (Escudero. 2017). En este trabajo no se usa esta condición debido a que atenúa en exceso las ondas sísmicas medidas en los puntos de control, obteniéndose factores de amplificación menores a la unidad en todos los puntos al ingresar el registro sísmico.

Tabla 23: PGA y factor de amplificación medidos en los puntos de control del modelo realizado por Escudero (2017). Fuente: (Modificado) Escudero (2017).

Punto de control	Componente	PGA (g)	Factor de amplificación
1	E-W (x)	2.2	1.8
	UP (z)	1.1	1.8
2	E-W (x)	2.4	2
	UP (z)	1.5	2.5
3	E-W (x)	2.3	1.9
	UP (z)	1.7	2.8

Tabla 24: PGA y factor de amplificación medidos en los puntos de control del modelo realizado en este trabajo. Modelo 1, Terremoto de Parkfield.

Punto de control	Componente	PGA (g)	Factor de amplificación
2	E-W (x)	0.43	0.85
	N-S (y)	0.61	1.14
	UP (z)	0.60	1.73
4	E-W (x)	0.36	0.72
	N-S (y)	0.39	0.72
	UP (z)	0.26	0.76
6	E-W (x)	0.37	0.74
	N-S (y)	0.28	0.52
	UP (z)	0.36	1.03

5.2.1.2 Modelo 2

En este caso se tienen desplazamientos máximos de 12 a 15 m, pero el movimiento que abarca mayor área ronda entre los 2 y 5 m. Todos estos movimientos se concentran en las áreas de mayor altura del talud (ver ilustración 58 b). Con respecto a los puntos de control, los máximos desplazamientos, se manifiestan en los puntos 1 y 2 con valores de 2.58 y 2.51 respectivamente, en el eje N-S (ver tabla 16).

Al observar los gráficos de desplazamiento con respecto al tiempo (ver ilustración 41), se tiene que los puntos de control 1, 2 y 4 muestran las mayores respuestas. Estos valores van disminuyendo proporcionalmente con la altura a excepción del punto de control 3 (ver ilustración 58 a).

Comparando los deslizamientos del modelo con el caso real, se puede apreciar que el modelo genera un deslizamiento que se encuentra fuera del contorno de remoción (ver ilustración 58 b). Esta remoción lateral también es observable en la fotografía satelital (ver ilustración 58 c).

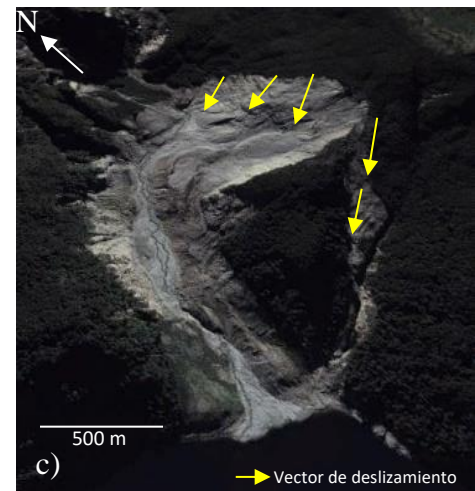
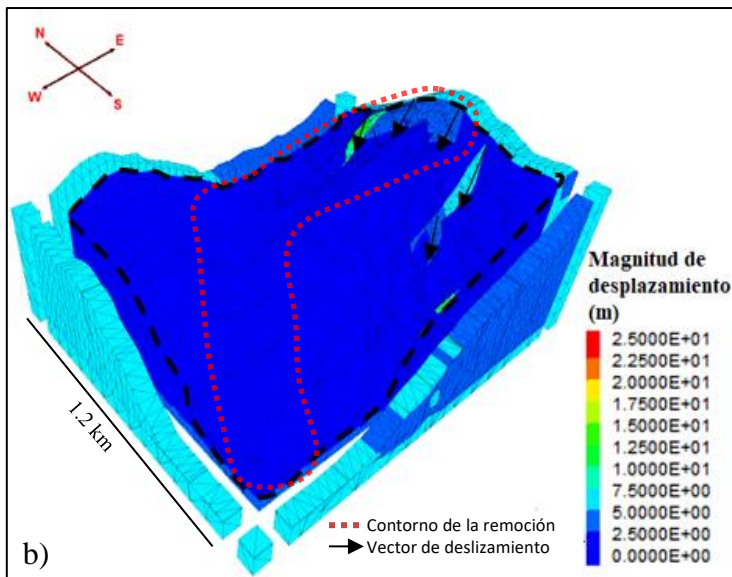
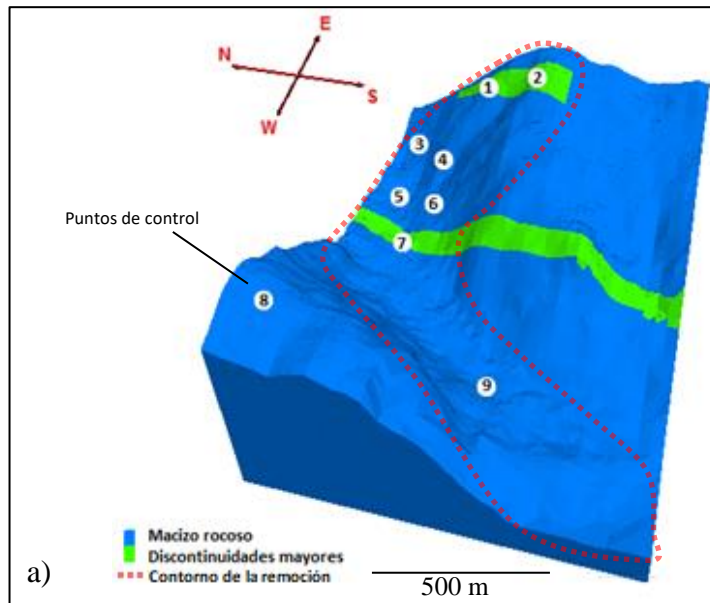


Ilustración 58: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 2, estación Parkfield luego de 48 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.

Con respecto a la dirección del deslizamiento, que se representa mediante vectores en las ilustraciones 58 y 59, éstas siguen la pendiente en dirección al occidente principalmente, no coincidiendo por completo con el caso estudiado por Oppikofer (2012), debido a que este último sigue una dirección al NE, dirigiéndose a la ladera norte del valle. Sin embargo, el área desplazada en el modelo se encuentra dentro de la zona propuesta por Oppikofer (2012) que indica el sector donde hubo deslizamiento de roca (ver ilustración 59).

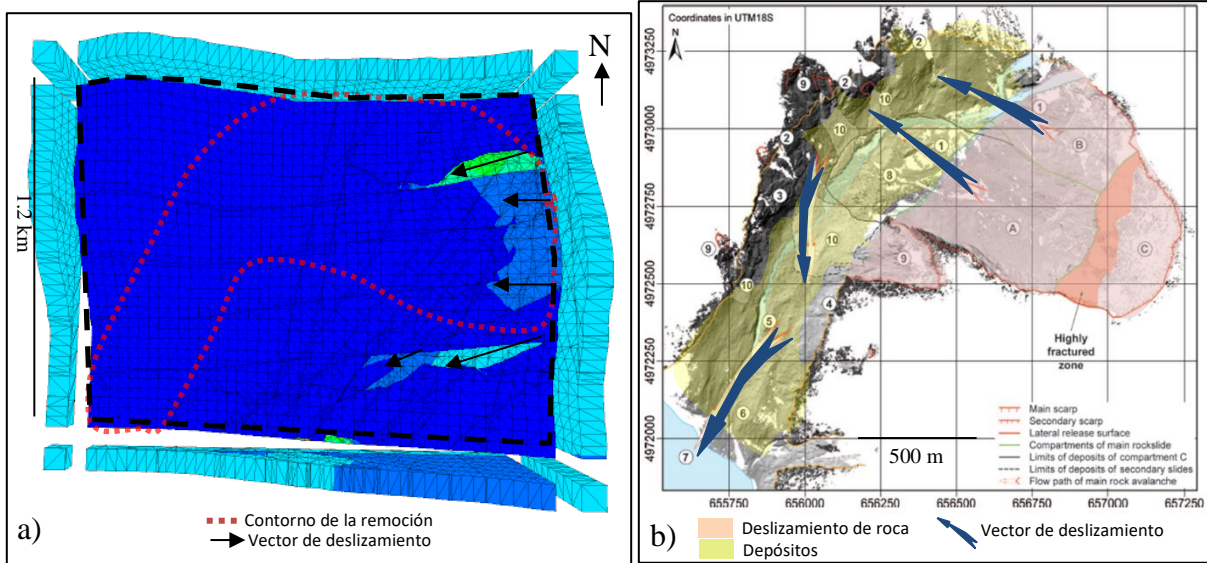
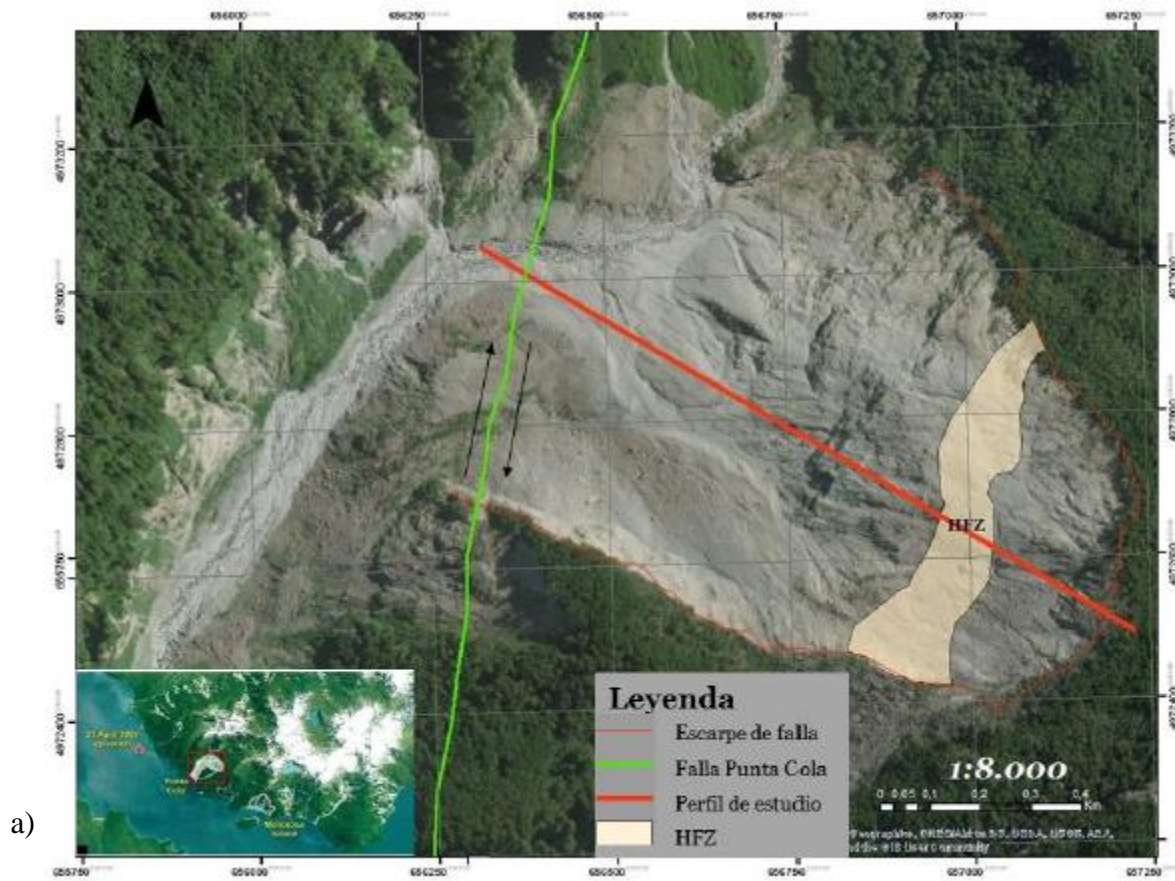
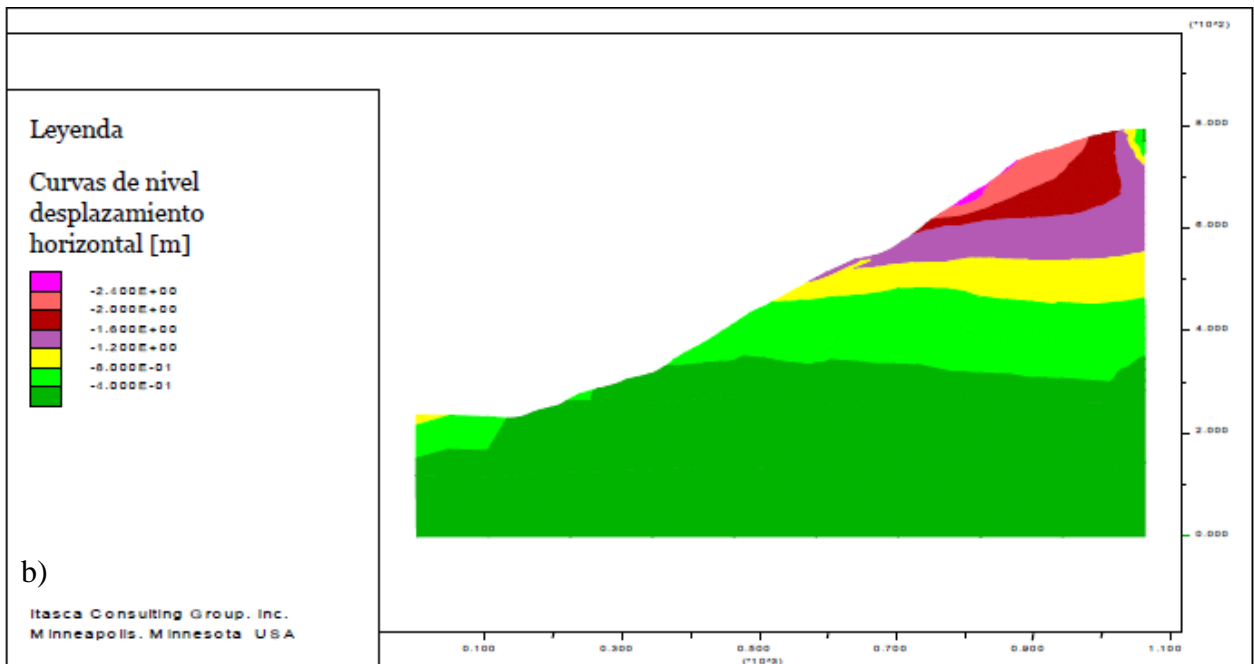


Ilustración 59: a) Vista en planta del estado final del Modelo 2, estación Parkfield luego de 48 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde
 b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo desprendimiento y deslizamiento de roca y, la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.

Comparando estos resultados con los obtenidos en el trabajo realizado por Escudero (2017), se tiene que en ambos casos el deslizamiento máximo se concentra en los sectores más altos del talud. En el trabajo de Escudero (2017), los valores de desplazamiento están en un rango entre 0.27 m y 2.4 m (ver ilustración 60 b). Por otro lado, en este trabajo esos valores oscilan entre 2-5 m y 12-15 m (ver ilustración 58 b). Sin embargo, las áreas que presentan entre 2-5 m de desplazamiento en el modelo 3D coinciden con las áreas de 2-2.4 m en el perfil.



a)



b)

Ilustración 60: Modelo realizado en el trabajo de Escudero (2017). a) Vista en planta del deslizamiento de Punta Cola. La línea color rojo indica el perfil de estudio. b) Perfil modelado con los contornos de desplazamiento.

Analizando los valores de PGA (ver tabla 16) en el Modelo 2, las mayores amplificaciones se muestran en los puntos de control 7 y 8 (ver ilustración 58 a) con un valor de 3.09 y 3.47 respectivamente. En este caso tampoco amplifican todos los puntos ni se ve alguna relación con la altura. El PGA de mayor valor se encuentra en el punto 8 (ver ilustración 58 a) con un valor de 1.44 g.

En las tablas 25 y 26, se observan los valores de PGA y factor de amplificación medidos en este trabajo y en el de Escudero (2017). Los valores de aceleración de la tabla 25 son mayores en todos los puntos en comparación con los valores de la tabla 26, especialmente en el eje x (E-W) en donde son superados hasta 7 veces. En el eje z (vertical) los valores obtenidos de Escudero (2017) superan hasta en 3 veces las aceleraciones medidas en este trabajo (ver tablas 25 y 26).

Tabla 25: PGA y factor de amplificación medidos en los puntos de control del modelo realizado por Escudero (2017). Fuente: (Modificado) Escudero (2017).

Punto de control	Componente	PGA (g)	Factor de amplificación
1	E-W (x)	2.2	1.8
	UP (z)	1.1	1.8
2	E-W (x)	2.4	2
	UP (z)	1.5	2.5
3	E-W (x)	2.3	1.9
	UP (z)	1.7	2.8

Tabla 26: PGA y factor de amplificación medidos en los puntos de control del modelo realizado en este trabajo. Modelo 2, Terremoto de Parkfield.

Punto de control	Componente	PGA (g)	Factor de amplificación
2	E-W (x)	0.47	0.94
	N-S (y)	0.33	0.62
	UP (z)	0.56	1.61
4	E-W (x)	0.41	0.80
	N-S (y)	0.35	0.65
	UP (z)	0.60	1.72
6	E-W (x)	0.32	0.64
	N-S (y)	0.28	0.53
	UP (z)	0.49	1.42

5.2.2 Terremoto de Morgan Hill, estación AND

5.2.2.1 Modelo 1

En este modelo se observan desplazamientos entre 2 y 20 m concentrados principalmente en los sectores más altos del talud (ver ilustración 61 b). Los puntos de control que manifiestan mayores respuestas según los gráficos de desplazamiento en el tiempo (ver ilustración 43) son los puntos 1, 2, 3 y 8, que además son los que se encuentran a mayor altura.

En la tabla 17, se aprecia que el punto de control 2 es el que presenta mayores valores de desplazamiento, siendo el componente vertical el que presenta las mayores respuestas, bordeando los 13 m. A medida que se va disminuyendo la altura, los movimientos son cada vez menores,

hasta llegar al punto de control 9 en donde el movimiento no supera los 15 centímetros de distancia.

En la ilustración 61 b, se pueden observar movimientos fuera del área de la remoción real (línea punteada), una de ellas es el deslizamiento lateral, al sur del talud (que también estuvo presente en el Modelo 2 del terremoto de Parkfield) que se encuentra presente también en la fotografía satelital (ilustración 61 c). Además, se aprecia deslizamiento en el sector oeste del talud, cercano al punto de control 8. Este último deslizamiento nombrado no se aprecia en las imágenes reales.

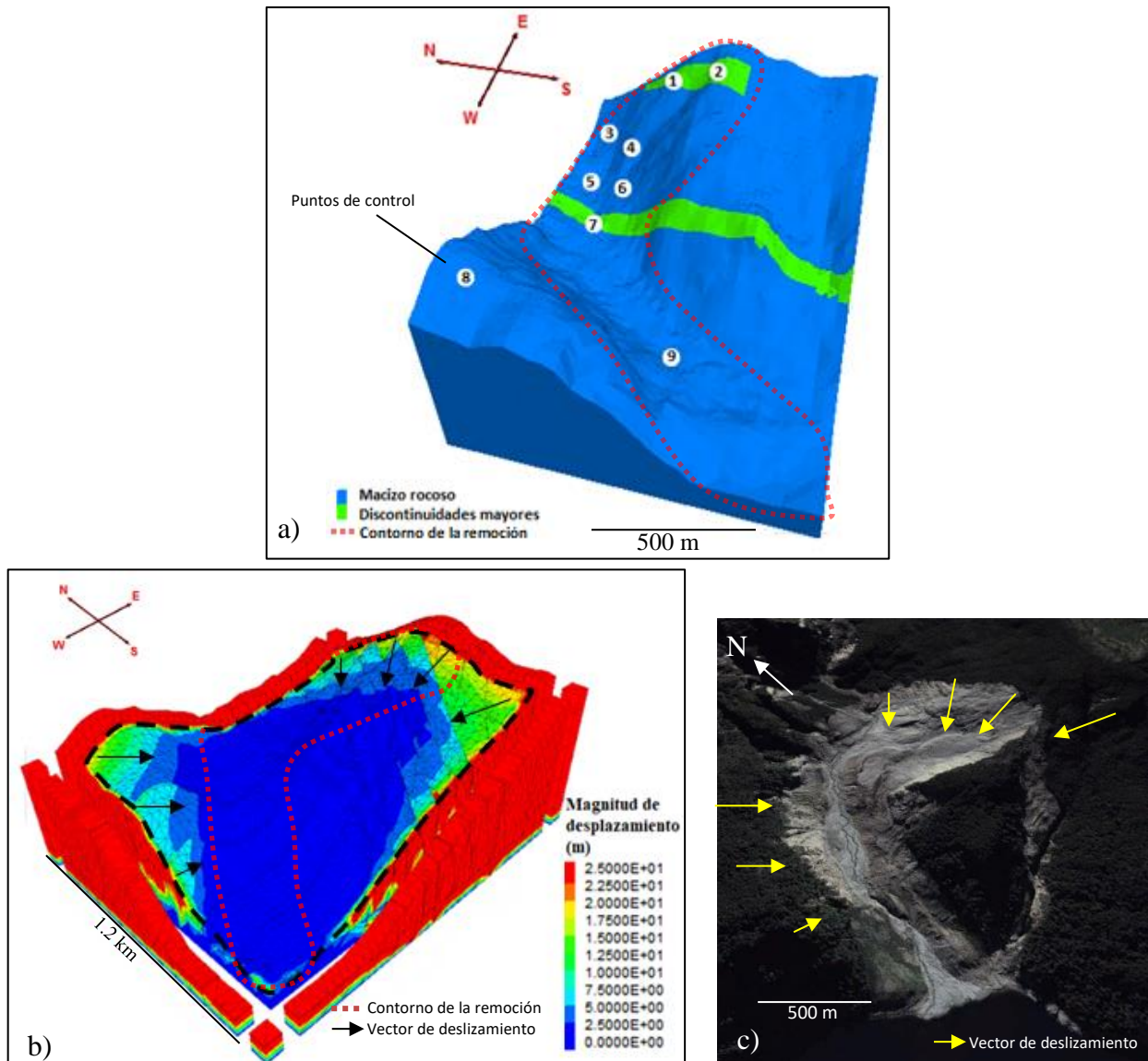


Ilustración 61: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 1, estación AND luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.

Respecto a la dirección del deslizamiento, se tiene que los vectores, al igual que en el caso de Parkfield, tienden al W, siguiendo la pendiente (ver ilustración 62). En lo propuesto por Oppikofer (2012), se tiene una dirección de desplazamiento con tendencia al NW como se muestra en la ilustración 62 b. La porción deslizada en este modelo, en el sector de mayor altura del talud, coincide con el área estudiada por Oppikofer (2012) en donde ocurrió deslizamiento de roca.

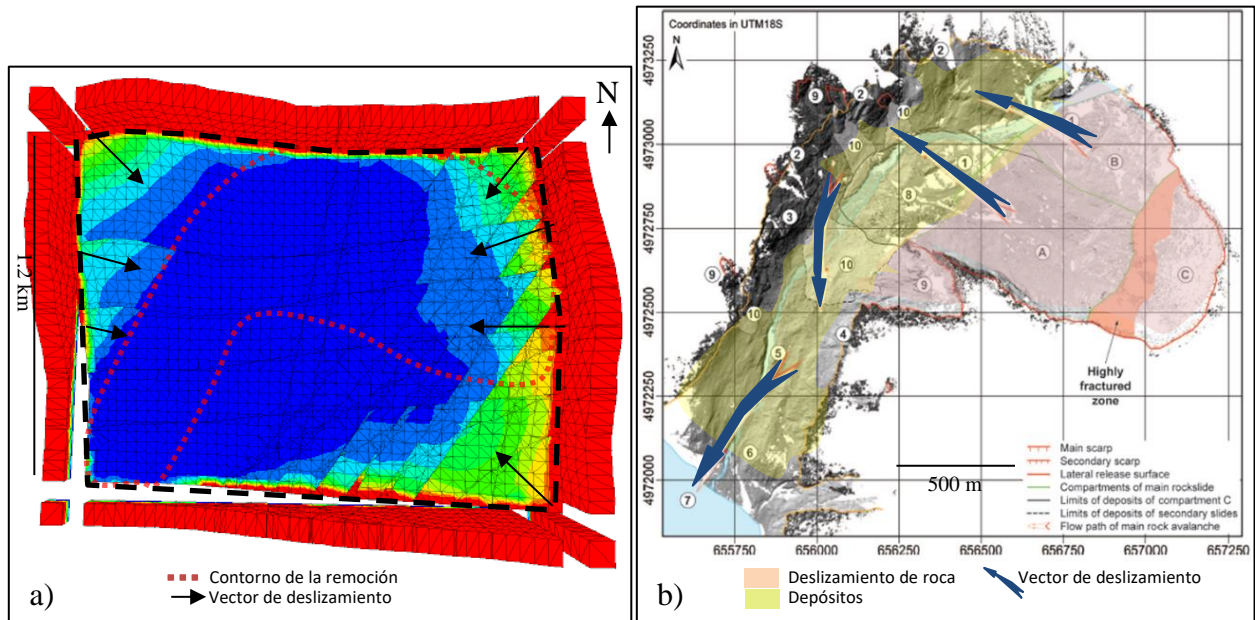


Ilustración 62: a) Vista en planta del estado final del Modelo 1, estación AND luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo desprendimiento y deslizamiento de roca y, la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.

Analizando los resultados presentes en la tabla 17, este modelo presenta amplificación sólo en los puntos de control 2 y 8, con valores de 5.26 y 5.54 respectivamente. Los PGA máximos se encuentran en los mismos puntos nombrados con valores de 0.92 g y 0.97 g (ver tabla 17). Los factores de amplificación de PGA no muestran proporcionalidad con la altura del talud.

5.2.2.2 Modelo 2

En este modelo se observan desplazamientos que superan los 22 m en las cercanías del escarpe principal. También se presentan movimientos sobre los 5 m en los sectores de mayor altura y en zonas de la ladera norte del talud (ver ilustración 63 b). El punto de control más afectado es el número 2 con un desplazamiento que alcanza los 17.65 m en la componente N-S (ver tabla 18).

Al observar los gráficos de desplazamiento con respecto al tiempo, se tiene que los puntos de control más afectados son los números 1, 2, 3 y 8 (ver ilustración 63 a), mostrando una

disminución del movimiento proporcional a la altura. La componente N-S es la que presenta los mayores valores de movimiento en este modelo (ver ilustración 45).

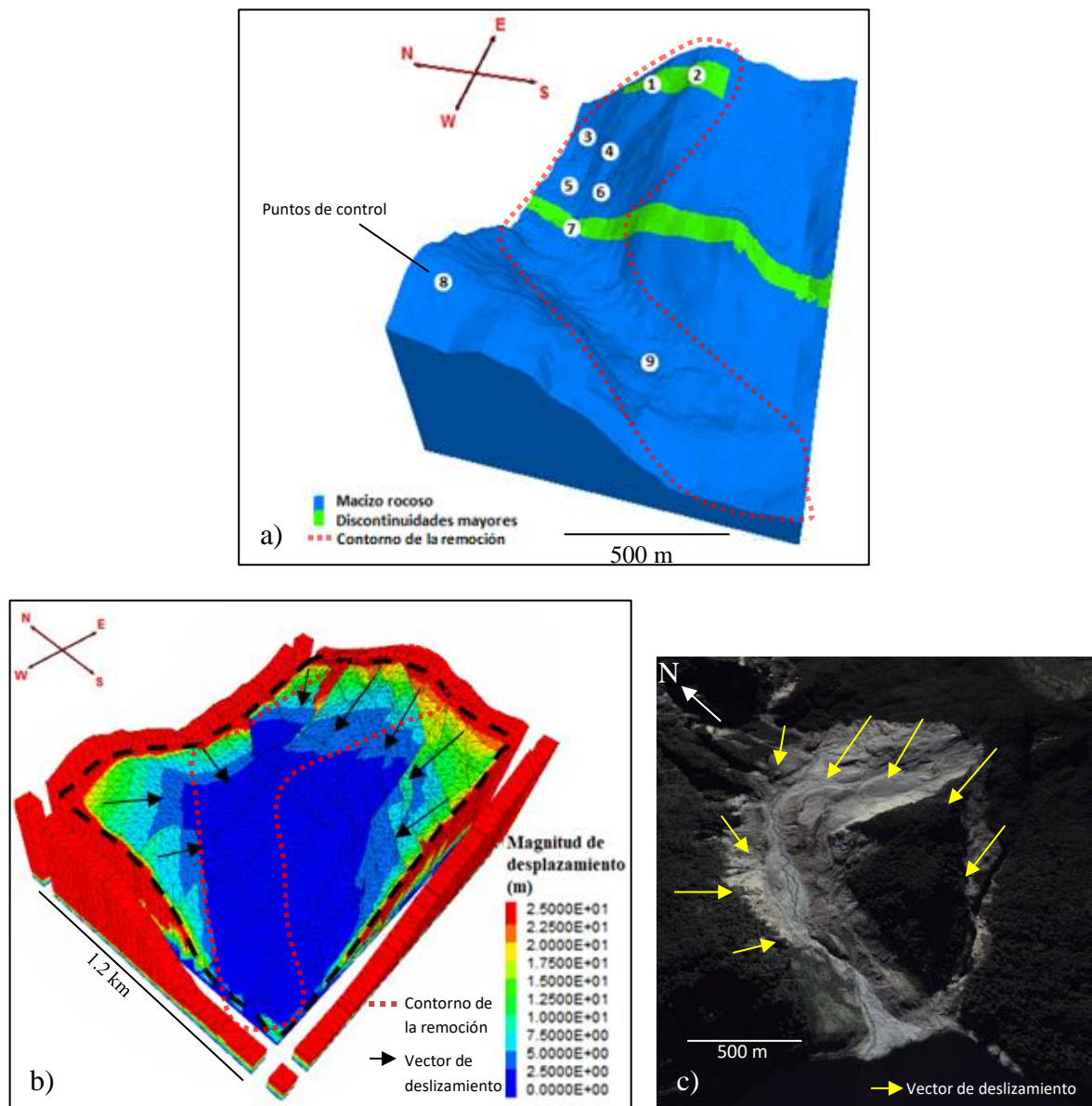


Ilustración 63: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 2, estación AND luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.

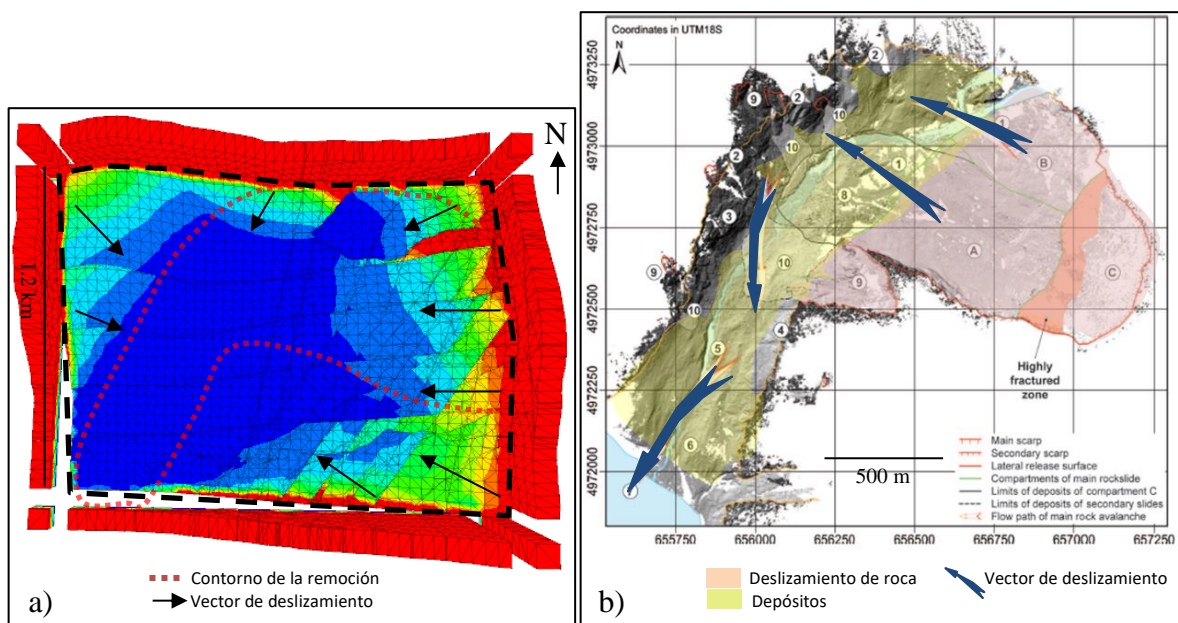


Ilustración 64: a) Vista en planta del estado final del Modelo 2, estación AND luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo desprendimiento y deslizamiento de roca y, la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.

Analizando los vectores de desplazamiento, el modelo presenta una dirección preferente al W. Sin embargo, en este caso se manifiesta la remoción que comienza en la ladera norte del talud, que, en el caso real, corresponde a la continuación del deslizamiento de roca luego de impactar la ladera norte del valle, siguiendo un camino con tendencia N-S, mostrándose bastante similar a lo propuesto por Oppikofer (2012) (ver ilustración 64). El área deslizada en la parte alta del talud también se encuentra dentro de lo propuesto en la ilustración 64 b. Adicionalmente, al igual que el Modelo 1, se manifiestan deslizamientos fuera de la remoción real (línea punteada, ilustración 64). Estos deslizamientos son equivalentes a los observados en el Modelo 1, que corresponden al deslizamiento lateral, al sur del talud, que se encuentra presente también en la fotografía satelital y a la que se encuentra cercana al punto de control 8 (ver imagen 63 b). Sin embargo, en este caso se manifiestan con mayor intensidad, abarcando áreas mayores.

Respecto a los resultados, presentes en la tabla 18, el modelo presenta amplificación con valores máximos de 6.71 y 8.16 en los puntos 2 y 7 respectivamente, y PGA de 1.18 g y 1.43 g en los mismos puntos. No se observa relación entre la amplificación y la altura debido a que la mayor amplificación se manifiesta en el punto 7, siendo uno de los de menor altura en el modelo (ver tabla 18).

5.2.3 Terremoto de Morgan Hill, estación CAP

5.2.3.1 Modelo 1

En este modelo los deslizamientos importantes se concentran en los sectores laterales de la cabeza del talud y en la ladera norte del mismo. El desplazamiento general ronda entre los 2 y 5 m (ver ilustración 65 b). El punto de control 8 es el que manifiesta un movimiento mayor, con un valor de 2.27 m en la componente E-W y vertical (ver tabla 19). Observando los gráficos de la

ilustración 47, los puntos de control 1, 2, 3 y 8 son los que manifiestan superiores respuestas. Respecto a los ejes, la componente E-W presenta los mayores movimientos. Los valores de desplazamiento van disminuyendo a medida que se avanza por los puntos de control, excepto por el punto de control 8, que a pesar de no ser el de mayor altura, manifiesta los valores más considerables (ver ilustración 47).

En este modelo se puede observar la remoción lateral presente en casos anteriores (al sur del talud). Sin embargo, se aprecia que no abarca un área de grandes dimensiones (ver ilustración 65 b).

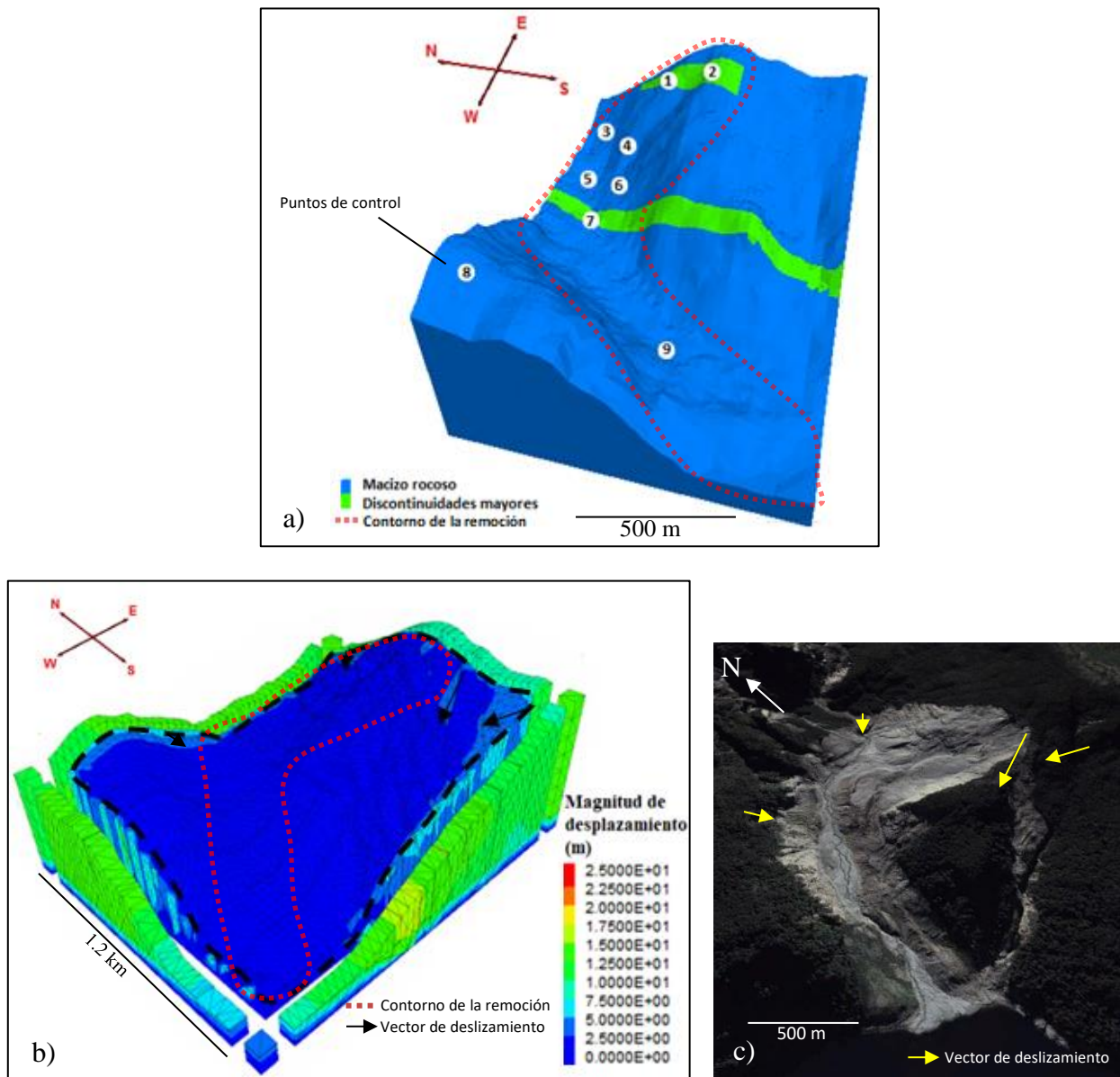


Ilustración 65: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 1, estación CAP luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.

Con respecto a las direcciones del desplazamiento, se puede apreciar en la siguiente imagen (ver ilustración 66) que los vectores no siguen la tendencia propuesta por Oppikofer (2012), salvo la remoción lateral, ubicada en la ladera norte del talud. Sin embargo, ésta corresponde a un “rebote” del deslizamiento iniciado en el escarpe principal y no a un deslizamiento independiente como se muestra en el modelo (Oppikofer et al. 2012). Las respuestas en el área alta del talud son prácticamente ausentes.

En este modelo, el factor de amplificación de PGA se manifiesta en todos los puntos de control y en casi todas sus componentes, presentándose los mayores valores en el punto 2, con un valor máximo de 46.67 y un PGA máximo de 2.05 g (ver tabla 19). Nuevamente, no se observa una relación concreta entre los valores del factor de amplificación y la altura del punto de control.

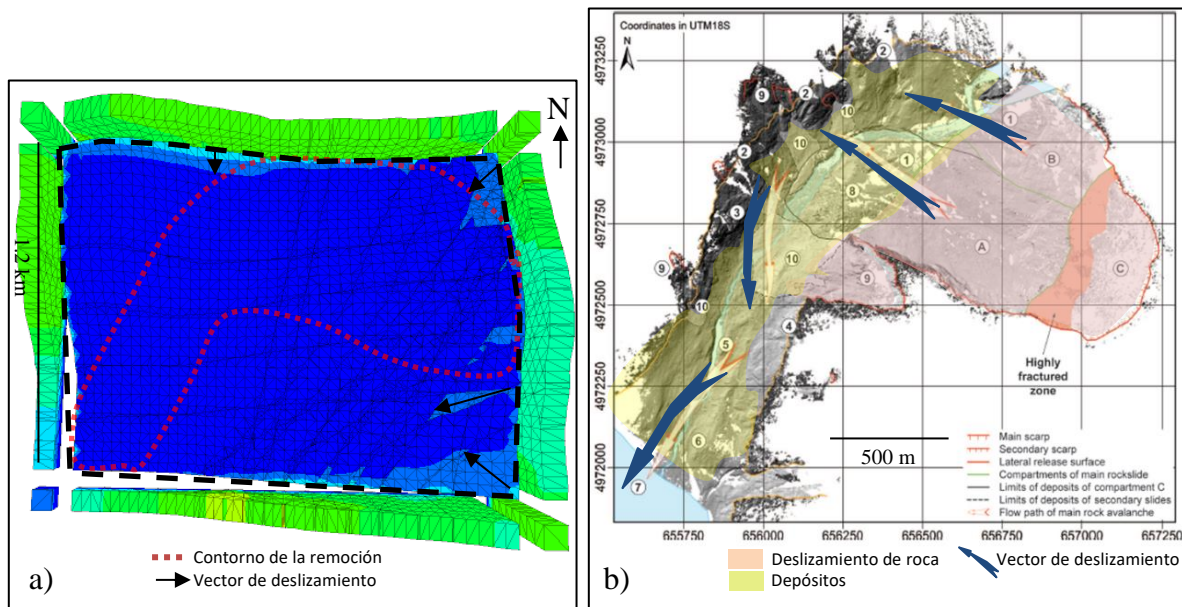


Ilustración 66: a) Vista en planta del estado final del Modelo 1, estación CAP luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo desprendimiento y deslizamiento de roca y, la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.

5.2.3.2 Modelo 2

En este modelo los desplazamientos son muchos más evidentes que en el Modelo 1. Los sectores más afectados son los que se concentran en la parte alta del talud y sus desplazamientos rondan entre los 2 m hasta 22 m aproximadamente (ver ilustración 67 b). El punto de control que manifiesta mayor desplazamiento es el punto 2 con un valor de 2.51 m en el eje N-S (ver tabla 20). Respecto a los gráficos de desplazamiento (ver ilustración 49), los puntos de control más afectados son los números 1, 2, 3, 4 y 8, siendo las componentes N-S y vertical las que muestran mayores valores. Se observa una proporcionalidad entre el desplazamiento y la altura del punto de control.

La dirección de desplazamiento es mayormente hacia el W siguiendo la pendiente como en los modelos anteriores. El área deslizada coincide con el área en donde se manifestó deslizamiento de roca según el trabajo de Oppikofer (2012) (ver ilustración 68). Nuevamente hay zonas fuera de donde ocurrió el deslizamiento original (línea punteada, ilustraciones 67 y 68) que manifiestan movimiento, como lo es el sector cercano al punto de control 8 y la ubicada al sur del

talud (ver ilustración 67). Esta última se puede apreciar en fotografías reales de Punta Cola (ver ilustración 67 c)

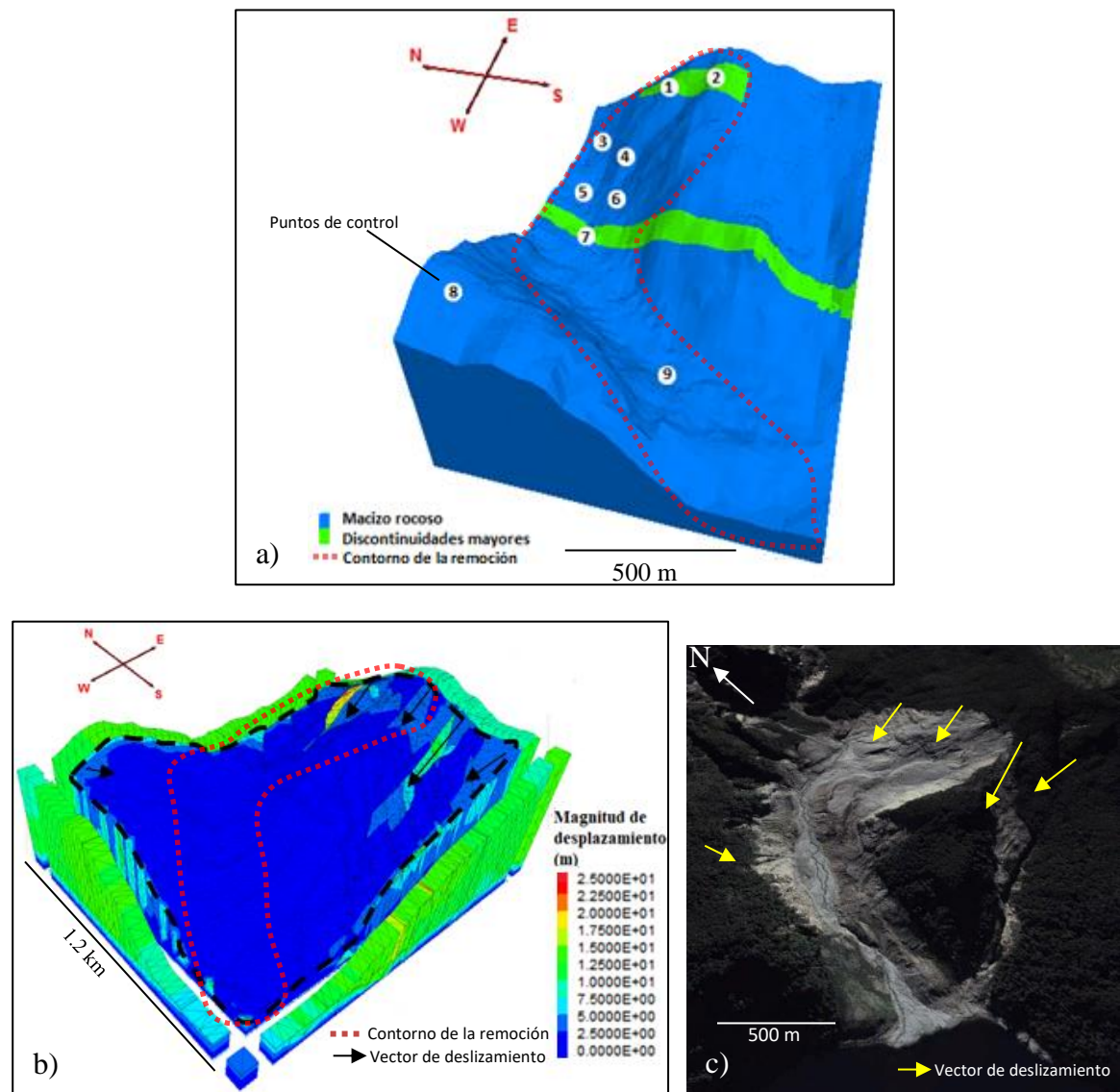


Ilustración 67: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 2, estación CAP luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.

Analizando los factores de amplificación, se tiene que en este modelo todos los puntos de control y en casi todos los ejes se manifiesta amplificación de PGA, concentrándose los mayores valores en los puntos de control 2 y 7 (ver tabla 20). La mayor amplificación se registra en el punto de control 7, con un valor de 36 y un PGA máximo de 1.58 g en el mismo punto. No se observa una relación de amplificación de PGA con la altura de los puntos de control.

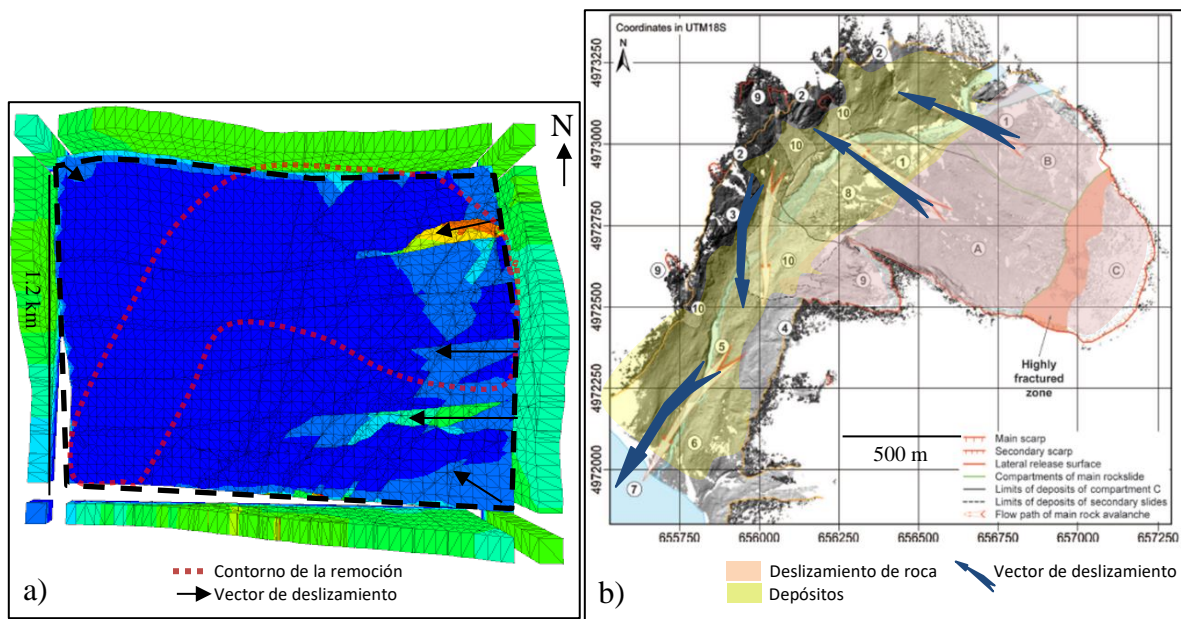


Ilustración 68: a) Vista en planta del estado final del Modelo 2, estación CAP luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo desprendimiento y deslizamiento de roca y, la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.

5.2.4 Terremoto de Morgan Hill, estación GMR

5.2.4.1 Modelo 1

Este modelo manifiesta un desplazamiento en áreas reducidas concentradas en los sectores más altos del talud. Estos movimientos rondan entre los 2 m y 7.5 m (ver ilustración 69 b), siendo el punto de control 2 el que presenta los mayores desplazamientos cuyo valor máximo es de 1.34 m en la componente N-S (ver tabla 21). Observando los gráficos de desplazamiento (ver ilustración 51) los puntos de control más afectados son los números 1, 2 y 8, apreciándose también una proporcionalidad entre el desplazamiento y la altura del punto de control. El eje que muestra mayor respuesta es el N-S.

Los desplazamientos siguen la orientación de la pendiente que tiene una tendencia E-W mayormente, lo que no coincide a cabalidad con lo propuesto por Oppikofer (2012) en donde, como se ha mencionado, el desplazamiento sigue una tendencia más bien NW. El área desplazada en el modelo se encuentra dentro de las zonas propuestas por Oppikofer (2012) en donde ocurrió deslizamiento de roca (ver ilustración 70). Al igual que en casos anteriores, se aprecia el deslizamiento fuera de la remoción original, al sur del talud (ver ilustración 69).

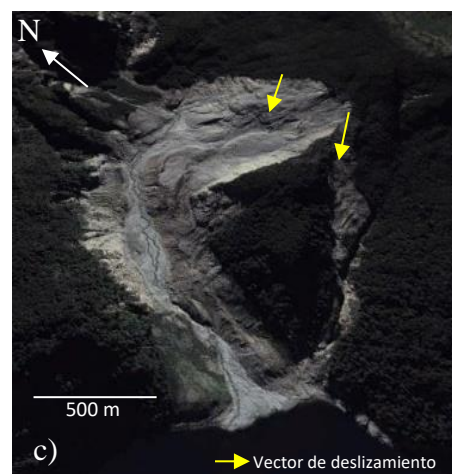
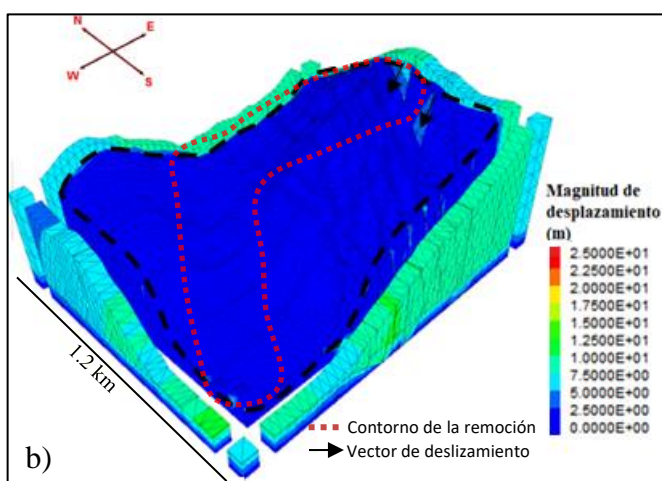
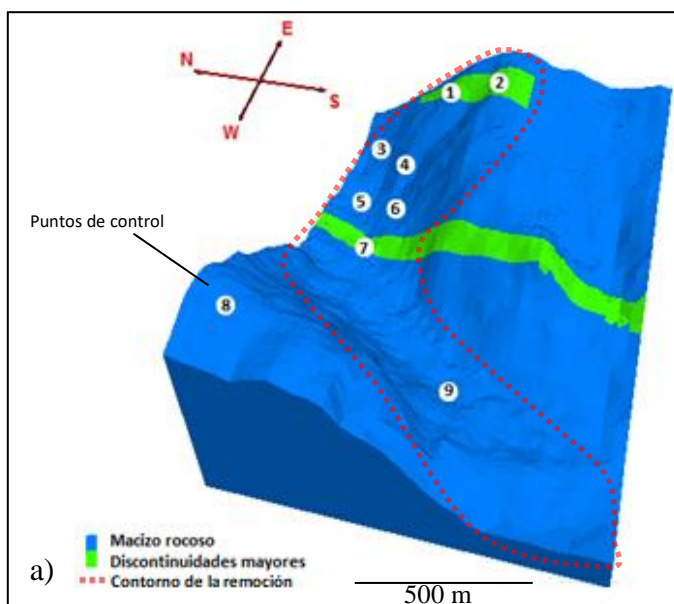


Ilustración 69: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 1, estación GMR luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.

En este modelo, los PGA amplifican en todos los puntos de control, pero no en todos sus ejes. El mayor registro se muestra en el punto de control 2 con un valor de 6.4 y un PGA de 0.85 g y en el punto 8 con un valor de 4.9 y un PGA de 0.87 g (ver tabla 21).

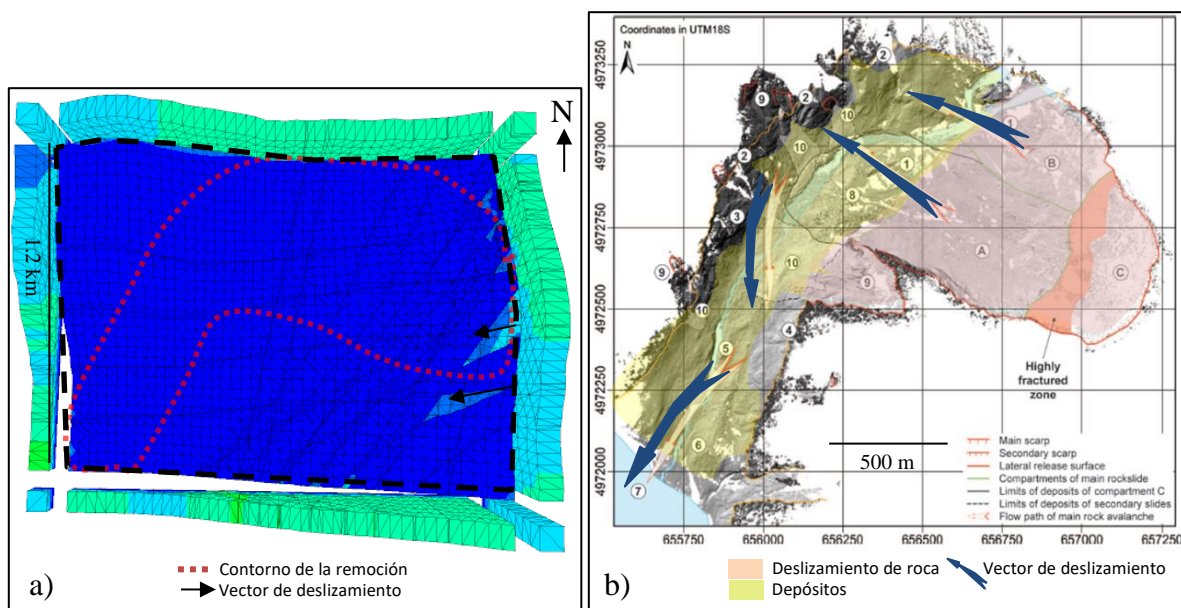


Ilustración 70: a) Vista en planta del estado final del Modelo 1, estación GMR luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo desprendimiento y deslizamiento de roca, y la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.

5.2.4.2 Modelo 2

Los desplazamientos de este modelo se muestran en mayores áreas en comparación con el Modelo 1. En este caso también abarca los sectores más altos del talud, con valores que varían entre los 2 m y los 15 m aproximadamente (ver ilustración 71 b). Observando la tabla 22, el punto de control que presenta mayor desplazamiento es el punto 2, con un valor máximo de 2.83 m en la componente N-S.

Observando los gráficos de desplazamiento (ver ilustración 53), los puntos de control más afectados son los números 1, 2, 4 y 8 y la componente que muestra mayor respuesta es la N-S. El desplazamiento es proporcional a la altura del punto de control, a excepción del punto 3.

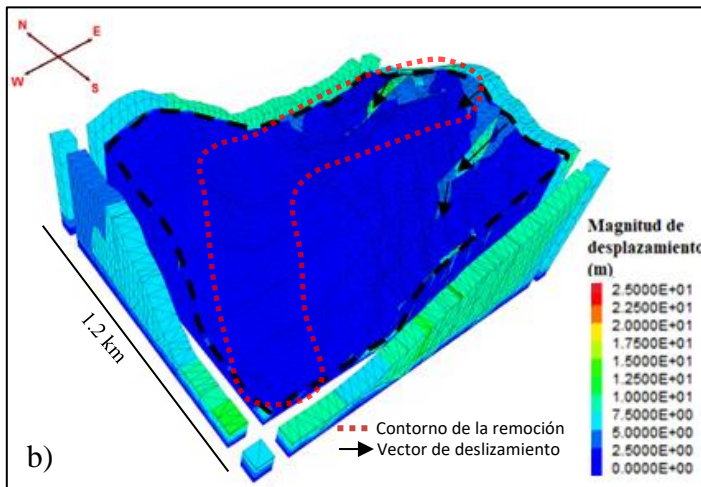
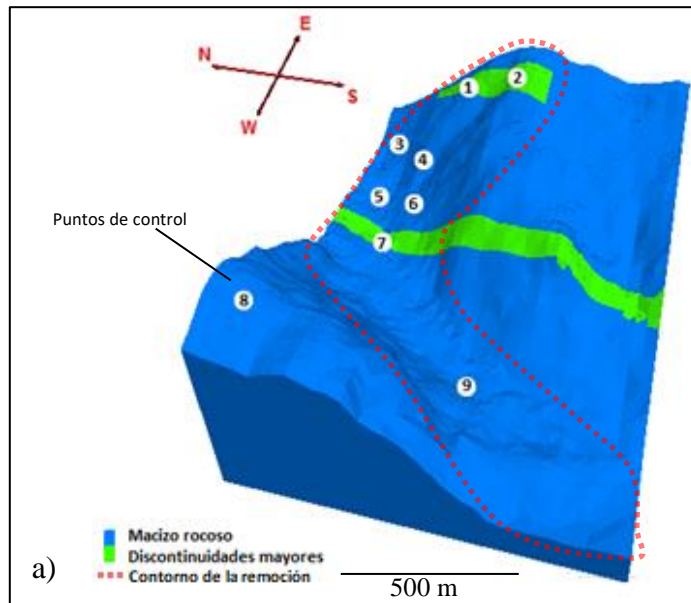


Ilustración 71: a) Puntos de control usados en el modelo. b) Estado final del Modelo 2, estación GMR luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. c) Fotografía real del deslizamiento de Punta Cola orientado en la misma dirección que b). Fuente: Google Earth. 2013.

Respecto a la dirección de desplazamiento, al igual que en los casos anteriores, se tiene una tendencia E-W que se diferencia a lo propuesto por Oppikofer en donde la dirección tiende al NW (ver ilustración 72). También se puede observar la remoción fuera de la línea punteada que tiene una leve tendencia SW al sur del talud (ver ilustración 71). Esta remoción es observada en modelos anteriores.

Respecto a los factores de amplificación, el mayor registro lo tiene el punto de control 2 con un valor de 11.2, pero el PGA máximo se encuentra en el punto 7 con un valor de 1.71 g (ver tabla 22). La amplificación de PGA no se muestra proporcional a la altura.

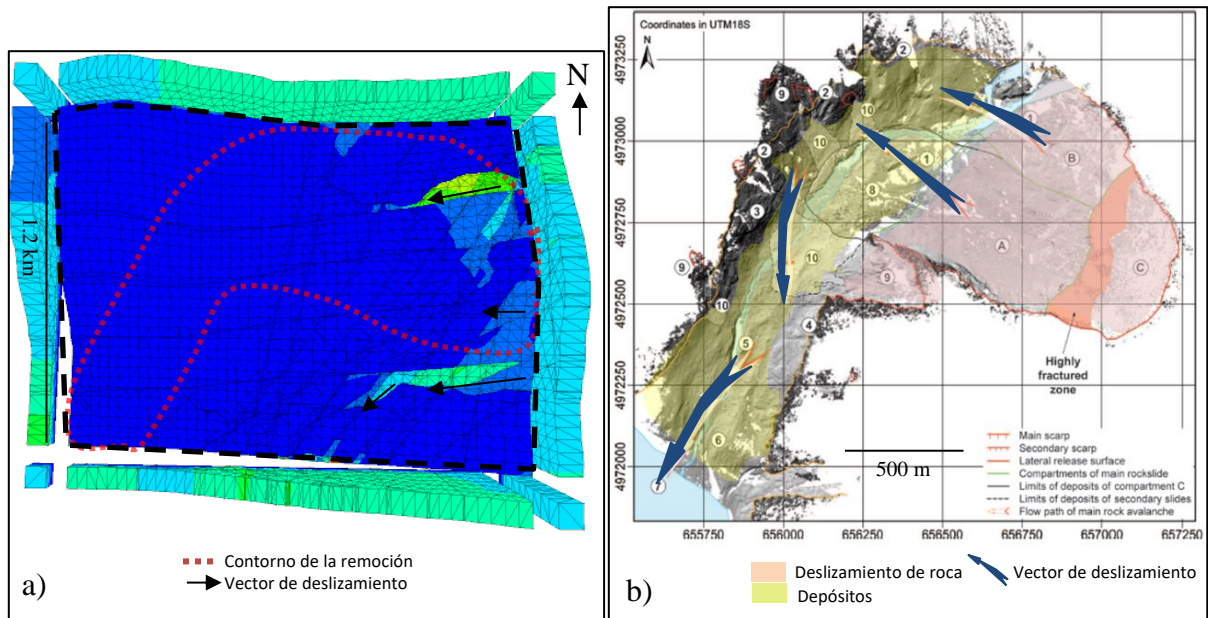


Ilustración 72: a) Vista en planta del estado final del Modelo 2, estación GMR luego de 53 s compilado el modelamiento. El deslizamiento se considera de la línea punteada color negro hacia el interior. Lo exterior es afectado por las condiciones de borde. b) Vista en planta del deslizamiento. Las flechas azules indican dirección del deslizamiento. La zona color rosa representa donde hubo deslizamiento de roca y la zona color amarillo, los depósitos generados por el deslizamiento y posterior avalancha. Fuente: (Modificado) Oppikofer et al. 2012.

En resumen, el punto de control 2 es el que manifestó mayor desplazamiento en la gran mayoría de los modelos y la componente N-S presenta las mayores respuestas frente al input sísmico.

Las mayores amplificaciones se registraron en distintos puntos, pero en su mayoría en los puntos 2 y 8, aunque no en todos los casos coincide con el PGA máximo. Tampoco se observa una relación con la altura del talud, ya que el punto 7, donde también presentó altos valores de amplificación y PGA en algunos de los casos estudiados, es uno de los de menor altura en el modelo.

Cabe agregar, que en los escenarios de las estaciones CAP (Modelo 1 y 2) y GMR (Modelo 2), se observan amplificaciones de aceleración con valores mayores a la decena, que son altamente exagerados si se comparan con lo recomendado en la Eurocode 8 (2004), en donde señala que las amplificaciones en acantilados y laderas deben ser mayores a 1.2 y, en el trabajo de Sepúlveda et al (2004), en donde se señala que las amplificaciones debido a topografía deben variar entre 2 y 5. Además, en el trabajo de Sepúlveda et al. (2005) se sugieren valores de amplificación, en base a análisis de Newmark, entre 5 y 10.

Adicionalmente, como fue expuesto, la amplificación no es proporcional a la altura del talud, aspecto que también destaca la Eurocode 8 (2004) para cumplirse en una situación como la modelada. Además, las amplificaciones deberían disminuir su valor con la altura hasta llegar a la base con un valor igual a 1, es decir, las aceleraciones medidas en la base del modelo debe ser equivalente al valor del input (Eurocode, 2004). Sin embargo, en muchos casos resultantes, se muestra una disminución de la amplificación, llegando a valores menores a uno.

Por lo tanto, no se manifiesta el fenómeno de amplificación topográfica. Esto puede deberse a la configuración de condiciones de borde en donde no se incluye una capa viscosa basal que evitara la reflexión de ondas del registro sísmico. Esta configuración, como se nombró a principios de este capítulo, fue integrada en el trabajo de Escudero (2017), pero no fue incluido en este trabajo debido a las bajas respuestas de amplificación observadas.

Ordenando los modelos frente a sus respuestas dinámicas, se tiene que el sismo que presentó mayores desplazamientos es el Terremoto de Morgan Hill, estación AND, seguida por la estación CAP y GMR del mismo terremoto, y finalmente, el registro de la estación perteneciente al Terremoto de Parkfield (ver ilustración 73 y 74). En general, los modelos no presentan grandes desplazamientos frente al input sísmico, ya que los resultados de varios casos muestran valores de desplazamiento menores a 10 metros en varias zonas donde debería ocurrir la remoción según imágenes y bibliografía. Esto puede deberse a que las estaciones escogidas del Terremoto de Morgan Hill se encuentran a grandes distancias del epicentro (a más de 17 km). En el caso del Terremoto de Parkfield, que, a pesar de encontrarse su estación a 500 m del epicentro, sus modelos fueron los que mostraron menores desplazamientos. Esto último se debe a que la magnitud de momento del Terremoto de Parkfield es menor al ocurrido en Aysén.

Observando los valores de Intensidad de Arias (Ia) de los registros ingresados al modelo, presentes en las tablas 12 y 14, el sismo que posee los mayores valores (promediando los valores de los ejes) es el de la estación AND de Morgan Hill. Lo sigue el registro de la estación GMR del mismo sismo, luego el registro del sismo Parkfield y finalmente, la estación CAP de Morgan Hill (ver ilustración 73).

Con respecto a los valores de PGA inicial (ver tablas 12 y 14), el mayor PGA promedio se presenta en el sismo de Parkfield con los valores máximos en todos sus ejes, seguido por la estación AND de Morgan Hill. Luego le siguen la estación GMR y CAP (ver ilustración 73).

Relación entre los registros ingresados al modelamiento

- Cercanía al epicentro: **Parkfield > AND > GMR > CAP**
- Desplazamiento: **AND > CAP > GMR > Parkfield**
- Intensidad de Arias: **AND > GMR > Parkfield > CAP**
- PGA inicial: **Parkfield > AND > GMR > CAP**

Ilustración 73: Relaciones entre los registros de las estaciones de Parkfield, AND, CAP y GMR respecto a distintos aspectos. Las estaciones se encuentran ordenadas de mayor a menor.

La estación CAP presenta mayor desplazamiento que la estación GMR a pesar de ser la estación más lejana al epicentro y mostrar los valores más bajos de PGA e Intensidades de Arias (ver ilustración 73). Comparando en detalle los PGA e Intensidad de Arias de las estaciones CAP y GMR (ver tabla 14), se puede observar que los valores del eje x (E-W) son mayores en la estación CAP para ambos parámetros, lo que podría determinar la importancia de este componente en la remoción, que justamente coincide con la pendiente principal del talud y es la dirección por la que recorre el deslizamiento de Punta Cola. La estación del Terremoto de

Parkfield no entrará a esta parte de la discusión debido a que la magnitud de su registro es menor al sismo ocurrido en Aysén.

Analizando los comportamientos de las estaciones estudiadas, el factor de primer orden para el de deslizamiento es la magnitud del sismo (M_w), ya que para el caso de Parkfield (M_w 6), cuya estación se encuentra a menos de 1 km del epicentro, es el que manifiesta menor movimiento en comparación a los resultados de los casos de Morgan Hill (M_w 6.2). El factor de segundo orden es la distancia al epicentro, ya que, entre las estaciones de Morgan Hill, la que tuvo un movimiento considerablemente mayor, es la estación AND, que se encuentra a una menor distancia epicentral (17 km) en comparación a las otras que se ubican a distancias mucho mayores (38 y 45 km). El factor de tercer orden es el PGA e Intensidad de Arias del componente E-W (eje x), debido al análisis realizado a las dos estaciones más lejanas (CAP y GMR).

El Modelo 2, en todos los escenarios estudiados, manifiesta mayores movimientos que el Modelo 1. Respecto a las discontinuidades menores, los sets de estructuras integrados a los modelos son suficientes para generar la remoción, sin embargo, en el Modelo 2, la presencia del set D7 genera un aumento del movimiento tanto en magnitud como en el número de zonas afectadas, actuando como un factor de cuarto orden en la remoción.

Respecto a las discontinuidades mayores (zonas de baja calidad de roca), el HFZ genera una zona de debilidad debido al bajo GSI integrado, ya que las mayores magnitudes de movimiento se localizan en esa zona, aunque no se comprueba si esto ocurre por el bajo GSI o por la gran concentración de sets de estructuras menores en esta zona. La Falla Punta Cola, por el contrario, no ejerce algún control observable respecto al movimiento. Esto puede deberse a que las discontinuidades menores se concentran en la cabeza del talud, no alcanzando a afectar la zona de la FPC.

Finalmente, se tiene que el caso estudiado que mejor se ajusta al deslizamiento ocurrido en Punta Cola, es el Modelo 2 realizado con el input sísmico del Terremoto de Morgan Hill, estación AND. Esto se debe a que el área de remoción se ajusta a lo estudiado por Oppikofer (2012) y porque además presenta la remoción lateral al sur del talud. Cabe destacar, que las características sísmicas de este registro son concordantes con la sismicidad local de la región de Aysén, debido a la profundidad del evento, cercano a los 10 km, mecanismo focal *strike slip* y magnitud del evento.

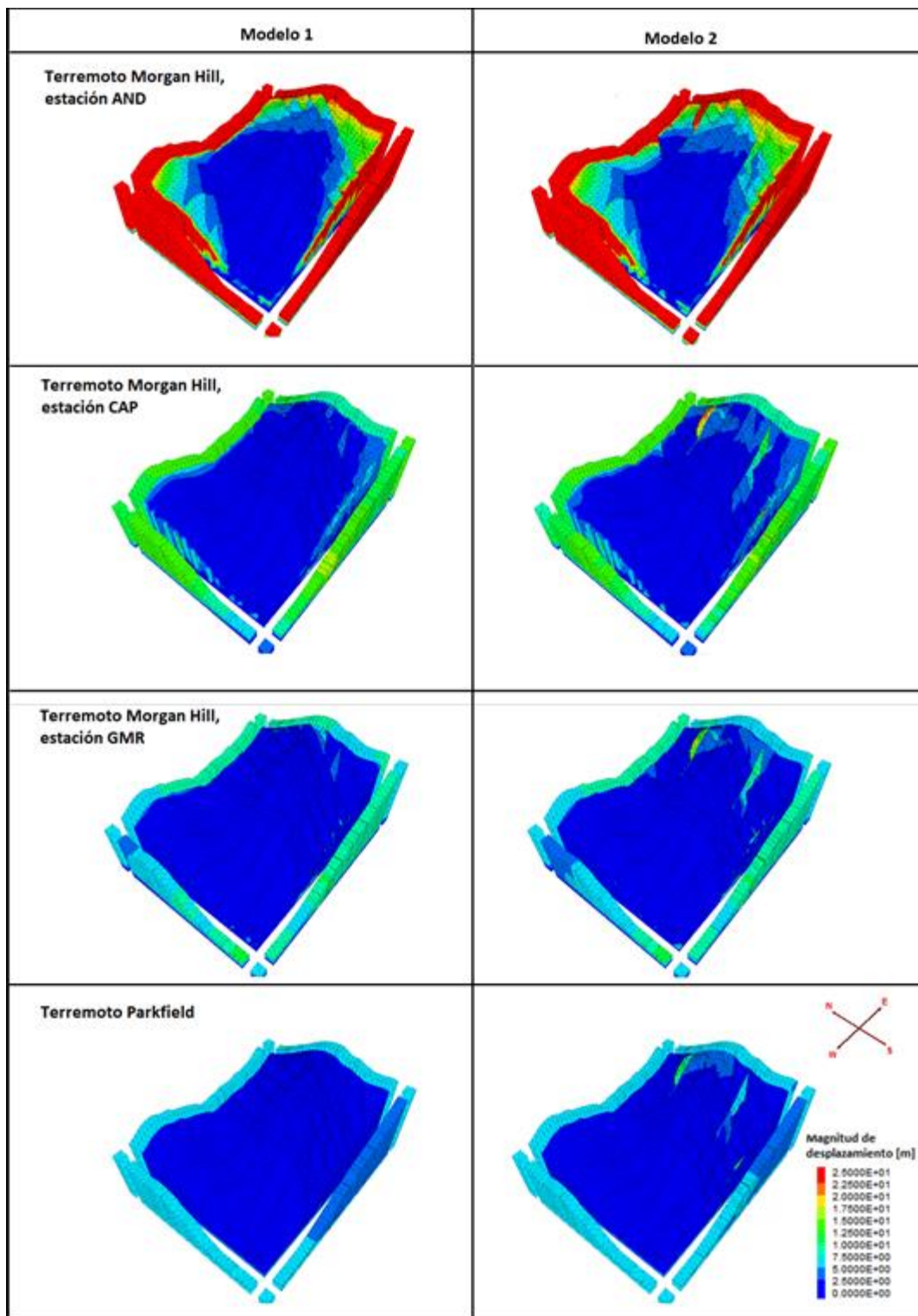


Ilustración 74: Cuadro comparativo de los contornos de desplazamiento de todos los modelos analizados. Con escala fija de máximo 25 m. Los modelos se encuentran ordenados de mayor desplazamiento (arriba) a menor desplazamiento (abajo).

6 Conclusiones

- 3DEC es un programa apto para realizar el modelamiento de Punta Cola. Sin embargo, el tiempo es un factor sensible en la compilación. El tiempo de compilación se incrementa considerablemente al aumentar la resolución del DEM para la construcción de la geometría. Lo mismo sucede al integrar una gran cantidad de sets de discontinuidades al modelo. Por lo que se recomienda usar una resolución que optimice el funcionamiento del software, y una cantidad mínima de sets que permitan representar de manera óptima y simplificada la situación real.
- Para recrear de manera general el comportamiento de un talud de grandes dimensiones (mayores a 1 km de ancho y 2 km de largo) frente a diferentes escenarios sísmicos y estáticos, 3DEC es una buena alternativa debido a la interactividad que brinda al usuario para la manipulación de objetos en 3D y diversas formas de visualización de los modelos.
- En el caso estático, el modelo coincide con el caso real, mostrando estabilidad en pocos segundos y movimientos centimétricos que no son considerables en comparación a la escala del talud estudiado. Validando así el software en este tipo de análisis.
- En el caso dinámico, el modelo parece no tener grandes respuestas frente al input sísmico en la mayoría de los casos, teniéndose como resultado, valores de desplazamiento menores a 10 metros en varias zonas en donde se esperaba remoción. Esto puede deberse a que las estaciones escogidas se encuentran lejos del epicentro (a más de 30 km) y una de ellas, a pesar de encontrarse a 500 metros (Parkfield), presenta una magnitud de momento menor al ocurrido en la zona de estudio.
- El caso estudiado que más se ajusta al caso real de Punta Cola, es el Modelo 2, realizado con el input sísmico de terremoto Morgan Hill, estación AND. Sus desplazamientos máximos en la zona de escarpe rondan entre los 20 y 25 metros, generándose una remoción en la zona más alta del talud. Las características sísmicas son concordantes a la sismicidad local, debido a la profundidad del evento, cercano a los 10 km, y mecanismo focal *strike slip*.
- Por lo tanto, las condiciones sísmicas que pudieron ser responsables de las remociones en el evento de abril del 2007 son las correspondientes a la estación AND, del sismo de Morgan Hill:
 - Mw 6.2
 - Mecanismo focal *strike slip* dextral
 - Hipocentro de 8,7 km de profundidad
 - PGA de 0.42, 0.28 y 0.18 g (para los ejes x, y, z respectivamente)
 - Ia de 0.68, 0.84, 0.29 m/s (para los ejes x, y, z respectivamente)
 - V_s^{30} de 488.77 m/s
- En el caso de los PGA resultantes en los puntos de control, se observaron casos en que estos valores estaban altamente amplificados, esto puede solucionarse cambiando la configuración de condiciones de borde. Sin embargo, el fenómeno de amplificación

topográfica no se manifiesta de la manera teóricamente correcta, ya que no es proporcional a la altura del talud.

- Respecto a las discontinuidades mayores (zonas de baja calidad de roca), el HFZ genera una zona de debilidad debido a su ubicación dentro del talud, ya que las mayores magnitudes de movimiento se localizan en esa zona. La Falla Punta Cola, por el contrario, no ejerce algún control observable respecto al movimiento. Esto puede deberse a que las discontinuidades menores se concentran en la cabeza del talud, no alcanzando a afectar la zona de la FPC.
- Los sets de estructuras de las discontinuidades menores son suficientes para manifestar la remoción, sin embargo, la presencia del set D7 en el Modelo 2, genera un aumento del movimiento tanto en magnitud como en el número de zonas afectadas en el modelo, actuando como un factor secundario en la remoción.
- Los errores en el modelamiento pueden estar asociados a falta de información exacta de la zona de estudio, ya que las propiedades de las discontinuidades menores fueron obtenidas de la localidad de Punta Grafiti y las propiedades del macizo se obtuvieron mediante interpolación de datos de estudios anteriores para el fiordo en general.
- Por lo que, para obtener una respuesta más exacta de remociones en masa en un modelamiento numérico, se requiere una fuente de información lo más precisa posible, ya sea mediante visitas a terreno, obtención de muestras, ensayos triaxiales y uniaxiales, fotografías a la zona de estudio en diferentes escalas, etc.

7 Bibliografía

- Arancibia, G., Cembrano, J., & Lavenu, A. (1999). Transpresión dextral y partición de la deformación en la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, Aisén, Chile (44-45°S). *Revista geológica de Chile*, 26(1), 03-22.
- Bakun, W. H., Clark, M. M., Cockerham, R. S., Ellsworth, A. G., Lindh, A. G., Prescott, W. H., ... & Spudich, P. (1984). The 1984 Morgan Hill, California, earthquake. *Science*, 225, 288-292.
- Cembrano, J., Hervé, F., & Lavenu, A. (1996). The Liquine Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics*, 259(1-3), 55-66.
- Chowdhury, I., & Dasgupta, S. P. (2003). Computation of Rayleigh damping coefficients for large systems. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 8(0), 1-11.
- Cruden, D.M. Bulletin of the International Association of Engineering Geology (1991) 43: 27. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Delgado, S. (2004) *"Relación entre perfil del basamento en fiordos y canales y la morfoestructura regional en Norpatagonia."* Memoria de Título. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- Escudero, 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, Departamento de Geología.
- Eurocode, C. E. N. (1998). 8 (2004). *European Committee for Standardization. Design of Structures for Earthquake Resistance-Part, 5.*
- García, M. (2016) *"Análisis dinámico de un deslizamiento traslacional de roca provocado por acción sísmica mediante el uso de elementos discretos"*. Memoria de Título. Universidad de Chile, Departamento de Geología.

- Gischig, V. S., Eberhardt, E., Moore, J. R., & Hungr, O. (2015). On the seismic response of deep-seated rock slope instabilities—Insights from numerical modeling. *Engineering Geology*, 193, 1-18.
- Glueer, F., & Loew, S. (2015). Rock Bridge Failure Caused by the Aysèn 2007 Earthquake (Patagonia, Chile). In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2* (pp. 775-780). Springer, Cham.
- Goel, R. K., & Chadwell, C. (2004). Preliminary report on September 28, 2004 Parkfield earthquake. *Civil and Environmental Engineering*, 78.
- Greve, F. (1964). Historia de la Sismología en Chile. Publicación del Instituto de Geofísica y Sismología, Universidad de Chile, Santiago.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Pearson Educación.
- Hauser, A. (1993). Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología. *Boletín*, (59).
- Herve, F., Mpodozis, C., Davidson, J., & Godoy, E. (2010). Observaciones estructurales y petrográficas en el basamento metamórfico del archipiélago de Los Chonos, entre el canal King y el canal Ninualac, Aisén. *Andean Geology*, (13-14).
- Highland, L., & Bobrowsky, P. T. (2008). *The landslide handbook: a guide to understanding landslides* (p. 129). Reston: US Geological Survey.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. El criterio de rotura de Hoek-Brown—Edición 2002 Hoek-Brown failure criterion—2002 Edition.
- Hoose, S. N. (1987). *The Morgan Hill, California, Earthquake of April 24, 1984* (No. 1639). US Government Printing Office.
- Inc, Itasca (2013). Consulting Group. *3DEC 3 Dimensional Distinct Element Code User's Guide*. Minneapolis, Minnesota.

- Lara, M, Sepúlveda, S. (2008). "Remociones en masa" Apuntes del curso GL62C. Departamento de Geología, Universidad de Chile
- Lastras, G., Amblas, D., Calafat, A. M., Canals, M., Frigola, J., Hermanns, R. L., ... & Vargas, G. (2013). Landslides cause tsunami waves: insights from Aysén Fjord, Chile. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94(34), 297-298
- Lastras, G., Amblas, D., Canals, M., & Party, D. S. (2016). Fjord-flank collapse and associated deformation in Aysén Fjord, Chile. *Geological Society, London, Memoirs*, 46(1), 107-108.
- Legrand, D., Barrientos, S., Bataille, K., Cembrano, J., & Pavez, A. (2011). The fluid-driven tectonic swarm of Aysen Fjord, Chile (2007) associated with two earthquakes (Mw= 6.1 and Mw= 6.2) within the Liquiñe-Ofqui Fault Zone. *Continental Shelf Research*, 31(3), 154-161.
- Lemos, J. V. (2013). Recent developments and future trends in distinct element methods—UDEEC/3DEC and PFC codes. *XAFS for Everyone*, 17.
- Mora, C., Comte, D., Russo, R., Gallego, A., & Mocanu, V. (2010). Análisis del enjambre sísmico de Aysén (Enero, 2007) utilizando Joint Hypocentral Determination. *Santiago*, 22, S9_057.
- Naranjo, J. A., Arenas, M., Clavero, J., & Muñoz, O. (2009). Mass movement-induced tsunamis: main effects during the Patagonian Fjordland seismic crisis in Aysén (45° 25'S), Chile. *Andean Geology*, 36(1).
- Naranjo, J. A., Arenas, M., & Clavero, J. (2009). Lecciones de la crisis sísmica de Aysén 2007. *Santiago*, 22, S2_011.
- Oppikofer, T., Hermanns, R. L., Redfield, T. F., Sepúlveda, S. A., Duhart, P., & Bascuñán, I. (2012). Morphologic description of the Punta Cola rock avalanche and associated minor rockslides caused by the 21 April 2007 Aysén earthquake (Patagonia, southern Chile). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69(3), 339-353.

- Redfield, T., Hermanns, R., Oppikofer, T., Duhart, P., Mella, M., Derch, P., ... & Rebolledo, S. (2011, January). Analysis of the 2007 earthquake-induced Punta Cola rockslide and tsunami, Aysén fjord, Patagonia, Chile (45.38 S, 73.0 W). In *5th international conference on earthquake geotechnical engineering, Santiago, paper* (Vol. 12).
- SERNAGEOMIN, Niemeyer, H., & J. Skarmeta M. (1984). *Hojas Península de Taitao y Puerto Aisén: Región de Aisén del General Carlos Ibañez del Campo: Carta Geológica de Chile 1: 500.000*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Chile.
- SERNAGEOMIN. (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.
- Sepúlveda, S. A., Murphy, W., & Petley, D. N. (2004). The role of topographic amplification effects on the generation of earthquake-induced rock slope failures. *Landslides, Evaluation and Stabilization*. Lacerda, WA, Ehrlich, M., Fontoura, SAB and Sayao, SF (eds.), Balkema, 1, 311-315.
- Sepúlveda, S. A., Murphy, W., & Petley, D. N. (2005). Topographic controls on coseismic rock slides during the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38(2), 189-196.
- Sepúlveda, S. A., & Serey, A. (2010). Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the April 21, 2007 Aisén earthquake, southern Chile (45.5° S). *Andean Geology*, 36(1), 131-136.
- Sepúlveda, S. A., Serey, A., Lara, M., Pavez, A., & Rebolledo, S. (2010). Landslides induced by the April 2007 Aysén fjord earthquake, Chilean Patagonia. *Landslides*, 7(4), 483-492.
- Serey Amador, A. J. (2011). *Análisis de las Remociones en Masa Generadas por el Terremoto del Fiordo Aysén de 2007 (45, 5° S)*. Memoria de Título. Universidad de Chile, Departamento de Geología.

- Universidad de Chile (2009). Línea de base Estudio de Impacto Ambiental "Proyecto Central Hidroeléctrica Cuervo".
<http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=3965520>
- Unsworth, M., and P. A. Bedrosian (2004), Electrical resistivity structure at the SAFOD site from magnetotelluric exploration, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12S05, *doi*: 10.1029/2003GL019405
- Vanegas Bravo, C. A. (2010). *Estudio sobre criterios de rotura mediante métodos tenso deformaciones y métodos de equilibrio límite para un macizo rocoso con aplicación al talud izquierdo del cuenco disipador del Proyecto Hidroeléctrico Mazar* (Master's thesis). Universidad de Cuenca
- Vargas, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S., Thiele, R., Townley, B., Padilla, C., ... & Herrera, M. (2009). La ruptura sísmica submarina de Abril de 2007 y tectónica activa en la Falla Liquiñe-Ofqui, Aysén, Chile. *Santiago*, 22, S9_089.
- Vargas, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S. A., Lahsen, A., Thiele, R., Townley, B., ... & Lara, M. (2013). Submarine earthquake rupture, active faulting and volcanism along the major Liquiñe-Ofqui Fault Zone and implications for seismic hazard assessment in the Patagonian Andes. *Andean Geology*, 40(1).
- Vargas (2017). Fallas Corticales. Seminario de Geotecnia. Universidad de Chile, Santiago.
- Vejar, 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, Departamento de Geología.
- Wieczorek, G. F. (1996). Landslide triggering mechanisms. *Landslides: Investigation and mitigation*, 247, 76-90.

8 Anexos

8.1 Anexo A: Construcción de topografía del modelo en base a prismas triangulares

Como se menciona en el capítulo 3, “Implementación del modelo”, en la sección 3.3.1, para la construcción de la geometría del modelo se hizo uso de información obtenida a partir de datos de levantamientos con escáner láser LIDAR junto a datos de terreno. Con estos datos se generó un DEM del área de estudio (pre deslizamiento).

El DEM tuvo que ser trabajado previamente para ser luego importado a 3DEC. Para ello, fue necesario el uso de ArcGis. Los pasos realizados se muestran a continuación (modificado de Vejar, 2016).

- Añadir el DEM al fichero del proyecto en ArcMap
- Crear un polígono (*shapefile*) para delimitar la zona, éste debe presentar el mismo sistema de referencia espacial que el DEM.
- El polígono debe poseer sus lados ortogonales entre sí (ej.: un cuadrado o un rectángulo). Esto es para que el comando *free field*, aplicado al caso dinámico, pueda ser ejecutado.
- Usar la herramienta “Extraer por Máscara”, en el *ArcToolbox*. Seleccionar como ráster de entrada el DEM y como máscara de identidad, ingresar el polígono construido.
- Al DEM resultante del paso anterior, se puede modificar el ancho de pixel haciendo clic con botón derecho al DEM en el fichero del proyecto, luego seleccionar “*Export data*”. Se abrirá una ventana en donde se puede modificar directamente el tamaño de pixel (*cell size*). Para efectos de este trabajo se usó un tamaño de pixel de 40 m.
- Usar la herramienta “De ráster a punto”, ubicado en el *ArcToolbox*. Como ráster de entrada, seleccionar el archivo modificado del paso anterior.
- Usar la herramienta “Exportar atributo de entidad a ASCII. Indicar como archivo de entrada el *shapefile* de puntos obtenidos en el paso previo, marcar el campo de valor correspondiente a “GRID_CODE”. El archivo de texto resultante corresponde a las coordenadas x, y, z de los centroides de cada pixel.
- Importar el archivo de texto con las coordenadas a AutoCAD (el software debe tener la extensión de CivilCAD) en el menú CivilCAD > Puntos > Terreno > Importar
- Seleccionar en el mismo menú CivilCAD > Altimetría > Triangulación > Terreno. Con esto se realiza la triangulación de las coordenadas importadas.
- Exportar el terreno triangulado como archivo *.dxf*

- En la página oficial de ITASCA, <http://www.itascacg.com/software/product-manager/extruded-geometries-in-3dec>, están presentes los códigos para descargar de forma libre que sirven para importar el terreno triangulado (con extensión *.dxf*) a 3DEC.
- Estos códigos (ver códigos 1 y 2), que se muestran a continuación, realiza la extrusión de la geometría importada, convirtiéndola a superficies usando el comando de 3DEC *Poly Prism*

8.1.1 Código 1

```

def extrude(geom_set, zcoord, filename)
;
; Function to create 3DEC blocks from a geometry surface
; by extruding in the z direction
;
; commands will be written to a file for reading
;
; INPUT: geom_set - the name of the geometry set to be extruded (string)
;         zcoord   - z coordinate for the end of the extrusion (float)
;         filename - name of file to hold poly commands (string)

    status = open(filename,1,1)
    if status > 0
        local io = out(filename+' could not be opened for writing.    status =
'+string(status))
        exit
    end_if

; array for writing lines to a file
file_line = get_array(1)

local gset = gset_find(geom_set)
loop foreach local gpol gpol_list(gset)
;   if gpol_check(gpol) = 1 ; polygon is valid

; a side of prism
file_line(1) = 'poly prism a '
loop i (1,gpol_size(gpol))
    gn = gpol_node(gpol,i)
    gnpos = gn_pos(gn)
    file_line(1) = file_line(1) + string(gnpos)+' '
end_loop
file_line(1) = file_line(1) + '...'
status = write(file_line,1)

; b side of prism
file_line(1) = ' b '
loop i (1,gpol_size(gpol))
    gn = gpol_node(gpol,i)
    gnpos = gn_pos(gn)
    newpos = vector(xcomp(gnpos),ycomp(gnpos),zcoord)
    file_line(1) = file_line(1) + string(newpos)+' '
end_loop
status = write(file_line,1)
;   else ; invalid polygon
;       status = out('Invalid polygon: '+string(gpol_id(gpol)))
;   end_if
end_loop

```

```

status = close
end

```

8.1.2 Código 2

```

new
geometry import topo-fix.dxf

set atol 0.01

call extrude.3dfis
@extrude('topo-fix',1000,'blocks.3ddat'); El Segundo parámetro de esta línea
corresponde al valor de z mínimo
call blocks

```

8.2 Anexo B: Obtención de parámetros para zonas en donde hubo deslizamiento

Criterio de Hoek-Brown generalizado (ec 1). (Extraído de Hoek, 2002)

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

Donde m_b es un valor que proviene de la constante del material, m_i . Su fórmula está dada en la ecuación 2.

$$mb = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (2)$$

El GSI utilizado para zonas en donde hubo deslizamiento, es la dada por el trabajo de Serey. (2011), cuyos valores varían entre 35 y 45. El parámetro escogido, GSI=35, es para mantener un criterio conservador en el análisis. s y a corresponden a constantes del macizo rocoso (ec. 3 y 4)

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

$$a = 1/2 + 1/6(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (4)$$

D es un factor que depende del grado de alteración que ha sido sometido el macizo rocoso, en donde $D=0$ corresponde a un macizo rocoso inalterado y $D=1$ a un macizo rocoso muy alterado (Hoek, 2002). Para este trabajo, se consideró un $D=0.5$

Para transformar los parámetros de Hoek-Brown a Mohr-Coulomb, se hizo uso del software RocLab de Rocscience, ingresando los parámetros solicitados (ver ilustración 75)

Hoek-Brown Classification	
sigci	210 MPa
GSI	35
mi	22
D	0.5

Ilustración 75: Parámetros ingresados a RocLab

Los valores de sigci, GSI y mi, fueron obtenidos a partir de Serey. (2011) (ver tabla 8).

Finalmente, los parámetros de Mohr-Coulomb, cohesión y ángulo de fricción, son los mostrados en la ilustración 76. Estos valores fueron los ingresados al programa para las discontinuidades mayores.

Mohr-Coulomb Fit	
c	8.112 MPa
phi	26.23 deg

Ilustración 76: Parámetros Mohr-Coulomb resultantes

8.3 Anexo C: Código casos estáticos

```
;Modelo 1 y Modelo 2
new
;base
poly prism a (655435,4.97194e+06,0) (655435,4.9719e+06,0) (655475,4.9719e+06,0) ...
b (655435,4.97194e+06,-7.4123) (655435,4.9719e+06,-7.4123) (655475,4.9719e+06,-
7.4123)
poly prism a (655475,4.9719e+06,0) (655515,4.9719e+06,0) (655475,4.97194e+06,0) ...
b (655475,4.9719e+06,-7.4123) (655515,4.9719e+06,-7.4123) (655475,4.97194e+06,-
7.4123)
poly prism a (655475,4.97194e+06,0) (655515,4.9719e+06,0) (655515,4.97194e+06,-
0.301436) ...
b (655475,4.97194e+06,-7.4123) (655515,4.9719e+06,-7.4123) (655515,4.97194e+06,-
7.4123)
poly prism a (655475,4.9719e+06,0) (655475,4.97194e+06,0) (655435,4.97194e+06,0) ...
b (655475,4.9719e+06,-7.4123) (655475,4.97194e+06,-7.4123) (655435,4.97194e+06,-
7.4123)
poly prism a (655435,4.97194e+06,0) (655475,4.97194e+06,0) (655475,4.97198e+06,-
2.12286) ...
b (655435,4.97194e+06,-7.4123) (655475,4.97194e+06,-7.4123) (655475,4.97198e+06,-
7.4123)
poly prism a (655435,4.97198e+06,0) (655475,4.97198e+06,-2.12286)
(655435,4.97202e+06,0) ...
b (655435,4.97198e+06,-7.4123) (655475,4.97198e+06,-7.4123) (655435,4.97202e+06,-
7.4123)
poly prism a (655435,4.97198e+06,0) (655435,4.97194e+06,0) (655475,4.97198e+06,-
2.12286) ...
b (655435,4.97198e+06,-7.4123) (655435,4.97194e+06,-7.4123) (655475,4.97198e+06,-
7.4123)
poly prism a (655435,4.97202e+06,0) (655475,4.97198e+06,-2.12286)
(655475,4.97202e+06,-6.63867) ...
```



```

b (655435,4.97202e+06,-7.4123) (655475,4.97198e+06,-7.4123) (655475,4.97202e+06,-
7.4123)
poly prism a (655475,4.97198e+06,-2.12286) (655515,4.97198e+06,-7.16589)
(655475,4.97202e+06,-6.63867) ...
b (655475,4.97198e+06,-7.4123) (655515,4.97198e+06,-7.4123) (655475,4.97202e+06,-
7.4123)
poly prism a (655515,4.97198e+06,-7.16589) (655475,4.97198e+06,-2.12286)
(655515,4.97194e+06,-0.301436) ...
b (655515,4.97198e+06,-7.4123) (655475,4.97198e+06,-7.4123) (655515,4.97194e+06,-
7.4123)
poly prism a (655515,4.97198e+06,-7.16589) (655515,4.97194e+06,-0.301436)
(655555,4.97194e+06,-3.12896) ...
b (655515,4.97198e+06,-7.4123) (655515,4.97194e+06,-7.4123) (655555,4.97194e+06,-
7.4123)
poly prism a (655475,4.97202e+06,-6.63867) (655515,4.97198e+06,-7.16589)
(655515,4.97202e+06,-6.78256) ...
b (655475,4.97202e+06,-7.4123) (655515,4.97198e+06,-7.4123) (655515,4.97202e+06,-
7.4123)
poly prism a (655475,4.97194e+06,0) (655515,4.97194e+06,-0.301436)
(655475,4.97198e+06,-2.12286) ...
b (655475,4.97194e+06,-7.4123) (655515,4.97194e+06,-7.4123) (655475,4.97198e+06,-
7.4123)
poly prism a (655435,4.97202e+06,0) (655475,4.97202e+06,-6.63867)
(655475,4.97206e+06,-7.4123) ...
b (655435,4.97202e+06,-7.4123) (655475,4.97202e+06,-7.4123) (655475,4.97206e+06,-
7.4123)

```

```

;mesa

```

```

poly brick 655435 657115 4.9719e+06 4.97318e+06 -108.4123 -7.4123

```

```

group block 'Base'
join on range group 'Base'
join_contact on range group 'Base'
mark region 1
join on range plane dip 0 dd 0 origin 0 0 800 below
join_contact on range plane dip 0 dd 0 origin 0 0 800 below
plot block

```

```

;Estructuras mayores

```

```

;FPC

```

```

SET atol 0.0001
jset dip 90 dd 101 origin 656372 4.97257e+06 0
jset dip 90 dd 101 origin 656287 4.97258e+06 0
hide range plane dip 90 dd 101 origin 656372 4.97257e+06 0 normal 0.9848 -0.1736 0
hide range plane dip 90 dd 101 origin 656287 4.97258e+06 343.379 normal -0.9848
0.1736 0
group block 'FPC'
mark region 3
seek

```

```

;HFZ

```

```

SET atol 0.0001
jset dip 90 dd 110 origin 656980 4.97277e+06 0
hide range plane dip 90 dd 110 origin 656980 4.97277e+06 0 normal -0.93969 0.342 0
jset dip 90 dd 100 origin 657036 4.9726e+06 0
hide range plane dip 90 dd 100 origin 657036 4.9726e+06 0 normal 0.9848 -0.17364 0
jset dip 90 dd 0 origin 656318 4.97243e+06 0
hide range plane dip 90 dd 0 origin 656318 4.97243e+06 0 normal 0 -1 0
jset dip 90 dd 0 origin 657059 4.97294e+06 0
hide range plane dip 90 dd 0 origin 657059 4.97294e+06 0 normal 0 1 0
group block 'HFZ'
mark region 4
seek

```

```

join on range plane dip 0 dd 0 origin 0 0 800 below
join_contact on range plane dip 0 dd 0 origin 0 0 800 below

plot create plot 'Blocks'
plot block colorby material axes

;Estructuras menores
set atol 0.0001
;jset dip 26.5 dd 283 spacing 100 num 1 origin 656674 4.9726e+06 387.874 id 16; Set D7
(incluir solo en Modelo 2)
jset dip 81 dd 178 spacing 200 num 4 origin 656834 4.97266e+06 581.471 id 10; Set D1
jset dip 79 dd 126 spacing 100 num 4 origin 656885 4.9726e+06 566.014 id 11; Set D2
jset dip 52 dd 304 spacing 100 num 4 origin 657019 4.97231e+06 589.045 id 12; Set D3
jset dip 76 dd 300 spacing 100 num 4 origin 656829 4.97266e+06 534.078 id 13; Set D3'

save armadopremesh.sav

;propiedad materiales (parámetros Mohr Coulomb)
change cons 2 mat 1 ;Modelo constitutivo M-C
change cons 2 mat 2
change jcons 2 mat 3
;Materiales Base (regiones 1 y 2)
prop mat=1 dens 2800 bulk 4.0833e10 g 1.8846e10 bcohesion 17e+06 bfriction 54 btension
12.35e+06 ;GSI=50 y unidades en [Pa],[Pa]/m, y grados
;intento3 c=17MPa, 7.5 MPa
;Materiales estructuras mayores (regiones 3 y 4)
prop mat=2 dens 2800 bulk 4.0833e10 g 1.8846e10 bcohesion 8.112e+06 bfriction 26.23
btension 16.464e+06 ;GSI=35 y unidades en [Pa],[Pa]/m, y grados

;Asignación de materiales
change mat 1 range region 1 ;2 ;Asignar propiedades (mat=1) a las regiones de la
base
change mat 2 range region 3 4 ;Asignar propiedades(mat=2) a las regiones de las
estructura

;Propiedades estructuras menores id= 10 11 12 13
prop jmat=3 jkn 3.2e+10 jks 3.2e+09 jfric 33 jcohesion 1e4 jtensile 1e3 ;jtensile
1e3 coh oficial 1e4
change jmat 3 range z -108.4123 800

gen edge 100 alternate

bound zvel 0 range z -108.4123 -7.4123 ;Base inmóvil
bound yvel 0 range z -108.4123 -7.4123 ;Bordes inmóviles
bound xvel 0 range z -108.4123 -7.4123
bound yvel 0 range y 4.9719e+06
bound yvel 0 range y 4.97318e+06
bound xvel 0 range x 655435
bound xvel 0 range x 657115

gravity 0 0 -9.81
damp local

set small
history xvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history xvelocity 656962 4.97264e+06 0
history yvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history yvelocity 656962 4.97264e+06 0
history zvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history zvelocity 656962 4.97264e+06 0

def static
ga = gp_near(656974,4.97259e+06,673.766)
gb = gp_near(657025,4.97271e+06,646.326)

```

```

gc = gp_near(657025,4.97284e+06,581.614)
gd = gp_near(656966,4.973e+06,450.315)
ge = gp_near(656805,4.97279e+06,466.17)
gf = gp_near(656574,4.97307e+06,260.301)
gg = gp_near(656556,4.97295e+06,272.173)
gh = gp_near(656420,4.97265e+06,380.151)
gi = gp_near(656355,4.97291e+06,215.263)
gj = gp_near(655691,4.97316e+06,538.832)
gk = gp_near(655834,4.97261e+06,140.623)
gl = gp_near(656322,4.97229e+06,401.244)
gm = gp_near(655748,4.97232e+06,75.1731)

array a1(1)
array a3(1)
array a05(1)
array a07(1)
array a09(1)
array a011(1)
array a013(1)
array a015(1)
array a017(1)
array a019(1)
array a021(1)
array a023(1)
array a025(1)
array aend1(1)

status = open('Casoestaticoarmado3v4.csv',1,1)

Loop n (1,3000)

    posxa = gp_xdis(ga)
    posya = gp_ydis(ga)
    posza = gp_zdis(ga)

    posxb = gp_xdis(gb)
    posyb = gp_ydis(gb)
    poszb = gp_zdis(gb)

    posxc = gp_xdis(gc)
    posyc = gp_ydis(gc)
    poszc = gp_zdis(gc)

    posxd = gp_xdis(gd)
    posyd = gp_ydis(gd)
    poszd = gp_zdis(gd)

    posxe = gp_xdis(ge)
    posye = gp_ydis(ge)
    posze = gp_zdis(ge)

    posxf = gp_xdis(gf)
    posyf = gp_ydis(gf)
    poszf = gp_zdis(gf)

    posxg = gp_xdis(gg)
    posyg = gp_ydis(gg)
    poszg = gp_zdis(gg)

    posxh = gp_xdis(gh)
    posyh = gp_ydis(gh)
    poszh = gp_zdis(gh)

    posxi = gp_xdis(gi)
    posyi = gp_ydis(gi)

```

```

poszi = gp_zdis(gi)

posxj = gp_xdis(gj)
posyj = gp_ydis(gj)
poszj = gp_zdis(gj)

posxk = gp_xdis(gk)
posyk = gp_ydis(gk)
poszk = gp_zdis(gk)

posxl = gp_xdis(gl)
posyl = gp_ydis(gl)
poszl = gp_zdis(gl)

posxm = gp_xdis(gm)
posym = gp_ydis(gm)
poszm = gp_zdis(gm)

a1(1)
string(time)+' '+string(unbal_ratio)+' '+string(posxa)+' '+string(posya)+' '+string(po
sza)
a3(1) = string(posxb)+' '+string(posyb)+' '+string(poszb)
a05(1) = string(posxc)+' '+string(posyc)+' '+string(poszc)
a07(1) = string(posxd)+' '+string(posyd)+' '+string(poszd)
a09(1) = string(posxe)+' '+string(posye)+' '+string(posze)
a011(1) = string(posxf)+' '+string(posyf)+' '+string(poszf)
a013(1) = string(posxg)+' '+string(posyg)+' '+string(poszg)
a015(1) = string(posxh)+' '+string(posyh)+' '+string(poszh)
a017(1) = string(posxi)+' '+string(posyi)+' '+string(poszi)
a019(1) = string(posxj)+' '+string(posyj)+' '+string(poszj)
a021(1) = string(posxk)+' '+string(posyk)+' '+string(poszk)
a023(1) = string(posxl)+' '+string(posyl)+' '+string(poszl)
a025(1) = string(posxm)+' '+string(posym)+' '+string(poszm)
aend1(1)
a1(1)+' '+a3(1)+' '+a05(1)+' '+a07(1)+' '+a09(1)+' '+a011(1)+' '+a013(1)+' '+a015(1)+'
'+a017(1)+' '+a019(1)+' '+a021(1)+' '+a023(1)+' '+a025(1)

status = write(aend1,1)
outs=out(unbal_ratio)
command

cycle time 0.01
endcommand

endloop
status = close

end
@static

save Casoestaticoarmado3v4.sav
plot history 2
plot history 3
plot history 1 2 3

```

8.4 Anexo D: Código casos dinámicos

```
----CASO Parkfield 3v3 (Modelo 2)----

restore casoestaticoarmado3v3.sav ;Modelo estático 2
plot block

set jcondf 2 ;modelo constitutivo para nuevas discontinuidades
set small on
; FF
ffield apply
; Damping/amortiguamiento
damp 0.005 2.236

table 1 read 'park_36414_5_90.csv' ;ejex
table 3 read 'park_36414_5_up.csv' ;ejez
table 2 read 'park_36414_5_360_2.csv' ;ejey

reset time

boundary xvelocity 1 history=table 1 range z -108.4123 ; -7.4123
boundary yvelocity 1 history=table 2 range z -108.4123 ; -7.4123
boundary zvelocity 1 history=table 3 range z -108.4123 ; -7.4123

history xvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history xvelocity 656962 4.97264e+06 0

history yvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history yvelocity 656962 4.97264e+06 0

history zvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history zvelocity 656962 4.97264e+06 0

def dina
  ga = gp_near(656974,4.97259e+06,673.766)
  gb = gp_near(657025,4.97271e+06,646.326)
  gc = gp_near(657025,4.97284e+06,581.614)
  gd = gp_near(656966,4.973e+06,450.315)
  ge = gp_near(656805,4.97279e+06,466.17)
  gf = gp_near(656574,4.97307e+06,260.301)
  gg = gp_near(656556,4.97295e+06,272.173)
  gh = gp_near(656420,4.97265e+06,380.151)
  gi = gp_near(656355,4.97291e+06,215.263)
  gj = gp_near(655691,4.97316e+06,538.832)
  gk = gp_near(655834,4.97261e+06,140.623)
  gl = gp_near(656322,4.97229e+06,401.244)
  gm = gp_near(655748,4.97232e+06,75.1731)

  array a01(1)
  array a03(1)
  array a5(1)
  array a7(1)
  array a9(1)
  array a11(1)
  array a13(1)
  array a15(1)
  array a17(1)
  array a19(1)
  array a21(1)
  array a23(1)
  array a25(1)
```

```

array aend2(1)

status = open('casodinamicoarmado3v320.csv',1,1)
loop n (1,2250)

    velxa = gp_xvel(ga)
    velya = gp_yvel(ga)
    velza = gp_zvel(ga)

    posxa = gp_xdis(ga)
    posya = gp_ydis(ga)
    posza = gp_zdis(ga)

    velxb = gp_xvel(gb)
    velyb = gp_yvel(gb)
    velzb = gp_zvel(gb)

    posxb = gp_xdis(gb)
    posyb = gp_ydis(gb)
    poszb = gp_zdis(gb)

    velxc = gp_xvel(gc)
    velyc = gp_yvel(gc)
    velzc = gp_zvel(gc)

    posxc = gp_xdis(gc)
    posyc = gp_ydis(gc)
    poszc = gp_zdis(gc)

    velxd = gp_xvel(gd)
    velyd = gp_yvel(gd)
    velzd = gp_zvel(gd)

    posxd = gp_xdis(gd)
    posyd = gp_ydis(gd)
    poszd = gp_zdis(gd)

    velxe = gp_xvel(ge)
    velye = gp_yvel(ge)
    velze = gp_zvel(ge)

    posxe = gp_xdis(ge)
    posye = gp_ydis(ge)
    posze = gp_zdis(ge)

    velxf = gp_xvel(gf)
    velyf = gp_yvel(gf)
    velzf = gp_zvel(gf)

    posxf = gp_xdis(gf)
    posyf = gp_ydis(gf)
    poszf = gp_zdis(gf)

    velxg = gp_xvel(gg)
    velyg = gp_yvel(gg)
    velzg = gp_zvel(gg)

    posxg = gp_xdis(gg)
    posyg = gp_ydis(gg)
    poszg = gp_zdis(gg)

    velxh = gp_xvel(gh)
    velyh = gp_yvel(gh)
    velzh = gp_zvel(gh)

```

```
posxh = gp_xdis(gh)
posyh = gp_ydis(gh)
poszh = gp_zdis(gh)
```

```
velxi = gp_xvel(gi)
velyi = gp_yvel(gi)
velzi = gp_zvel(gi)
```

```
posxi = gp_xdis(gi)
posyi = gp_ydis(gi)
poszi = gp_zdis(gi)
```

```
velxj = gp_xvel(gj)
velyj = gp_yvel(gj)
velzj = gp_zvel(gj)
```

```
posxj = gp_xdis(gj)
posyj = gp_ydis(gj)
poszj = gp_zdis(gj)
```

```
velxk = gp_xvel(gk)
velyk = gp_yvel(gk)
velzk = gp_zvel(gk)
```

```
posxk = gp_xdis(gk)
posyk = gp_ydis(gk)
poszk = gp_zdis(gk)
```

```
velxl = gp_xvel(gl)
velyl = gp_yvel(gl)
velzl = gp_zvel(gl)
```

```
posxl = gp_xdis(gl)
posyl = gp_ydis(gl)
poszl = gp_zdis(gl)
```

```
velxm = gp_xvel(gm)
velym = gp_yvel(gm)
velzm = gp_zvel(gm)
```

```
posxm = gp_xdis(gm)
posym = gp_ydis(gm)
poszm = gp_zdis(gm)
```

```

a01(1) =
string(time)+' '+string(velxa)+' '+string(velya)+' '+string(velza)+' '+string(posxa)+'
'+string(posya)+' '+string(posza)
a03(1) =
string(velxb)+' '+string(velyb)+' '+string(velzb)+' '+string(posxb)+' '+string(posyb)+
'+string(poszb)
a5(1) =
string(velxc)+' '+string(velyc)+' '+string(velzc)+' '+string(posxc)+' '+string(posyc)+
'+string(poszc)
a7(1) =
string(velxd)+' '+string(velyd)+' '+string(velzd)+' '+string(posxd)+' '+string(posyd)+
'+string(poszd)
a9(1) =
string(velxe)+' '+string(velye)+' '+string(velze)+' '+string(posxe)+' '+string(posye)+
'+string(posze)
a11(1) =
string(velxf)+' '+string(velyf)+' '+string(velzf)+' '+string(posxf)+' '+string(posyf)+
'+string(poszf)
```



```

                a13(1) =
string(velxg)+' ,'+string(velyg)+' ,'+string(velzg)+' ,'+string(posxg)+' ,'+string(posyg)+
' ,'+string(poszg)
                a15(1) =
string(velxh)+' ,'+string(velyh)+' ,'+string(velzh)+' ,'+string(posxh)+' ,'+string(posyh)+
' ,'+string(poszh)
                a17(1) =
string(velxi)+' ,'+string(velyi)+' ,'+string(velzi)+' ,'+string(posxi)+' ,'+string(posyi)+
' ,'+string(poszi)
                a19(1) =
string(velxj)+' ,'+string(velyj)+' ,'+string(velzj)+' ,'+string(posxj)+' ,'+string(posyj)+
' ,'+string(poszj)
                a21(1) =
string(velxk)+' ,'+string(velyk)+' ,'+string(velzk)+' ,'+string(posxk)+' ,'+string(posyk)+
' ,'+string(poszk)
                a23(1) =
string(velxl)+' ,'+string(velyl)+' ,'+string(velzl)+' ,'+string(posxl)+' ,'+string(posyl)+
' ,'+string(poszl)
                a25(1) =
string(velxm)+' ,'+string(velym)+' ,'+string(velzm)+' ,'+string(posxm)+' ,'+string(posym)+
' ,'+string(poszm)
                aend2(1) =
a01(1)+' ,'+a03(1)+' ,'+a5(1)+' ,'+a7(1)+' ,'+a9(1)+' ,'+a11(1)+' ,'+a13(1)+' ,'+a15(1)+' ,'+a
17(1)+' ,'+a19(1)+' ,'+a21(1)+' ,'+a23(1)+' ,'+a25(1)

```

```

                status = write(aend2,1)
                command
                cycle time 0.02

```

```

                endcommand
        endloop
        status = close
end
@dina

```

```
save casodinamicoarmado3v320.sav
```

```
plot history 1
plot history 2
plot history 3

```

```
----CASO Parkfield 3v4 (Modelo 1)----
```

```
restore casoestaticoarmado3v4.sav ;Modelo estático 1
plot block

```

```
set jcondf 2 ;modelo contitutivo para nuevas discontinuidades
set small on
; FF
ffield apply
; Damping/amortiguamiento
damp 0.005 2.236

```

```
table 1 read 'park_36414_5_90.csv' ;ejex
table 3 read 'park_36414_5_up.csv' ;ejez
table 2 read 'park_36414_5_360_2.csv' ;ejey

```

```
reset time

```

```
boundary xvelocity 1 history=table 1 range z -108.4123 ; -7.4123
boundary yvelocity 1 history=table 2 range z -108.4123 ; -7.4123
boundary zvelocity 1 history=table 3 range z -108.4123 ; -7.4123

```

```
history xvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history xvelocity 656962 4.97264e+06 0
```

```
history yvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history yvelocity 656962 4.97264e+06 0
```

```
history zvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history zvelocity 656962 4.97264e+06 0
```

```
def dina
```

```
ga = gp_near(656974,4.97259e+06,673.766)
gb = gp_near(657025,4.97271e+06,646.326)
gc = gp_near(657025,4.97284e+06,581.614)
gd = gp_near(656966,4.973e+06,450.315)
ge = gp_near(656805,4.97279e+06,466.17)
gf = gp_near(656574,4.97307e+06,260.301)
gg = gp_near(656556,4.97295e+06,272.173)
gh = gp_near(656420,4.97265e+06,380.151)
gi = gp_near(656355,4.97291e+06,215.263)
gj = gp_near(655691,4.97316e+06,538.832)
gk = gp_near(655834,4.97261e+06,140.623)
gl = gp_near(656322,4.97229e+06,401.244)
gm = gp_near(655748,4.97232e+06,75.1731)
```

```
array a01(1)
array a03(1)
array a5(1)
array a7(1)
array a9(1)
array a11(1)
array a13(1)
array a15(1)
array a17(1)
array a19(1)
array a21(1)
array a23(1)
array a25(1)
array aend2(1)
```

```
status = open('casodinamicoarmado3v420.csv',1,1)
loop n (1,2250)
```

```
velxa = gp_xvel(ga)
velya = gp_yvel(ga)
velza = gp_zvel(ga)
```

```
posxa = gp_xdis(ga)
posya = gp_ydis(ga)
posza = gp_zdis(ga)
```

```
velxb = gp_xvel(gb)
velyb = gp_yvel(gb)
velzb = gp_zvel(gb)
```

```
posxb = gp_xdis(gb)
posyb = gp_ydis(gb)
poszb = gp_zdis(gb)
```

```
velxc = gp_xvel(gc)
velyc = gp_yvel(gc)
velzc = gp_zvel(gc)
```

```
posxc = gp_xdis(gc)
```

```
posyc = gp_ydis(gc)
poszc = gp_zdis(gc)

velxd = gp_xvel(gd)
velyd = gp_yvel(gd)
velzd = gp_zvel(gd)

posxd = gp_xdis(gd)
posyd = gp_ydis(gd)
poszd = gp_zdis(gd)

velxe = gp_xvel(ge)
velye = gp_yvel(ge)
velze = gp_zvel(ge)

posxe = gp_xdis(ge)
posye = gp_ydis(ge)
posze = gp_zdis(ge)

velxf = gp_xvel(gf)
velyf = gp_yvel(gf)
velzf = gp_zvel(gf)

posxf = gp_xdis(gf)
posyf = gp_ydis(gf)
poszf = gp_zdis(gf)

velxg = gp_xvel(gg)
velyg = gp_yvel(gg)
velzg = gp_zvel(gg)

posxg = gp_xdis(gg)
posyg = gp_ydis(gg)
poszg = gp_zdis(gg)

velxh = gp_xvel(gh)
velyh = gp_yvel(gh)
velzh = gp_zvel(gh)

posxh = gp_xdis(gh)
posyh = gp_ydis(gh)
poszh = gp_zdis(gh)

velxi = gp_xvel(gi)
velyi = gp_yvel(gi)
velzi = gp_zvel(gi)

posxi = gp_xdis(gi)
posyi = gp_ydis(gi)
poszi = gp_zdis(gi)

velxj = gp_xvel(gj)
velyj = gp_yvel(gj)
velzj = gp_zvel(gj)

posxj = gp_xdis(gj)
posyj = gp_ydis(gj)
poszj = gp_zdis(gj)

velxk = gp_xvel(gk)
velyk = gp_yvel(gk)
velzk = gp_zvel(gk)

posxk = gp_xdis(gk)
posyk = gp_ydis(gk)
```

```

poszk = gp_zdis(gk)

velx1 = gp_xvel(g1)
vely1 = gp_yvel(g1)
velz1 = gp_zvel(g1)

posx1 = gp_xdis(g1)
posy1 = gp_ydis(g1)
posz1 = gp_zdis(g1)

velxm = gp_xvel(gm)
velym = gp_yvel(gm)
velzm = gp_zvel(gm)

posxm = gp_xdis(gm)
posym = gp_ydis(gm)
poszm = gp_zdis(gm)

a01(1) =
string(time)+' '+string(velxa)+' '+string(velya)+' '+string(velza)+' '+string(posxa)+'
'+string(posya)+' '+string(posza)
a03(1) =
string(velxb)+' '+string(velyb)+' '+string(velzb)+' '+string(posxb)+' '+string(posyb)+'
'+string(poszb)
a5(1) =
string(velxc)+' '+string(velyc)+' '+string(velzc)+' '+string(posxc)+' '+string(posyc)+'
'+string(poszc)
a7(1) =
string(velxd)+' '+string(velyd)+' '+string(velzd)+' '+string(posxd)+' '+string(posyd)+'
'+string(poszd)
a9(1) =
string(velxe)+' '+string(velye)+' '+string(velze)+' '+string(posxe)+' '+string(posye)+'
'+string(posze)
a11(1) =
string(velxf)+' '+string(velyf)+' '+string(velzf)+' '+string(posxf)+' '+string(posyf)+'
'+string(poszf)
a13(1) =
string(velxg)+' '+string(velyg)+' '+string(velzg)+' '+string(posxg)+' '+string(posyg)+'
'+string(poszg)
a15(1) =
string(velxh)+' '+string(velyh)+' '+string(velzh)+' '+string(posxh)+' '+string(posyh)+'
'+string(poszh)
a17(1) =
string(velxi)+' '+string(velyi)+' '+string(velzi)+' '+string(posxi)+' '+string(posyi)+'
'+string(poszi)
a19(1) =
string(velxj)+' '+string(velyj)+' '+string(velzj)+' '+string(posxj)+' '+string(posyj)+'
'+string(poszj)
a21(1) =
string(velxk)+' '+string(velyk)+' '+string(velzk)+' '+string(posxk)+' '+string(posyk)+'
'+string(poszk)
a23(1) =
string(velxl)+' '+string(velyl)+' '+string(velzl)+' '+string(posxl)+' '+string(posyl)+'
'+string(poszl)
a25(1) =
string(velxm)+' '+string(velym)+' '+string(velzm)+' '+string(posxm)+' '+string(posym)+'
'+string(poszm)
aend2(1) =
a01(1)+' '+a03(1)+' '+a5(1)+' '+a7(1)+' '+a9(1)+' '+a11(1)+' '+a13(1)+' '+a15(1)+' '+a
17(1)+' '+a19(1)+' '+a21(1)+' '+a23(1)+' '+a25(1)

```

```
status = write(aend2,1)
```

```

command
    cycle time 0.02
endcommand
endloop
status = close
end
@dina

save casodinamicoarmado3v420.sav

plot history 1
plot history 2
plot history 3

;;-----CASO CAP 3v3 (Modelo 2)-----
;new
;restore casoestaticoarmado3v3.sav
;set jcondf 2 ;modelo contitutivo para nuevas discontinuidades
;set small on
;; FF
;ffield apply
;; Damping/amortiguamiento
;damp 0.005 2.236
;
;
;;table 1 read 'park_36414_5_90.csv' ;ejex
;;table 3 read 'park_36414_5_up.csv' ;ejez
;;table 2 read 'park_36414_5_360_2.csv' ;ejey
;table 1 read 'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillestacioncap/CAP132.csv' ;eje x
;table 2 read 'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillestacioncap/CAP042.csv' ;eje y
;table 3 read 'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillestacioncap/CAP-UP.csv' ;eje z
;
;
;reset time
;
;boundary xvelocity 1 history=table 1 range z -108.4123 ; -7.4123
;boundary yvelocity 1 history=table 2 range z -108.4123 ; -7.4123
;boundary zvelocity 1 history=table 3 range z -108.4123 ; -7.4123
;
;history xvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
;history xvelocity 656962 4.97264e+06 0
;
;history yvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
;history yvelocity 656962 4.97264e+06 0
;
;history zvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
;history zvelocity 656962 4.97264e+06 0
;
;
;def dina
;    ga = gp_near(656974,4.97259e+06,673.766)
;    gb = gp_near(657025,4.97271e+06,646.326)
;    gc = gp_near(657025,4.97284e+06,581.614)
;    gd = gp_near(656966,4.973e+06,450.315)
;    ge = gp_near(656805,4.97279e+06,466.17)
;    gf = gp_near(656574,4.97307e+06,260.301)
;    gg = gp_near(656556,4.97295e+06,272.173)
;    gh = gp_near(656420,4.97265e+06,380.151)
;    gi = gp_near(656355,4.97291e+06,215.263)
;    gj = gp_near(655691,4.97316e+06,538.832)
;    gk = gp_near(655834,4.97261e+06,140.623)

```

```
;
;   gl = gp_near(656322,4.97229e+06,401.244)
;   gm = gp_near(655748,4.97232e+06,75.1731)
;
;
;   array a01(1)
;   array a03(1)
;   array a05(1)
;   array a07(1)
;   array a09(1)
;   array a11(1)
;   array a13(1)
;   array a15(1)
;   array a17(1)
;   array a19(1)
;   array a21(1)
;   array a23(1)
;   array a25(1)
;   array aend2(1)
;
;   status = open('casodinamicoarmado3v3cap.csv',1,1)
;   loop n (1,9600)
;
;       velxa = gp_xvel(ga)
;       velya = gp_yvel(ga)
;       velza = gp_zvel(ga)
;
;       posxa = gp_xdis(ga)
;       posya = gp_ydis(ga)
;       posza = gp_zdis(ga)
;
;       velxb = gp_xvel(gb)
;       velyb = gp_yvel(gb)
;       velzb = gp_zvel(gb)
;
;       posxb = gp_xdis(gb)
;       posyb = gp_ydis(gb)
;       poszb = gp_zdis(gb)
;
;       velxc = gp_xvel(gc)
;       velyc = gp_yvel(gc)
;       velzc = gp_zvel(gc)
;
;       posxc = gp_xdis(gc)
;       posyc = gp_ydis(gc)
;       poszc = gp_zdis(gc)
;
;       velxd = gp_xvel(gd)
;       velyd = gp_yvel(gd)
;       velzd = gp_zvel(gd)
;
;       posxd = gp_xdis(gd)
;       posyd = gp_ydis(gd)
;       poszd = gp_zdis(gd)
;
;       velxe = gp_xvel(ge)
;       velye = gp_yvel(ge)
;       velze = gp_zvel(ge)
;
;       posxe = gp_xdis(ge)
;       posye = gp_ydis(ge)
;       posze = gp_zdis(ge)
;
;       velxf = gp_xvel(gf)
;       velyf = gp_yvel(gf)
;       velzf = gp_zvel(gf)
;
;
;
```

```

;         posxf = gp_xdis(gf)
;         posyf = gp_ydis(gf)
;         poszf = gp_zdis(gf)
;
;         velxg = gp_xvel(gg)
;         velyg = gp_yvel(gg)
;         velzg = gp_zvel(gg)
;
;         posxg = gp_xdis(gg)
;         posyg = gp_ydis(gg)
;         poszg = gp_zdis(gg)
;
;         velxh = gp_xvel(gh)
;         velyh = gp_yvel(gh)
;         velzh = gp_zvel(gh)
;
;         posxh = gp_xdis(gh)
;         posyh = gp_ydis(gh)
;         poszh = gp_zdis(gh)
;
;         velxi = gp_xvel(gi)
;         velyi = gp_yvel(gi)
;         velzi = gp_zvel(gi)
;
;         posxi = gp_xdis(gi)
;         posyi = gp_ydis(gi)
;         poszi = gp_zdis(gi)
;
;         velxj = gp_xvel(gj)
;         velyj = gp_yvel(gj)
;         velzj = gp_zvel(gj)
;
;         posxj = gp_xdis(gj)
;         posyj = gp_ydis(gj)
;         poszj = gp_zdis(gj)
;
;         velxk = gp_xvel(gk)
;         velyk = gp_yvel(gk)
;         velzk = gp_zvel(gk)
;
;         posxk = gp_xdis(gk)
;         posyk = gp_ydis(gk)
;         poszk = gp_zdis(gk)
;
;         velxl = gp_xvel(gl)
;         velyl = gp_yvel(gl)
;         velzl = gp_zvel(gl)
;
;         posxl = gp_xdis(gl)
;         posyl = gp_ydis(gl)
;         poszl = gp_zdis(gl)
;
;
;         velxm = gp_xvel(gm)
;         velym = gp_yvel(gm)
;         velzm = gp_zvel(gm)
;
;         posxm = gp_xdis(gm)
;         posym = gp_ydis(gm)
;         poszm = gp_zdis(gm)
;
;
;         a01(1)
string(time)+' '+string(velxa)+' '+string(velya)+' '+string(velza)+' '+string(posxa)+'
'+string(posya)+' '+string(posza)
=

```



```

;          a03(1) =
string(velxb)+','+string(velyb)+','+string(velzb)+','+string(posxb)+','+string(posyb)+
','+string(poszb)
;          a5(1) =
string(velxc)+','+string(velyc)+','+string(velzc)+','+string(posxc)+','+string(posyc)+
','+string(poszc)
;          a7(1) =
string(velxd)+','+string(velyd)+','+string(velzd)+','+string(posxd)+','+string(posyd)+
','+string(poszd)
;          a9(1) =
string(velxe)+','+string(velye)+','+string(velze)+','+string(posxe)+','+string(posye)+
','+string(posze)
;          a11(1) =
string(velxf)+','+string(velyf)+','+string(velzf)+','+string(posxf)+','+string(posyf)+
','+string(poszf)
;          a13(1) =
string(velxg)+','+string(velyg)+','+string(velzg)+','+string(posxg)+','+string(posyg)+
','+string(poszg)
;          a15(1) =
string(velxh)+','+string(velyh)+','+string(velzh)+','+string(posxh)+','+string(posyh)+
','+string(poszh)
;          a17(1) =
string(velxi)+','+string(velyi)+','+string(velzi)+','+string(posxi)+','+string(posyi)+
','+string(poszi)
;          a19(1) =
string(velxj)+','+string(velyj)+','+string(velzj)+','+string(posxj)+','+string(posyj)+
','+string(poszj)
;          a21(1) =
string(velxk)+','+string(velyk)+','+string(velzk)+','+string(posxk)+','+string(posyk)+
','+string(poszk)
;          a23(1) =
string(velxl)+','+string(velyl)+','+string(velzl)+','+string(posxl)+','+string(posyl)+
','+string(poszl)
;          a25(1) =
string(velxm)+','+string(velym)+','+string(velzm)+','+string(posxm)+','+string(posym)+
','+string(poszm)
;          aend2(1) =
a01(1)+','+a03(1)+','+a5(1)+','+a7(1)+','+a9(1)+','+a11(1)+','+a13(1)+','+a15(1)+','+a
17(1)+','+a19(1)+','+a21(1)+','+a23(1)+','+a25(1)
;
;
;          status = write(aend2,1)
;          command
;          cycle time 0.005
;
;          endcommand
;
;      endloop
;      status = close
;end
;@dina
;
;save casodinamicoarmado3v3cap.sav
;
;-----CASO AND 3V3 (Modelo 2)-----
new
restore casoestaticoarmado3v3.sav
set jcondf 2 ;modelo contitutivo para nuevas discontinuidades
set small on
; FF
ffield apply
; Damping/amortiguamiento
damp 0.005 2.236

```

```
table 1 read 'park_36414_5_90.csv' ;ejex
```

```

table 3 read 'park_36414_5_up.csv' ;ejez
table 2 read 'park_36414_5_360_2.csv' ;ejey
table      1      read      'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
/sismos/morganhillestacionand/AND250.csv' ;eje x
table      2      read      'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
/sismos/morganhillestacionand/AND340.csv' ;eje y
table      3      read      'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
/sismos/morganhillestacionand/AND-UP.csv' ;eje z

```

```

reset time

```

```

boundary xvelocity 1 history=table 1 range z -108.4123 ; -7.4123
boundary yvelocity 1 history=table 2 range z -108.4123 ; -7.4123
boundary zvelocity 1 history=table 3 range z -108.4123 ; -7.4123

```

```

history xvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history xvelocity 656962 4.97264e+06 0

```

```

history yvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history yvelocity 656962 4.97264e+06 0

```

```

history zvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history zvelocity 656962 4.97264e+06 0

```

```

def dina

```

```

ga = gp_near(656974,4.97259e+06,673.766)
gb = gp_near(657025,4.97271e+06,646.326)
gc = gp_near(657025,4.97284e+06,581.614)
gd = gp_near(656966,4.973e+06,450.315)
ge = gp_near(656805,4.97279e+06,466.17)
gf = gp_near(656574,4.97307e+06,260.301)
gg = gp_near(656556,4.97295e+06,272.173)
gh = gp_near(656420,4.97265e+06,380.151)
gi = gp_near(656355,4.97291e+06,215.263)
gj = gp_near(655691,4.97316e+06,538.832)
gk = gp_near(655834,4.97261e+06,140.623)
gl = gp_near(656322,4.97229e+06,401.244)
gm = gp_near(655748,4.97232e+06,75.1731)

```

```

array a01(1)
array a03(1)
array a5(1)
array a7(1)
array a9(1)
array a11(1)
array a13(1)
array a15(1)
array a17(1)
array a19(1)
array a21(1)
array a23(1)
array a25(1)
array aend2(1)

```

```

status = open('casodinamicoarmado3v3and.csv',1,1)
loop n (1,9000)

```

```

velxa = gp_xvel(ga)
velya = gp_yvel(ga)
velza = gp_zvel(ga)

```

```

posxa = gp_xdis(ga)

```

```
posya = gp_ydis(ga)
posza = gp_zdis(ga)

velxb = gp_xvel(gb)
velyb = gp_yvel(gb)
velzb = gp_zvel(gb)

posxb = gp_xdis(gb)
posyb = gp_ydis(gb)
poszb = gp_zdis(gb)

velxc = gp_xvel(gc)
velyc = gp_yvel(gc)
velzc = gp_zvel(gc)

posxc = gp_xdis(gc)
posyc = gp_ydis(gc)
poszc = gp_zdis(gc)

velxd = gp_xvel(gd)
velyd = gp_yvel(gd)
velzd = gp_zvel(gd)

posxd = gp_xdis(gd)
posyd = gp_ydis(gd)
poszd = gp_zdis(gd)

velxe = gp_xvel(ge)
velye = gp_yvel(ge)
velze = gp_zvel(ge)

posxe = gp_xdis(ge)
posye = gp_ydis(ge)
posze = gp_zdis(ge)

velxf = gp_xvel(gf)
velyf = gp_yvel(gf)
velzf = gp_zvel(gf)

posxf = gp_xdis(gf)
posyf = gp_ydis(gf)
poszf = gp_zdis(gf)

velxg = gp_xvel(gg)
velyg = gp_yvel(gg)
velzg = gp_zvel(gg)

posxg = gp_xdis(gg)
posyg = gp_ydis(gg)
poszg = gp_zdis(gg)

velxh = gp_xvel(gh)
velyh = gp_yvel(gh)
velzh = gp_zvel(gh)

posxh = gp_xdis(gh)
posyh = gp_ydis(gh)
poszh = gp_zdis(gh)

velxi = gp_xvel(gi)
velyi = gp_yvel(gi)
velzi = gp_zvel(gi)

posxi = gp_xdis(gi)
posyi = gp_ydis(gi)
```

poszi = gp_zdis(gi)

velxj = gp_xvel(gj)
velyj = gp_yvel(gj)
velzj = gp_zvel(gj)

posxj = gp_xdis(gj)
posyj = gp_ydis(gj)
poszj = gp_zdis(gj)

velxk = gp_xvel(gk)
velyk = gp_yvel(gk)
velzk = gp_zvel(gk)

posxk = gp_xdis(gk)
posyk = gp_ydis(gk)
poszk = gp_zdis(gk)

velxl = gp_xvel(gl)
velyl = gp_yvel(gl)
velzl = gp_zvel(gl)

posxl = gp_xdis(gl)
posyl = gp_ydis(gl)
poszl = gp_zdis(gl)

velxm = gp_xvel(gm)
velym = gp_yvel(gm)
velzm = gp_zvel(gm)

posxm = gp_xdis(gm)
posym = gp_ydis(gm)
poszm = gp_zdis(gm)

a01(1) =
string(time)+' '+string(velxa)+' '+string(velya)+' '+string(velza)+' '+string(posxa)+'
' '+string(posya)+' '+string(posza)
a03(1) =
string(velxb)+' '+string(velyb)+' '+string(velzb)+' '+string(posxb)+' '+string(posyb)+
' '+string(poszb)
a5(1) =
string(velxc)+' '+string(velyc)+' '+string(velzc)+' '+string(posxc)+' '+string(posyc)+
' '+string(poszc)
a7(1) =
string(velxd)+' '+string(velyd)+' '+string(velzd)+' '+string(posxd)+' '+string(posyd)+
' '+string(poszd)
a9(1) =
string(velxe)+' '+string(velye)+' '+string(velze)+' '+string(posxe)+' '+string(posye)+
' '+string(posze)
a11(1) =
string(velxf)+' '+string(velyf)+' '+string(velzf)+' '+string(posxf)+' '+string(posyf)+
' '+string(poszf)
a13(1) =
string(velxg)+' '+string(velyg)+' '+string(velzg)+' '+string(posxg)+' '+string(posyg)+
' '+string(poszg)
a15(1) =
string(velxh)+' '+string(velyh)+' '+string(velzh)+' '+string(posxh)+' '+string(posyh)+
' '+string(poszh)
a17(1) =
string(velxi)+' '+string(velyi)+' '+string(velzi)+' '+string(posxi)+' '+string(posyi)+
' '+string(poszi)

```

        a19(1) =
string(velxj)+' '+string(velyj)+' '+string(velzj)+' '+string(posxj)+' '+string(posyj)+
','+string(poszj)
        a21(1) =
string(velxk)+' '+string(velyk)+' '+string(velzk)+' '+string(posxk)+' '+string(posyk)+
','+string(poszk)
        a23(1) =
string(velxl)+' '+string(velyl)+' '+string(velzl)+' '+string(posxl)+' '+string(posyl)+
','+string(poszl)
        a25(1) =
string(velxm)+' '+string(velym)+' '+string(velzm)+' '+string(posxm)+' '+string(posym)+
','+string(poszm)
        aend2(1) =
a01(1)+' '+a03(1)+' '+a5(1)+' '+a7(1)+' '+a9(1)+' '+a11(1)+' '+a13(1)+' '+a15(1)+' '+a
17(1)+' '+a19(1)+' '+a21(1)+' '+a23(1)+' '+a25(1)

        status = write(aend2,1)
        command
        cycle time 0.005

        endcommand

    endloop
    status = close
end
@dina

save casodinamicoarmado3v3and.sav

;-----CASO GMR 3V3 (Modelo 2)-----
new
restore casoestaticoarmado3v3.sav
set jcondf 2 ;modelo contitutivo para nuevas discontinuidades
set small on
; FF
ffield apply
; Damping/amortiguamiento
damp 0.005 2.236

;table 1 read 'park_36414_5_90.csv' ;ejex
;table 3 read 'park_36414_5_up.csv' ;ejez
;table 2 read 'park_36414_5_360_2.csv' ;ejej
table 1 read 'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillstaciongmr/GMR090.csv' ;eje x
table 2 read 'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillstaciongmr/GMR000.csv' ;eje y
table 3 read 'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillstaciongmr/GMR-UP.csv' ;eje z

reset time

boundary xvelocity 1 history=table 1 range z -108.4123 ;-7.4123
boundary yvelocity 1 history=table 2 range z -108.4123 ;-7.4123
boundary zvelocity 1 history=table 3 range z -108.4123 ;-7.4123

history xvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history xvelocity 656962 4.97264e+06 0

history yvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history yvelocity 656962 4.97264e+06 0

history zvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history zvelocity 656962 4.97264e+06 0

```

```

def dina
  ga = gp_near(656974,4.97259e+06,673.766)
  gb = gp_near(657025,4.97271e+06,646.326)
  gc = gp_near(657025,4.97284e+06,581.614)
  gd = gp_near(656966,4.973e+06,450.315)
  ge = gp_near(656805,4.97279e+06,466.17)
  gf = gp_near(656574,4.97307e+06,260.301)
  gg = gp_near(656556,4.97295e+06,272.173)
  gh = gp_near(656420,4.97265e+06,380.151)
  gi = gp_near(656355,4.97291e+06,215.263)
  gj = gp_near(655691,4.97316e+06,538.832)
  gk = gp_near(655834,4.97261e+06,140.623)
  gl = gp_near(656322,4.97229e+06,401.244)
  gm = gp_near(655748,4.97232e+06,75.1731)

  array a01(1)
  array a03(1)
  array a5(1)
  array a7(1)
  array a9(1)
  array a11(1)
  array a13(1)
  array a15(1)
  array a17(1)
  array a19(1)
  array a21(1)
  array a23(1)
  array a25(1)
  array aend2(1)

  status = open('casodinamicoarmado3v3gmr.csv',1,1)
  loop n (1,10000)

    velxa = gp_xvel(ga)
    velya = gp_yvel(ga)
    velza = gp_zvel(ga)

    posxa = gp_xdis(ga)
    posya = gp_ydis(ga)
    posza = gp_zdis(ga)

    velxb = gp_xvel(gb)
    velyb = gp_yvel(gb)
    velzb = gp_zvel(gb)

    posxb = gp_xdis(gb)
    posyb = gp_ydis(gb)
    poszb = gp_zdis(gb)

    velxc = gp_xvel(gc)
    velyc = gp_yvel(gc)
    velzc = gp_zvel(gc)

    posxc = gp_xdis(gc)
    posyc = gp_ydis(gc)
    poszc = gp_zdis(gc)

    velxd = gp_xvel(gd)
    velyd = gp_yvel(gd)
    velzd = gp_zvel(gd)

    posxd = gp_xdis(gd)

```

```
posyd = gp_ydis(gd)
poszd = gp_zdis(gd)

velxe = gp_xvel(ge)
velye = gp_yvel(ge)
velze = gp_zvel(ge)

posxe = gp_xdis(ge)
posye = gp_ydis(ge)
posze = gp_zdis(ge)

velxf = gp_xvel(gf)
velyf = gp_yvel(gf)
velzf = gp_zvel(gf)

posxf = gp_xdis(gf)
posyf = gp_ydis(gf)
poszf = gp_zdis(gf)

velxg = gp_xvel(gg)
velyg = gp_yvel(gg)
velzg = gp_zvel(gg)

posxg = gp_xdis(gg)
posyg = gp_ydis(gg)
poszg = gp_zdis(gg)

velxh = gp_xvel(gh)
velyh = gp_yvel(gh)
velzh = gp_zvel(gh)

posxh = gp_xdis(gh)
posyh = gp_ydis(gh)
poszh = gp_zdis(gh)

velxi = gp_xvel(gi)
velyi = gp_yvel(gi)
velzi = gp_zvel(gi)

posxi = gp_xdis(gi)
posyi = gp_ydis(gi)
poszi = gp_zdis(gi)

velxj = gp_xvel(gj)
velyj = gp_yvel(gj)
velzj = gp_zvel(gj)

posxj = gp_xdis(gj)
posyj = gp_ydis(gj)
poszj = gp_zdis(gj)

velxk = gp_xvel(gk)
velyk = gp_yvel(gk)
velzk = gp_zvel(gk)

posxk = gp_xdis(gk)
posyk = gp_ydis(gk)
poszk = gp_zdis(gk)

velxl = gp_xvel(gl)
velyl = gp_yvel(gl)
velzl = gp_zvel(gl)

posxl = gp_xdis(gl)
posyl = gp_ydis(gl)
```



```

        posz1 = gp_zdis(g1)

        velxm = gp_xvel(gm)
        velym = gp_yvel(gm)
        velzm = gp_zvel(gm)

        posxm = gp_xdis(gm)
        posym = gp_ydis(gm)
        poszm = gp_zdis(gm)

        a01(1) =
string(time)+' '+string(velxa)+' '+string(velya)+' '+string(velza)+' '+string(posxa)+'
','+string(posya)+' '+string(posza)
        a03(1) =
string(velxb)+' '+string(velyb)+' '+string(velzb)+' '+string(posxb)+' '+string(posyb)+
','+string(poszb)
        a5(1) =
string(velxc)+' '+string(velyc)+' '+string(velzc)+' '+string(posxc)+' '+string(posyc)+
','+string(poszc)
        a7(1) =
string(velxd)+' '+string(velyd)+' '+string(velzd)+' '+string(posxd)+' '+string(posyd)+
','+string(poszd)
        a9(1) =
string(velxe)+' '+string(velye)+' '+string(velze)+' '+string(posxe)+' '+string(posye)+
','+string(posze)
        a11(1) =
string(velxf)+' '+string(velyf)+' '+string(velzf)+' '+string(posxf)+' '+string(posyf)+
','+string(poszf)
        a13(1) =
string(velxg)+' '+string(velyg)+' '+string(velzg)+' '+string(posxg)+' '+string(posyg)+
','+string(poszg)
        a15(1) =
string(velxh)+' '+string(velyh)+' '+string(velzh)+' '+string(posxh)+' '+string(posyh)+
','+string(poszh)
        a17(1) =
string(velxi)+' '+string(velyi)+' '+string(velzi)+' '+string(posxi)+' '+string(posyi)+
','+string(poszi)
        a19(1) =
string(velxj)+' '+string(velyj)+' '+string(velzj)+' '+string(posxj)+' '+string(posyj)+
','+string(poszj)
        a21(1) =
string(velxk)+' '+string(velyk)+' '+string(velzk)+' '+string(posxk)+' '+string(posyk)+
','+string(poszk)
        a23(1) =
string(velxl)+' '+string(velyl)+' '+string(velzl)+' '+string(posxl)+' '+string(posyl)+
','+string(poszl)
        a25(1) =
string(velxm)+' '+string(velym)+' '+string(velzm)+' '+string(posxm)+' '+string(posym)+
','+string(poszm)
        aend2(1) =
a01(1)+' '+a03(1)+' '+a5(1)+' '+a7(1)+' '+a9(1)+' '+a11(1)+' '+a13(1)+' '+a15(1)+' '+a
17(1)+' '+a19(1)+' '+a21(1)+' '+a23(1)+' '+a25(1)

        status = write(aend2,1)
        command
            cycle time 0.005
        endcommand
    endloop
    status = close
end
@dina

```

```
save casodinamicoarmado3v3gmr.sav
```

```
;----CASO CAP 3v4 (Modelo 1)-----
```

```
new
restore casoestaticoarmado3v4.sav
set jcondf 2 ;modelo contitutivo para nuevas discontinuidades
set small on
; FF
ffield apply
; Damping/amortiguamiento
damp 0.005 2.236
```

```
;table 1 read 'park_36414_5_90.csv' ;ejex
;table 3 read 'park_36414_5_up.csv' ;ejez
;table 2 read 'park_36414_5_360_2.csv' ;ejey
table      1      read      'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillstacioncap/CAP132.csv' ;eje x
table      2      read      'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillstacioncap/CAP042.csv' ;eje y
table      3      read      'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillstacioncap/CAP-UP.csv' ;eje z
```

```
reset time
```

```
boundary xvelocity 1 history=table 1 range z -108.4123 ;-7.4123
boundary yvelocity 1 history=table 2 range z -108.4123 ;-7.4123
boundary zvelocity 1 history=table 3 range z -108.4123 ;-7.4123
```

```
history xvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history xvelocity 656962 4.97264e+06 0
```

```
history yvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history yvelocity 656962 4.97264e+06 0
```

```
history zvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history zvelocity 656962 4.97264e+06 0
```

```
def dina
```

```
ga = gp_near(656974,4.97259e+06,673.766)
gb = gp_near(657025,4.97271e+06,646.326)
gc = gp_near(657025,4.97284e+06,581.614)
gd = gp_near(656966,4.973e+06,450.315)
ge = gp_near(656805,4.97279e+06,466.17)
gf = gp_near(656574,4.97307e+06,260.301)
gg = gp_near(656556,4.97295e+06,272.173)
gh = gp_near(656420,4.97265e+06,380.151)
gi = gp_near(656355,4.97291e+06,215.263)
gj = gp_near(655691,4.97316e+06,538.832)
gk = gp_near(655834,4.97261e+06,140.623)
gl = gp_near(656322,4.97229e+06,401.244)
gm = gp_near(655748,4.97232e+06,75.1731)
```

```
array a01(1)
array a03(1)
array a5(1)
array a7(1)
array a9(1)
array a11(1)
array a13(1)
```

```

array a15(1)
array a17(1)
array a19(1)
array a21(1)
array a23(1)
array a25(1)
array aend2(1)

status = open('casodinamicoarmado3v4cap.csv',1,1)
loop n (1,9600)

    velxa = gp_xvel(ga)
    velya = gp_yvel(ga)
    velza = gp_zvel(ga)

    posxa = gp_xdis(ga)
    posya = gp_ydis(ga)
    posza = gp_zdis(ga)

    velxb = gp_xvel(gb)
    velyb = gp_yvel(gb)
    velzb = gp_zvel(gb)

    posxb = gp_xdis(gb)
    posyb = gp_ydis(gb)
    poszb = gp_zdis(gb)

    velxc = gp_xvel(gc)
    velyc = gp_yvel(gc)
    velzc = gp_zvel(gc)

    posxc = gp_xdis(gc)
    posyc = gp_ydis(gc)
    poszc = gp_zdis(gc)

    velxd = gp_xvel(gd)
    velyd = gp_yvel(gd)
    velzd = gp_zvel(gd)

    posxd = gp_xdis(gd)
    posyd = gp_ydis(gd)
    poszd = gp_zdis(gd)

    velxe = gp_xvel(ge)
    velye = gp_yvel(ge)
    velze = gp_zvel(ge)

    posxe = gp_xdis(ge)
    posye = gp_ydis(ge)
    posze = gp_zdis(ge)

    velxf = gp_xvel(gf)
    velyf = gp_yvel(gf)
    velzf = gp_zvel(gf)

    posxf = gp_xdis(gf)
    posyf = gp_ydis(gf)
    poszf = gp_zdis(gf)

    velxg = gp_xvel(gg)
    velyg = gp_yvel(gg)
    velzg = gp_zvel(gg)

    posxg = gp_xdis(gg)

```

```
posyg = gp_ydis(gg)
poszg = gp_zdis(gg)
```

```
velxh = gp_xvel(gh)
velyh = gp_yvel(gh)
velzh = gp_zvel(gh)
```

```
posxh = gp_xdis(gh)
posyh = gp_ydis(gh)
poszh = gp_zdis(gh)
```

```
velxi = gp_xvel(gi)
velyi = gp_yvel(gi)
velzi = gp_zvel(gi)
```

```
posxi = gp_xdis(gi)
posyi = gp_ydis(gi)
poszi = gp_zdis(gi)
```

```
velxj = gp_xvel(gj)
velyj = gp_yvel(gj)
velzj = gp_zvel(gj)
```

```
posxj = gp_xdis(gj)
posyj = gp_ydis(gj)
poszj = gp_zdis(gj)
```

```
velxk = gp_xvel(gk)
velyk = gp_yvel(gk)
velzk = gp_zvel(gk)
```

```
posxk = gp_xdis(gk)
posyk = gp_ydis(gk)
poszk = gp_zdis(gk)
```

```
velxl = gp_xvel(gl)
velyl = gp_yvel(gl)
velzl = gp_zvel(gl)
```

```
posxl = gp_xdis(gl)
posyl = gp_ydis(gl)
poszl = gp_zdis(gl)
```

```
velxm = gp_xvel(gm)
velym = gp_yvel(gm)
velzm = gp_zvel(gm)
```

```
posxm = gp_xdis(gm)
posym = gp_ydis(gm)
poszm = gp_zdis(gm)
```

```

a01(1) =
string(time)+' '+string(velxa)+' '+string(velya)+' '+string(velza)+' '+string(posxa)+'
'+string(posya)+' '+string(posza)
a03(1) =
string(velxb)+' '+string(velyb)+' '+string(velzb)+' '+string(posxb)+' '+string(posyb)+
'+string(poszb)
a5(1) =
string(velxc)+' '+string(velyc)+' '+string(velzc)+' '+string(posxc)+' '+string(posyc)+
'+string(poszc)
a7(1) =
string(velxd)+' '+string(velyd)+' '+string(velzd)+' '+string(posxd)+' '+string(posyd)+
'+string(poszd)
```

```

                a9(1) =
string(velxe)+' '+string(velye)+' '+string(velze)+' '+string(posxe)+' '+string(posye)+
','+string(posze)
                a11(1) =
string(velxf)+' '+string(velyf)+' '+string(velzf)+' '+string(posxf)+' '+string(posyf)+
','+string(poszf)
                a13(1) =
string(velxg)+' '+string(velyg)+' '+string(velzg)+' '+string(posxg)+' '+string(posyg)+
','+string(poszg)
                a15(1) =
string(velxh)+' '+string(velyh)+' '+string(velzh)+' '+string(posxh)+' '+string(posyh)+
','+string(poszh)
                a17(1) =
string(velxi)+' '+string(velyi)+' '+string(velzi)+' '+string(posxi)+' '+string(posyi)+
','+string(poszi)
                a19(1) =
string(velxj)+' '+string(velyj)+' '+string(velzj)+' '+string(posxj)+' '+string(posyj)+
','+string(poszj)
                a21(1) =
string(velxk)+' '+string(velyk)+' '+string(velzk)+' '+string(posxk)+' '+string(posyk)+
','+string(poszk)
                a23(1) =
string(velxl)+' '+string(velyl)+' '+string(velzl)+' '+string(posxl)+' '+string(posyl)+
','+string(poszl)
                a25(1) =
string(velxm)+' '+string(velym)+' '+string(velzm)+' '+string(posxm)+' '+string(posym)+
','+string(poszm)
                aend2(1) =
a01(1)+' '+a03(1)+' '+a5(1)+' '+a7(1)+' '+a9(1)+' '+a11(1)+' '+a13(1)+' '+a15(1)+' '+a
17(1)+' '+a19(1)+' '+a21(1)+' '+a23(1)+' '+a25(1)

```

```

                status = write(aend2,1)
                command
                cycle time 0.005

```

```

                endcommand
            endloop
            status = close
        end
@dina

```

```

save casodinamicoarmado3v4cap.sav

```

```

;-----CASO AND 3V4 (Modelo 1)-----

```

```

new
restore casoestaticoarmado3v4.sav
set jcondf 2 ;modelo contitutivo para nuevas discontinuidades
set small on
; FF
ffield apply
; Damping/amortiguamiento
damp 0.005 2.236

```

```

;table 1 read 'park_36414_5_90.csv' ;ejex
;table 3 read 'park_36414_5_up.csv' ;ejez
;table 2 read 'park_36414_5_360_2.csv' ;eje y
table 1 read 'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillestacionand/AND250.csv' ;eje x
table 2 read 'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillestacionand/AND340.csv' ;eje y
table 3 read 'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillestacionand/AND-UP.csv' ;eje z

```

```

reset time

boundary xvelocity 1 history=table 1 range z -108.4123 ;-7.4123
boundary yvelocity 1 history=table 2 range z -108.4123 ;-7.4123
boundary zvelocity 1 history=table 3 range z -108.4123 ;-7.4123

history xvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history xvelocity 656962 4.97264e+06 0

history yvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history yvelocity 656962 4.97264e+06 0

history zvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history zvelocity 656962 4.97264e+06 0

def dina
  ga = gp_near(656974,4.97259e+06,673.766)
  gb = gp_near(657025,4.97271e+06,646.326)
  gc = gp_near(657025,4.97284e+06,581.614)
  gd = gp_near(656966,4.973e+06,450.315)
  ge = gp_near(656805,4.97279e+06,466.17)
  gf = gp_near(656574,4.97307e+06,260.301)
  gg = gp_near(656556,4.97295e+06,272.173)
  gh = gp_near(656420,4.97265e+06,380.151)
  gi = gp_near(656355,4.97291e+06,215.263)
  gj = gp_near(655691,4.97316e+06,538.832)
  gk = gp_near(655834,4.97261e+06,140.623)
  gl = gp_near(656322,4.97229e+06,401.244)
  gm = gp_near(655748,4.97232e+06,75.1731)

  array a01(1)
  array a03(1)
  array a5(1)
  array a7(1)
  array a9(1)
  array a11(1)
  array a13(1)
  array a15(1)
  array a17(1)
  array a19(1)
  array a21(1)
  array a23(1)
  array a25(1)
  array aend2(1)

  status = open('casodinamicoarmado3v4and.csv',1,1)
  loop n (1,9000)

    velxa = gp_xvel(ga)
    velya = gp_yvel(ga)
    velza = gp_zvel(ga)

    posxa = gp_xdis(ga)
    posya = gp_ydis(ga)
    posza = gp_zdis(ga)

    velxb = gp_xvel(gb)
    velyb = gp_yvel(gb)
    velzb = gp_zvel(gb)

    posxb = gp_xdis(gb)
    posyb = gp_ydis(gb)

```

```
poszb = gp_zdis (gb)

velxc = gp_xvel (gc)
velyc = gp_yvel (gc)
velzc = gp_zvel (gc)

posxc = gp_xdis (gc)
posyc = gp_ydis (gc)
poszc = gp_zdis (gc)

velxd = gp_xvel (gd)
velyd = gp_yvel (gd)
velzd = gp_zvel (gd)

posxd = gp_xdis (gd)
posyd = gp_ydis (gd)
poszd = gp_zdis (gd)

velxe = gp_xvel (ge)
velye = gp_yvel (ge)
velze = gp_zvel (ge)

posxe = gp_xdis (ge)
posye = gp_ydis (ge)
posze = gp_zdis (ge)

velxf = gp_xvel (gf)
velyf = gp_yvel (gf)
velzf = gp_zvel (gf)

posxf = gp_xdis (gf)
posyf = gp_ydis (gf)
poszf = gp_zdis (gf)

velxg = gp_xvel (gg)
velyg = gp_yvel (gg)
velzg = gp_zvel (gg)

posxg = gp_xdis (gg)
posyg = gp_ydis (gg)
poszg = gp_zdis (gg)

velxh = gp_xvel (gh)
velyh = gp_yvel (gh)
velzh = gp_zvel (gh)

posxh = gp_xdis (gh)
posyh = gp_ydis (gh)
poszh = gp_zdis (gh)

velxi = gp_xvel (gi)
velyi = gp_yvel (gi)
velzi = gp_zvel (gi)

posxi = gp_xdis (gi)
posyi = gp_ydis (gi)
poszi = gp_zdis (gi)

velxj = gp_xvel (gj)
velyj = gp_yvel (gj)
velzj = gp_zvel (gj)

posxj = gp_xdis (gj)
posyj = gp_ydis (gj)
poszj = gp_zdis (gj)
```



```
velxk = gp_xvel(gk)
velyk = gp_yvel(gk)
velzk = gp_zvel(gk)
```

```
posxk = gp_xdis(gk)
posyk = gp_ydis(gk)
poszk = gp_zdis(gk)
```

```
velxl = gp_xvel(gl)
velyl = gp_yvel(gl)
velzl = gp_zvel(gl)
```

```
posxl = gp_xdis(gl)
posyl = gp_ydis(gl)
poszl = gp_zdis(gl)
```

```
velxm = gp_xvel(gm)
velym = gp_yvel(gm)
velzm = gp_zvel(gm)
```

```
posxm = gp_xdis(gm)
posym = gp_ydis(gm)
poszm = gp_zdis(gm)
```

```

a01(1) =
string(time)+' '+string(velxa)+' '+string(velya)+' '+string(velza)+' '+string(posxa)+'
'+string(posya)+' '+string(posza)
a03(1) =
string(velxb)+' '+string(velyb)+' '+string(velzb)+' '+string(posxb)+' '+string(posyb)+
'+string(poszb)
a5(1) =
string(velxc)+' '+string(velyc)+' '+string(velzc)+' '+string(posxc)+' '+string(posyc)+
'+string(poszc)
a7(1) =
string(velxd)+' '+string(velyd)+' '+string(velzd)+' '+string(posxd)+' '+string(posyd)+
'+string(poszd)
a9(1) =
string(velxe)+' '+string(velye)+' '+string(velze)+' '+string(posxe)+' '+string(posye)+
'+string(posze)
a11(1) =
string(velxf)+' '+string(velyf)+' '+string(velzf)+' '+string(posxf)+' '+string(posyf)+
'+string(poszf)
a13(1) =
string(velxg)+' '+string(velyg)+' '+string(velzg)+' '+string(posxg)+' '+string(posyg)+
'+string(poszg)
a15(1) =
string(velxh)+' '+string(velyh)+' '+string(velzh)+' '+string(posxh)+' '+string(posyh)+
'+string(poszh)
a17(1) =
string(velxi)+' '+string(velyi)+' '+string(velzi)+' '+string(posxi)+' '+string(posyi)+
'+string(poszi)
a19(1) =
string(velxj)+' '+string(velyj)+' '+string(velzj)+' '+string(posxj)+' '+string(posyj)+
'+string(poszj)
a21(1) =
string(velxk)+' '+string(velyk)+' '+string(velzk)+' '+string(posxk)+' '+string(posyk)+
'+string(poszk)
a23(1) =
string(velxl)+' '+string(velyl)+' '+string(velzl)+' '+string(posxl)+' '+string(posyl)+
'+string(poszl)
```

```

                a25(1)
string(velxm)+','+string(velym)+','+string(velzm)+','+string(posxm)+','+string(posym)+
','+string(poszm)
                aend2(1)
a01(1)+','+a03(1)+','+a05(1)+','+a07(1)+','+a09(1)+','+a11(1)+','+a13(1)+','+a15(1)+','+a
17(1)+','+a19(1)+','+a21(1)+','+a23(1)+','+a25(1)

                status = write(aend2,1)
                command
                cycle time 0.005

                endcommand

        endloop
        status = close
end
@dina

save casodinamicoarmado3v4and.sav

;-----CASO GMR 3V4 (Modelo 1)-----
new
restore casoestaticoarmado3v4.sav
set jcondf 2 ;modelo contitutivo para nuevas discontinuidades
set small on
; FF
ffield apply
; Damping/amortiguamiento
damp 0.005 2.236

;table 1 read 'park_36414_5_90.csv' ;ejex
;table 3 read 'park_36414_5_up.csv' ;ejez
;table 2 read 'park_36414_5_360_2.csv' ;ejey
table          1          read          'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillestaciongmr/GMR090.csv' ;eje x
table          2          read          'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillestaciongmr/GMR000.csv' ;eje y
table          3          read          'C:/Users/Administrador/Documents/Natalia
A/sismos/morganhillestaciongmr/GMR-UP.csv' ;eje z

reset time

boundary xvelocity 1 history=table 1 range z -108.4123 ; -7.4123
boundary yvelocity 1 history=table 2 range z -108.4123 ; -7.4123
boundary zvelocity 1 history=table 3 range z -108.4123 ; -7.4123

history xvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history xvelocity 656962 4.97264e+06 0

history yvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history yvelocity 656962 4.97264e+06 0

history zvelocity 656962 4.97264e+06 626.007
history zvelocity 656962 4.97264e+06 0

def dina
ga = gp_near(656974,4.97259e+06,673.766)
gb = gp_near(657025,4.97271e+06,646.326)
gc = gp_near(657025,4.97284e+06,581.614)
gd = gp_near(656966,4.973e+06,450.315)
ge = gp_near(656805,4.97279e+06,466.17)
gf = gp_near(656574,4.97307e+06,260.301)

```

```

gg = gp_near(656556,4.97295e+06,272.173)
gh = gp_near(656420,4.97265e+06,380.151)
gi = gp_near(656355,4.97291e+06,215.263)
gj = gp_near(655691,4.97316e+06,538.832)
gk = gp_near(655834,4.97261e+06,140.623)
gl = gp_near(656322,4.97229e+06,401.244)
gm = gp_near(655748,4.97232e+06,75.1731)

array a01(1)
array a03(1)
array a5(1)
array a7(1)
array a9(1)
array a11(1)
array a13(1)
array a15(1)
array a17(1)
array a19(1)
array a21(1)
array a23(1)
array a25(1)
array aend2(1)

status = open('casodinamicoarmado3v4gmr.csv',1,1)
loop n (1,10000)

    velxa = gp_xvel(ga)
    velya = gp_yvel(ga)
    velza = gp_zvel(ga)

    posxa = gp_xdis(ga)
    posya = gp_ydis(ga)
    posza = gp_zdis(ga)

    velxb = gp_xvel(gb)
    velyb = gp_yvel(gb)
    velzb = gp_zvel(gb)

    posxb = gp_xdis(gb)
    posyb = gp_ydis(gb)
    poszb = gp_zdis(gb)

    velxc = gp_xvel(gc)
    velyc = gp_yvel(gc)
    velzc = gp_zvel(gc)

    posxc = gp_xdis(gc)
    posyc = gp_ydis(gc)
    poszc = gp_zdis(gc)

    velxd = gp_xvel(gd)
    velyd = gp_yvel(gd)
    velzd = gp_zvel(gd)

    posxd = gp_xdis(gd)
    posyd = gp_ydis(gd)
    poszd = gp_zdis(gd)

    velxe = gp_xvel(ge)
    velye = gp_yvel(ge)
    velze = gp_zvel(ge)

    posxe = gp_xdis(ge)
    posye = gp_ydis(ge)

```

```

posze = gp_zdis(ge)

velxf = gp_xvel(gf)
velyf = gp_yvel(gf)
velzfy = gp_zvel(gf)

posxf = gp_xdis(gf)
posyf = gp_ydis(gf)
poszfy = gp_zdis(gf)

velxg = gp_xvel(gg)
velyg = gp_yvel(gg)
velzgy = gp_zvel(gg)

posxg = gp_xdis(gg)
posyg = gp_ydis(gg)
poszgy = gp_zdis(gg)

velxh = gp_xvel(gh)
velyh = gp_yvel(gh)
velzgh = gp_zvel(gh)

posxh = gp_xdis(gh)
posyh = gp_ydis(gh)
poszgh = gp_zdis(gh)

velxi = gp_xvel(gi)
velyi = gp_yvel(gi)
velzgi = gp_zvel(gi)

posxi = gp_xdis(gi)
posyi = gp_ydis(gi)
poszgi = gp_zdis(gi)

velxj = gp_xvel(gj)
velyj = gp_yvel(gj)
velzgj = gp_zvel(gj)

posxj = gp_xdis(gj)
posyj = gp_ydis(gj)
poszgj = gp_zdis(gj)

velxk = gp_xvel(gk)
velyk = gp_yvel(gk)
velzkg = gp_zvel(gk)

posxk = gp_xdis(gk)
posyk = gp_ydis(gk)
poszkg = gp_zdis(gk)

velxl = gp_xvel(gl)
velyl = gp_yvel(gl)
velzgl = gp_zvel(gl)

posxl = gp_xdis(gl)
posyl = gp_ydis(gl)
poszgl = gp_zdis(gl)

velxm = gp_xvel(gm)
velym = gp_yvel(gm)
velzgm = gp_zvel(gm)

posxm = gp_xdis(gm)
posym = gp_ydis(gm)

```

```

poszm = gp_zdis(gm)

    a01(1) =
string(time)+' '+string(velxa)+' '+string(velya)+' '+string(velza)+' '+string(posxa)+'
','+string(posya)+' '+string(posza)
    a03(1) =
string(velxb)+' '+string(velyb)+' '+string(velzb)+' '+string(posxb)+' '+string(posyb)+
','+string(poszb)
    a5(1) =
string(velxc)+' '+string(velyc)+' '+string(velzc)+' '+string(posxc)+' '+string(posyc)+
','+string(poszc)
    a7(1) =
string(velxd)+' '+string(velyd)+' '+string(velzd)+' '+string(posxd)+' '+string(posyd)+
','+string(poszd)
    a9(1) =
string(velxe)+' '+string(velye)+' '+string(velze)+' '+string(posxe)+' '+string(posye)+
','+string(posze)
    a11(1) =
string(velxf)+' '+string(velyf)+' '+string(velzf)+' '+string(posxf)+' '+string(posyf)+
','+string(poszf)
    a13(1) =
string(velxg)+' '+string(velyg)+' '+string(velzg)+' '+string(posxg)+' '+string(posyg)+
','+string(poszg)
    a15(1) =
string(velxh)+' '+string(velyh)+' '+string(velzh)+' '+string(posxh)+' '+string(posyh)+
','+string(poszh)
    a17(1) =
string(velxi)+' '+string(velyi)+' '+string(velzi)+' '+string(posxi)+' '+string(posyi)+
','+string(poszi)
    a19(1) =
string(velxj)+' '+string(velyj)+' '+string(velzj)+' '+string(posxj)+' '+string(posyj)+
','+string(poszj)
    a21(1) =
string(velxk)+' '+string(velyk)+' '+string(velzk)+' '+string(posxk)+' '+string(posyk)+
','+string(poszk)
    a23(1) =
string(velxl)+' '+string(velyl)+' '+string(velzl)+' '+string(posxl)+' '+string(posyl)+
','+string(poszl)
    a25(1) =
string(velxm)+' '+string(velym)+' '+string(velzm)+' '+string(posxm)+' '+string(posym)+
','+string(poszm)
    aend2(1) =
a01(1)+' '+a03(1)+' '+a5(1)+' '+a7(1)+' '+a9(1)+' '+a11(1)+' '+a13(1)+' '+a15(1)+' '+a
17(1)+' '+a19(1)+' '+a21(1)+' '+a23(1)+' '+a25(1)

    status = write(aend2,1)
    command
        cycle time 0.005
    endcommand
endloop
status = close
end
@dina
save casodinamicoarmado3v4gmr.sav

```

