



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INICIT

MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE UNA DEFORMACIÓN GRAVITACIONAL
PROFUNDA DE LADERA: EL CASO DEL DESLIZAMIENTO JUAN DEL
GRIJALVA, CHIAPAS, MÉXICO.

Tesis

Para obtener el grado de
Maestro en Geociencias y Planificación del Territorio

Presenta

Erika Ruiz Díaz

Asesor:

Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal

Morelia, Michoacán.

Febrero 2017

Índice general

Resumen	IX
Abstract	X
Introduccion	XI
1. Planteamiento del Problema	2
1.1. Objetivo General	6
1.1.1. Objetivos particulares	6
1.2. Hipótesis	7
2. Marco Teórico	8
2.1. Clasificación de inestabilidad de laderas	9
2.1.1. Caídos o desprendimientos	11
2.1.2. Vuelcos o desplomes	11
2.1.3. Deslizamientos	11
2.1.4. Expansiones laterales	13
2.1.5. Movimientos complejos	13
2.1.6. Flujos	13
2.1.7. Deformaciones gravitacionales profundas de ladera	14
2.1.8. Variación del nivel de agua	16
2.1.9. Deslizamiento de Juan del Grijalva	16
2.2. Antecedentes	17
2.2.1. Trabajos previos	17
2.2.2. Nuevo Juan del Grijalva.	24

2.2.3. Trabajos Previos con PLAXIS 2D	25
3. Área de Estudio	27
3.1. Clima	27
3.2. Uso de suelo y vegetación	29
3.3. Hidrografía	29
3.4. Geología regional	30
3.4.1. Fallas	31
3.4.2. Fracturamiento	32
3.4.3. Estratigrafía	32
3.5. Geología Local	33
3.5.1. Morfología	33
3.5.2. Litología de la zona de estudio	34
4. Materiales y Métodos	38
4.1. Obtención de datos	38
4.2. Análisis de datos	39
4.3. Uso de un SIG	39
4.4. Implementación del modelo	40
4.5. <i>PLAXIS 2D</i>	40
4.5.1. Método numérico de Elementos Finitos	41
4.5.2. Métodos contenidos en <i>Plaxis</i>	44
4.5.3. Procedimiento general para el análisis del problema	47
4.5.4. Subprograma <i>Input</i>	48
4.5.5. Subprograma <i>Calculations</i>	49
4.6. GeoSlope 2007	52
4.6.1. <i>SEEP/W</i>	52
4.6.2. <i>SLOPE/W</i>	54
4.7. Validación del modelo	56
4.8. Verificación o negación de la hipótesis	56
5. Resultados	57
5.1. Datos de entrada	57
5.1.1. Parámetros básicos para el modelo Mohr-Coulomb	61

5.2. <i>PLAXIS 2D</i>	64
5.2.1. Plaxis 2D. Cálculos	68
5.3. <i>GEOSLOPE</i>	69
5.4. Escenarios modelados	75
5.4.1. Modelo con valores reales.	75
5.4.2. Nivel del río constante	80
5.4.3. Variación en la precipitación	83
5.5. Discusión	83
5.5.1. Fortalezas y debilidades del modelo.	84
6. Conclusiones	87
Bibliografía	88

Índice de figuras

1.1. Vista aérea de la zona del deslizamiento y del tapón formado sobre el río Grijalva. Imagen tomada de Melo <i>et al.</i> (2009)	3
1.2. En la imagen de la izquierda se aprecia la ladera de Juan del Grijalva antes del deslizamiento y en la derecha, la zona después del deslizamiento. Se observa el represamiento generado por el material desplazado. Marlvi (2008) y Melo, <i>et al.</i> , (2009)	7
1.3. Imagen que muestra la apertura en un primer tramo del tapón el 18 de Diciembre de 2007, Marlvi (2008).	7
2.1. Desprendimientos o caídas (WP/WLI, 1990).	11
2.2. Vuelcos o desplomes (WP/WLI, 1990).	11
2.3. Deslizamiento rotacional (WP/WLI, 1990).	12
2.4. Deslizamientos traslacionales, Potter 2007.	13
2.5. Expansiones Laterales (WP/WLI, 1990).	13
2.6. Flujos (WP/WLI, 1990).	14
2.7. Precipitación máxima	19
2.8. Precipitación promedio	19
2.9. Intensidad de lluvia	20
2.10. Hidrograma de entrada y evolución de niveles en la presa Peñitas del 01 de Octubre al 04 de Noviembre de 2007	20
2.11. Precipitación acumulada en la zona de Juan del Grijalva (estación meteorológica de Ocotepéc; CONAGUA 2007). Las barras representan la lluvia diaria; y la línea continua la lluvia acumulada. Gráfica obtenida del artículo de Hernández Madrigal <i>et al.</i> , (2010).	20

2.12. Nivel de agua en la presa Peñitas, antes y después del deslizamiento .	21
2.13. Gráfica que muestra el comportamiento de los niveles de agua en cada uno de los barrenos y su relación con la precipitación del 26 de Diciembre de 2007 al 16 de Enero de 2008, (Melo <i>et al.</i> , 2009.	22
2.14. Niveles Freáticos en pozos de observación e inclinómetros, (Melo <i>et al.</i> , 2009).	23
2.15. Configuración de los niveles de agua en los barrenos perforados en la zona del deslizamiento, (Melo, 2009).	24
2.16. Ciudad Rural Sustentable Nuevo Juan del Grijalva. 30 de Mayo de 2016.	24
3.1. Mapa de localización, Juan del Grijalva, Ostucán, Chiapas. Fuente: INEGI 2010	28
3.2. Vegetación en la zona de Juan del Grijalva, Chiapas. Mayo 2016.	29
3.3. Cuencas y subcuencas del río Grijalva	29
3.4. Columna estatigráfica regional. Imagen tomada del trabajo de tesis Melo, A., <i>et.al.</i> 2009	33
3.5. Intercalación de Lutitas y Areniscas. 30 Mayo de 2016.	33
3.6. Mapa geomorfológico del área de estudio. Tomado de Hernández Magdrilal, <i>et. al</i> 2010.	34
3.7. Conglomerado, y granito en la zona del deslizamiento Juan del Grijalva. 30 Mayo de 2016.	36
3.8. Modelo geológico, Barreno 2. Se observa la continuidad del bloque deslizado hacia el cauce del río. Modificado de A. Melo 2009.	37
4.1. Celda $CE_{i,j}$, que muestra la diagonal más corta de ella y los vértices que la definen.	42
4.2. Subprograma <i>Input, Material sets-General.</i>	48
4.3. Subprograma <i>Input, Material sets-Parameters.</i>	48
4.4. Posición de los nodos y puntos de estrés <i>PLAXIS 2010.</i>	49
4.5. <i>Calculations.</i> Imagen tomada de Manual de <i>PLAXIS 2D.</i>	49
4.6. <i>Water Conditions</i> , en la fase de <i>Calculations.</i> Manual de <i>PLAXIS 2010.</i>	50
4.7. Ventana <i>Active tasks.</i> Manual de <i>PLAXIS 2010.</i>	51

5.1. Perfil topográfico de la ladera de Juan del Grijalva antes del deslizamiento, elaborado con <i>ArcGis 10.2</i> , fuente INEGI 2010.	58
5.2. Perfil de la ladera de Juan del Grijalva, intercalación de lutitas y areniscas. Elaborado en <i>Plaxis 2010</i>	59
5.3. Perfil de la ladera del cerro la Pera. Los colores indican el grado de humedad en la ladera, dónde azul es poca saturación y rojo es completamente saturado. Elaborado en <i>SEEP/W 2007</i>	60
5.4. Barreno 2, inclinómetro 1, 31 de Mayo de 2016.	63
5.5. Primera fase en <i>Plaxis, Input</i>	65
5.6. Intercalación de lutitas y areniscas. Modelo con grieta, basado en el MDE antes del deslizamiento.	66
5.7. Malla de seis nodos para cada triangulación, elaborado en <i>Plaxis 2D 2010</i>	67
5.8. Subprograma <i>Calculations, Water conditions</i> . Se hace el cambio del Nivel Freático y con ello se modifica la presión de poro en cada paso de tiempo.	68
5.9. Subprograma <i>Calculations, Water conditions</i> . Se provee al programa los datos de precipitación acumulada en cada fase.	68
5.10. <i>Calculations</i> . Cálculos, elaborado con <i>PLAXIS 2D</i> , versión 2010.	69
5.11. <i>Water Conditions</i> . Primer fase en dónde se asignan los valores de precipitación, nivel freático y cambio en el embalse.	69
5.12. <i>Plaxis 2D</i> . Calculando fases.	69
5.13. Union del <i>SEEP/W</i> con <i>Slope/W</i> . Elaborado en <i>GeoSlope 2007</i>	70
5.14. Propiedades de los materiales. Elaborado en <i>Slope/W</i>	70
5.15. Asignación de materiales, <i>Slope/W</i>	72
5.16. Malla con elementos finitos	73
5.17. Función de precipitación. Elaborado en <i>SEEP/W</i>	73
5.18. Función de variación del nivel del Río Grijalva. Elaborado en <i>SEEP/W</i>	73
5.19. Malla de superficies de deslizamiento. Elaborado en <i>Slope/W</i>	74
5.20. Gráfica de Factor de Seguridad en la Ladera del Cerro la Pera, del 10 de Octubre al 04 de Noviembre de 2007.	75
5.21. Gráfica de Comparación del Factor de Seguridad con la precipitación.	76

5.22. Gráfica de comparación del factor de seguridad con la variación del Nivel del Río Grijalva.	77
5.23. Deformaciones totales, con variaciones en el nivel del embalse. Sin la malla ni estratos superpuestos.	78
5.24. Superficie de rotura y factor de Seguridad. Elaborado en <i>Slope/W</i> . . .	79
5.25. Deformaciones totales, con el nivel del embalse constante.	82
5.26. Gráfica de Factor de Seguridad con el nivel del río Grijalva constante a 85 m.	83
5.27. Gráfica de Factor de Seguridad con el nivel del río Grijalva constante a 88 m.	83
5.28. Factor de seguridad para el 04 de Noviembre 2007, con precipitación constante a 12.32 mm/día.	83

Índice de cuadros

1.1. Total de evacuados después del deslizamiento de Juan del Grijalva. Tomado del informe Protección Civil del estado de Chiapas (PC del estado de Chiapas , 2010).	3
2.1. Clasificación de los procesos de remoción de masa.	10
2.2. Datos obtenidos de Garnica, <i>et al.</i> , (2011)	19
2.3. Datos obtenidos de Garnica <i>et al.</i> , (2011)	19
2.4. Comunidades reubicadas en Nuevo Juan del Grijalva. Informe de Protección Civil del Estado de Chiapas, 2007.	25
3.1. Juan del Grijalva, , 30 de Mayo de 2016. En la primer imagen se aprecia parte de la roca que se desprendió de la ladera, se observa la intercalación de la lutita y las areniscas. En la segunda imagen se observa un bloque de roca.	36
5.1. Pruebas triaxiales realizadas en la roca intacta, lutita. Datos obtenidos de Melo <i>et al.</i> , 2009.	61
5.2. Datos obtenidos de Melo, <i>et al.</i> , 2009. Lutita Alterada	61
5.3. Datos de la Lutita inalterada, obtenidos de Ingeniería Geológica, González de Vallejo.	62
5.4. Datos obtenidos de A. Melo, <i>et. al.</i> 2009. Arenisca (roca intacta) . . .	62
5.5. Datos empleados en el modelo	64
5.6. Factor de seguridad con niveles del río Grijalva constante a 85 m. y a 88 m.	81

Resumen

El presente trabajo hace referencia a la modelización numérica de una deformación profunda de ladera; el caso particular con el que se trabaja es el deslizamiento de Juan del Grijalva, en el estado de Chiapas, México.

Estos procesos de remoción en masa (PRM) como también se les conoce ocurren diariamente alrededor del mundo, provocando un impacto mucho mayor en países en vías de desarrollo debido al alto grado de vulnerabilidad. Este tipo de fenómeno se encuentra entre los peligros naturales más destructivos de nuestro planeta, debido al elevado número de pérdidas humanas, damnificados e incalculables daños económicos que produce anualmente.

El 04 de Noviembre de 2007 en Juan del Grijalva, municipio de Ostuacán en el estado de Chiapas (México), se presentó el colapso de una deformación profunda de ladera, provocando 25 personas fallecidas, alrededor de 3600 personas evacuadas, así como incalculables daños económicos. Considerado por ello como uno de los más catastróficos en México en los últimos años, debido a la magnitud del movimiento y la relevancia de sus efectos.

En la actualidad existen distintas hipótesis acerca del factor detonante de éste deslizamiento; sin embargo, ninguna ha sido demostrada mediante algún método matemático, modelación numérica, métodos probabilísticos u otros.

El modelo realizado en este trabajo empleó los programas computacionales *Plaxis 2D* y *GeoSlope*. Los resultados obtenidos permitieron conocer con mayor detalle la parte mecánica del deslizamiento, origen y evolución en el tiempo, así como tener una idea más clara del factor que lo detonó.

Palabras clave: Deslizamiento, Juan del Grijalva, modelización, *Plaxis 2D*, *GeoSlope*.

Abstract

The present work refers to the numerical modelling of a deep slope deformation; The particular case with which one works is the landslide of Juan del Grijalva, in the state of Chiapas, Mexico.

These mass removal processes (PRM) as they are also known occur daily around the world, causing a much greater impact in developing countries due to the high degree of vulnerability. This type of phenomenon is among the most destructive natural hazards of our planet, due to the high number of human losses, earthquakes and incalculable economic damages it produces annually.

On November 4, 2007, in Juan del Grijalva, municipality of Ostuacán, in the state of Chiapas, Mexico, there was a collapse of a deep slope deformation that caused 25 people dead, about 3 600 people evacuated from 21 communities settled in the banks of the Grijalva River, as well as incalculable economic damages. Considered as one of the most catastrophic in Mexico in recent years, due to the magnitude of the movement and the relevance of its effects.

At present there are different hypotheses about the detonating factor of this slip; however, none has been demonstrated by some mathematical method, numerical modelling, probabilistic methods or others.

The model used in the work used the computational programs Plaxis 2D and GeoSlope. The results obtained allowed to know in more detail the mechanical part of the landslide, origin and evolution over time, as well as to have a clearer idea of the factors that detonated it.

Keywords: Landslide, Juan del Grijalva, modelling, *Plaxis 2D*, *GeoSlope*.

Introducción

Los procesos geodinámicos que afectan a la superficie terrestre dan lugar a movimientos del terreno de diversas características, magnitudes y velocidades; los más frecuentes son los movimientos de ladera o Procesos de Remoción en Masa (PRM). Los PRM, conocidos coloquialmente como Deslaves o Derrumbes, se definen como el movimiento ladera abajo de una masa compuesta por rocas, detritos, suelo o una combinación de todo ello; bajo la influencia de la gravedad y teniendo como factores principales: el clima (precipitación), sismicidad y actividades antropogénicas (Brunsden, 1979; Penk 1894; Sharpe, 1938; Terzaghi, 1950; Varnes, 1958; Zaruba y Mencl, 1969; Skempton y Hutchinson, 1969; Gary *et al.*, 1972; Coates, 1977).

Este tipo de fenómeno se encuentra entre los peligros naturales más destructivos de nuestro planeta, debido al elevado número de pérdidas humanas, damnificados e incalculables daños económicos que produce anualmente. Afectan a poblaciones de diversas regiones provocando un impacto mucho mayor en países pobres o en vías de desarrollo debido al alto grado de vulnerabilidad de éstos.

Con base en datos obtenidos a escala mundial por la *Commission on Landslides* (1971 - 1975) de la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (IAEG), por contabilidad de la UNESCO: el 14% de las víctimas de catástrofes naturales son atribuidas a inestabilidad de laderas. Cifra que se supone subestimada si se considera que parte de las víctimas atribuidas a terremotos son, en realidad provocadas por colapsos de laderas detonadas por el evento sísmico.

En México, en la época de lluvias y ciclones se presentan catástrofes que afectan las poblaciones que generalmente están en las zonas costeras y cercanas a ríos y presas, sobre todo en la región sureste.

El 04 de Noviembre de 2007 en Juan del Grijalva, municipio de Ostuacán en el estado de Chiapas (México), se presentó el colapso de una deformación profunda de ladera, que provocó 25 personas fallecidas, alrededor de 3600 personas evacuadas de 21 comunidades asentadas en los márgenes del río Grijalva, así como incalculables daños económicos. Considerado por ello como uno de los eventos más catastróficos en México en los últimos años (Hernández-Madrigal, *et. al* 2010), debido a la magnitud del movimiento y la relevancia de sus efectos.

El dique-deslizamiento generado por este evento interrumpió totalmente el flujo del río Grijalva, generando aguas arriba una sobrelevación del nivel del río y la inundación de diversas localidades. Gracias a la intervención de diversos órganos de gobierno como de grupos de expertos que actuaron de manera eficiente, se evitó que la catástrofe fuese aún mayor; debido a que existía el riesgo de colapso de dicho dique-deslizamiento y se comprometía la estabilidad y funcionamiento de la Presa Peñitas, así como de otras comunidades localizadas aguas abajo (Melo *et al.*, 2009).

El material desplazado formó un tapón de 800 m de longitud y 200 m de ancho, con un volumen de $50 \times 10^3 \text{ m}^3$ en un tramo del cauce del río Grijalva impidiendo el paso del flujo, que ponía en riesgo a comunidades aledañas al río en el estado de Chiapas, así como a comunidades localizadas en el estado de Tabasco. Se calcula que en el movimiento se desplazaron $55 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua (Hernández-Madrigal, *et. al* 2010).

En la actualidad existen distintas hipótesis acerca del factor detonante de éste deslizamiento; sin embargo, ninguna ha sido demostrada mediante algún método matemático, modelación numérica, métodos probabilísticos u otros. Se tiene la certeza que los métodos numéricos son una buena herramienta en el análisis de riesgos de este tipo de fenómenos.

El modelo realizado en este trabajo, empleó los programas computacionales *Plaxis 2D* [32] y *GeoSlope* [33]. Los resultados obtenidos permitieron conocer con mayor detalle la parte mecánica del deslizamiento, origen y evolución en el tiempo, así como tener una idea más clara del factor que lo detonó. Esto ayudará a crear programas de prevención en zonas con comunidades en alto riesgo de sufrir las consecuencias de un deslizamiento, además de prevenir posibles eventos de este tipo en esta zona por donde pasa uno de los ríos más caudalosos del país, el Grijalva.

La investigación tuvo como base la revisión literaria existente, desde la parte más general de las deformaciones profundas de ladera encontrada en libros; así como la consulta de artículos que hace referencia a este deslizamiento, además de un trabajo de licenciatura.

Para ello se hizo una selección de insumos (que se obtuvieron de la literatura consultada) necesarios para facilitar la modelación usando *PLAXIS* y *GeoSlope* tales como: elección de parámetros geotécnicos y geomecánicos, definir la escala a trabajar, los materiales a utilizar, entre otros.

Se generó un modelo geométrico y una malla con elementos finitos, basada en una sección transversal vertical representativa de la ladera de Juan del Grijalva. Se capturó gráficamente el perfil topográfico en base en un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), con resolución de 15 m (INEGI 2010); para luego hacer el dibujo esquematizado y así identificar cada uno de los elementos que intervinieron en el problema.

Se hizo la elección de las condiciones iniciales necesarias, que nos permitieron hacer los cálculos y pruebas de manera adecuada. Se evaluaron los resultados obtenidos comparándolos con otros encontrados durante la revisión de antecedentes además de corroborarlos con datos obtenidos en campo por otros autores.

Es importante recalcar que los métodos numéricos como el de Elemento Finito deben basarse en simplificaciones del fenómeno, por lo que el resultado es una aproximación a la realidad, es por ello que se tuvo mucho cuidado en la elección de los elementos que ayudaron a dicha modelación, así como tener claras las posibles fuentes de error; de manera que se logre tener una buena aproximación del fenómeno sujeto a investigación.

En el primer capítulo se aborda el planteamiento, ¿cómo sucedió el deslizamiento de Juan del Grijalva en 2007?, la relevancia del fenómeno, los efectos para la población, fallecimientos, desplazados, riesgos para los estados de Chiapas y Tabasco.

En el siguiente capítulo se hace una revisión de las teorías existentes acerca del factor detonante del deslizamiento sujeto a estudio, así como de la parte teórica que nos ayudó a la realización de modelo numérico.

En el capítulo tres se describe la metodología empleada, el uso de *Plaxis*, *GeoSlope* y de los insumos que estos softwares requirieron para hacer la modelación.

En el cuarto capítulo se describe el área de estudio, su localización geográfica, el marco geológico regional y local, clima, suelo, cobertura vegetal, etcétera.

En el capítulo cinco se abordan los resultados obtenidos de la modelación, los datos más relevantes así como la discusión y comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con los de otros autores.

En el último capítulo se dan las conclusiones a las que se llegaron con el trabajo, la comprobación o refutación de la hipótesis. También se presentan sugerencias y comentarios referentes a lo que facilitó el proceso de la investigación y recomendaciones que puedan servir a futuros trabajos.

Capítulo 1

Planteamiento del Problema

El domingo 04 de Noviembre del año 2007 aproximadamente a las 20:31 horas, tiempo local en el estado de Chiapas, ocurrió un deslizamiento en el lado sur del cerro la Pera en el poblado Juan del Grijalva o, San Juan Grijalva, localizado en el municipio de Ostuacán al noroeste del estado de Chiapas (México).

Este poblado se encontraba en la margen derecha del Río Grijalva, aproximadamente a 14 km aguas arriba de la Presa Ángel Albino Corzo (Peñitas) y a 56 km aguas abajo de la presa Nezhualcóyotl (Malpaso).

A lo largo de 600 m sobre la cresta del cerro La Pera se inició el desprendimiento de un bloque de aproximadamente 1300 m de longitud y 75 m de espesor que se desplazó pendiente abajo, acarreando consigo depósitos de areniscas y lutita. Las dimensiones del deslizamiento dio como resultado un área afectada cercana a las 80 ha y un volumen de $55 \times 10^6 \text{ m}^3$. Generó un tapón o dique-deslizamiento de 80 m de altura a lo largo de 800 m del cauce con un ancho de 300 m (Hinojosa Corona, *et. al*, 2011), de manera que el volumen de material obstruyó totalmente el cauce del río Grijalva (Fig. 1.2).

La masa deslizada generó un alud de rocas, tierra y árboles que al emplazarse sobre el cauce del Río Grijalva desplazó las aguas del río formando una ola de aproximadamente 50 m de altura; en el informe de Protección Civil del estado de Chiapas, se indica que se encontraron peces a 50 m de diferencia de los espejos de agua, localizados en la ladera frontal del Cerro la Pera. Esta ola, arrasó con el poblado de Juan del Grijalva, generando el fallecimiento de 25 personas y posteriormente



Figura 1.1: Vista aérea de la zona del deslizamiento y del tapón formado sobre el río Grijalva. Imagen tomada de Melo *et al.* (2009)

la reubicación temporal de 3 504 de 34 comunidades asentadas en los márgenes del mismo río, según el informe de Protección Civil del estado de Chiapas, (cuadro 1.1).

Cuadro 1.1: Total de evacuados después del deslizamiento de Juan del Grijalva. Tomado del informe Protección Civil del estado de Chiapas (PC del estado de Chiapas , 2010).

Municipio	Comunidades	Población Total	Evacuadas
Ostuacán	11	2646	552
Tecpatán	23	3821	2952
Total	34	6467	3504

Según Hinojosa-Corona, *et al.*(2011) reportan que el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), que mantiene la estación sismológica del volcán Chichonal, se registraron las vibraciones producidas por este deslizamiento. La dependencia reporta una duración aproximada de 40 segundos.

Debido a que el evento se presentó entre las centrales conocidas como Malpaso y

Peñitas, Comisión Federal de Electricidad (CFE) detuvo la generación de electricidad en las dos centrales y su consecuente cierre temporal.

La falta de flujo de agua, provocó que de forma paulatina, se incrementara el tirante hidráulico del nivel de aguas arriba del tapón (PC del estado de Chiapas , 2010), de manera que los niveles de agua aumentaron gradualmente a una velocidad de 10 cm/día en cada embalse (A. Melo, 2009); al medir las cotas del caudal aguas arriba y aguas abajo, se encontró una diferencia de 2 m entre cada embalse. La elevación del nivel del agua ponía en riesgo a las poblaciones aledañas al río Grijalva en los estados de Chiapas y Tabasco.

Después de lo sucedido se emitió una declaratoria de emergencia, publicada en el Diario Oficial de la Federación No. 061, el día 16 de Noviembre de 2007:

[· · ·] Así mismo se presentaron lluvias durante los días 23 al 31 de Octubre de 2007, producidas por la interacción de aire húmedo y cálido proveniente del Golfo de México y la masa de aire situada sobre gran parte de la República Mexicana, lo cual originó un amplia área de inestabilidad con desarrollos convectivos que generaron precipitaciones fuertes a localmente intensas en la Región sur del Territorio Nacional y particularmente en las zonas Centro, Norte y Selva del Estado de Chiapas, dando lugar a crecientes repentinas con escurrimientos que causaron desbordamientos e inundaciones, por lo que con fecha 30 de octubre de 2007, se solicitó la Declaratoria de Emergencia para veintidos municipios de las Regiones Centro, Norte y Selva del Estado, misma que fue autorizada y difundida mediante boletín 298/07, del 01 de noviembre del año en curso; sin embargo derivado de la magnitud de los daños, fue necesario invocar la ampliación de declaración de emergencia a doce municipios de las mismas regiones de la Entidad, la cual fue publicada a través del boletín 305/07 de fecha 05 de noviembre de 2007, para efecto de once municipios (PC del estado de Chiapas , 2010) [· · ·]

Aunado a ello se trasladaron a Juan del Grijalva, especialistas de diversas disciplinas: Topografía, Geología, Perforación, Sismo tectónica, Geotécnia e Instrumentación. Se construyó un canal en una primer etapa de 800 m de largo con una sección trapecial de 60 m en su base y 80 m en promedio en su parte superior y profundidad

media de 28 m. Después de trabajar las 24 horas del día 05 de Noviembre al 31 de Diciembre de 2007, en la excavación por tres frentes, se logró la apertura del tapón el 18 de Diciembre de 2007 (Fig. 1.3). Se removieron más de $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ de arcilla y roca (A. Melo, 2009).

Los deslizamientos de ladera además de arrasar lo que encuentran en su camino, al obstruir el flujo de la corriente se genera un peligro creciente e inminente para las comunidades e infraestructura establecidas aguas abajo, en las riberas del río y las llanuras de inundación por la repentina liberación del volumen de agua retenido al colapsarse la barrera natural por el sobreflujo. La acción inmediata para reestablecer el flujo es imperativa, a fin de eliminar o disminuir los posibles efectos si no se actúa en consecuencia. Es indispensable contar con información para dimensionar y caracterizar el fenómeno y así establecer un plan de acción a fin de atender la contingencia (Hinojosa Corona, *et. al*, 2011).

Este deslizamiento es considerado el más catastrófico en México que se tenga registro, debido a la magnitud del fenómeno y la relevancia de sus efectos:

- Al interrumpir el flujo de uno de los ríos más caudalosos del país puso en riesgo los asentamientos humanos ubicados aguas arriba y aguas abajo del tapón formado, debido a la ocurrencia de inundaciones.
- Imposibilitó la operación normal de las centrales hidroeléctricas Nezahualcóyotl (Malpaso) y Ángel Albino Corzo (Peñitas).
- La magnitud del volumen de material desplazado. Si la fuerza del caudal de río Grijalva removía el tapón generado por el deslizamiento, la corriente acarrearía el agua y el material acumulados; causando daños en las comunidades aledañas al río, en los estados de Chiapas y Tabasco.

En el mes de Octubre se registró un incremento de precipitaciones en la regiones Norte, Selva y Centro por la presencia del Frente frío No. 4 y el reforzamiento de la masa de aire polar interactuando con la Tormenta Tropical “Noel” en el Mar Caribe,

que mantuvieron saturado el suelo, lo que limitó su capacidad de infiltración (A. Melo, 2009).

En días previos al deslizamiento, se registraron lluvias intensas y atípicas en el sureste mexicano. La precipitación ocurrida en la región fue especialmente intensa, con registros mayores de 400 mm en 24 horas y cerca de 1000 mm durante los días del 28 al 30 de Octubre en la cuenca media del río Grijalva (Comisión de asuntos Hidráulicos, Senado de la República, CAH-SRM, 2008) (Hinojosa Corona, *et. al*, 2011); por lo cual se considera un factor detonante.

Algunos autores como Hinojosa-Corona *et al.* (2011) sugieren que un sismo registrado días antes del deslizamiento pudo ser un factor detonante; sin embargo, la mayor parte de los deslizamientos relacionados a sismos ocurren durante o inmediatamente después de la ocurrencia del sismo, y según el Servicio Sismológico Nacional de México (SSN) y del Centro Nacional de Información Sísmica del USGS, no se reporta ninguna actividad sísmica importante en los alrededores del deslizamiento momentos antes del evento.

Se tuvieron reportes de un sismo de magnitud 4.5 grados en la escala de *Richter* el 30 de Octubre en las inmediaciones del deslizamiento, sismo registrado cuatro días antes del evento.

Determinar el factor detonante, ayudará a identificar otras zonas susceptibles a deslizamientos que se puedan presentar en el futuro, en una región en la cual atraviesa uno de los ríos más caudalosos del país y que además conecta a importantes centrales hidroeléctricas.

En la actualidad existen distintas hipótesis acerca del factor detonante del deslizamiento de las cuales ninguna se ha demostrado numéricamente.

Si se prueba con el modelo numérico que el factor detonante del deslizamiento fue el que se plantea en la hipótesis (que más adelante abordaremos), será necesario que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) haga un monitoreo más cuidadoso acerca de la apertura de las compuertas de las presas, de manera que se tengan programas de prevención y así evitar un desastre como el ocurrido en Juan del Grijalva.

1.1. Objetivo General

Realizar un modelo numérico, usando los paquetes computacionales *PLAXIS* [32] y *GeoSlope* [33], el cual nos permitirá conocer con mayor profundidad la parte mecánica del deslizamiento, cuál fue su origen y evolución en el tiempo, así como tener una idea más clara del factor detonante de éste proceso de remoción en masa.

1.1.1. Objetivos particulares

- Recopilar información bibliográfica a partir de artículos y trabajos de tesis que tienen como tema central el deslizamiento de Juan del Grijalva.
- Obtener información a partir del análisis de gráficas (precipitación, ascenso y descenso del nivel del río Grijalva) y tablas de la literatura consultada; topografía y geología del área de estudio.
- Analizar datos haciendo una selección adecuada de estos, de acuerdo a los parámetros que el *software* requiere para que la modelación numérica se haga de manera adecuada.
- Hacer uso de un Sistema de Información Geográfica. Realizar la descripción morfológica, obtener el perfil de la ladera antes del deslizamiento con la ayuda del Modelo Digital de Elevaciones (resolución de 15 m, INEGI 2010).
- Implementar del modelo. Hacer la elección del modelo a usar. Trazando el perfil topográfico y geológico; introducir los datos que se seleccionarán para el modelo.
- Validar del modelo. Al ser un fenómeno que ya sucedió se compara los resultados del modelo con los elementos vistos en campo y reportados en la literatura, para hacer la comparación de lo obtenido con lo que se suscitó en la realidad.
- Verificación o negación de la hipótesis.

1.2. Hipótesis

El deslizamiento ocurrido el 04 de Noviembre de 2007 en el poblado de Juan del Grijalva, Chiapas, tuvo como factor detonante el abatimiento acelerado del nivel del río Grijalva producido por la apertura de las compuertas en la Presa Ángel Albino Corzo (Peñitas).



Figura 1.2: En la imagen de la izquierda se aprecia la ladera de Juan del Grijalva antes del deslizamiento y en la derecha, la zona después del deslizamiento. Se observa el represamiento generado por el material desplazado. Marlvi (2008) y Melo, *et al.*, (2009)



Figura 1.3: Imagen que muestra la apertura en un primer tramo del tapón el 18 de Diciembre de 2007, Marlvi (2008).

Capítulo 2

Marco Teórico

Un proceso de remoción en masa (PRM), también conocido como proceso gravitacional, inestabilidad de ladera o movimientos de ladera se puede definir como el movimiento ladera abajo de materiales formadores de las laderas: masa de roca, suelo residual o sedimentos de una ladera, e incluso partes de la roca madre; bajo la influencia de la gravedad. Entre los principales factores detonantes se consideran: el clima (precipitación), sismicidad y actividades antropogénicas (Brunsden, 1979; Penk 1894; Sharpe, 1938; Terzaghi, 1950; Varnes, 1958; Zaruba y Mencl, 1969; Skempton y Hutchinson, 1969; Gary *et al.*, 1972; Coates, 1977).

Las áreas que están más propensas a la inestabilidad de laderas son las zonas montañosas y escarpadas, zonas de relieve con procesos erosivos y de meteorización, acantilados costeros, laderas de valles fluviales, zonas con suelos blandos y sueltos, zonas con fallas y fracturas (sísmicas) y de precipitación intensa.

Los PRM en dónde no se ve involucrada la acción antropogénica, suelen ser profundos y movilizan millones de metros cúbicos de material. Los mecanismos de rotura, son complejos y están condicionados por factores de tipo geológicos como: fallas, procesos tectónicos, procesos geomorfológicos, litorales, flujos de agua subterránea, o simplemente la distribución espacial de elementos planares.

En términos de esfuerzos, la inestabilidad de laderas, se debe al desequilibrio entre las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno, de tal manera que las fuerzas desestabilizadoras superan a las fuerzas estabilizadoras o resistentes. Dicho desequilibrio se puede deber a una modificación de las fuerzas ya existentes o bien a

la aplicación de nuevas fuerzas externas, las cuales pueden ser estáticas o dinámicas (Álcantara-Ayala 1999).

Debido a la frecuencia y extensión de la inestabilidad de laderas constituyen un riesgo geológico muy importante debido a que afecta construcciones, vías de comunicación y a poblaciones.

2.1. Clasificación de inestabilidad de laderas

Existen diversas clasificaciones para los PRM, de acuerdo a diferentes estudiosos y expertos de la materia. Estas clasificaciones se hace de acuerdo a los tipos de materiales involucrados, y al mecanismo y tipo de la rotura; también se consideran aspectos como la cantidad de agua en el suelo, así como la velocidad y magnitud del movimiento.

La clasificación más aceptada y aplicada a nivel internacional se basa en el mecanismo del movimiento. Aquí se hará uso de la clasificación propuesta por el programa EPOCH (1993), la cual a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988) se elaboró una diferenciación entre el tipo de movimiento y los materiales involucrados (3.4).

- Los caídos o desprendimientos (*falls*).
- Vuelcos o desplomes (*topples*).
- Deslizamientos (*slides*).
- Expansiones laterales (*lateral spreading*).
- Movimientos complejos (*complex movements*).
- Flujos (*flows*).

Cuadro 2.1: Clasificación de los procesos de remoción de masa.

Mecanismos de movimiento	Tipo de material involucrado		
	Roca	Derrubios	Suelo
Caída (<i>fall</i>)	Caída de rocas (<i>rockfall</i>)	Caída de derrubios (<i>debris fall</i>)	Caída de suelos (<i>soil fall</i>)
Vuelco o desplome (<i>topple</i>)	Vuelco o desplome de rocas (<i>rock topple</i>)	Vuelco o desplome de derrubios (<i>debris topple</i>)	Vuelco o desplome de suelos (<i>soil topple</i>)
Deslizamiento rotacional simple (<i>rotational slide</i>)	Individual (<i>simple</i>). Multiple. Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>). Multiple. Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>). Multiple. Sucesivo (<i>successive</i>)
Deslizamiento traslacional (<i>translational slide, non-rotational</i>)	Deslizamiento de roca en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento de derrubios en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento traslacional de suelos (<i>slab slide</i>)
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas (<i>rock slide</i>)	Deslizamiento de derrubios (<i>debris slide</i>)	Coladas de barro (<i>mudslide</i>)
Flujos (<i>flow</i>)	Flujo de rocas (<i>rock flow</i>)	Corrientes de derrubios (<i>debris flow</i>)	Flujos de tierra, arena o suelo (<i>soil flow</i>)
Expansion lateral (<i>lateral spreading</i>)	Expansiones laterales en rocas (<i>rock spreading</i>)	Expansiones laterales en derrubios (<i>debris spread</i>)	Expansiones laterales en suelos (<i>soil Spreading</i>)
Complejo (<i>complex</i>)	Ejemplo: Alud de rocas (<i>rock avalanche</i>)	Ejemplo: Flujo deslizando (<i>flow slide</i>)	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras (<i>slump-earthflow</i>)

2.1.1. Caídos o desprendimientos

Son movimientos repentinos de suelos y fragmentos aislados de rocas o detritos que se originan en pendientes pronunciadas y acantilados, por lo que el movimiento es casi en caída libre, el cual puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo posteriormente (Fig. 2.1).

Los movimientos son definidos con base en el material involucrado, por lo que se pueden clasificar en caídas o desprendimientos de rocas (*rockfalls*), caídas o desprendimiento de detritos (*debris falls*) y caídas o desprendimientos de suelos (*soil falls*) (Alcántara-Ayala (1999)).

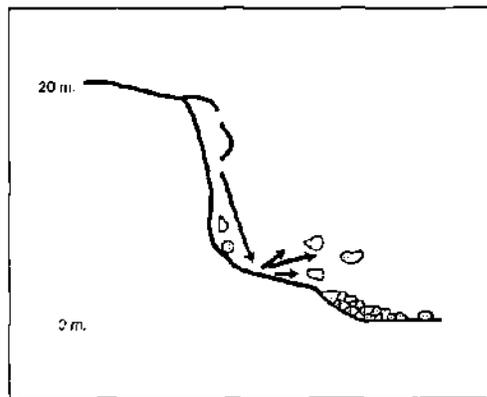


Figura 2.1: Desprendimientos o caídas (WP/WLI, 1990).

2.1.2. Vuelcos o desplomes

Un vuelco o desplome, es la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje, el cual está determinado por su centro de gravedad. La dirección de su movimiento está dirigida hacia adelante o hacia la parte externa, por lo cual existe un basculamiento o inclinación pero no hay un colapsamiento (Fig. 2.2).

Ocurren principalmente en una o más superficies, cuyos materiales poseen un sistema de discontinuidades como diaclasas, grietas de tensión o superficies columnares.

Se clasifican en vuelcos o desplome de rocas, de derrubios o detritos y de suelos (Alcántara-Ayala (1999)).

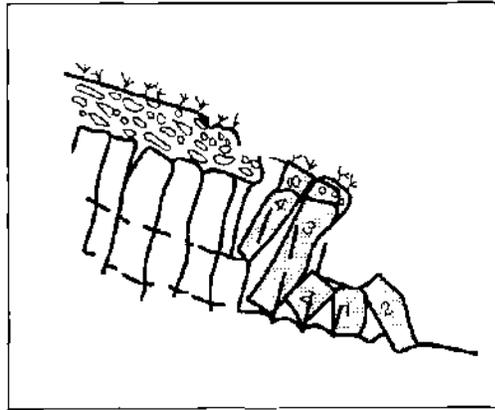


Figura 2.2: Vuelcos o desplomes (WP/WLI, 1990).

2.1.3. Deslizamientos

Son movimientos ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie reconocible de ruptura. Es frecuente que la formación de grietas transversales a la pendiente del talud sea una señal de la ocurrencia de este tipo de movimientos, y están localizadas en la zona que ocupará el escarpe principal (Alcántara-Ayala (1999)).

La superficie de ruptura es lo que define el tipo de deslizamiento, de esta forma, las superficies curvas, cóncavas o en forma de “cuchara” se asocian a deslizamientos rotacionales; mientras que las superficies de ruptura semiplanas u onduladas se ligan con los movimientos traslacionales o planares.

Rotacionales

Son deslizamientos en los que su superficie principal de falla resulta cóncava, es decir, hacia arriba en forma de “cuchara o concha”, definiendo un movimiento rotacional de la masa inestable de suelos y/o fragmentos de rocas. Los bloques ubicados en la parte superior se inclinan hacia atrás, el escarpe principal regularmente es vertical, la masa desplazada se acumula ladera abajo y su deformación interna es de muy bajo grado (Fig. 2.3).

La velocidad y extensión de este tipo de movimientos es muy variable. Dependiendo de las etapas del movimiento, se clasifican en simples, múltiples y sucesivos

(Alcántara-Ayala (1999)).

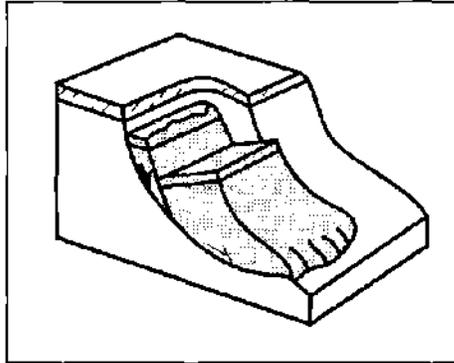


Figura 2.3: Deslizamiento rotacional (WP/WLI, 1990).

Traslacionales

Los deslizamientos traslacionales son menos profundos que los rotacionales y en ellos se involucra un movimiento paralelo a la superficie, los cuales están controlados por superficies de debilidad de los materiales formadores (Fig. 2.4).

La masa de suelos y/o fragmentos de rocas se desplaza hacia fuera y hacia abajo, a lo largo de una superficie principal más o menos plana, con muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. Usualmente determinan deslizamientos someros en suelos granulares, o bien, están definidos por superficies de debilidad en formaciones rocosas, como los son planos de estratificación, juntas y zonas de cambio de estado de meteorización en las rocas (Alcántara-Ayala (1999)).

Estos se subdividen en deslizamientos de roca en bloque (*block slide*), deslizamientos de derrubio en bloque (*block slide*) y deslizamientos traslacionales de suelos (*slab slide*) (Alcántara-Ayala (1999)).

2.1.4. Expansiones laterales

Movimientos que son el resultado de la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compactas, debido a la licuefacción o fluidización del material subyacente.

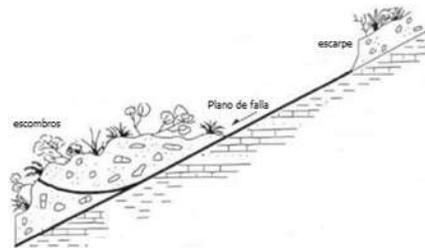


Figura 2.4: Deslizamientos traslacionales, Potter 2007.

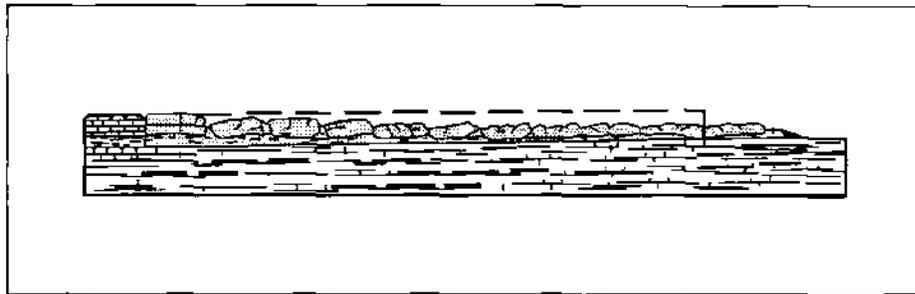


Figura 2.5: Expansiones Laterales (WP/WLI, 1990).

Ocurren cuando suelos gruesos o rocas están inmersos en una matriz de suelo fino (2.5).

La superficie de cizallamiento no está bien definida, la masa involucrada se mueve rápida y retrogresivamente. Movimientos que ocurren en ambientes de tipo lacustre y marinos de poca profundidad.

Pueden ser desencadenados por movimientos rotacionales o por efectos sísmicos. Se clasifican en expansiones laterales en rocas (*rock spreading*), en derrubios (*debris spread*) y suelos (*soil spreading*), (Alcántara-Ayala (1999)).

2.1.5. Movimientos complejos

Los movimientos complejos ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al desplazar ladera abajo. Entre los más importantes se encuentran: los aludes, o avalanchas de rocas, y flujos deslizantes.

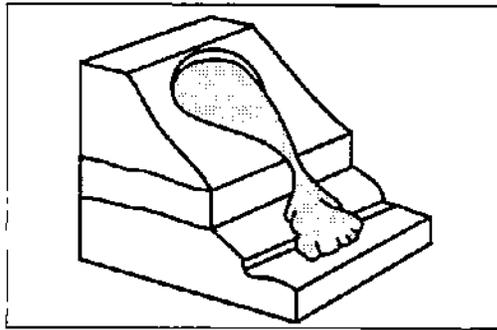


Figura 2.6: Flujos (WP/WLI, 1990).

2.1.6. Flujos

Los flujos son movimientos espacialmente continuos, en los que las superficies de cizalla son muy próximas, de poca duración y por lo tanto difíciles de observar. El movimiento de los flujos se comporta como un fluido viscoso, razón por la cual la distribución de velocidades no es homogénea y origina la formación de lóbulos a partir del predominio del movimiento intergranular. La principal causa es el aporte de intensa precipitación y material suelto en una superficie (Fig. 2.6).

Son fenómenos muy complejos que involucran grandes volúmenes de roca, residuos y suelo; presentan diferentes tipos de movimiento inicial (caídos, deslizamientos traslacionales, entre otros), seguidos de un movimiento de flujo de fragmentos de roca o residuos (Hungry, 2011).

El límite inferior del material desplazado puede ser una superficie, a lo largo de la cual existe una gradación de deslizamientos a flujos, dependiendo del contenido de humedad, la movilidad y evolución del movimiento (Cruden y Varnes, 1996).

Los flujos involucran todos los tipos de materiales y se clasifican de acuerdo a su contenido: flujos de rocas (*rock flows*), flujos o corrientes de derrubios (*debris flow*) y flujos de arena o suelo (*soil flow*).

2.1.7. Deformaciones gravitacionales profundas de ladera

Las inestabilidades profundas en ladera de grandes dimensiones han sido definidas de diferentes maneras a nivel mundial (Audemard *et al.*,

2010). La mayoría de los casos reportados han sido atribuidos a formas diversas de hundimientos de la ladera (“slope sagging”; Savage y Varnes, 1987; Hutchinson, 1998), un término derivado de la palabra alemana “Sackung” (Zischinsky, 1966). Esta definición presenta un significado similar al término relajamiento gravitatorio (“gravitational spreading”; Varnes *et al.*, 1989) y deformaciones gravitatorias profundas en laderas (“deep-seated gravitational slope deformation DSGSD”; e.g., Nemcok, 1972; Dramis y Sorriso-Valvo, 1994). Sin embargo leves diferencias pueden persistir entre tales términos. El término “sackung” difiere de un deslizamiento grande clásico en la lentitud del proceso de deformación de la ladera en largo plazo, junto a la ausencia de bordes bien definidos y del abultamiento del pie del deslizamiento (McCalpin y Irvien, 1995). Los “sackungen” se ubican típicamente a lo largo de la cima de la montaña en rocas masivas competentes, mimetizándose con las curvas de nivel, así como a lo largo del rumbo de discontinuidades mayores en las rocas (estratificación, foliación, fracturas y/o fallas).

Los DSGSD, en su definición más amplia, muestran rasgos morfoestructurales distintivos, tales como: montañas dobles o múltiples, escarpes y contra escarpes, hundimiento de la cima, depresiones transversales a la montaña, trincheras, depresiones (con o sin laguna), fisuras de tensión abiertas o abultamiento en el pie, entre otras (Audemard *et al.*, 2010). Los DSGSD son lentos pero continuos sobre largos períodos de tiempo, ocurren en laderas de alta pendiente (con al menos 500 m de desnivel), con dimensiones comparables a la ladera (áreas $> 0.25 \text{ km}^2$, volúmenes $> 0.5 \text{ km}^3$, espesor $> 100 \text{ m}$) y carecen de bordes y superficie basal bien definidos. Sus desplazamientos pueden ser relativamente pequeños en comparación con el tamaño de la vertiente, pero los movimientos acumulados pueden ser considerables. Pueden reactivarse luego de prolongados períodos de inactividad. Su velocidad a lo largo de la superficie de deslizamiento está típicamente entre pocos milímetros a algunos centímetros al año (en el orden de 0.4 a 5.0 mm/año, según Varnes *et al.*, 1989). Cuando son disparados o reactivados por sismos, su movimiento es a brincos,

con la alternancia de períodos prolongados de inactividad y de momentos de reactivación cortos en ocasión de los sismos. En consecuencia son considerados como efectos superficiales sismo-gravitacionales potenciales que esencialmente resultan de la combinación de la vibración sísmica y fuerzas gravitacionales.

Los principales factores detonantes de los movimientos en masa sísmicamente inducidos son: aceleraciones orientadas (carga dinámica), cambios en el nivel freático, sismos, cambios cíclicos en la presión de poros y licuación, fallamiento y fraturamiento superficial sismotectónico (Radbruch-Hall y Varnes, 1976; Solonenko, 1977; Dramis y Blumetti, 2005).

2.1.8. Variación del nivel de agua

La elevación del nivel de agua en el embalse, como consecuencia de prolongados periodos de lluvia o por el llenado de trasvases, provoca un aumento de presiones intersticiales en las laderas que pueden desencadenar o acelerar a los PRM. Como ejemplo se tienen el gran deslizamiento de *Vajont* (González de Vallejo, 2006).

El caso más desfavorable para la estabilidad de las laderas de embalses y lagos es el *descenso brusco del nivel del agua*, al generarse unas condiciones de desequilibrio por permanecer los materiales de las laderas con elevadas presiones intersticiales que no se disipan con la misma velocidad del descenso del nivel de agua. Estas circunstancias pueden darse en laderas de embalses destinados al control de avenidas en valles escarpados, sujetos a cambios estacionales del nivel de agua que pueden superar varias decenas de metros, como lo ocurrido en los embalse de las presas de Esla (Zamora) y Beninar (Almería) (González de Vallejo, 2006).

Deslizamiento Vajont

El 09 de Octubre de 1963

2.1.9. Deslizamiento de Juan del Grijalva

El deslizamiento de Juan del Grijalva tuvo un deslizamiento principal que fue de tipo traslacional, además de otros de menor grado: en los flancos se observaron flujos

de lodo y escombros, así como deslizamientos de tipo rotacional en la cabeza y pie de la ladera (Hernández-Madrigal, 2010). Debido a la complejidad de este fenómeno, se puede clasificar como una deformación profunda de ladera (Ibsen y Brunsten, 1996), si bien la definición formal se menciona que son movimientos lentos, como es un tipo poco estudiado, la velocidad puede ser mayor a lo que se describe.

En el trabajo de A. Melo (2009) se menciona lo siguiente:

La inspección de roca fracturada en el sitio, así como la observación de los taludes excavados, permiten definir que la masa deslizada conservó parte de su estructura (posición de los estratos de lutita y areniscas) aunque muy fracturada, lo que confirma que se deslizó en primera instancia como cuerpo rígido y posteriormente se separó durante el movimiento.

2.2. Antecedentes

2.2.1. Trabajos previos

Actualmente se cuentan con siete trabajos relacionados al deslizamiento ocurrido en Juan de Grijalva, entre los que se encuentran seis artículos y un trabajo de tesis de licenciatura; en estos trabajos se abordan estudios hechos en la zona de estudio, desde el punto de vista geológico, hidrológico y morfológico exponen sus diversas hipótesis acerca de los factores que se estiman fueron los detonantes del deslizamiento y los factores condicionantes para que el fenómeno ocurriese, así como la descripción del tipo de PRM al que pertenece.

Según Melo (2009) dos tipos de fenómenos causaron el deslizamiento: uno de carácter geológico (relacionado a los aspectos litológicos y estructurales) y el otro meteorológico, relacionado con una precipitación intensa entre los días del 28 de Octubre al 03 de noviembre de 2007, lo que provocó variaciones en el nivel freático de la masa rocosa y con ello supresiones (presiones ascendentes que contrarrestan el efecto gravitatorio del macizo (Melo, 2009)). Sin embargo también se aborda lo siguiente en las conclusiones del trabajo:

Al ascender el nivel del agua, saturó la lutita, con lo cual perdió adherencia con las areniscas; tal vez sea la causa del deslizamiento del bloque

superior [...]

Según el artículo de Hinojosa-Corona *et al.*, (2011), el deslizamiento se debió a una suma de factores con efectos retardados de unos días, tales como la lluvia y los eventos sísmológicos ocurridos. Mencionan que en la segunda mitad del mes de Octubre del 2007 ocurrieron precipitaciones extraordinarias en la cuenca del Río Grijalva, por lo que el suelo se saturó lo cual limitó su capacidad de infiltración.

En 2012, Mora-Ortiz y Rojas-González analizaron la estabilidad del talud mediante una modelación del comportamiento del talud: usando *PlaxFlow 2003* para simular el flujo de agua en los suelos no saturados y el segundo *Geo, 1995* para el análisis de las estabilidad de taludes; para lo cuál obtuvieron las características estatógráficas, geométricas y geomecánicas. Esto último mediante pruebas de laboratorio en muestras inalteradas.

Consideraron la variación de la cohesión provocada por el humedecimiento y con ello observaron que el factor de seguridad evoluciona con el contenido de agua del cuerpo del talud. Concluyen que la causa del deslizamiento en Juan del Grijalva, fue el humedecimiento del suelo, y que las lluvias del 28 de Octubre al 04 de Noviembre de 2007 fueron el detonante del deslizamiento.

Por su parte Garnica y Mora (2011), hicieron un análisis geotécnico de los factores que provocaron el deslizamiento. Compararon el factor de seguridad contra la humedad del suelo, y concluyen que a medida que transcurrían los días del mes de Octubre el grado de saturación del suelo aumentaba y con ello el factor de seguridad disminuía. Según estos autores los 1073 mm de precipitación acumulados del 28 al 01 de Noviembre fueron el factor detonante del deslizamiento, la masa de suelo se saturó prácticamente en su totalidad del 02 al 04 de Noviembre para concluir con el deslizamiento.

En 2010 Hernández-Madrigal *et al.*, consideran que entre los factores que influyeron en el deslizamiento destacan la precipitación, que acumuló el 67 % del promedio del precipitación anual en 30 días; otro factor potencial incluye un sismo de 4.5 grados ocurrido cinco días antes del deslizamiento y finalmente el abatimiento del río Grijalva generado por la apertura de las compuertas de la presa Peñitas, la cual está localizada a 14 km aguas abajo.

Datos obtenidos

En el trabajo de Garnica (2011) sobre el deslizamiento de Juan del Grijalva, se tomaron tres muestras inalteradas representativas del suelo que conforma el cuerpo del talud, de este material obtuvieron las siguientes propiedades:

Cuadro 2.2: Datos obtenidos de Garnica, *et al.*, (2011)

Límite Líquido	51 %
Índice Plástico	16 %
Contenido de agua en el lugar	41.19 %
Peso Volumétrico	16.37 kN/m^3
Densidad de Sólidos	2.7
Relación de vacíos	1.32
Grado de saturación	85.54 %
Esfuerzo de preconsolidación	435 kPa

Además Garnica *et al.*, (2011), realizaron tres ensayos triaxiales consolidados drenados sobre muestras saturadas y los círculos de Mohr dieron los siguientes valores:

Cuadro 2.3: Datos obtenidos de Garnica *et al.*, (2011)

Ángulo de fricción interna	20°
Cohesión	3.63 kPa

Gráficas de precipitación

En los artículo de Hinojosa Corona *et al.*, (2011) y de Hernández Madrigal *et al.*, (2010), se tienen las gráficas de precipitación en milímetros del 08 de Octubre de 2007 hasta 04 de Noviembre de 2007 la fecha del deslizamiento (2.7), (2.8), (2.9), (2.10). De estas gráficas se obtuvieron la cantidad de agua que se precipitó por día y la precipitación acumulada hasta el día del fenómeno.

Además de las gráficas de precipitación, se tiene la gráfica de los ascensos y descensos del nivel del agua del Río Grijalva; en una entrevista con el Físico César Triana, director de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en el estado de Chiapas, comentó que debido a precipitaciones considerables dos meses antes del deslizamiento en la cuenca del Grijalva, se tuvo que cerrar las compuertas de la

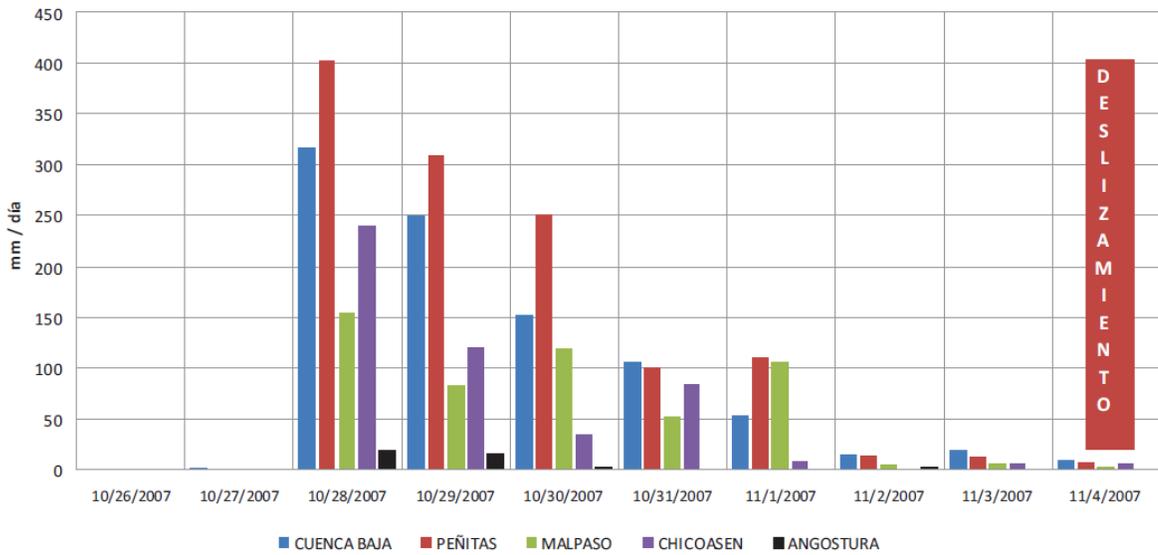


Figura 2.7: Precipitación máxima en milímetros por cuenca y por día, antes del deslizamiento. Gráfica tomada del artículo de Hinojosa-Corona, *et al.*, (2011).

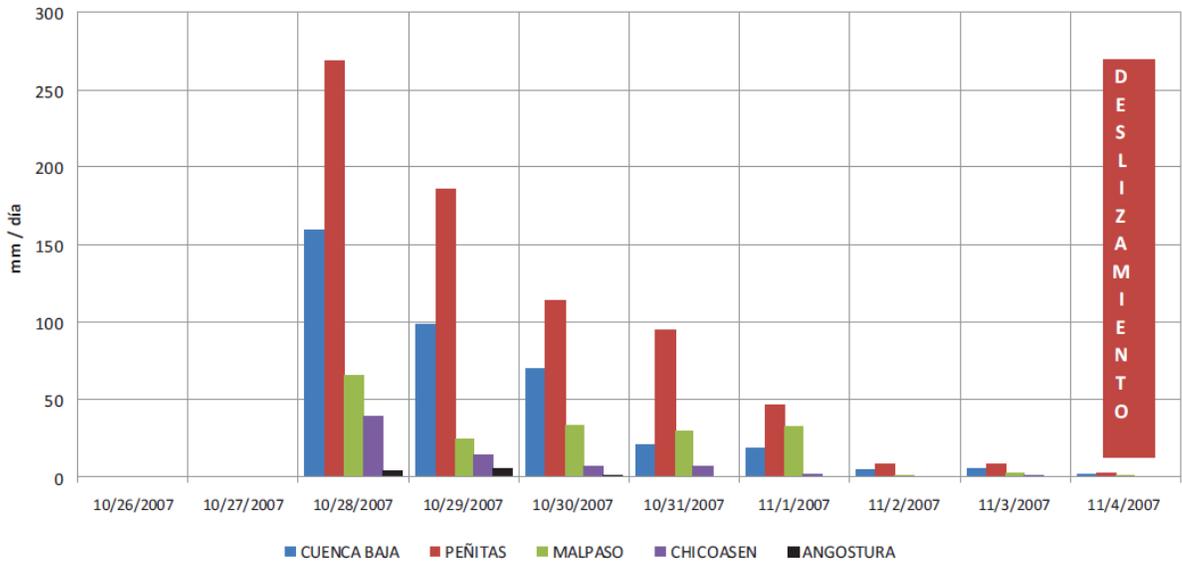


Figura 2.8: Precipitación promedio en milímetros por cuenca y por día, antes del deslizamiento. Gráfica tomada del artículo de Hinojosa-Corona, *et al.*, (2011).

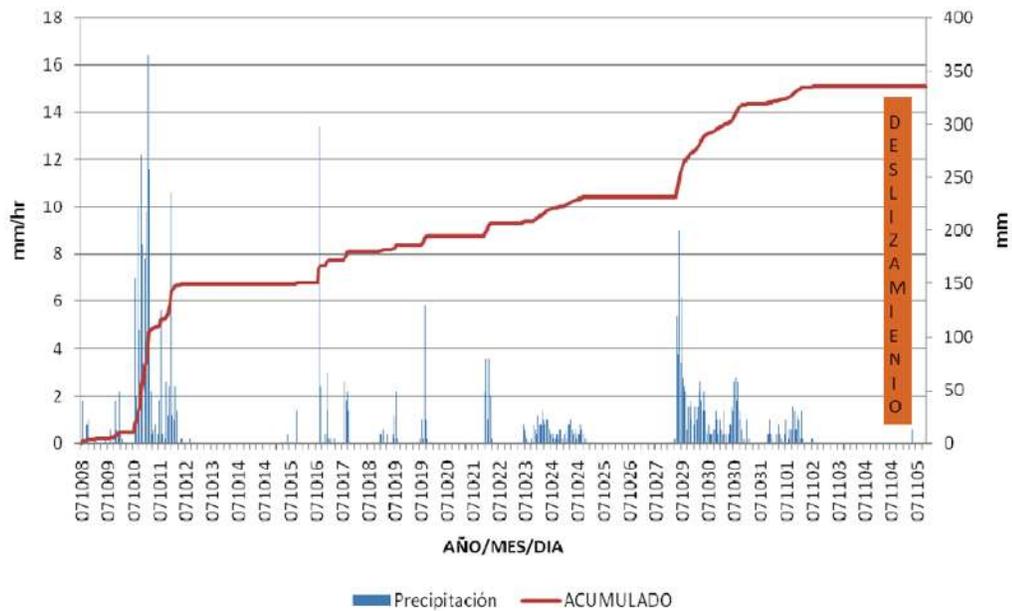


Figura 2.9: Intensidad de lluvia (mm/h) en la estación meteorológica del Campo Experimental del Centro de Chiapas (CECECH) del INIFAP, agrupando cada hora las mediciones (15 min) para el período de 2007/10/08 al 2007/11/05. Gráfica tomada del artículo de Hinojosa-Corona, *et al.*, (2011).

presa Malpaso un mes antes del deslizamiento, es decir el mes de Octubre de 2007, por lo que el control del nivel del agua estuvo a cargo de la presa Peñitas solamente.

Cinco abatimientos considerables en el nivel del agua del Río Grijalva fueron observados basados en los registros de la presa Peñitas, cada uno con una duración de tres días durante Octubre y Noviembre de 2007. Los cuatro primeros abatimientos tuvieron una tasa de 0.35 a 0.9 m/día, y el último ocurrió del 02 al 05 de Noviembre, el cual tuvo un abatimiento con tasa del 1.47 m/día, período en el que se situó el deslizamiento del Juan del Grijalva al final del último abatimiento, como se puede observar en la gráfica, fue el mayor en comparación con los otros cuatro registros, (Fig. 2.12) (A. Melo, 2009).

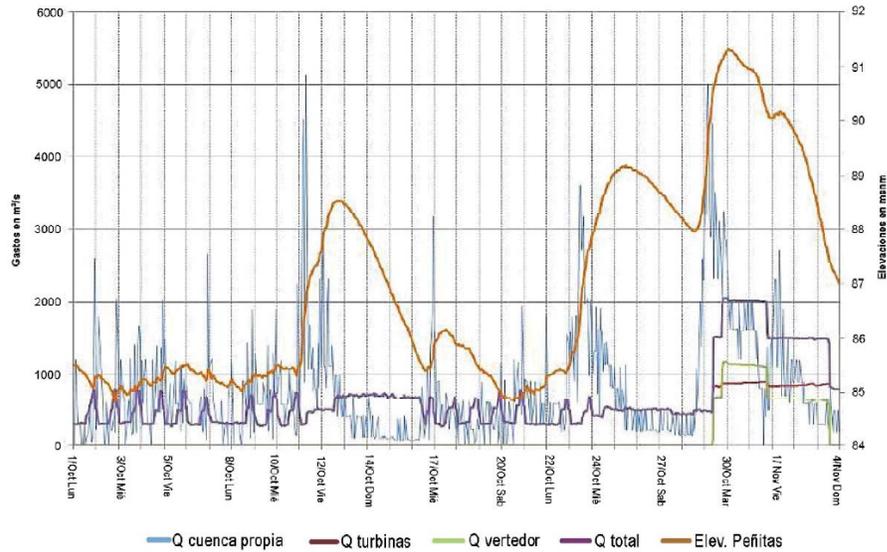


Figura 2.10: Hidrograma de entrada y evolución de niveles en la presa Peñitas del 01 de Octubre al 04 de Noviembre de 2007. Se muestra el gasto (Q) en m^3/s propio de la cuenca, el canalizado en las turbinas, al vertedor de excedencias y el total. Gráfica tomada del artículo de Hinojosa-Corona, *et al.*, (2011).

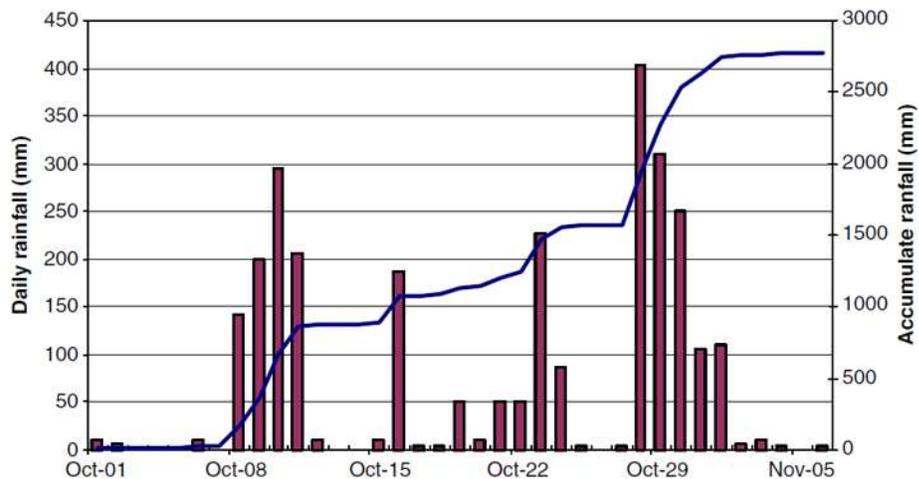


Figura 2.11: Precipitación acumulada en la zona de Juan del Grijalva (estación meteorológica de Ocoatepec; CONAGUA 2007). Las barras representan la lluvia diaria; y la línea continua la lluvia acumulada. Gráfica obtenida del artículo de Hernández Madrigal *et al.*, (2010).

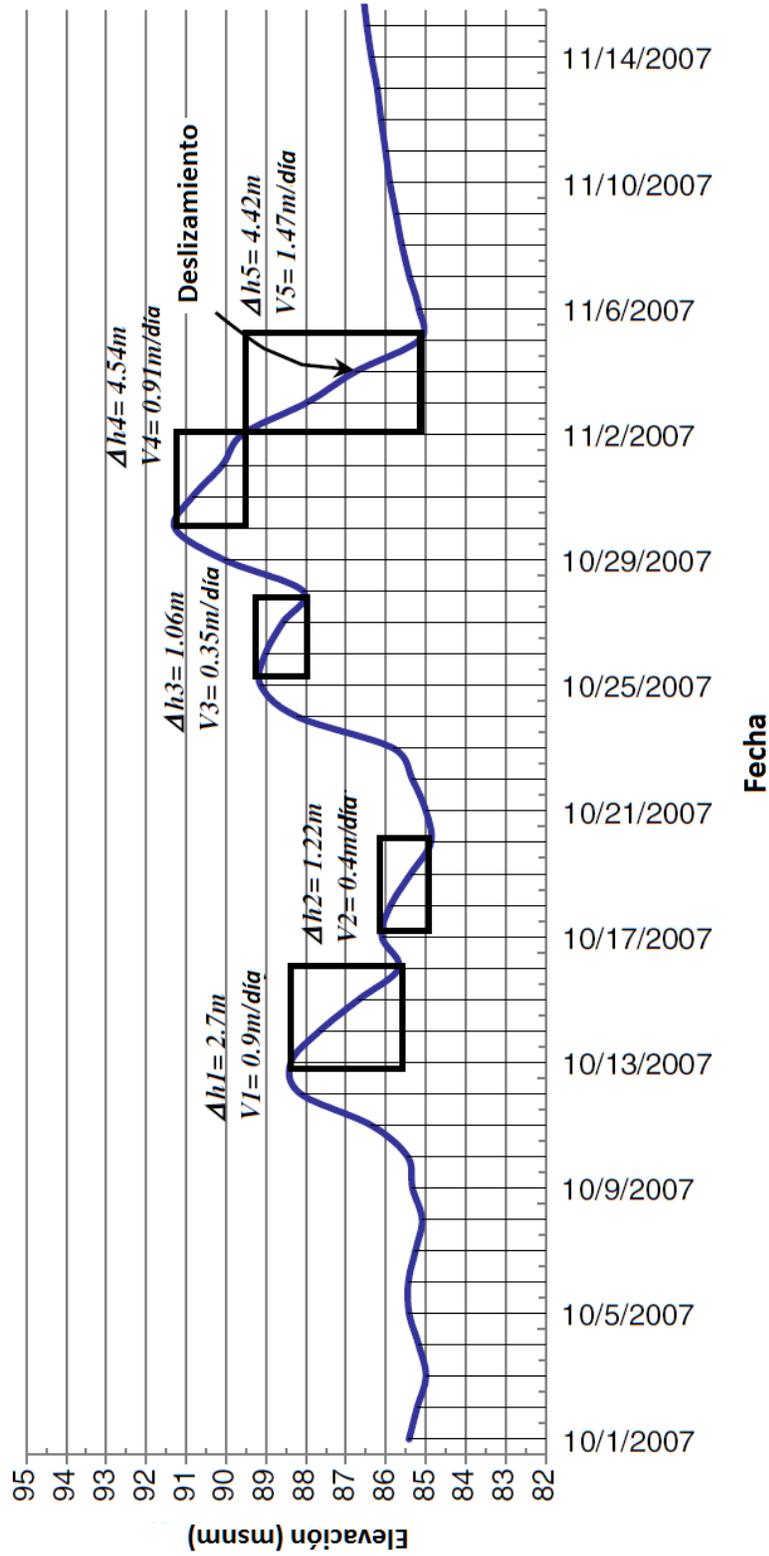


Figura 2.12: Nivel de agua en la presa Peñitas, antes y después del deslizamiento. Los recuadros muestran el batimiento del nivel del agua y las etiquetas indican el cambio en el nivel del agua (Δh) y la tasa del abatimiento del nivel del agua (V) de cada abatimiento. Gráfica tomada del artículo de Hernández Madrigal, *et al.*, (2010).

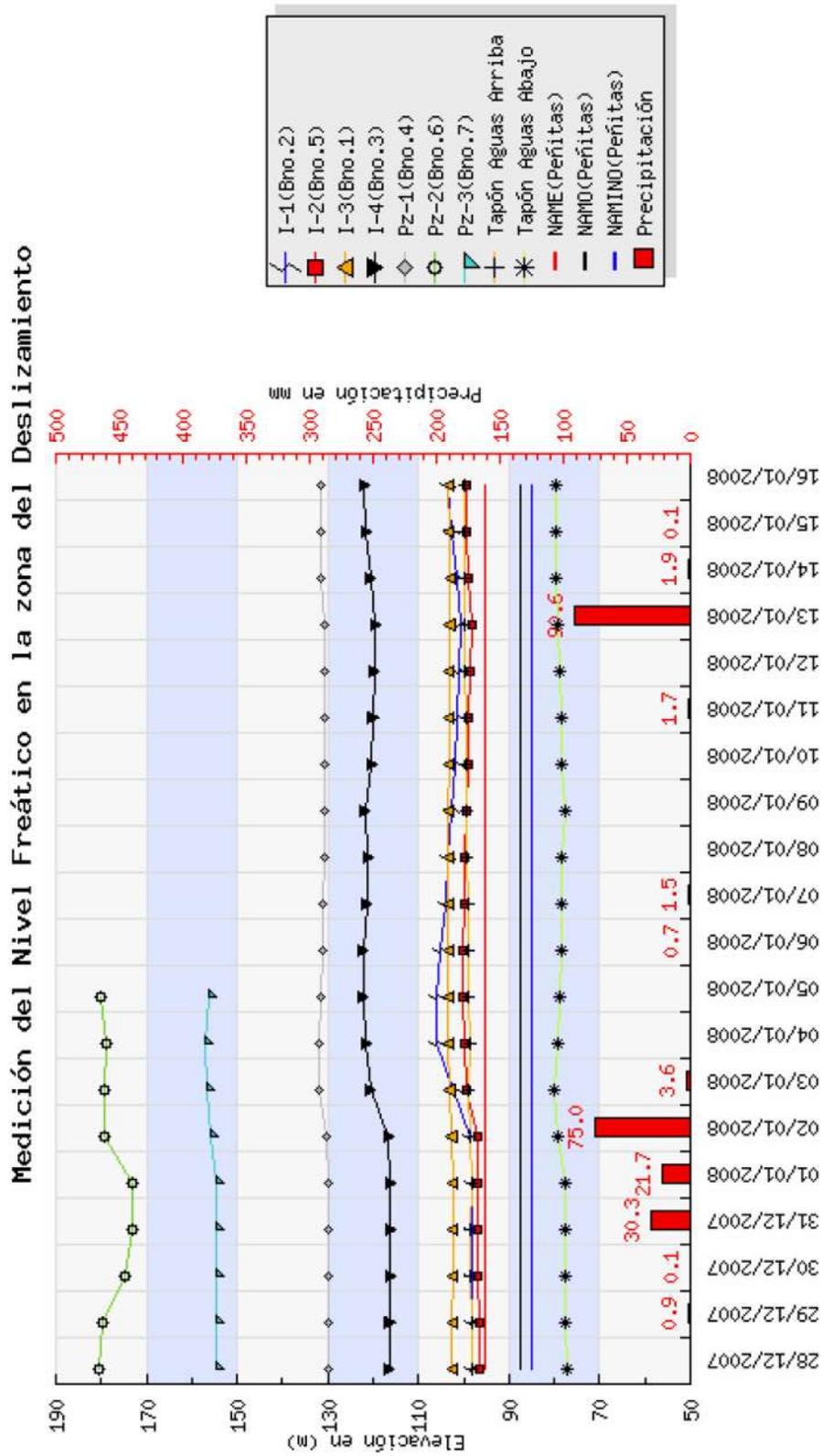


Figura 2.13: Gráfica que muestra el comportamiento de los niveles de agua en cada uno de los barrenos y su relación con la precipitación del 26 de Diciembre de 2007 al 16 de Enero de 2008, (Melo *et al.*, 2009).

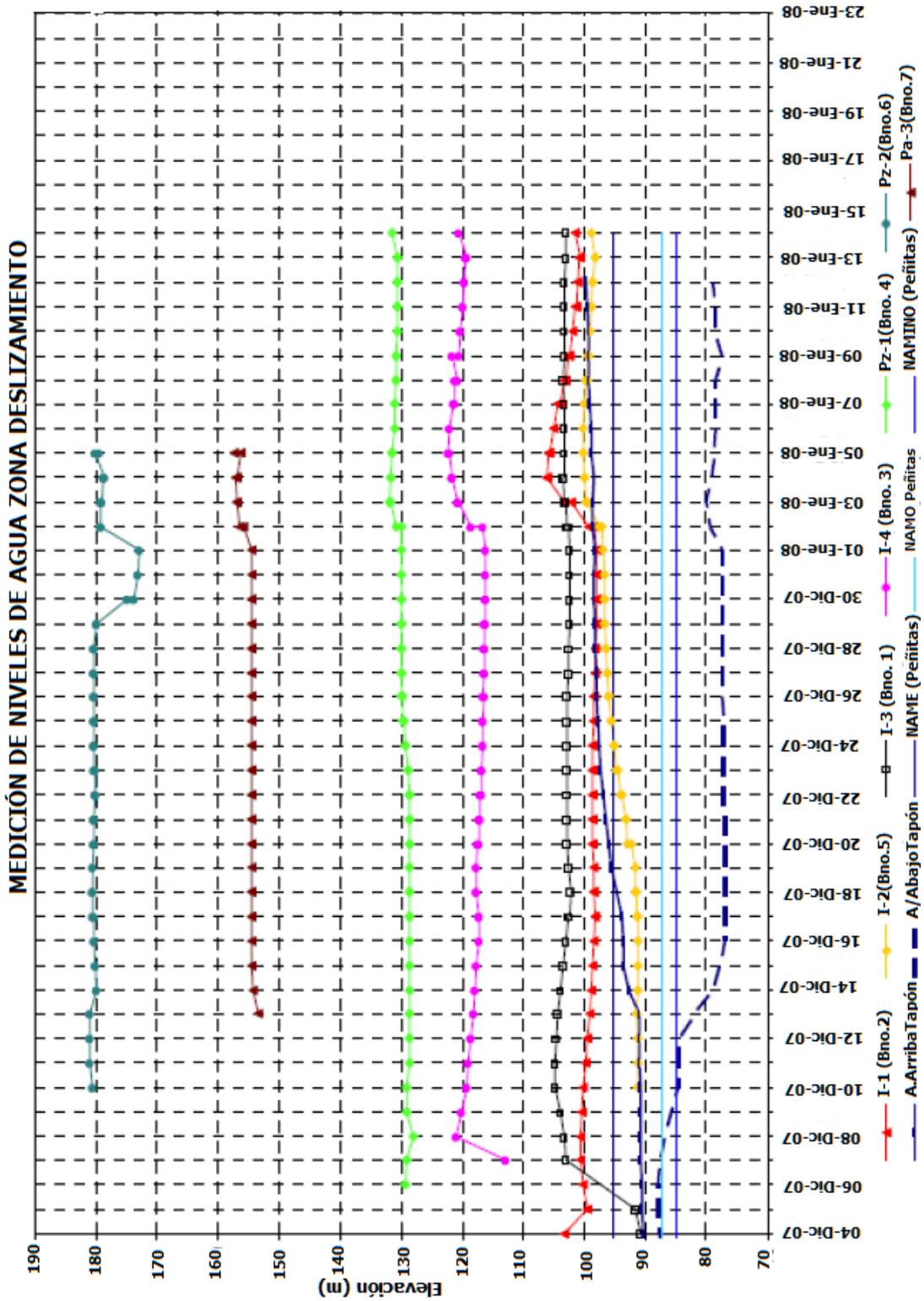


Figura 2.14: Niveles Freáticos en pozos de observación e inclinómetros, (Melo *et al.*, 2009).

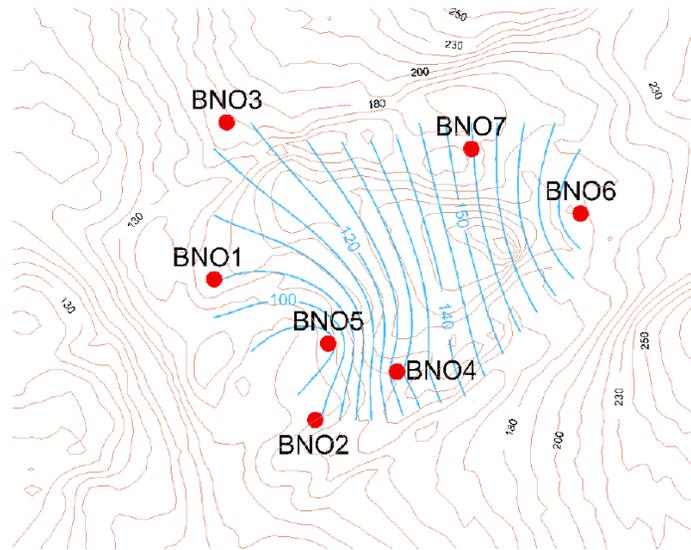


Figura 2.15: Configuración de los niveles de agua en los barrenos perforados en la zona del deslizamiento, (Melo, 2009).

2.2.2. Nuevo Juan del Grijalva.

Después del desastre ocasionado por el deslizamiento la noche del 04 de Noviembre de 2007, se inició la reubicación de las familias afectadas por dicho fenómeno (Fig. 2.4); así se construyó la primera Ciudad Rural Sustentable (Fig. 2.16), la cual fue nombrada como Nuevo Juan del Grijalva, en honor a los habitantes que perdieron la vida.

Se ubica en el municipio de Ostucán, en las coordenadas $17^{\circ} 25'38''$ latitud Norte y $93^{\circ} 22'20''$ longitud Oeste, con una extensión territorial de 80 hectáreas. De manera inicial se contaron con 1 704 habitantes pertenecientes a 410 familias damnificadas, de un listado de localidades que fueron afectadas durante del fenómeno, ubicadas en el Municipio de Ostucán (INEGI, 2010).



Figura 2.16: Ciudad Rural Sustentable Nuevo Juan del Grijalva. 30 de Mayo de 2016.

Cuadro 2.4: Comunidades reubicadas en Nuevo Juan del Grijalva. Informe de Protección Civil del Estado de Chiapas, 2007.

Comunidades	Población total
Ejido Juan del Grijalva.	583
Ejido Salomón González Blanco.	181
Ejido Playa Larga Tercera Sección.	236
Ejido La Laja.	261
Ejido Pichucalco antes Muspac.	242
Comunidad Playa Larga Primera Sección.	195
Comunidad Peñitas del Mico.	126
Comunidad Antonio León.	207
Ranchería Antonio León Anexo.	68
Ranchería Loma Bonita.	142
Ranchería Nuevo Sayula.	405

2.2.3. Trabajos Previos con PLAXIS 2D

Para el estudio de problemas de estabilidad de laderas usando *PLAXIS 2D*, se hace una recopilación de trabajos realizados en diversas partes del mundo y en México, hasta la fecha en que se redactó el presente trabajo, en nuestro país se cuenta con un sólo trabajo de este tipo.

Görog y Török (2007) con el trabajo titulado “Slope stability assessment of weathered clay by using field data and computer modelling: A case study from Budapest”, estudiaron zona diseñada para una futura urbanización, en una zona con laderas. Se evaluó la estabilidad del talud y generaron el factor de seguridad, para ellos se usaron dos tipos de *software Plaxis* y el *GEO-4*. Encontraron que de acuerdo con los cálculos del modelo y los datos de campo, los principales mecanismos de activación de los deslizamientos parecen ser de alta presión de poros debido a precipitaciones y a la inclinación de la pendiente. La superficie de deslizamiento se encuentra en la zona límite de la arcilla inalterada-degradada amarilla y gris.

Askarinejad *et al.*,(2013) estudiaron el deslizamiento Slano Blato, ocurrido en el año 2000 el cual tuvo un volumen de más de un millón de metros cúbicos, considerado uno de los más grandes deslizamiento en Eslovenia. Esta zona contaba con dos antiguos deslizamientos en los años de 1888 y en 1902, por 100 años se mantuvo estable hasta que se reactivó en el año 2000 por efectos de lluvia intensa.

El trabajo titulado “Drainage efficiency of large dowels as a stabilising measure, case study of Slano Blato landslide (Slovenia)” publicado en 2013 señala que modelaron distintos escenarios con *Plaxis* con estados estacionarios y transitorios. Éstas simulaciones mostraron que la instalación de los pasadores de drenaje cumplen tanto los requisitos de retención y drenaje.

La eficacia del drenaje de las espigas instaladas se examinó de manera analítica y numérica. El cálculo analítico se llevó a cabo bajo supuestos simplificados de acuerdo con la teoría clásica de Dupuit y Thiem. Los cálculos numéricos se realizaron utilizando el programa de elementos finitos PLAXIS bajo diferentes escenarios de estado estacionario y transitorio. Los resultados se compararon con un caso ‘undrained’ para captar el grado de pendiente ascendente de drenaje y pendiente abajo. Las simulaciones muestran que la instalación de los pasadores de drenaje conduce a un éxito de la pendiente al menos a un radio de 40 m.

Se tiene un trabajo de tesis de Maestría Villaseñor Reyes (2014), titulado “Caracterización Geomecánica y Estudio del Deslizamiento el Campestre, Morelia, Mich.” en el cual se caracterizó geomecánicamente la porción oriental del escarpe de la falla La Paloma en la Ciudad de Morelia, Michoacán, y con el uso del *Software PLAXIS 2010* realizaron la modelación del deslizamiento El Campestre.

Encontraron que la superficie de falla crítica tiende a hacerse más profunda conforme sube el nivel freático independientemente del escenario analizado, resultados que fueron corroborados con GeoSlope. Los factores condicionantes que producen inestabilidad en la ladera de la falla La Paloma son la sismicidad y las propiedades físico-mecánicas de las rocas responsables del comportamiento de las fracturas, infiltración e intemperismo, y como factor detonante sería el aumento del nivel freático.

Capítulo 3

Área de Estudio

La localidad de Juan del Grijalva, nombre oficial según INEGI, conocido comúnmente por San Juan Grijalva o Juan de Grijalva, se localiza en el municipio de Ostuacán en el estado de Chiapas, en la región V Norte en las coordenadas geográficas $17^{\circ} 21'51''$ latitud Norte y $93^{\circ} 23'00''$ longitud Oeste, (Fig. 3.1).

El municipio de Ostuacán colinda al norte con el estado de Tabasco y el municipio de Pichucalco; al este con los municipios de Pichucalco, Sunuapa y Francisco León; al sur con los municipios de Francisco León y Tecpatán; al oeste con los municipios de Tecpatán, Zona interestatal Chiapas-Tabasco y el estado de Tabasco.

3.1. Clima

El clima de Ostuacán está clasificado como Cálido húmedo con lluvias todo el año Af(m), tiene una temperatura media anual de $24^{\circ}C - 26^{\circ}C$ y la precipitación promedio anual es de 2,500 - 4,500 mm, uno de los más altos del país de acuerdo al INEGI, 2007.

Las precipitaciones pueden llegar a erosionar, transportar y depositar sedimentos no consolidados, además de que la convergencia de los escurrimientos provocan un excedente de humedad en la zona; el coeficiente de escurrimeinto es mayor de 30 % (PC del estado de Chiapas, 2010).

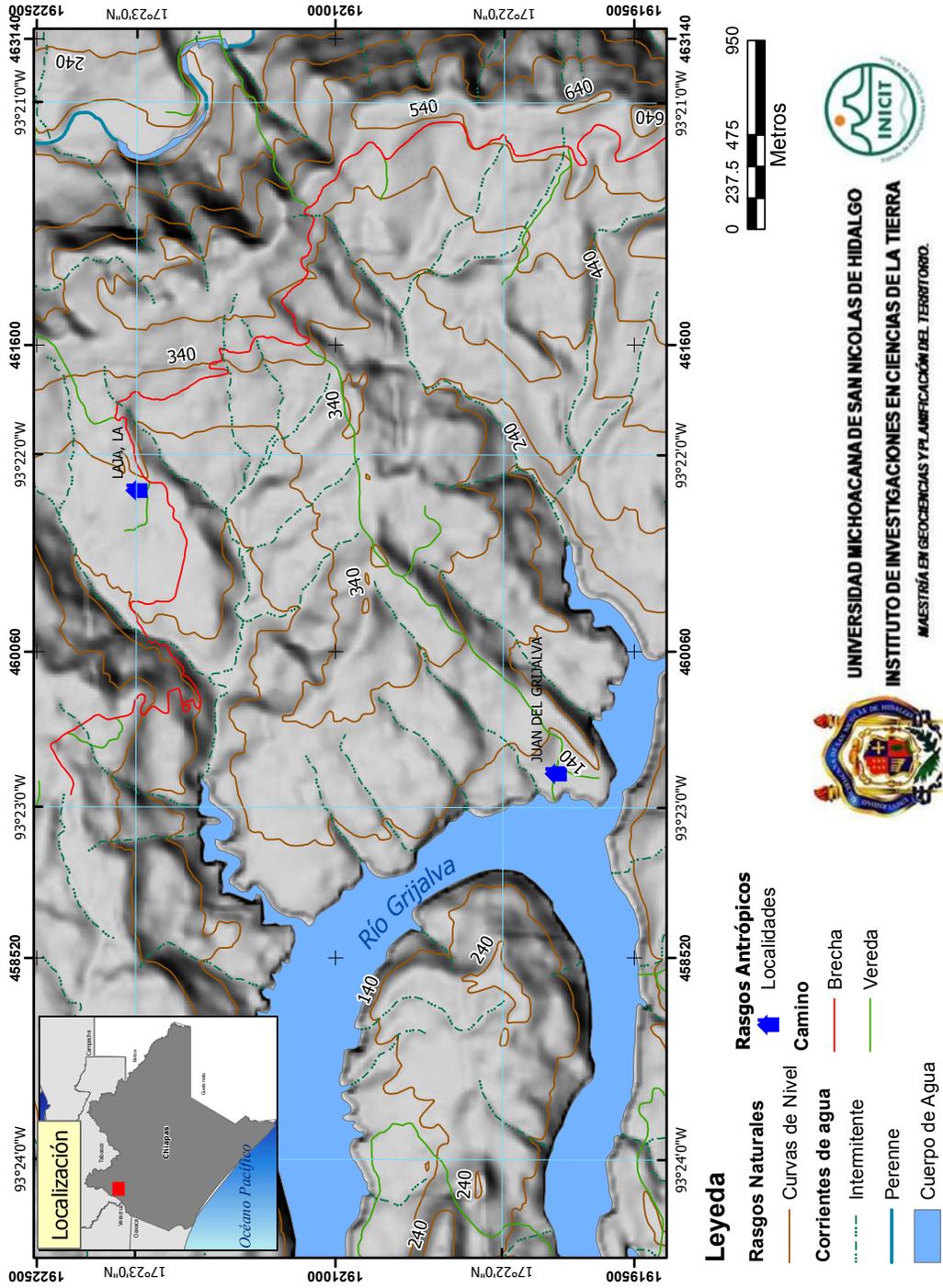


Figura 3.1: Mapa de localización, Juan del Grijalva, Ostuacán, Chiapas. Fuente: INEGI 2010



Figura 3.2: Vegetación en la zona de Juan del Grijalva, Chiapas. Mayo 2016.

3.2. Uso de suelo y vegetación

Uso de suelo: pastizal cultivado 64.19 %, agricultura 6.06 % y zona urbana 0.24 %. Vegetación: selva 21.07 % y área sin vegetación 2.18 % (Fig. 3.2).

El uso de suelo más próximo a la localidad de Juan del Grijalva, es el de pastizales (ganadero) en la periferia del municipio es de uso habitacional (PC del estado de Chiapas, 2010).

3.3. Hidrografía

La zona de estudio se encuentra contenida en la región hidrológica Grijalva-Usumacinta en un 100 %, en la cuenca Río Grijalva - Villahermosa y en la subcuenca Río Mezcalapa en un 47.84 %, Río Platanar 30.36 % y Río Zayula 21.80 %.

La cuenca del río Grijalva se localiza el sureste de México, de 60 256 km² que se extiende desde la Sierra de Cuchumatanes en Guatemala hasta México a lo largo de la Depresión Central de Chiapas. Aguas abajo el río Grijalva conlleva los escurrimientos de las Sierras de Chiapas, hacia la parte inferior de la cuenca, la cual está localizada en la Llanura Costera del Golfo. Dos de los ríos más caudalosos del país atraviezan esta provincia fisiográfica el Grijalva y el Usumacinta, para desembocar en la parte sur del Golfo de México en el estado de Tabasco (Hinojosa-Corona 2011). Los escurrimientos son de tipo superficiales.

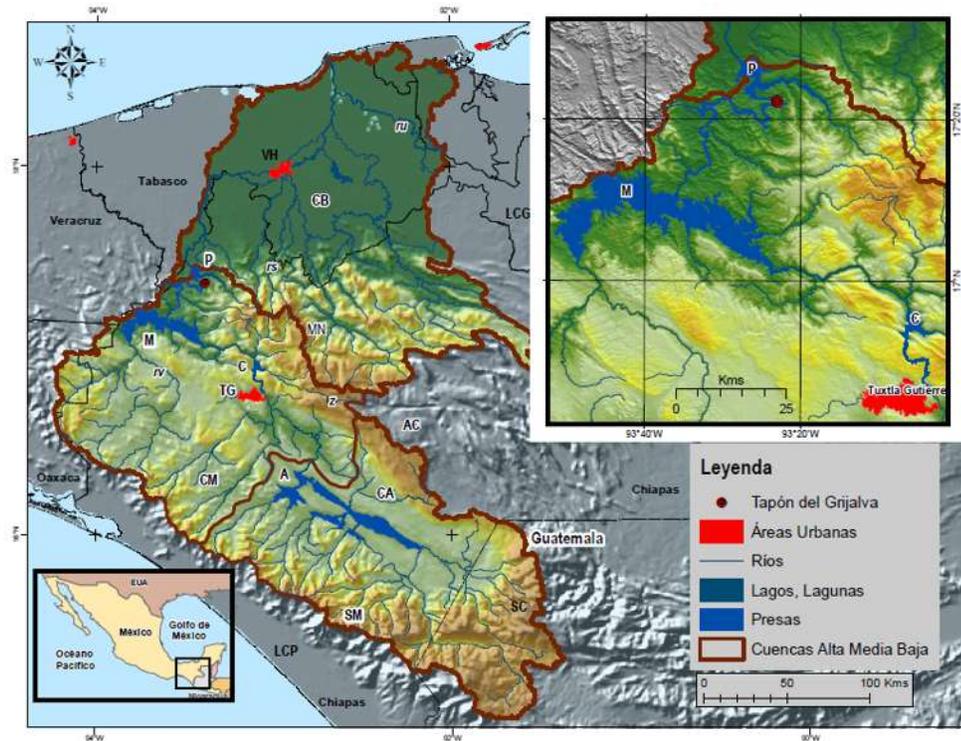


Figura 3.3: Cuencas y subcuencas del río Grijalva. P = Presa Peñitas, M = Presa Malpaso, A= Presa La Angostura, C= Presa Chicoasén, VH = Villa Hermosa, TG= Tuxtla Gutiérrez, SM= Sierra Madre de Chiapas, AC= Zona Altos de Chiapas, SC= Sierra Cuchumatanes, MN= Montañas Norte de Chiapas, LCP= Llanura Costera del Pacífico, LCG= Llanura Costera del Golfo. Imagen tomada de Hinojosa-Corona et. al 2011.

El río Grijalva tiene una longitud de 766 km desde su nacimiento en las laderas occidentales de la Sierra Madre de Chiapas hasta su desembocadura en el Golfo de México. Es usado para generar energía eléctrica en cuatro presas hidroeléctricas: Angostura (con una capacidad efectiva de 900 Mw), Chicoasén (2400 Mw), Malpaso (1080 Mw), y Peñitas (420 Mw) (A. Melo, 2009).

En condiciones normales, las presas desfogan de 400 a 900 m³/s en promedio al producir electricidad, por las lluvias suscitadas en 2007 en Chicoasén se desfogaron 3 150 m³/s por vertedores más 1190 m³/s por turbinas (PC del estado de Chiapas, 2010).

El deslizamiento de Juan del Grijalva se localiza a 50 km aguas abajo de la presa de Malpaso y 14 km aguas arriba de la presa Peñitas, en un área donde el nivel del río Grijalva es influenciado por cambios en el nivel del embalse de Peñitas principalmente (A. Melo, 2009).

Las condiciones climáticas varían de acuerdo a la zona en la que se encuentra el río Grijalva: las cuencas alta (CA) y media (CM) tienen una precipitación media que oscila entre los 1200 y 1700 mm anuales (Hinojosa-Corona et. al 2011). En la parte alta de la cuenca se ubica una de las zonas de mayor precipitación en México con poco más de 4000 mm anuales. Las lluvias se presentan todo el año debido a la influencia de sistemas tropicales y de invierno. Los de invierno generan precipitaciones de hasta 300 mm en 24 horas, lo cual produce escurrimientos importantes debido a la intensidad de las precipitaciones (Hinojosa-Corona et. al 2011).

La cantidad de agua que desemboca en el Golfo de México, por el aporte de la cuenca del Grijalva y del Usumacinta, es de alrededor de 10^9 m³ anuales; el volumen medio anual que escurre hacia la desembocadura del río Grijalva está alrededor de los 36.5×10^8 m³ (Hinojosa-Corona et. al 2011).

Para esto, se tiene el control del flujo del río Grijalva, primero en la parte alta de la cuenca, las aportaciones de agua son retenidas en la presa La Angostura; aguas abajo continúa hacia la presa Chicoasén, y posteriormente llega a la presa Malpaso y después la Presa Peñitas. Aguas abajo de la presa Peñitas el Grijalva continúa su recorrido hacia la Llanura Costera del Golfo en dónde está localizada la ciudad de Villahermosa, Tabasco; es necesario mencionar que las comunidades localizadas en en las zonas planas de la llanura son sumamente vulnerables a las inundaciones.

3.4. Geología regional

En el ámbito de la geología, comprende los períodos: Paleógeno (36.62%), Cuaternario (34.23%) y Neógeno (29.15%). Cuenta con rocas de tipo ígnea extrusiva: Andesita-brecha volcánica intermedia (21.12%); sedimentaria de tipo Lutita-arenisca (32.77%), arenisca (29.15%) y conglomerado (3.85%); depósitos Aluviales (13.11%).

La zona se caracteriza por una serie de sierras, valles, y lomas redondeadas no muy inclinadas, como sierras coronadas por escarpes verticales que hacen visible a distancia la estratificación de las rocas (Fig. 3.1).

Las principales estructuras geológicas son anticlinales y sinclinales alineados este-oeste y conformados por la secuencia de areniscas, areniscas conglomeráticas y lutitas, cuyos echados oscilan entre los 8° a 12° (zona de Juan del Grijalva).

Sinclinal Malpaso. Localizado al W de Juan del Grijalva, con el eje de NW-SE.

El *Anticlinal del Mono Pelado*: Cuyo eje es casi paralelo al Sinclinal Malpaso, es interrumpido en varias ocasiones por fallas van en dirección E-W. Se encuentra ubicado al SW del tapón generado por el deslizamiento y al sur de Rómulo Calzada cerca del poblado de Rubén Jaramillo, las rocas más antiguas que afloran en el núcleo pertenecen al Eoceno (A. Melo, 2009).

Sinclinal Maspac: Presenta un rumbo N 36° - 40° W es su núcleo se encuentran las rocas más jóvenes del Mioceno, su eje se encuentra cortado por fallas de rumbo con dirección NE y fallas de dirección NE-SW y E-W lo que hace que el eje se flexione (Arvizu-Lara G., 2009).

3.4.1. Fallas

El área de estudio se localiza en el borde noreste del eje del sinclinal Maspac, estructura regional producto de la deformación de la Orogenia Chiapaneca. Se observan plegamientos amplios en los sedimentos terrígenos del Mioceno y Eoceno, cortados por un sistema de fallas de desplazamiento lateral de rumbo noreste (N50° – 70° E).

Se presenta un sistema de fallas con orientaciones que de forma general se agrupan en E-W y NW-SE, las cuales gobiernan la dirección y curso del río Grijalva.

La zona del deslizamiento se encuentra limitada en la parte norte y sur por dos fallas de tipo lateral, que son paralelas entre sí, con un rumbo NE 60° SO. Rumbo al noreste el bloque se encuentra segmentado por la falla de tipo normal “La Laja”.

Entre las principales fallas se mencionan: EL Fuerte, La Herradura, Playa Larga, La Laja y Ostuacán (Arvizu-Lara G., 2009).

3.4.2. Fracturamiento

Existen tres familias de fracturamiento (A. Melo 2009):

- N 60° E / 75° NO y SE, es el principal sistema de discontinuidades. Se caracteriza por fracturas continuas (de 3 a 10 m), de superficie plana y con escaso relleno de calcita; este sistema es paralelo a las fallas de desplazamiento lateral.
- N 45° O / 80° NE. Sistema secundario de fracturamiento de menor continuidad

(de 1 a 3 m), con superficie plana-rugosa, sin relleno y ortogonal al primer sistema.

- E-O / 85° N. Sistema poco continuo, de superficie plana-lisa, cortado por el sistema de fracturamiento N 60° E.

3.4.3. Estatigrafía

La zona de estudio está formada por rocas sedimentarias muy intemperizadas y fracturadas, cuya edad se ubica en la parte media y superior del Terciario, más específicamente en el Eoceno y Mioceno, (Fig. 3.4). Las rocas más jóvenes de la región son lutitas limosas blandas de color pardo claro, con una estratificación en capas que van de 10 a 30 cm. A medida que aumenta la profundidad se vuelven más arcillosas de un color gris oscuro y presentan una fractura concoidal, con mayor compacidad y dureza que las lutitas limosas, sus estratos varían desde unos 20 cm hasta 1 m de espesor, intercaladas en capas de arcilla franca y expansiva (A. Melo 2009).

En la figura 3.4 se muestra una columna estatigráfica que incluye las formaciones del Cretáceo y del Terciario, las cuales afloran entre las presas Peñitas y Malpaso, señalando lo que corresponde al entorno de la central hidroeléctrica Peñitas y su embalse. Se tiene una secuencia de lutitas y areniscas, agrupadas y descritas localmente en diversas formaciones del Eoceno- Mioceno, con un espesor que supera los 2000 m (A. Melo 2009).

Además hay en diferentes niveles de la columna estatigráfica; un cuerpo de conglomerados formados por clastos redondeados de 10 a 15 cm de tamaño, empaçados en una matriz arcillosa (A. Melo 2009).

El sitio a un nivel superficial está conformado por una alternancia de areniscas de grano fino, limolitas y lutitas de color gris oscuro en estratos delgados a laminares. Secuencia cubierta por areniscas limosas de color pardo ocre, en estratos delgados a medianos. La base de esta secuencia litológica son areniscas conglomeráticas y conglomerados polimícticos constituídos por fragmentos de rocas ígneas subredondeadas empaçadas en una matriz arenosa (Fig. 3.7).

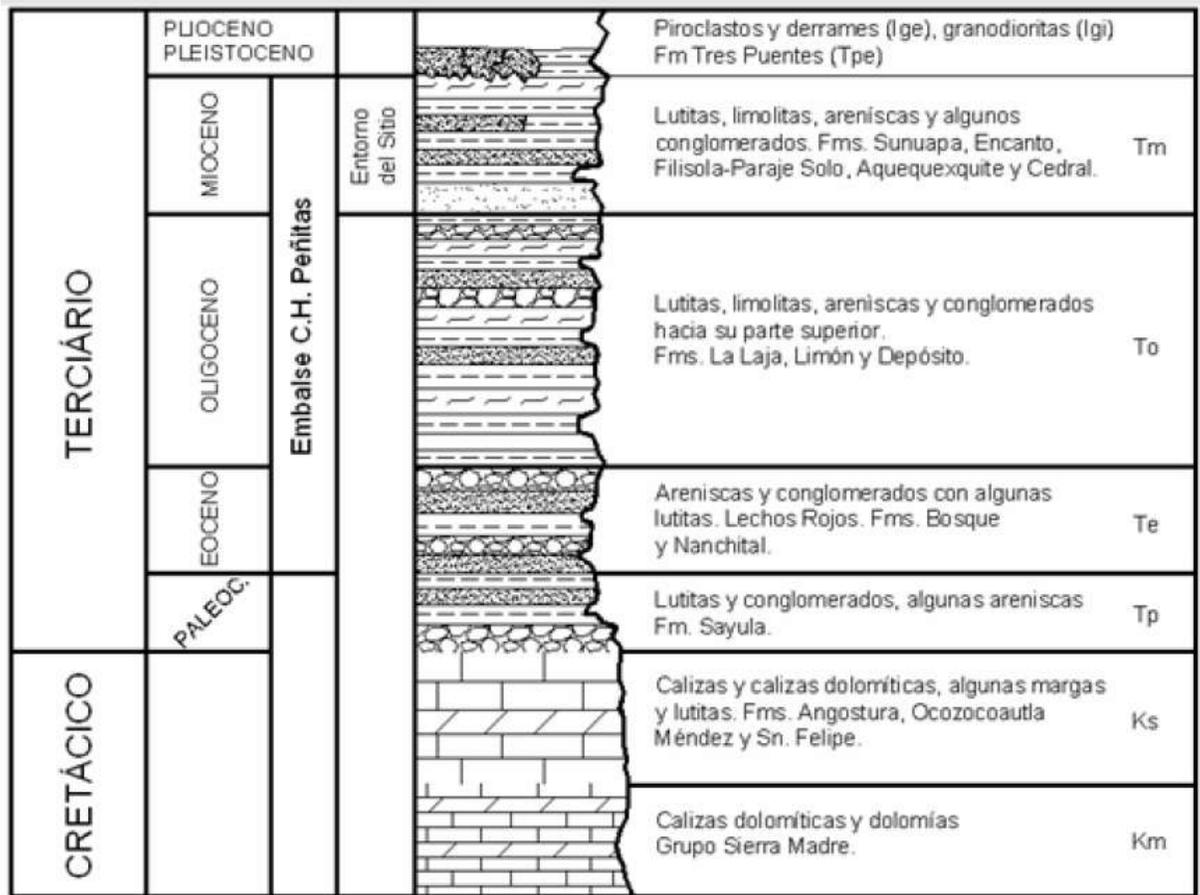


Figura 3.4: Columna estatigráfica regional. Imagen tomada del trabajo de tesis Melo, A., et.al. 2009

3.5. Geología Local

Dentro del marco geológico local, el deslizamiento de San Juan Grijalva está comprendido entre la Presa de Malpaso al SO y la Presa Peñitas al N, desde la cortina hasta aproximadamente 5 km al sur del poblado Rómulo Calzada; ambas presas sobre el río Grijalva. El sinclinal Malpaso al O y el anticlinal la Unión al E, zona contenida en las provincias fisiográficas Montañas del Norte y la Planicie Costera del Golfo (Fig. 3.3).



Figura 3.5: Intercalación de Lutitas y Areniscas. 30 Mayo de 2016.

3.5.1. Morfología

Los rasgos morfológicos que más se destacan en el área del deslizamiento son las formas meándricas estrechas del río Grijalva que se asocian a las características litológicas de la zona, representadas por areniscas y lutitas, así como a la geometría de las fracturas y fallas que afectan a la masa rocosa, principalmente en el sentido NE.

La ladera presentaba un desnivel de 50 a 280 m, con una longitud de casi 1 km desde el río; el deslizamiento se ubica en el meandro de aguas abajo con 900 m de ancho, siendo el más estrecho, en las inmediaciones del Cerro de la Pera.

En el tramo NW, paralelo al río Sayula se localiza el arroyo La Laja, el cual desemboca en el río Sayula; este arroyo está asociado a la falla La Laja y representa el límite oriente del deslizamiento. Los parteaguas tienen formas estrechas que alcanzan alturas desde los 200 msnm a los 600 msnm.

El río Sayula se localiza entre el meandro en donde se suscitó el deslizamiento

y el volcán Chichonal, éste drena en sentido NNW hasta el poblado de Ostucán, en dónde cambia a una dirección E-W hasta el poblado Sayula, para posteriormente desembocar en el río Grijalva.

De manera general se puede precisar que en las inmediaciones del sitio del desplazamiento la morfología es de lomeríos suaves, cuyas laderas presentan pendientes asociadas a los buzamientos de las capas que los conforman. El drenaje es de tipo dendrítico y paralelo a rectangular asociado a las estructuras geológicas.

El flanco derecho del deslizamiento, antes de desarrollarse, tenía una pendiente suave de 10° a 12° de inclinación NW 20° con variación a N-S y echados de $8 - 15^\circ$ al SW, entre las elevaciones que van de 100 a 200 msnm, y en la parte baja, rumbo al cauce, la pendiente presentaba un máximo de inclinación de 45° .

Para el caso del margen en el lado izquierdo, se tenía la misma condición que en la margen derecha hasta la cota 200; a partir de esa elevación, los rasgos topográficos son suaves con algunos lomeríos de menor grado de inclinación. Sobre un cordón topográfico orientado E-O de unos 200 m de altura y cuyo ancho es de 950 m, éste comprende la margen del lado izquierdo del embalse de la presa Peñitas, aguas arriba y aguas abajo del tapón. El drenaje era de tipo subparalelo, formado por cuatro arroyos con escaso grado de madurez y de orientación NE, en la margen del lado derecho.

3.5.2. Litología de la zona de estudio

El cuerpo de la ladera inestable estaba constituido principalmente por una alternancia de lutita y areniscas, en estratos con una pendiente de 10° a 12° con dirección SE, el principal rumbo es de NW 20° con variación de N-S (A. Melo 2009).

La zona está conformada por una alternancia de areniscas de grano fino, limolitas y lutitas de color gris oscuro en estratos delgados a laminares, la cual se encuentra cubierta por areniscas limosas de color parde ocre, en estratos delgados a medianos. La base de la secuencia litológica ubicada en algunos alforamientos cercanos a la zona del poblado de Juan del Grijalva, son areniscas conglomeráticas y conglomerados poliméticos constituidos por fragmentos de rocas ígneas subredondeadas empacadas en una matriz arenosa.

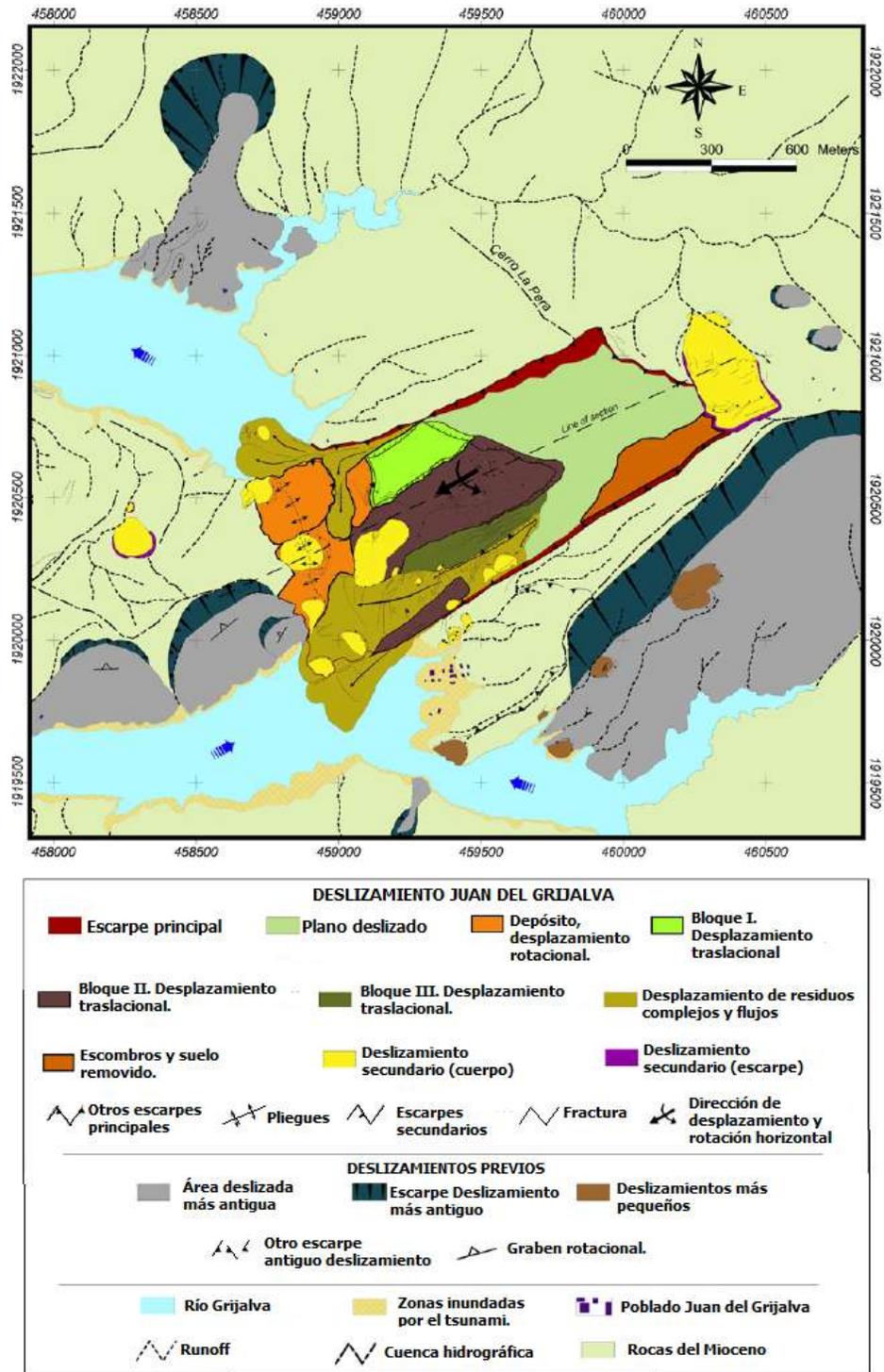


Figura 3.6: Mapa geomorfológico del área de estudio. Tomado de Hernández Madrigal, *et. al* 2010.



Figura 3.7: Conglomerado, y granito en la zona del deslizamiento Juan del Grijalva. 30 Mayo de 2016.

Conglomerados con una profundidad de 3 m desde el nivel del agua del río Grijalva (Fig. 3.7), con predominio de clastos bien redondeados de cuarzo, piedra caliza y rocas de tipo terrígenas dentro de una matriz arenosa bien cementada. Estos conglomerados son cambios de facies hacia el río.

La falla ocurrió sobre un estrato de lutita muy alterada con un echado del orden de 8° a 10° hacia el río y ubicado a una profundidad aproximada de 60 m a 80 m.

A continuación se describen, de arriba hacia abajo, las principales unidades que conforman el perfil litológico del área de estudio, después del deslizamiento en base al barrenado efectuado en la zona (Fig. 3.8). Información obtenida del Barreno 2, Inclímetro 1, profundidad 72.30 m y una elevación de 137.975 msnm (A. Melo 2009):

0-26.4 m: Lutita de color gris oscuro, estratificación laminar con intercalación de areniscas arcillosas fracturadas a poco fracturada

Lutita-Arenosa: Estrato de lutita muy alterado y de lutita arenosa

26.4 - 40.40 m: Intercalación de lutitas y lutitas arenosas con areniscas arcillosas, las areniscas son de color gris oscuro de estratificación delgada a laminar; mientras las areniscas son de grano fino, de color gris oscuro y estratificación delgada

40.4 - 56.0 m: Lutitas arenosas de color gris oscuro, de estratificación laminar a delgada, intercalada con horizontes y lentes de areniscas de grano fino. Este intervalo se presenta de fracturado a muy fracturado con presencia de horizontes arcillosos y

fragmentados de lutita empacados en arcilla plástica

56 - 72.3 m: Intercalación de lutitas de color gris oscuro de estratificación delgada a laminar con pequeñas bandas y lentes de materia orgánica y lentes de bandas y horizontes de arenisca de grano fino color gris



Cuadro 3.1: Juan del Grijalva, , 30 de Mayo de 2016. En la primer imagen se aprecia parte de la roca que se desprendió de la ladera, se observa la intercalación de la lutita y las areniscas. En la segunda imagen se observa un bloque de roca.

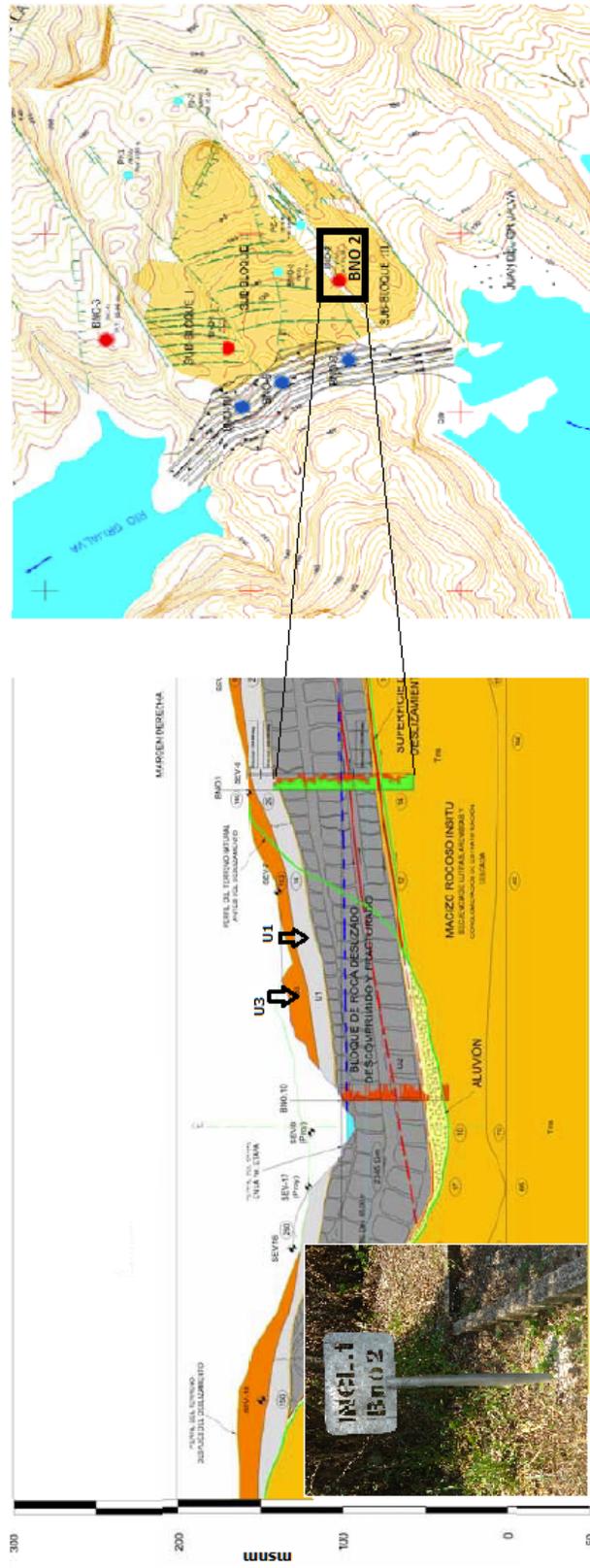
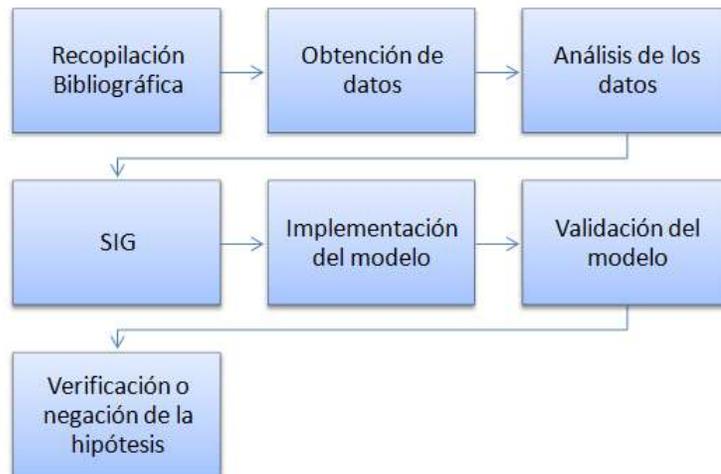


Figura 3.8: Modelo geológico, Barreno 2. Se observa la continuidad del bloque deslizado hacia el cauce del río. Modificado de A. Meio 2009.

Capítulo 4

Materiales y Métodos

Para la realización del presente trabajo se hizo uso de una metodología que consta de siete etapas principales de acuerdo al siguiente diagrama:



Se realizó la revisión bibliográfica de los trabajos relacionados al deslizamiento Juan del Grijalva: artículos científicos diversos y un trabajo de tesis del Instituto Politécnico Nacional. De estos trabajos se obtuvo la información general del área de estudio, y más en concreto los parámetros necesarios para el modelo. Además fue necesario consultar otros trabajos relacionados a los procesos de remoción de masa, en específico de deformaciones profundas de ladera, debido a que el deslizamiento

con el que se está trabajando se considera de este tipo de PRM; así como también de la consulta de los trabajos realizados con los programas computacionales *Plaxis* y *GeoSlope* que ayudaron en la implementación del modelo.

4.1. Obtención de datos

Después de hacer el cotejo de la literatura consultada se obtuvo una serie de datos, los cuales fueron seleccionados de acuerdo a lo que el *software* requirió. Se seleccionaron principalmente las gráficas de precipitación que nos hace una descripción diaria antes y durante el deslizamiento, gráficas de ascenso y descenso de los espejos de agua del Río Grijalva, las tablas obtenidas a través del sismógrafo del Servicio Sismológico Nacional que se encuentra localizado de la zona; también fue conveniente conocer las propiedades mecánicas de la roca, la topografía de la región antes y después del fenómeno ocurrido, para lo cuál se usó un MDE con resolución de 15 m, cartas del estado de Chiapas.

Para hacer el modelo numérico fue necesario tener en cuenta una serie de pasos que nos permitió pasar del trabajo de campo a la computadora; estos datos fueron obtenidos de la literatura consultada, principalmente de la tesis de Melo A., Maldonado A., (2009). Sin embargo, también se obtuvieron datos de otros trabajos relacionados con este deslizamiento.

Una vez que se definieron cuáles parámetros geométricos, geotécnicos y geomecánicos eran los que necesitamos, pudimos realizar el modelo gráfico de la situación de la ladera, antes del fenómeno ocurrido y después de éste.

4.2. Análisis de datos

Se continuó con el análisis de los datos para hacer un filtro de información y así quedarnos con aquellos que nos sirvieron para hacer la modelación de acuerdo a los parámetros del modelo a usar y del *software*.

Los primeros datos presentados a continuación son las propiedades del suelo y posteriormente las propiedades de la roca.

4.3. Uso de un SIG

Se hizo uso de un sistema de información geográfico que permitió describir regionalmente la zona de estudio, para ello se necesitó:

- Mapa de localización en formato PDF, escala 1:15 000, fuente INEGI 2010, con una resolución de 15 m.
- Modelo digital de elevaciones (MDE), con resolución 15 m; fuente INEGI 2010.
- Generación del perfil topográfico de la ladera del Cerro La Pera (con longitud de 1600 m y una altura de 196 m), antes del deslizamiento a escala 1:10 000.

En base al MDE con resolución de 15 m y haciendo uso del *software ArcGIS 10.2* se contruyó el perfil topográfico de la zona de estudio antes del deslizamiento, esto con el objetivo de obtener el perfil de la ladera antes del deslizamiento, obtener las coordenadas de la ladera y así tener el perfil en el software e iniciar con la modelación en *Plaxis*.

4.4. Implementación del modelo

4.5. *PLAXIS 2D*

PLAXIS es un programa computacional que ha sido creado en la Universidad Técnica de Delft en Holanda, en 1987. El objetivo inicial fue el desarrollo de un código de fácil uso basado en los elementos finitos para el análisis de diques construidos sobre las capas de suelo blando que forman el subsuelo de Holanda. En los años subsecuentes este programa se ha ido ampliando y mejorando de manera que cubre la mayor parte de las áreas de ingeniería geotécnica (Tesis, Villaseñor C. 2014).

Este paquete computacional funciona mediante el método de elementos finitos bidimensionales, método numérico que consiste en discretizar el dominio (área de estudio) es decir, en subdividir la estructura a diseñar, en un número reducido de elementos de geometría regular manejables que mantienen las propiedades de la estructura general y al trabajar de manera conjunta estos elementos, se predice el comportamiento de la estructura general.

Es un programa diseñado para el análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos de distinta naturaleza. Utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla en elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del área de estudio.

Consta de un sistema de *CAD* (Diseño Asistido por Computadora), que grafica de manera simple la sección vertical de un modelo geométrico del problema geotécnico que se esté estudiando, para luego discretizarlo a través de una malla y haciendo la aproximación por el método de elementos finitos, se le asignan las condiciones iniciales y se procede a realizar cálculos para entregar los resultados del problema que se modela.

Nos ayuda a hacer modelaciones en dónde se tienen problemas de deformación plana o con asimetría, éstas son modelaciones de muros de contención, terraplenes, taludes, túneles, geomallas, entre otras.

La base matemática de este software para hacer la aproximación del modelo, es el método de elementos finitos (MEF).

4.5.1. Método numérico de Elementos Finitos

El método Finite Elements Method (MEF) es uno de los métodos para aproximar la solución de una ecuación diferencial; consiste en hacer una subdivisión del dominio del modelo matemático en componentes de geometría simple como triángulos o rectángulos en el caso 2D o bien, tetraedros y paralelepípedos en 3D, en dónde cada subdivisión es llamado elemento finito.

Una de las ventajas del MEF es que aunque el dominio con el que se trabaje sea muy irregular, es posible dividirlos en elementos que faciliten el análisis y el cálculo de la aproximación.

Cuando se requiere representar un dominio real, se obtiene un modelo similar de una forma geométrica de elementos discretos en una malla, ya sea estructurada o no estructurada; la información de cada elemento se expresa en términos de un número finito de grados de libertad.

La implementación del MEF usualmente consta de las siguientes etapas:

- Discretizar el dominio. Se divide la región Ω en pequeñas regiones interconectadas, las cuales se conocen como elementos; los puntos de intersección de las

líneas que forman los lados de los elementos son los nodos.

- Aproximación de las ecuaciones. Se desarrolla un sistema de ecuaciones que aproximen la solución de la ecuación en cada elemento. Esto involucra elegir una función adecuada para aproximar la solución de la ecuación y evaluar los coeficiente de tal forma que la función se aproxime a la solución de la mejor manera posible.
- Ensamble del sistema discreto. Luego de que cada elemento se asocia a un sistema de ecuaciones, se ensambla para construir un sólo sistema de ecuaciones; una vez realizado esto, el sistema se expresa:

$$Kv = F \quad (4.1)$$

donde K es la matriz resultante del ensamble y v, F son vectores.

- Condiciones de frontera. Se hace un ajuste al vector F de manera que se tomen en cuenta las condiciones de frontera, esto con la información de frontera del sistema discreto.
- Solución. Se resuelve el sistema resultante usando algún método iterativo.

Para la implementación del modelo en elementos finitos, se hace un aproximación a la solución de la ecuación diferencial por medio de una suma de funciones de interpolación definidas sobre el dominio discretizado, de manera que se busca encontrar los coeficiente de la suma para minimizar el residuo en el sentido de un funcional por el método de Galerkin, así se obtiene un sistema de ecuaciones lineales que se resuelve para aproximar la solución de la ecuación diferencial parcial.

Sea L un operador diferencial, $L = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ definido sobre una región Ω de \mathbb{R}^3 , u es la solución desconocida de la ecuación diferencial y f una función conocida sobre Ω junto con las condiciones de frontera especificadas a lo largo de $\partial\Omega$

$$Lu = f. \quad (4.2)$$

Supongamos la celda $CE_{i,j}$ definida por los vértices $\{P_{i,j}, P_{i+1,j}, P_{i,j+1}, P_{i+1,j+1}\}$ que se divide en dos triángulos, eligiendo la diagonal más corta de la celda (Fig. 4.1).

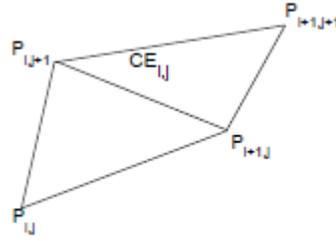


Figura 4.1: Celda $CE_{i,j}$, que muestra la diagonal más corta de ella y los vértices que la definen.

Usando la selección de elemento de la malla (Fig. 4.1), y empleando la aproximación de Galerkin,

Una manera de formular el métodos de elementos finitos es utilizando y usando la selección de elemento de la malla (Fig. 4.1), además de emplear la aproximación del método de Galerkin, la solución del problema elíptico de valores a la frontera

$$-\nabla \circ (K(x, y)\nabla u(x, y)) = f(x, y) \quad (4.3)$$

considerando

$$K(x, y) = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

$$u(x, y)|_{\partial\Omega} = g(x, y) \quad (4.5)$$

que es la matriz de conductividad o de difusividad, según el tipo de problema físico. La función u se encuentra definida sobre el dominio y sea \hat{u} la aproximación que se define como

$$u \approx \hat{u} = \sum_{i=1}^n U_i \psi_i \quad (4.6)$$

donde

U_j son los coeficientes de la interpolación y son indeterminados.

$\psi = Ax + By + C$ funciones definidas sobre el dominio.

En este método, las funciones ψ se eligen generalmente como polinomios que sa-

tisfacen las condiciones de contorno y se denotan como funciones de forma, funciones base o funciones de interpolación. Aunque las funciones base elegidas satisfacen las condiciones iniciales, no resuelven la ecuación diferencial, de manera que si se sustituye en la ecuación 4.2, nos queda un residuo R .

$$L\hat{u} - f = R \quad (4.7)$$

De manera que se busca determinar los coeficientes de forma que el residuo se minimice

$$\int_{\Omega} R d\Omega = 0. \quad (4.8)$$

Con esto, se genera una ecuación con n coeficientes indeterminados; se introducen funciones de peso w_i para $i = 1, \dots, n$ y así obtener el siguiente sistema de ecuaciones

$$\int_{\Omega} R w_i d\Omega = 0. \quad (4.9)$$

La forma débil de la ecuación 4.3 está dada por

$$\sum_i U_i \int_{\Omega} \nabla \psi_j \circ (K(x, y) \nabla \psi_i) d\mathcal{A} = \int_{\Omega} \psi_j f d\mathcal{A} \quad (4.10)$$

lo que produce la matriz de rigidez

$$M_{i,j} = \int_{\Omega} \nabla \psi_j \circ (K(x, y) \nabla \psi_i) d\mathcal{A} \quad (4.11)$$

y el vector de cargas

$$F_j = \int_{\Omega} \psi_j f d\mathcal{A} \quad (4.12)$$

4.5.2. Métodos contenidos en *Plaxis*

Para tener un modelo más adecuado que nos permita tener resultados lo más cercanos a la realidad, *PLAXIS* contiene siete modelos de acuerdo a la composición litológica del suelo y la roca, así como su composición física.

- **Linear Elastic.** El modelo incluye dos parámetros de rigidez elástica: el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν). Se utiliza fundamentalmente para materiales rígidos tales como el concreto.
- **Mohr-Coulomb.** Este modelo se utiliza como una primera aproximación al comportamiento del suelo en general. El modelo incluye cinco parámetros: el módulo de Young (E), el coeficiente de Poisson (ν), la cohesión (c), el ángulo de fricción (ϕ), y el ángulo de dilatancia (ψ).
- **Soft Soil Model.** Puede ser utilizado para simular el comportamiento de suelos blandos, como arcillas normalmente consolidadas y turbas.
- **Hardening Soil Model.** Este modelo puede ser utilizado para simular el comportamiento de arenas y gravas, así como para suelos más blandos, como arcillas y sedimentos.
- **Soft Creep Model.** Modelo que puede ser utilizado para simular el comportamiento dependiente del tiempo de suelos blandos, tales como arcillas normalmente consolidadas y turbas.
- **Jointed Rock Model.** Se usa este modelo para simular el comportamiento de roca estratificada o fracturada.
- **User-Defined.** Modelo de suelo definido por el usuario. Esta opción permite la utilización de otros modelos constitutivos aparte de los modelos estándar de *Plaxis*.

Modelo Mohr-Coulomb

Para este trabajo se usó *Mohr-Coulomb*, debido a que es el que más se adecua al comportamiento que tuvo en conjunto los materiales correspondientes a la ladera. El cual es un modelo que se define como elastoplástico perfecto de la conjunción de la Ley de Hooke y la forma generalizada del criterio de Mohr-Coulomb, de manera que el modelo no representa un comportamiento elastoplástico progresivo, sino un modelo elástico y luego plástico perfecto (Nieto-Leal et. al. 2009).

Este criterio expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado triaxial de esfuerzos, de tal forma que se obtiene la relación entre los esfuerzos normal y tangencial actuantes en el momento de la rotura mediante la expresión matemática:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (4.13)$$

donde: τ y σ son los esfuerzos tangencial y normal sobre el plano de rotura, c y ϕ son la cohesión y ángulo de fricción de la matriz rocosa.

Puede expresarse igualmente en función de los esfuerzos principales σ_1 y σ_2 :

$$\sigma_1 = \frac{2c + \sigma_3(\sin 2\theta + \tan \phi(1 - \cos 2\theta))}{\sin 2\theta - \tan \phi(1 + \cos 2\theta)} \quad (4.14)$$

permitiendo obtener la resistencia en cualquier plano definido por θ . Para el plano crítico de rotura, $\theta = 45^\circ + \phi/2$, la expresión anterior tomará la forma:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi + \sigma_3(1 + \sin \phi)}{1 - \sin \phi}. \quad (4.15)$$

Si se da la condición $\sigma_3 = 0$, σ_1 será la resistencia a compresión simple de la roca:

$$\sigma_1 = \sigma_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4.16)$$

También proporciona el valor de la resistencia a tracción:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi}$$

Este criterio implica que tiene lugar una fractura por corte al alcanzarse la resistencia máxima de pico del material. La principal ventaja es su sencillez, sin embargo, presenta algunos inconvenientes (González de Vallejo, 2006):

- La envolvente de la resistencia en roca nos son lineales.
- La dirección del plano de la fractura según este criterio no siempre coincide con los resultados experimentales.
- El criterio sobrevalora la resistencia a la tracción.

Los parámetros básicos que se necesitan para el modelo de Mohr-Coulomb y que se emplearán en el programa son los siguientes:

Parámetro	Unidades
Módulo de Young (E)	<i>kPa</i>
Coefficiente de Poisson (ν)	–
Ángulo de fricción interna (ϕ)	grados
Cohesión	kPa

4.5.3. Procedimiento general para el análisis del problema

Creación del modelo geométrico

- Configuración general.
- Creación de la geometría.
- Ingreso de condiciones de contorno.
- Ingreso de propiedades de suelos o masa rocosa.
- Generación de la malla con el método de elementos finitos.

Condiciones iniciales

- Generación de la presión de poros.
- Configuración inicial de la geometría.
- Generación de esfuerzos iniciales.

Cálculos

- Construcción de la carga de esfuerzos.
- Aplicación de fuerzas externas.
- Creación de las fases con distintos intervalos de tiempo.

- Cambios en el nivel freático y precipitación por día.
- Cambios en el nivel del embalse del cuerpo de agua.

PLAXIS está constituido por los subprogramas: *Input*, *Calculations* y *Output*.

4.5.4. Subprograma *Input*

En esta parte del programa, se hace la construcción de la geometría del modelo (ver ??) con la respectiva aplicación de cargas, condiciones iniciales y de contorno, se define la litología que se ha de usar, se introducen los materiales se genera la malla por el método de elementos finitos.

Después de tener la geometría lista, se asignan las propiedades de los materiales que conforman el modelo geométrico tales como: suelo, interfaz, estructuras y geomallas; éstas pueden ser introducidas en forma manual por el usuario o bien, utilizando las propiedades que *PLAXIS* ya tiene integradas en su base de datos. Dentro del software se cuenta con el comando *Materials sets*, el cual se usa para ingresar propiedades.

Aquí se introducen ciertas propiedades físico-mecánicas de cada una de las litologías, principalmente se tienen:

- Parámetros geotécnicos: Densidad, humedad, granulometría, límite de consistencia, grado de saturación, índice de vacío.
- Parámetros geomecánicos: Ángulo de fricción interna (ϕ), ángulo de dilatación (ψ), cohesión (c), índice de compresibilidad, coeficiente de consolidación, módulo de elasticidad, módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν).

Para hacer uso de éstas propiedades, primero se debe definir cuál modelo se usará para hacer las pruebas y elegir los parámetros adecuados; como se mencionó anteriormente se tienen siete tipos de modelos contenidos en *Plaxis*.

Generación de la malla del modelo numérico

Una vez que se han ingresado las propiedades de los materiales y asignados a la geometría creada, se procede a la generación de la malla con el método de elementos

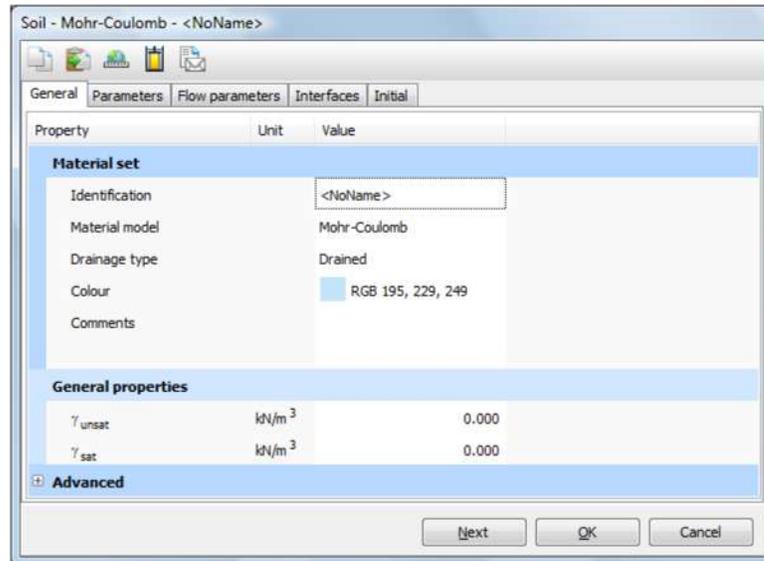


Figura 4.2: Subrograma *Input, Material sets-General*.

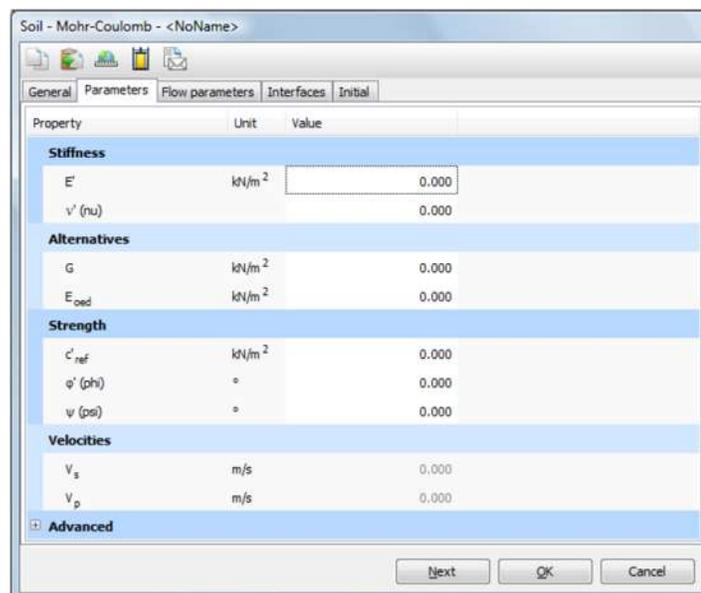


Figura 4.3: Subrograma *Input, Material sets-Parameters*.

finitos, la hacemos una vez que la geometría del modelo se ha definido por completo y las propiedades de los materiales se han asignado a cada uno de los estratos correspondientes.

El programa emplea elementos triangulares (por trabajar con MEF) de 6 y 15 nodos (ver figura 5.12). Para este modelo emplearemos elementos triangulares con seis nodos.

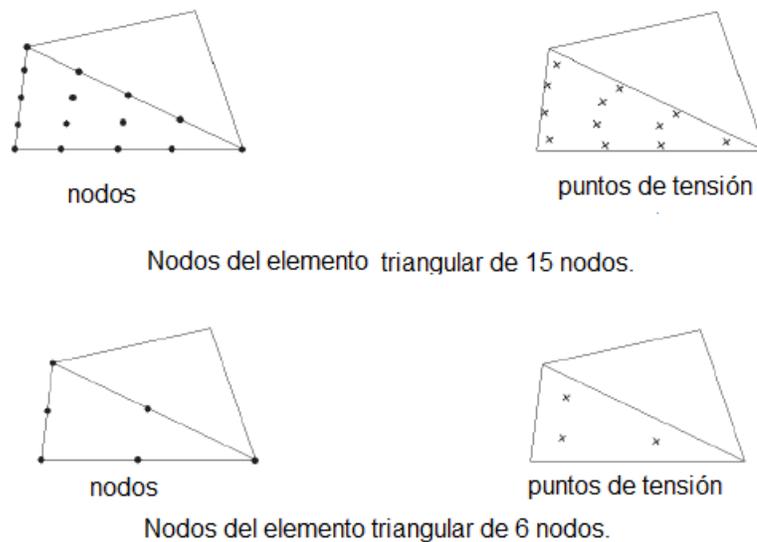


Figura 4.4: Posición de los nodos y puntos de estrés *PLAXIS 2010*.

Los elementos de seis nodos facilitan la interpolación de segundo orden para desplazamientos y entrega sólo tres puntos de evaluación de esfuerzos; también proporciona buenos resultados en el análisis de deformación estándar pero es importante considerar un número apropiado de elementos.

Los elementos triangulares de 15 nodos proporcionan una interpolación de cuarto orden para desplazamientos y la integración numérica involucra doce puntos de Gauss (puntos de estrés). El tipo de elemento para elementos estructurales e interfaces es tomado automáticamente para ser compatible con el tipo de suelo que se haya elegido. La triangulación de 15 nodos provee gran exactitud en sus resultados para problemas complejos, sin embargo su uso requiere de más memoria computacional, por lo que ocasiona cálculos lentos y disminución en el rendimiento de las operaciones.

4.5.5. Subprograma *Calculations*

En esta parte del modelo se crean las fases o etapas de cálculo que se desea hacer, esto en relación al tipo de análisis que se realizará. Esta fase se inicia con *Initial phase* en el que se darán las condiciones con las que inicia el modelo (condiciones de esfuerzos y presión de poro inicial). Se escoge entre *KO procedure* (coeficiente de presión lateral) y *Gravity Loading* (carga gravitacional).

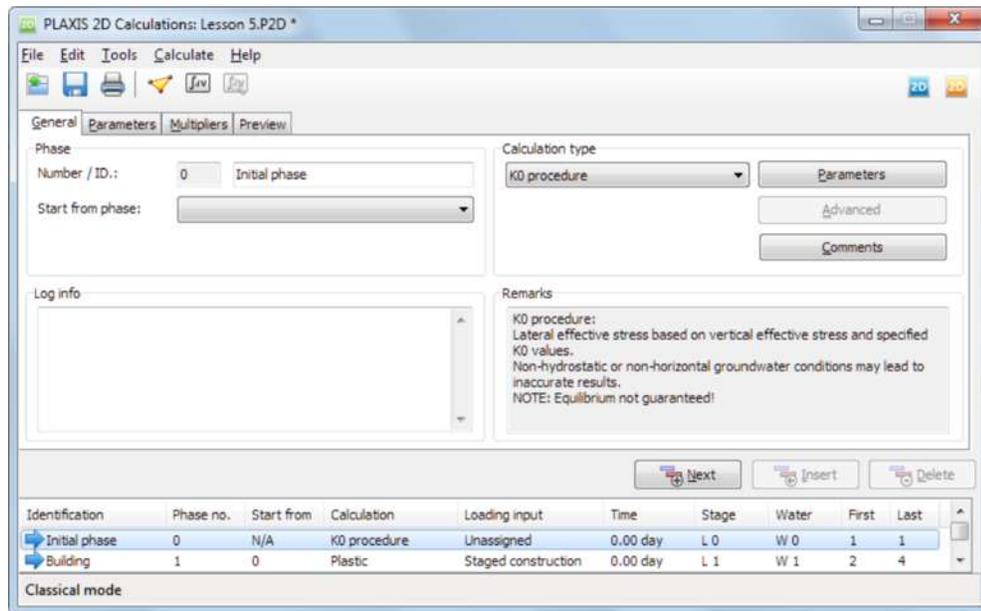


Figura 4.5: *Calculations*. Imagen tomada de Manual de *PLAXIS 2D*.

Para las siguientes fases se puede elegir entre distintos tipos de análisis: *Plastic*, *Plastic-Drained*, *Consolidation (EPP)*, *Safety*, *Dinamic* que involucran deformación elástico-plásticas, análisis de consolidación de suelo, cálculo del factor de seguridad y análisis dinámicos (4.5).

En *Plastic* y *Plastic Drained* se pueden acceder a *Water Conditions* en dónde asignamos al modelo los parámetros de precipitación y se realizan los cambios del nivel freático (4.6), y para cada uno de ellos se puede generar la presión de poro, el cual se observa en el subprograma *Output*. Así mismo los cambios del embalse con respecto al tiempo se generan de acuerdo al tiempo asignado para la fase en la que se está trabajando.

Cuando se ha concluido la introducción de las fases que se han implementado iniciamos el proceso de análisis. El programa resuelve los problemas a través de pasos de cálculo ya que si en alguno de los análisis existe plasticidad en el suelo, las ecuaciones que se generan son no lineales.

En cada paso de cálculo los errores de equilibrio en la solución se reducen de forma sucesiva, hasta que son más pequeños que el máximo permitido. *PLAXIS* maneja dos tipos de errores: el error global y el error local.

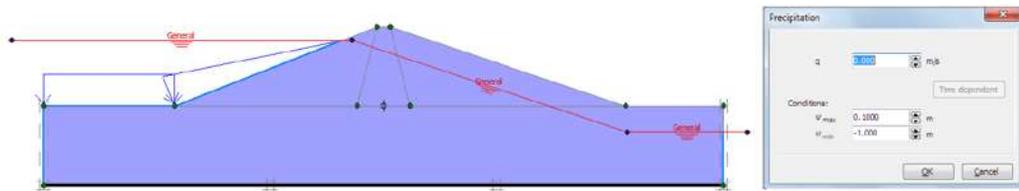


Figura 4.6: *Water Conditions*, en la fase de *Calculations*. Manual de *PLAXIS* 2010.

El error global usado en la fase de cálculos se relaciona con la suma de las magnitudes de las fuerzas nodales no-equilibradas; este término se refiere a la diferencia entre la carga externa y las fuerzas que están en equilibrio con el esfuerzo que está actuando. Para obtener este parámetro se tiene:

$$\text{Error Global} = \frac{\sum ||\text{Fuerzas nodales no - equilibradas}||}{\sum ||\text{Cargas activas}||}$$

Para el caso del error local, este hace referencia a los errores en cada punto de esfuerzo individual:

$$\text{Error Local} = \frac{||\sigma^e - \sigma^c||}{Tmax},$$

donde el numerador es una norma de las diferencia entre el tensor de esfuerzos en equilibrio (σ^e) y el constitutivo tensor de esfuerzo (σ^c), la cual se define:

$$\begin{aligned} ||\sigma^e - \sigma^c|| &= \sqrt{(\sigma_{xx}^e - \sigma_{xx}^c)^2 + (\sigma_{yy}^e - \sigma_{yy}^c)^2 + (\sigma_{zz}^e - \sigma_{zz}^c)^2 + (\sigma_{xy}^e - \sigma_{xy}^c)^2} \\ &+ \sqrt{(\sigma_{yz}^e - \sigma_{yz}^c)^2 + (\sigma_{zx}^e - \sigma_{zx}^c)^2}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Mientras que T_{max} es el máximo valor del esfuerzo cortante y está definido por el criterio de rotura de Coulomb. En el caso del modelo de Mohr-Coulomb se define como:

$$T_{max} = \max \left(\frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1), c \cos \phi \right) \quad (4.18)$$

Una vez finalizada la etapa de cálculos, los resultados que se obtienen se visualizan en el subprograma *Output*; en este se observan las deformaciones, aunque para la versión de *PLAXIS* que se está usando no es posible la deformación de la malla, también podemos observar los esfuerzos totales, los cambios en la presión de poro, los de saturación, así como generar gráficas y diagramas.

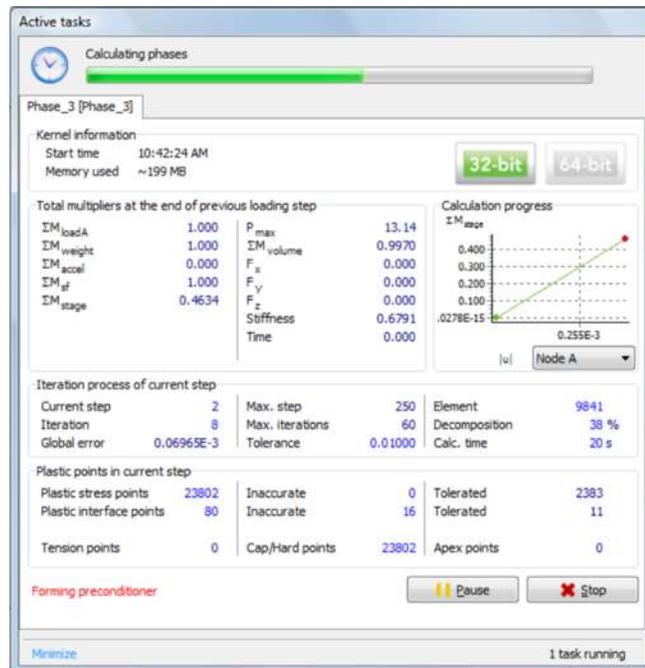


Figura 4.7: Ventana *Active tasks*. Manual de *PLAXIS 2010*.

4.6. GeoSlope 2007

El paquete de programas *GeoStudio* está compuesto de varias herramientas con distintos usos y funcionalidades:

SLOPE/W Es para cálculo de estabilidad de taludes.

SEEP/W Para el cálculo de redes de flujo.

SIGMA/W Orientado al cálculo tensodeformacional.

QUAKE/W Para cálculo de los efectos de sismo en suelos y estructuras de suelos (presas, terraplenes, etcétera.)

TEMP/W Aplicación de la ecuación de calor sobre estructuras de suelos.

CTRAN/W Aplicado a fenómenos de contaminación de suelos.

AIR/W Analiza la interacción del aire-subsuelo de acuerdo a la porosidad de los materiales tales como suelo y roca.

VADOSE/W Usado en la modelización de acuíferos.

Los que vamos a usar para este trabajo es el *SLOPE/W* y *SEEP/W*; los programas se relacionan entre sí, por lo que la geometría que es creada en alguno de ellos, puede servir para algún otro, esto es de gran ayuda, de manera que el mismo perfil se pueda usar para ambos programas. A su vez, se pueden combinar estos dos programas de forma tal que puedan trabajar de manera conjunta.

4.6.1. *SEEP/W*

Este programa se usa para la modelización y estudio de las redes de flujo en medios permeables. Permite el análisis de la filtración de aguas subterráneas y problemas de exceso y disipación de presión intersticial dentro de los materiales porosos tal como el suelo y la roca.

SEEP/W se puede aplicar al análisis y diseño de proyectos de ingeniería geotécnica, civiles, hidrogeológicos y mineros [33].

CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA.

El programa, tiene en su versión 2007, las características que se definen a continuación:

Tipos de análisis

El programa permite realizar los cálculos de redes de flujo a través de dos tipos fundamentales de análisis:

Régimen estacionario. En el cual el tiempo no interviene como variable en el proceso.

Régimen transitorio. En dónde se tienen en cuenta la evolución del sistema con el tiempo.

Geometría y estratigrafía

Geometría adaptable a cualquier contorno estatigráfico mediante herramientas gráficas a través de la definición de regiones, lo que hace que la introducción al programa de los condicionantes geométricos sean versátiles.

Propiedades de los suelos

Con la intención de modelizar el comportamiento de los suelos, el programa dispone de diferentes opciones a elegir:

- Permeabilidad del terreno.
- Relación entre las permeabilidades K_y/K_x .
- Variación direccional de la permeabilidad de la componente horizontal K_x .
- Modelo de estado saturados o insaturado/saturado.
- Definición de función de conductividad en suelos insaturados.

Condiciones de contorno del problema

Para el estudio del comportamiento del modelo además de la parametrización del terreno es necesario definir las propiedades de los contornos del modelo, para ello disponemos de las siguientes opciones:

- Altura piezométrica.
- Caudal filtrado
- Altura de presión
- Flujo unitario.
- Gradiente Unitario

4.6.2. *SLOPE/W*

Es el software líder de estabilidad de taludes para calcular el factor de seguridad de los taludes de tierra y roca. *SLOPE/W* puede analizar de forma eficaz los problemas simples y complejos para una variedad de formas de superficie de deslizamiento, las condiciones de presión intersticial, las propiedades del suelo, métodos de análisis y condiciones de carga [33].

CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA

La versión de GeoSlope que se está usando para este trabajo es la 2007, la cual tiene las siguientes características:

Métodos de cálculo

El programa permite realizar los cálculos de estabilidad a través de diez métodos diferentes. Para este trabajo se usará el Método de Elementos Finitos (MEF), método numérico en el que también trabaja *Plaxis*.

Geometría y estratigrafía

De manera similar a como trabaja *SEEP/W* la introducción de las diferentes geometrías son versátiles y adaptables:

- Geometría adaptable a cualquier contorno estratigráfico mediante la definición de regiones poligonales.
- Definición de grietas de tensión.
- Geometría parcialmente sumergida.

Una de las ventajas de *GEOSLOPE* es que es posible conjuntar sus programas y que trabajen coordinadamente, para nuestro caso será *SEEP/W* con *SLOPE/W*, por lo que la geometría creada en el primer programa se mantiene y puede usarse en el segundo, y viceversa.

Superficie de deslizamiento

Dispone de distintos sistemas de modelado de las superficies de rotura.

- Malla de centros y límites de radios.
- Superficies de rotura poligonales con o sin centro.
- Por bloques.
- Zonas de entrada de salida acotando los posibles círculos de rotura.
- Búsqueda automática de superficies de rotura.
- Optimización de búsqueda de superficies de rotura.
- Posicionamiento automático de grietas de tensión.

4.7. Validación del modelo

Una vez realizadas las pruebas en el modelo numérico tanto en *Plaxis*, como en *GeoSlope*, primero se hizo una comparación de lo obtenido en *Plaxis* con lo reportado en la literatura, se observaron los estados de esfuerzos con el abatimiento del espejo de agua y manteniendo el nivel del río constante.

Posteriormente en *GeoSlope* se hizo la revisión del factor de seguridad desde el primer paso de tiempo designado como el 10 de Octubre, hasta el último paso de tiempo, el 04 de Noviembre de 2007 (día del evento), cada una con distintas condiciones: pruebas con cambios en el nivel del río, pruebas con el nivel del río constante a diferentes alturas y pruebas con y sin precipitación. Con base en las diferentes pruebas hechas se observó en cuál de ellas sí se tiene un factor de seguridad menor o igual a uno para el día del deslizamiento, lo cual nos indicará que concuerda con el colapso de la ladera.

4.8. Verificación o negación de la hipótesis

Dependiendo de si el modelo fue implementado de manera adecuada, y de acuerdo a los resultados obtenidos, se pudo verificar o en su caso negar la hipótesis que planteamos en el capítulo 1.

Capítulo 5

Resultados

El modelo numérico se realizó en dos partes, la primera con el *Software PLAXIS 2D* y luego con *GEOSLOPE*, con este último se trabajó con *SEEP/W* y *SLOPE/W*.

5.1. Datos de entrada

Necesitamos la descripción litológica de cada uno de los estratos que conforman la ladera, esto con el fin de tener los parámetros adecuados de acuerdo al tipo de roca y al modelo que emplearemos para el modelo. Los datos se obtuvieron de la recopilación de información previamente hecha y del análisis de éstos, por lo cual se debe representar gráficamente la situación del área determinada, tales como: espesor de cada estrato, parámetros geotécnicos y geomecánicos de los distintos estratos de la masa rocosa, permeabilidad y el sistema de cargas externas involucradas.

La ladera presentaba un desnivel de 50 m a 280 m y una longitud de casi un kilómetro de Norte a Sur, con una pendiente de 12° y en cada uno de los estratos, se observa que el borde del río tenía una pendiente muy pronunciada (fig. 5.1).

Después de haber trazado el perfil topográfico y geológico de la zona de estudio en base al Modelo Digital de Elevaciones (MDE), se trazó el perfil en *PLAXIS* (5.2), y en *GeoSlope*.

La escala regional a utilizar es de 1:20,000; en la descripción de la hidrología se tendrán datos de insumos con escala de 1:50,000 y la escala general del trabajo será de 1:10,000.

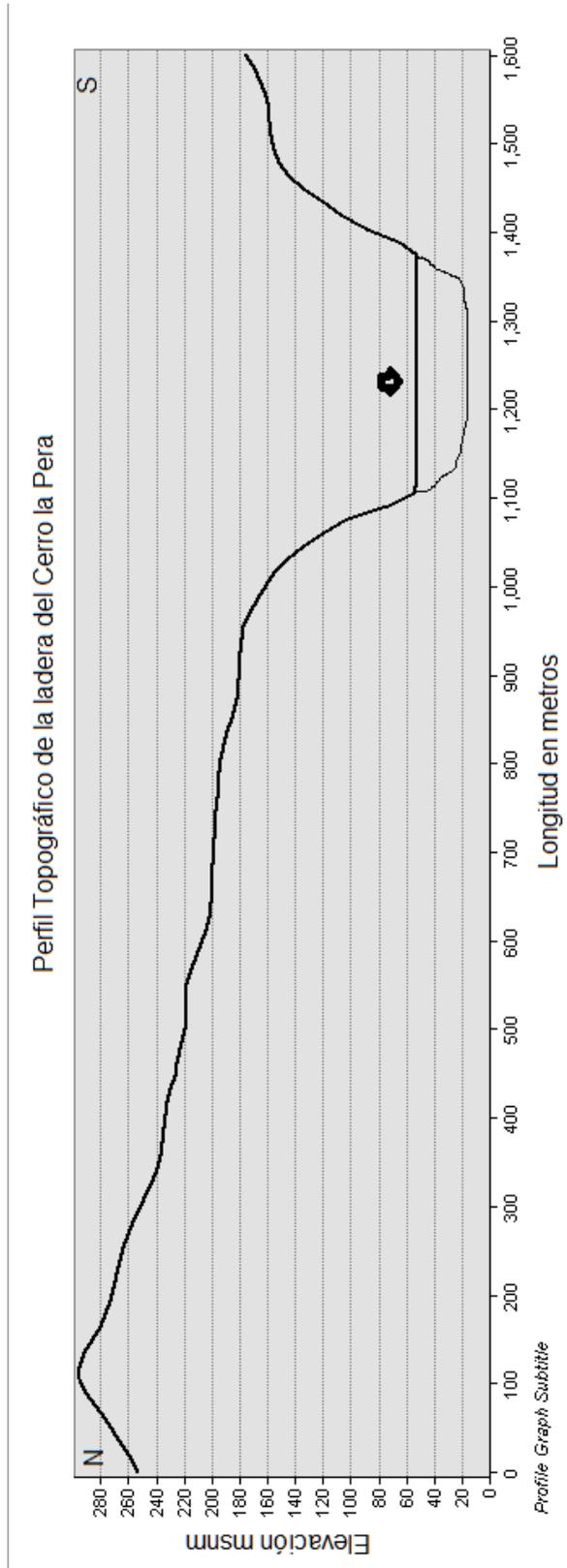


Figura 5.1: Perfil topográfico de la ladera de Juan del Grijalva antes del deslizamiento, elaborado con ArcGis 10.2, fuente INEGI 2010.

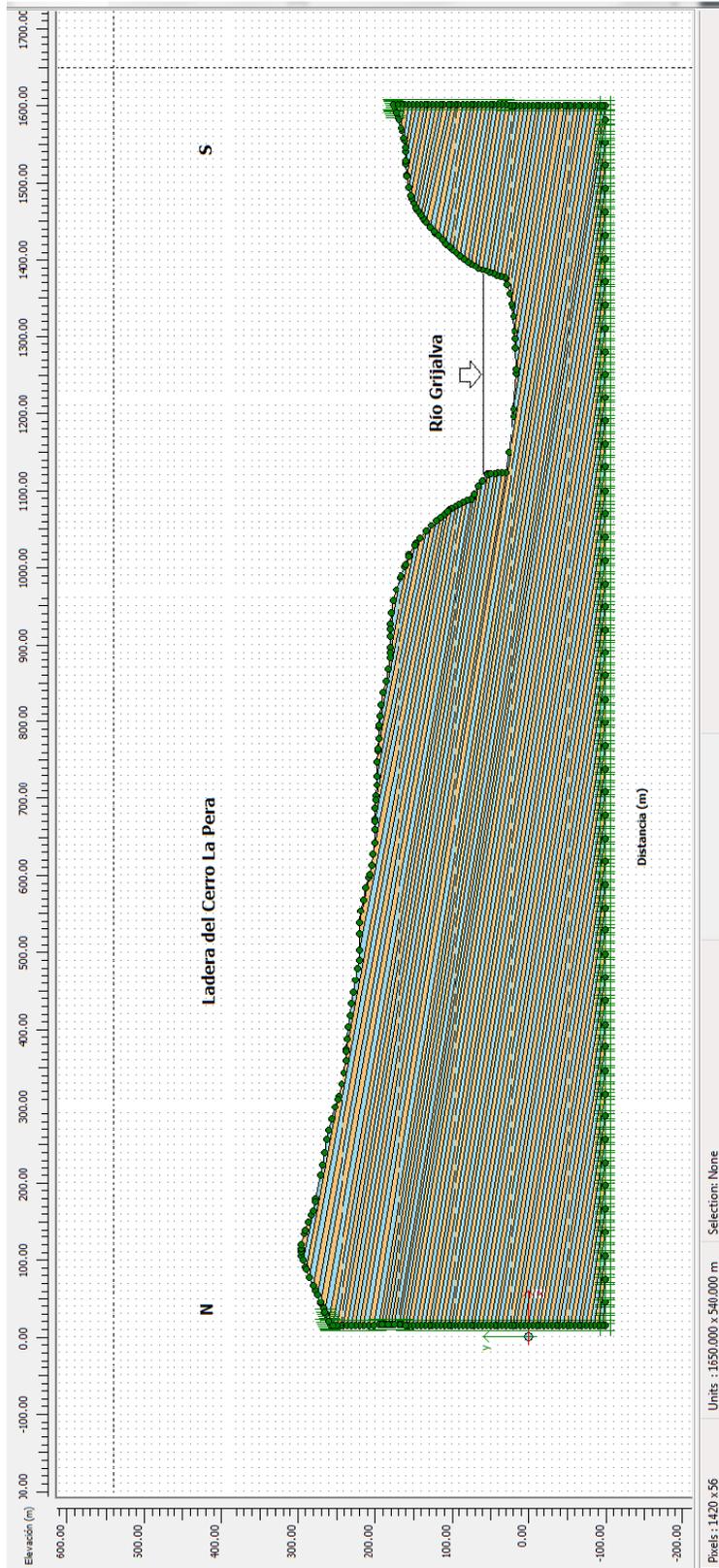


Figura 5.2: Perfil de la ladera de Juan del Grijalva, intercalación de lutitas y areniscas. Elaborado en *Plaxis* 2010

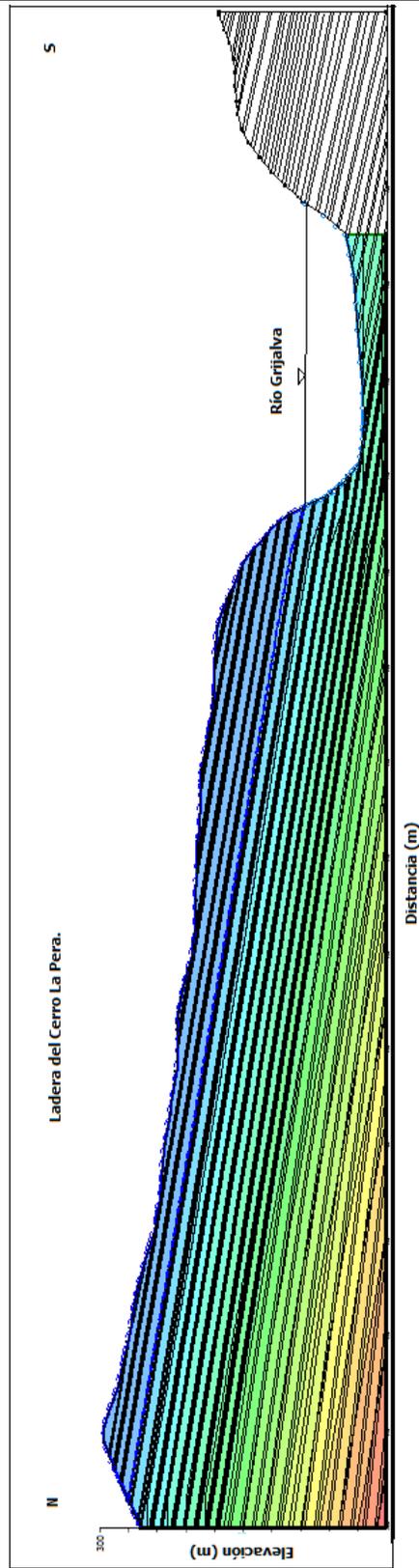


Figura 5.3: Perfil de la ladera del cerro la Pera. Los colores indican el grado de humedad en la ladera, donde azul es poca saturación y rojo es completamente saturado. Elaborado en SEEP/W 2007.

Cuando se resuelve un problema geotécnico, se requiere que se definan aspectos y parámetros necesarios para poder usar el programa. Se deben tomar los datos del levantamiento de la ladera y así dibujar su perfil, para tener las dimensiones físicas del lugar en dónde se sitúa el elemento a modelar.

Para este trabajo se usó *Mohr Coulomb*, debido a que es el que más se adecua al comportamiento que tuvieron en conjunto los materiales correspondientes a la ladera. Debido a la versión del software no fue posible exportar el perfil de *ArcGIS* a *Plaxis 2D* directamente. Se trazó el perfil a mano, haciendo uso de las coordenadas de cada uno de los puntos que conformaban la ladera antes del deslizamiento, de acuerdo al MDE.

5.1.1. Parámetros básicos para el modelo Mohr-Coulomb

De la revisión bibliográfica se obtuvieron los siguientes parámetros para la lutita inalterada, la lutita muy alterada y de la arenisca, la principal fuente fue la tesis de A. Melo *et. al.*, (2009), debido al extenso trabajo que hicieron en la zona del deslizamiento en coordinación con Comisión Federal de Electricidad (CFE). Sin embargo, como hay datos no reportados en el texto, se tomaron datos más generales encontrados en la literatura; el conjunto de estos se exponen a continuación.

Cuadro 5.1: Pruebas triaxiales realizadas en la roca intacta, lutita. Datos obtenidos de Melo *et al.*, 2009.

Parámetro	Valor
Cohesión (c)	100 kPa
Ángulo de fricción (ϕ)	34

Cuadro 5.2: Datos obtenidos de Melo, *et al.*, 2009. Lutita Alterada

Parámetro	Valor
Cohesión (c)	5 kPa
Ángulo de fricción (ϕ)	12.9

Cuadro 5.3: Datos de la Lutita inalterada, obtenidos de Ingeniería Geológica, González de Vallejo.

Parámetro	Valor
Coefficiente de Poisson (ν)	0.27
Módulo de Young (E)	1.25×10^5 kPa
Módulo de Corte (G)	49,212.598 kN/m ²

Cuadro 5.4: Datos obtenidos de A. Melo, *et. al.* 2009. Arenisca (roca intacta)

Parámetro	Valor
Cohesión (c)	900 kPa
Ángulo de fricción (ϕ)	34
Módulo de elasticidad estático (E)	4,901,950 kPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0.275

Para hacer los cambios en el nivel freático en *PLAXIS*, de acuerdo a la precipitación que se presentó en los días previos al deslizamiento y considerando que se estima que para el día del evento se tenía un suelo totalmente saturado, se usaron las gráficas de las figuras (2.13 y 2.14), y en base a estos datos se hizo una interpolación lineal por segmentos. Desafortunadamente se cuentan con pocos datos que involucran precipitación y su relación con los cambios en el nivel freático en días cercanos al evento, es por esto que se recurrió a este método y no a otros que, si bien son más precisos, involucran gran cantidad de datos como las series de tiempo.

Con los datos de precipitación y su relación con el nivel freático (Fig. 2.13), se realizó una interpolación con el método de Lagrange lineal, con los datos de los barrenos instalados en el área del deslizamiento; se seleccionaron el dos, cuatro y siete debido a que su ubicación con respecto al perfil trazado con *Arc Gis 2010* es favorecedora para el modelo (ver 2.15).

Se obtuvieron para el barreno 2, inclinómetro 1 con coordenadas X : 59 364, Y: 1920287, Z: 132 m (Fig. 5.4): $f(x) = 0.111857(x - 30.3) + 99$.

Barreno 4 con coordenadas: X: 459522.69, Y: 1920380.35, Z:170.38 :

$$f(x) = 130 + 0.0187617(-21.7 + x).$$

Barreno 7, con coordenadas: X: 459682, Y:1920802, Z: 168.

$$f(x) = 156 + 0.0281426(-21.7 + x),$$

donde f es el cambio en el nivel freático y x la precipitación en milímetros. Los resultados para los cambios en el nivel freático, se implementaron en la sección de *Water conditions* (Figs. 5.9 y 5.8).

Del cuadro 5.5, se observan algunos puntos interesantes; se tiene un máximo en la elevación del río con 91.4 m el día 30 de Octubre, y después de 5 días desciende a 86.5 m (04 de Nov., deslizamiento, con un desnivel de 4.9 m). Ésta elevación no es la más baja, en las fechas 20 y 21 de Octubre con 84.9 m y 85 m respectivamente; sin embargo, no se presentó el deslizamiento en estas fechas, quizá porque el grado de precipitación acumulada era menor en comparación con la que se presentó el día del deslizamiento.



Figura 5.4: Barreno 2, inclinómetro 1, 31 de Mayo de 2016.

Cuadro 5.5: Datos de precipitación y del nivel del río Grijalva empleados en el modelo, del 10 de Octubre al 04 de Noviembre de 2007.

Fecha	Elevación (m) Río Grijalva	Precipitación acum. (mm/día)	Precipitación acum. (mm)
10/Oct/07	85.5	290	290
11/Oct/07	86.4	210	500
12/Oct/07	88.3	9.84	509.84
13/Oct/07	88.5	0	509.84
14/Oct/07	87.6	0	509.84
15/Oct/07	86.7	9.84	519.68
16/Oct/07	85.5	180	699.68
17/Oct/07	86.1	4.8	704.48
18/Oct/07	85.9	4.8	709.28
19/Oct/07	85.5	50	759.28
20/Oct/07	84.9	9.84	769.12
21/Oct/07	85.0	50	819.12
22/Oct/07	85.4	48	867.12
23/Oct/07	85.8	229.92	1 097.04
24/Oct/07	88.2	80	1 177.04
25/Oct/07	89.2	9.84	1 186.88
26/Oct/07	89.0	0.0	1 186.88
27/Oct/07	88.5	9.84	1 196.72
28/Oct/07	88.0	405	1 601.72
29/Oct/07	90.0	309.84	1 911.56
30/Oct/07	91.4	250.08	2162.36
31/Oct/07	90.9	108.0	2 270.6
01/Nov/07	90.1	110	2 380.36
02/Nov/07	89.5	4.8	2 385.16
03/Nov/07	88.0	9.84	2 395
04/Nov/07	86.5	3	2 398

5.2. PLAXIS 2D

Para hacer el modelo numérico se requieren de ciertas herramientas, que sean adecuadas para los objetivos planteados, primero se empleó *software Plaxis*; el cual emplea subprogramas durante el proceso de modelación, la primera fase es la de *Input* en dónde se crea el perfil topográfico (Fig. 5.2) y además se introducen los

insumos que se necesitan para la creación del modelo.

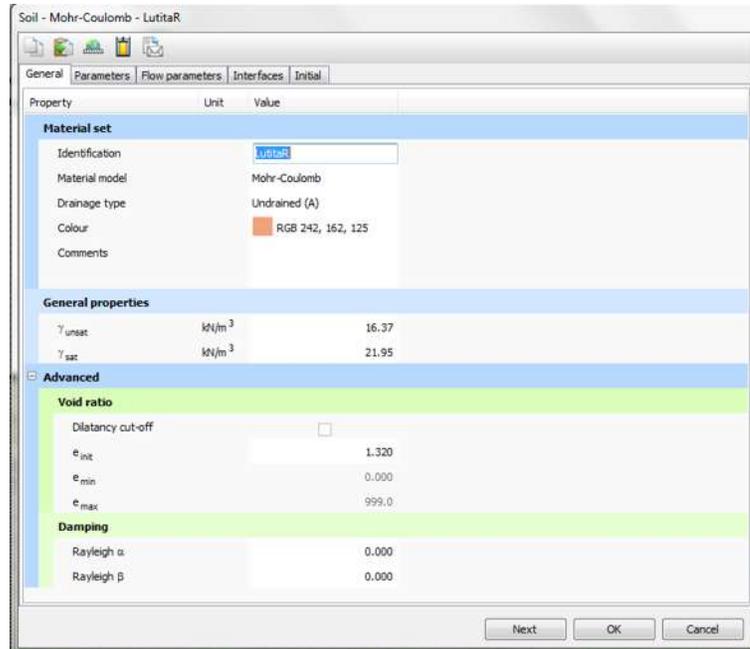


Figura 5.5: Primera fase en *Plaxis*, *Input*.

Los parámetros antes descritos (5.1, 5.2, 5.3, 5.4) se introdujeron en *Plaxis* en la parte *Input*, de acuerdo a cada material asignado en el modelo (Fig. 5.5).

Se elaboró un modelo con grieta (Figs. 5.6 y 5.12), la cual se ubicó de acuerdo al MDE antes del deslizamiento; y otro modelo sin grieta (Figs. 5.6, 5.9, 5.8), sin que se haya observado una diferencia significativa, la cual se debe a la versión del *software*.

Una vez que la geometría del modelo se ha definido por completo, se han ingresado las propiedades de los materiales, y se han asignado las propiedades de los materiales a cada uno de los estratos correspondientes, se procedió a la generación de la malla con el método de elementos finitos (MEF). El programa emplea elementos triangulares (por trabajar con MEF) de 6 y 15 nodos (Fig. 5.7). Para este modelo emplearemos elementos triangulares con seis nodos.

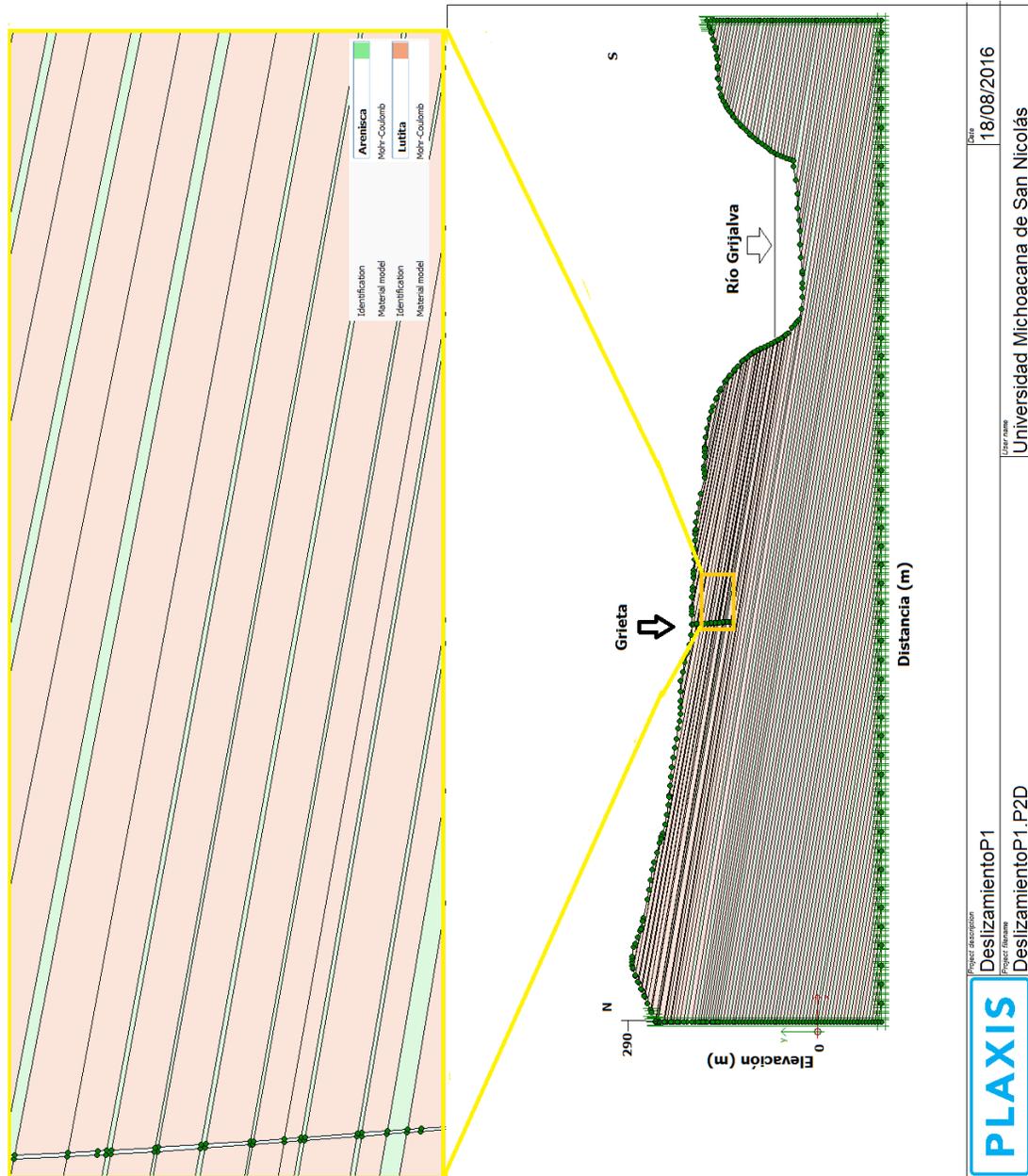


Figura 5.6: Intercalación de lutitas y areniscas. Modelo con grieta, basado en el MDE antes del deslizamiento.

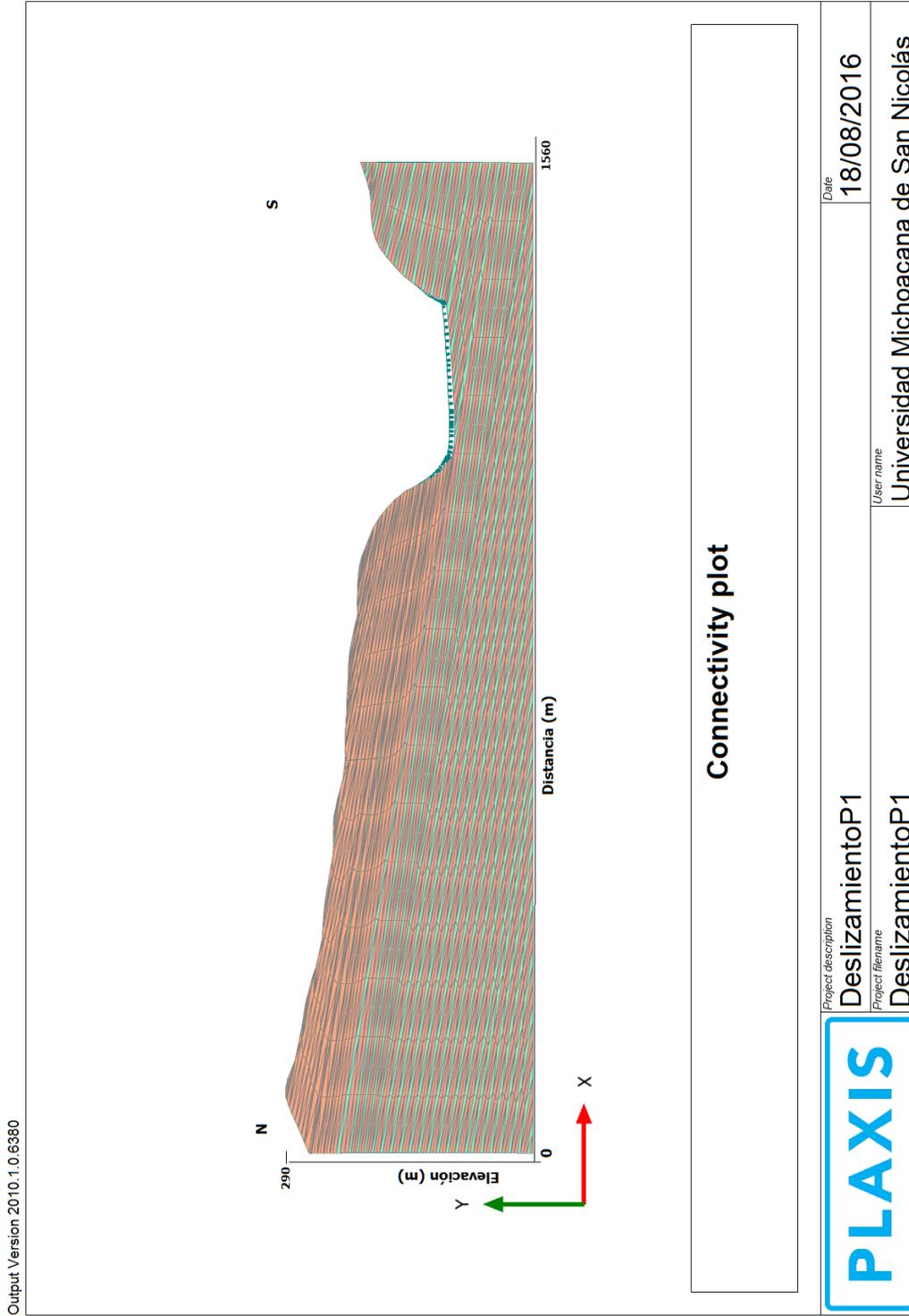


Figura 5.7: Malla de seis nodos para cada triangulación, elaborado en *Plaxis 2D 2010*.

5.2.1. Plaxis 2D. Cálculos

El siguiente paso en la modelación fue la etapa de cálculos, la cual se realizó en el subprograma *Calculations* en dónde se involucraron los cambios en el nivel freático (Fig. 5.8), de precipitación y en el nivel del embalse del Grijalva en el lapso de tiempo del 08 de Octubre de 2007 al 04 de Noviembre de 2007 (Fig. 5.9). Datos de precipitación basados en las gráficas (2.7, 2.8, 2.9, 2.9, 2.11) y del abatimiento de los cuerpos de agua (Fig. 2.12).

Para esta parte, se inició con un nivel del embalse del Río Grijalva de 85 m. Es importante recalcar que la presa Peñitas recibió prácticamente sólo los escurrimientos de su propia cuenca, en los días 11 y 12 de Octubre recibió un caudal superior a los 5 000 m³/s. Del 23 al 26 de Octubre se presentó una segunda creciente con un gasto pico de más de 3 500 m³/s que estaba siendo desalojada de la presa Peñitas, cuando el 29 de Octubre presentó una creciente de 5 000 m³/s (Hinojosa-Corona *et. al* 2011).

Del 20 de Octubre al 04 de Noviembre (día del deslizamiento) se acumularon precipitaciones máximas de 1208.5 mm, y la precipitación acumulada del 08 de Octubre al 04 de Noviembre fue de más de 2 500 mm.

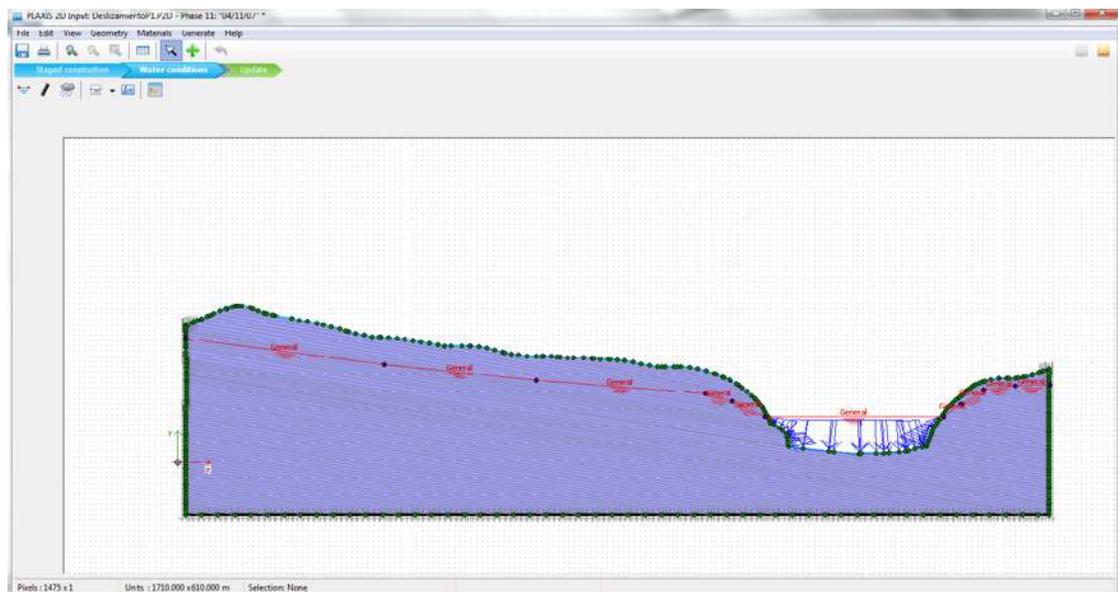


Figura 5.8: Subprograma *Calculations*, *Water conditions*. Se hace el cambio del Nivel Freático y con ello se modifica la presión de poro en cada paso de tiempo.

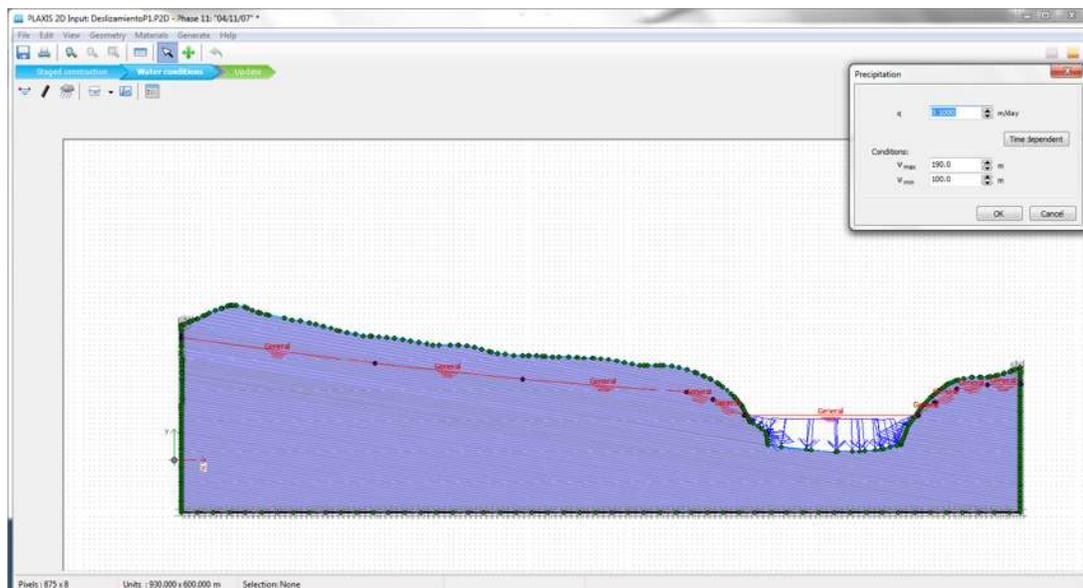


Figura 5.9: Subprograma *Calculations*, *Water conditions*. Se provee al programa los datos de precipitación acumulada en cada fase.

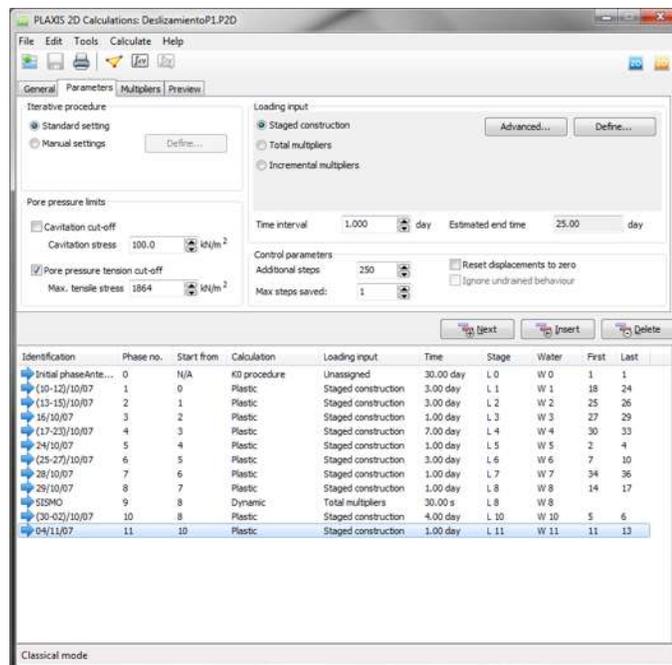


Figura 5.10: *Calculations*. Cálculos, elaborado con *PLAXIS 2D*, versión 2010.

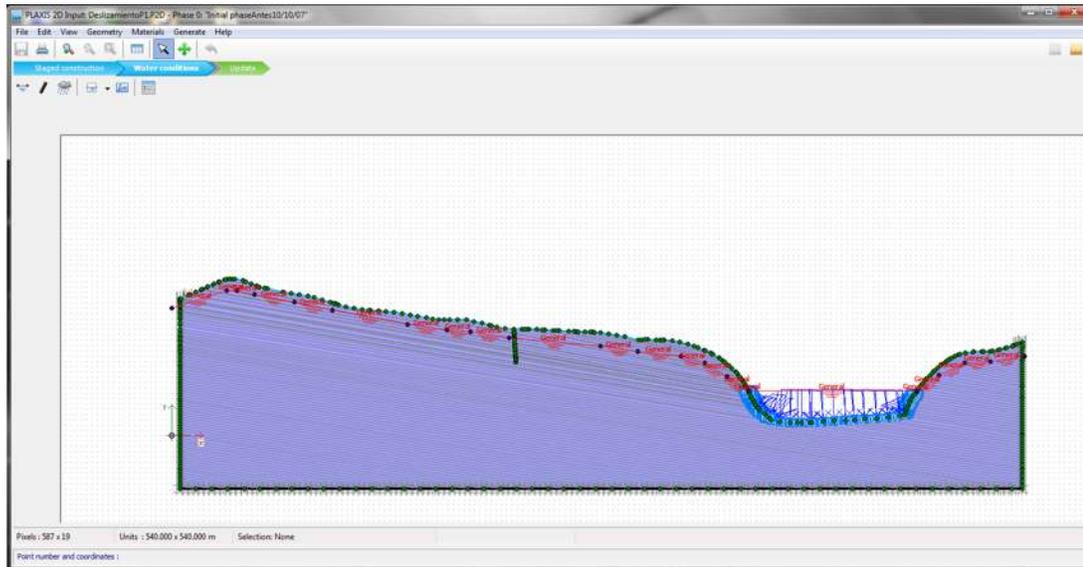


Figura 5.11: *Water Conditions*. Primer fase en dónde se asignan los valores de precipitación, nivel freático y cambio en el embalse.

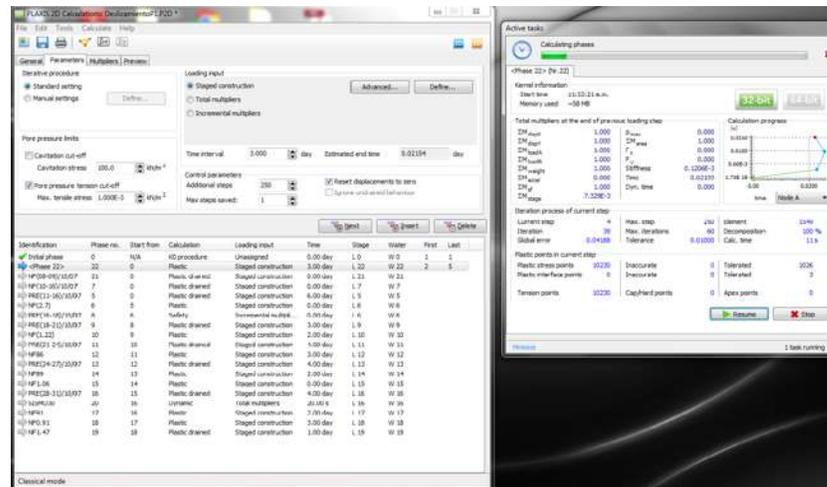


Figura 5.12: *Plaxis 2D*. Calculando fases.

Una vez que se han completado cada una de las fases se procede a hacer los cálculos (Fig. 5.12)

Se realizaron pruebas en el que se consideró el nivel del Río Grijalva como constante en 85 m (debido a que este es el valor promedio en el que se mantuvo el nivel

el río Grijalva del 10 de Octubre al 04 de Noviembre de 2007) y otro en el cual se estuvo variando de acuerdo a los datos mostrados en las figuras 2.12 y 5.6.

Estas pruebas se realizan en el subprograma *Calculations*, en donde se asignó una fase a cada uno de los días comprendidos del 10 de Octubre de 2007 al 04 de Noviembre de 2007. A su vez en cada fase se asignó en la parte de *Water Conditions* la precipitación acumulada por día así como el cambio en el embalse registrado (Fig. 5.11). En lo que se refiere a las variaciones del nivel del embalse, éstas se hicieron de modo manual es decir, en cada fase se indicó cuánto aumentó o disminuyó con respecto al siguiente día.

Después de tener las fases completas y hacer los cálculos (Fig. 5.10) se esperaba tener un colapso de la ladera, es decir, una deformación en la malla de manera que fuese lo más parecido posible al fenómeno ocurrido, pero debido a la versión del programa *Plaxis 2D, 2010* con la que se cuenta, esto no fue posible; sin embargo, se obtuvieron resultados que nos ayudan en el análisis del deslizamiento y que a su vez permitieron hacer un mejor modelo en *GeoSlope*.

5.3. GEOSLOPE

La segunda parte del modelo se realizó en *GEOSLOPE 2007*, en particular con los programas *SEEP/W* y *SLOPE/W*; al iniciar los cálculos se deben elegir ambos programas para que los parámetros introducidos en ellos se involucren entre sí y el trabajo se realice de manera conjunta (Fig. 5.13). Con el objetivo de encontrar el factor de seguridad y visualizar la superficie de rotura asociada (Fig. 5.24, 5.20). Se le asignó una serie de tiempo la cual también comprende del 10 de Octubre al 04 de Noviembre de 2007.

El perfil topográfico se hizo en base al perfil obtenido en *ArcGis 10.0* y fue elaborado en el programa *SEEP/W*. La estratificación de la ladera se hizo manteniendo la alternancia entre lutitas y areniscas de forma análoga a como se hizo en *PLAXIS* (Fig. 5.15).

Se asignaron funciones de precipitación y variación del nivel del Río Grijalva, las cuales fueron creadas en base a los datos de la tabla (5.6), con fecha del 10 de Oct. al 04 de Nov. de 2007 (Figs. 5.17, 5.18).

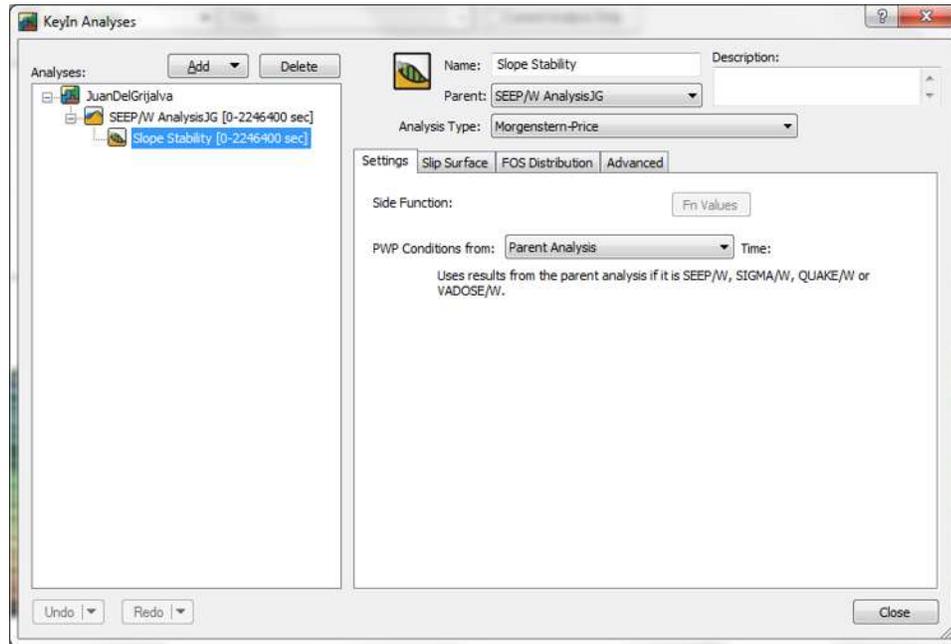


Figura 5.13: Union del *SEEP/W* con *Slope/W*. Elaborado en *GeoSlope 2007*.

Las propiedades de la lutita y de la arenisca se asignaron en el programa *Slope/W*, tal como la cohesión (c), el peso volumétrico y el ángulo de fricción interna (ϕ) que fueron descritos anteriormente (Fig. 5.14).

Para el control de la localización de los centros de los círculos de rotura, fue necesario definir líneas a partir de las cuales se obtuvo la malla de superficies de deslizamiento, en la cual se concentra los centros de dichos círculos.

Se tienen 11 líneas de radios, con esto el programa dibujó círculos de rotura tangentes a éstas líneas. Ésta se localiza en el frente de la ladera debido a que en la modelación con *Plaxis*, la deformación mayor se concentró en esta zona (Fig. 5.19).

El programa trabaja, con el método de elementos finitos; para este modelo se tienen alrededor de 53,362 elementos (Fig. 5.16).

KeyIn Materials

Name	Color
Lutita	
Arenisca	
Bedrock	

Name: Lutita Color:  Set...

Material Model: Mohr-Coulomb

Basic | Suction | Drawdown | Liquefaction | Advanced

Unit Weight: 22 kN/m³ Cohesion: 100 kPa

Phi: 34 °

Materials

Name	Color
Lutita	
Arenisca	
Bedrock	

Name: Arenisca Color:  Set...

Material Model: Mohr-Coulomb

Basic | Suction | Drawdown | Liquefaction | Advanced

Unit Weight: 23.5 kN/m³ Cohesion: 900 kPa

Phi: 34 °

Figura 5.14: Propiedades de los materiales. Elaborado en *Slope/W*.

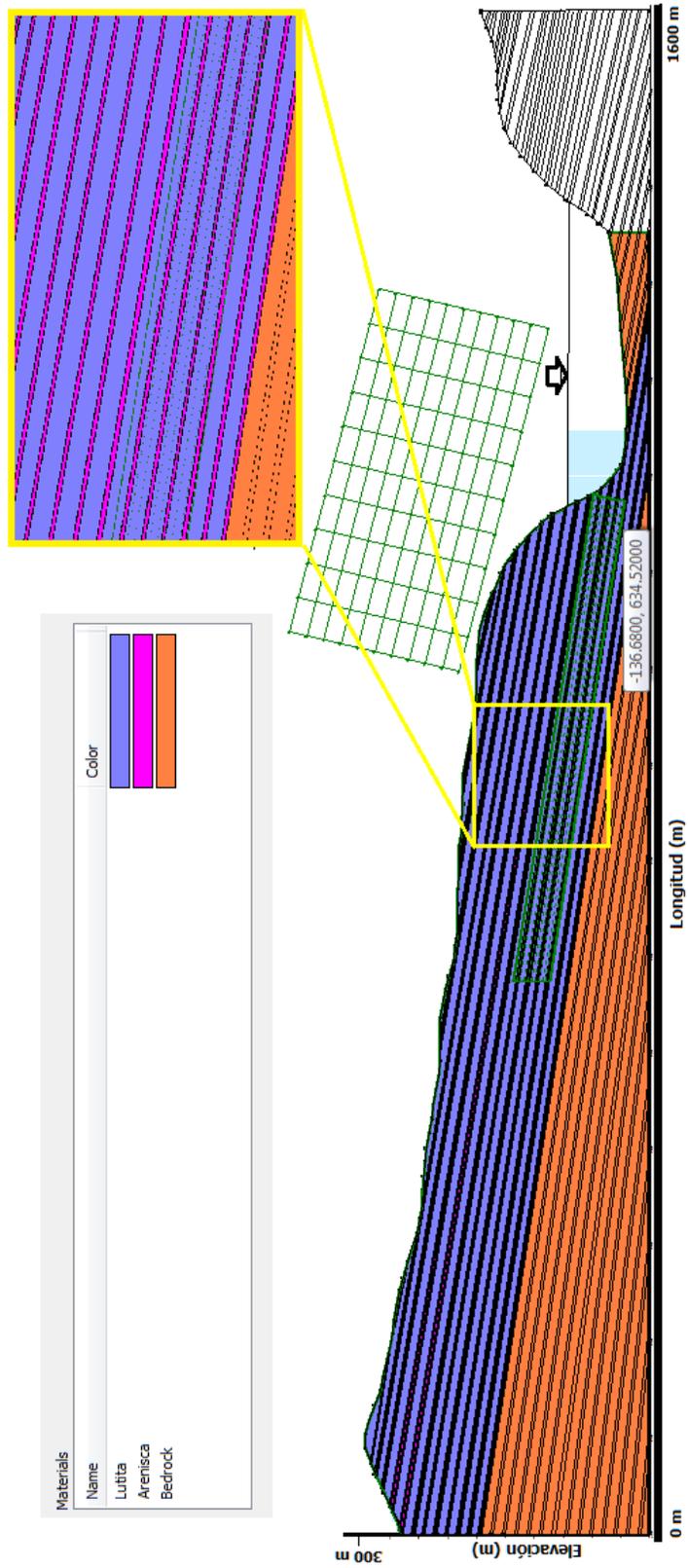


Figura 5.15: Asignación de materiales. Se presenta una intercalación de Lutita y Areniscas, en dónde el grosor de la Lutita es mayor en comparación con las areniscas. *Slope/W* 2010.

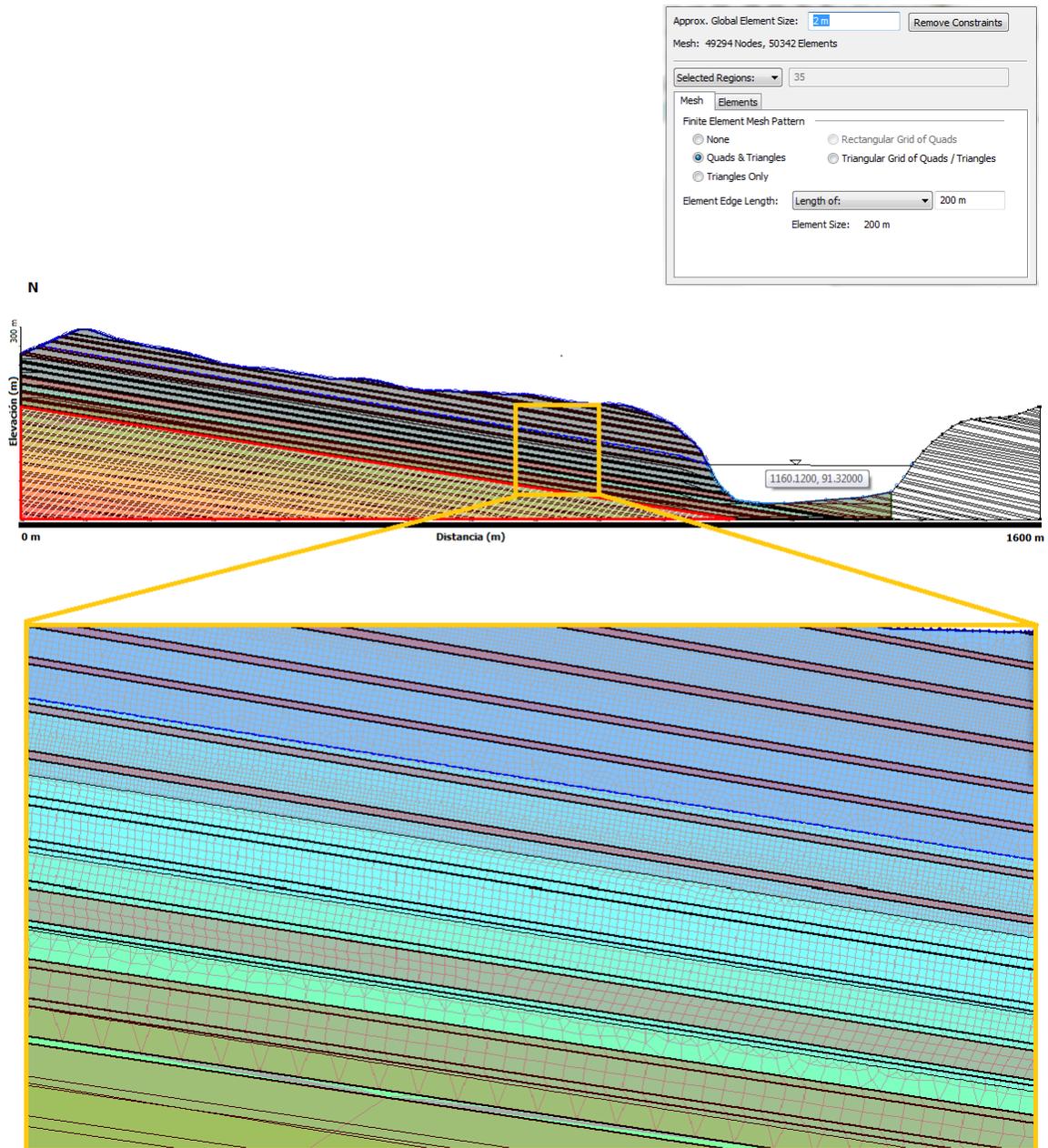


Figura 5.16: Malla híbrida con elementos finitos, con un total de 49 294 nodos y 53,362 elementos. El menor tamaño de cada elemento fue de 2m, este refinamiento se realizó especialmente cercano a los posibles estratos de falla . Elaborado en *SEEP/W* 2007.

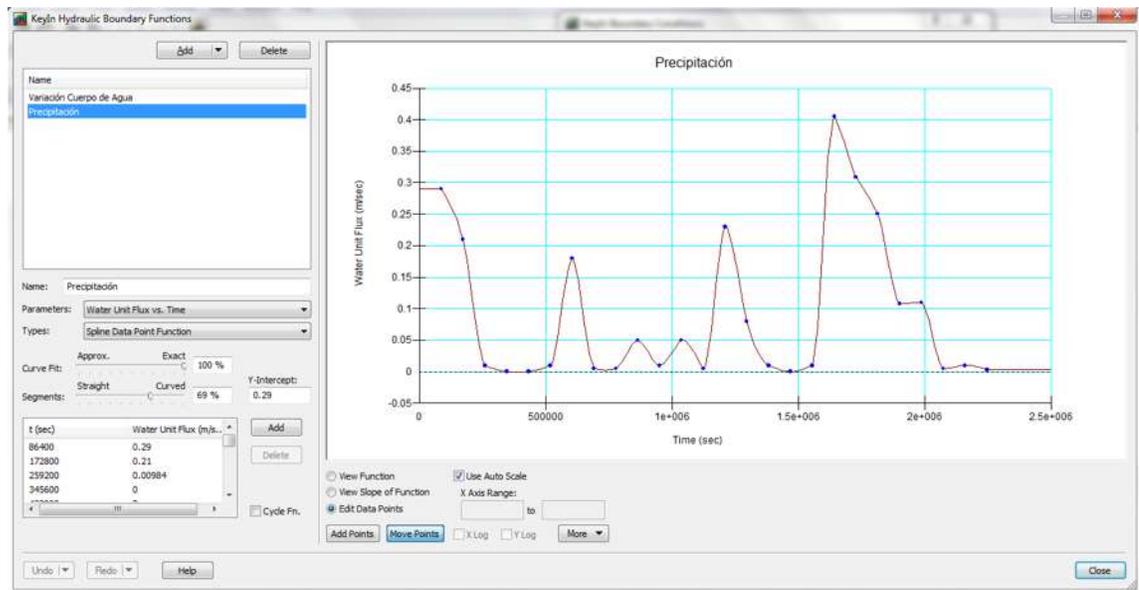


Figura 5.17: Función de precipitación. Elaborado en *SEEP/W*

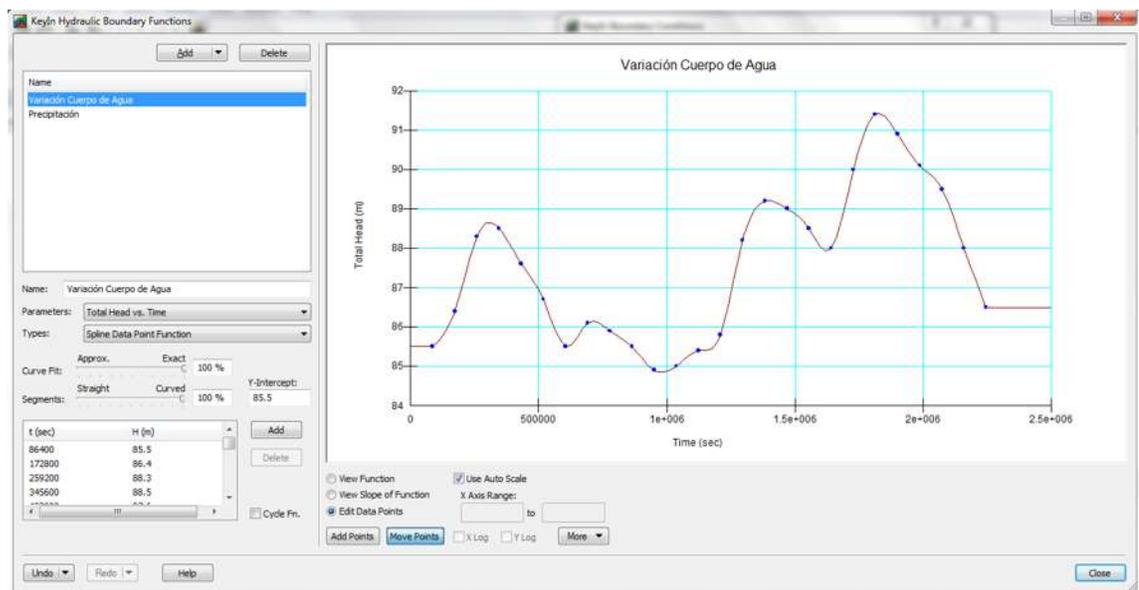


Figura 5.18: Función de variación del nivel del Río Grijalva. Elaborado en *SEEP/W*.

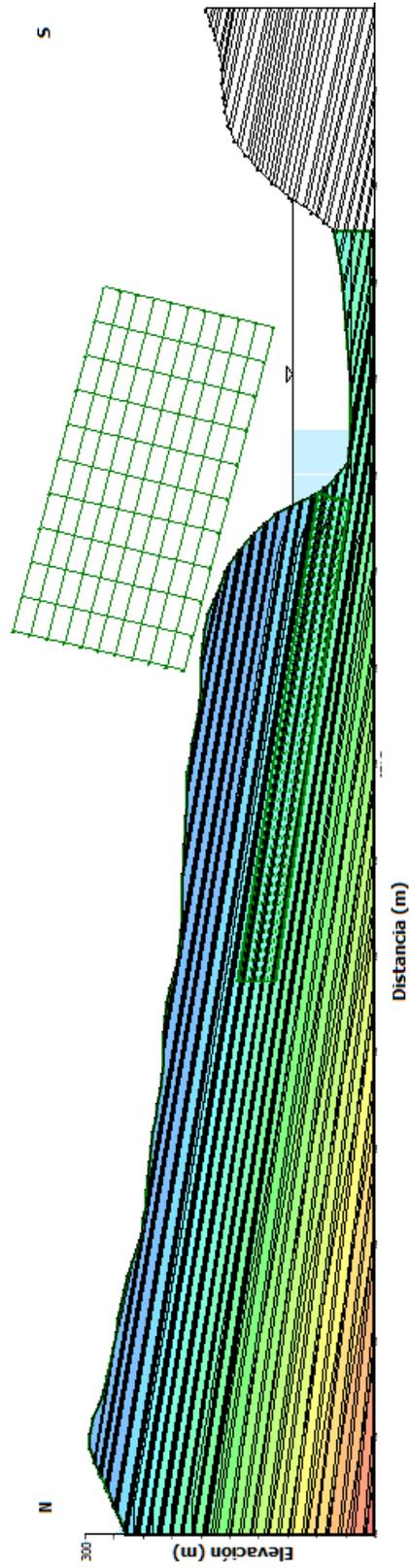


Figura 5.19: Malla de superficies de deslizamiento. Elaborado en *Slope/W*.

5.4. Escenarios modelados

5.4.1. Modelo con valores reales.

En esta sección se muestra los resultados obtenidos en las pruebas con *PLAXIS* y *GeoSlope*, respetando los datos reales de la (Tabla 5.6).

Se observó que la deformación mayor se encuentra en el frente de la ladera (la deformación es menor, cuando el nivel del río se mantuvo constante (Fig. 5.25), con lo que la hipótesis de que primero hubo un deslizamiento de tipo rotacional y luego traslacional se refuerza (Fig. 5.23).

El modelo con *PLAXIS* ayudó para establecer la malla de superficies de deslizamiento (Fig. 5.19) y así continuar con las pruebas en *GeoSlope*; después de hacer los cálculos se encuentra que para el último paso de tiempo, el cual fue designado como el 04 de Noviembre día del colapso, el factor de seguridad fue de 0.9841 (Fig. 5.20).

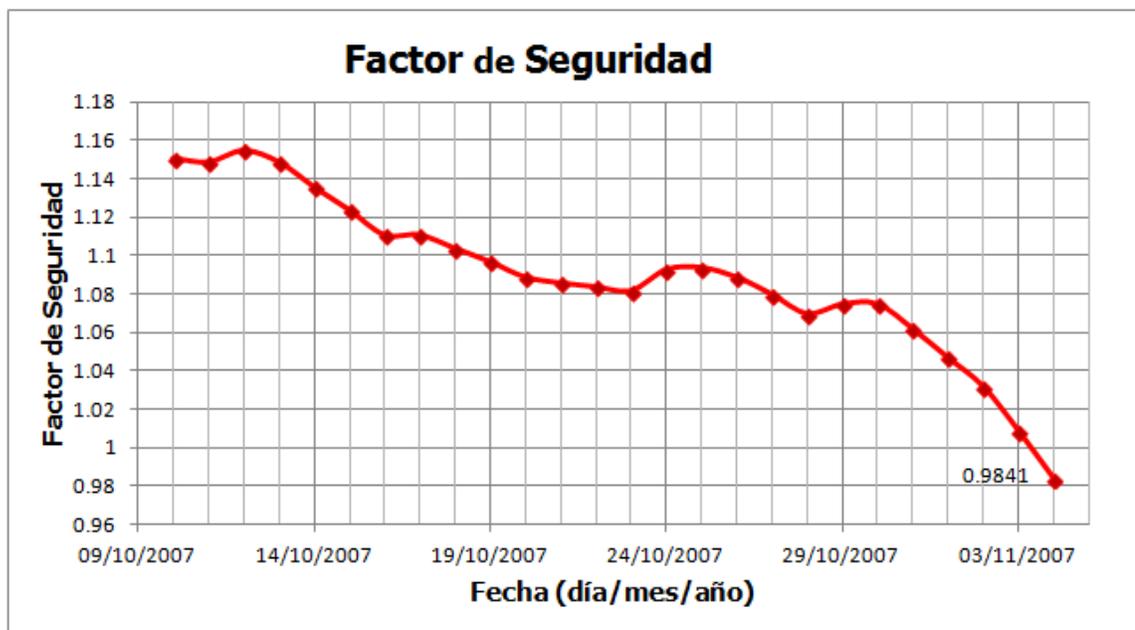


Figura 5.20: Gráfica de Factor de Seguridad en la Ladera del Cerro la Pera, del 10 de Octubre al 04 de Noviembre de 2007.

En la gráfica 5.22 en donde se hace la comparación del nivel del río Grijalva y el factor de seguridad, se observa que cuando se suscitó un descenso en el nivel del

Río Grijalva el factor de seguridad disminuyó, a medida que avanzaban los días la tendencia en la gráfica del factor de seguridad es hacia el colapso, lo cual se puede asociar principalmente a las precipitaciones que se suscitaron en la segunda mitad del mes de Octubre (Fig. 5.21). Sin embargo cuando hay un aumento en el nivel del Río Grijalva se observa un aparente recuperación en el factor de seguridad.

Observamos que cuando se suscitan elevaciones en el nivel del río, el factor de seguridad también tuvo ligeros aumentos, eso puede indicar que cuando esto sucedió se le dió estabilidad a la ladera (Fig 5.22).

Para el día 20 de Octubre se tiene el nivel más bajo en el río Grijalva, con 84.9 m mientras que la ladera se mantuvo estable; en comparación con lo suscitado el 04 de Noviembre en dónde se tuvo un nivel del río en 86.5 m. Esto se puede deber a que las precipitaciones para el día 20 son menores con un acumulado de 769.12 mm contra 2 398 mm, el día del deslizamiento.

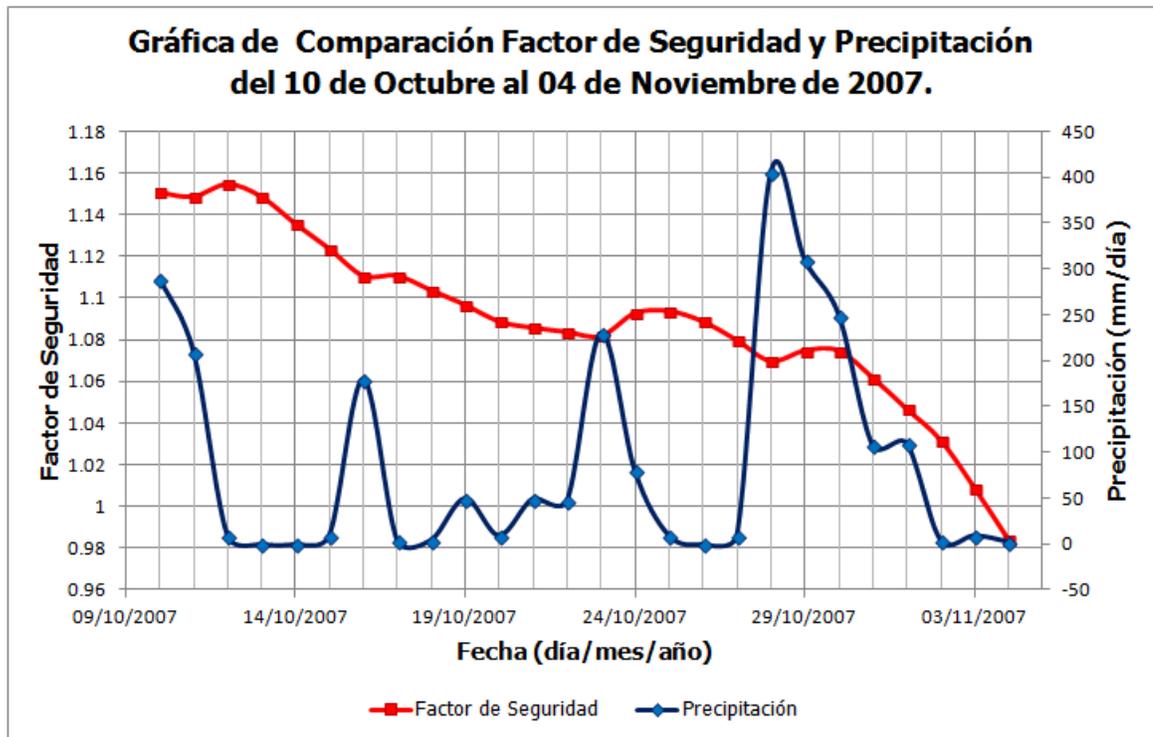


Figura 5.21: Gráfica de Comparación del Factor de Seguridad con la precipitación.

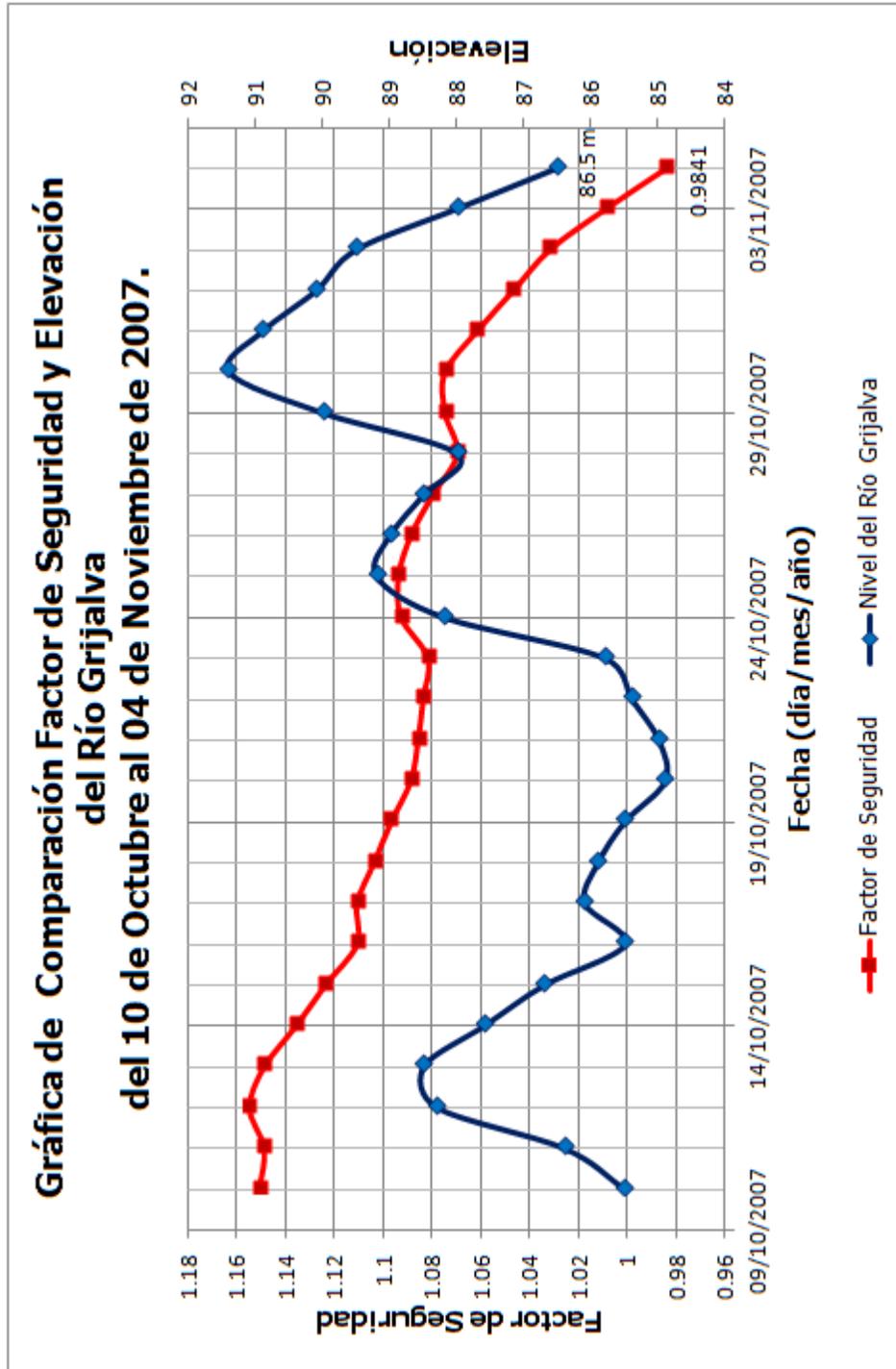


Figura 5.22: Gráfica de comparación del factor de seguridad con la variación del Nivel del Río Grijalva.

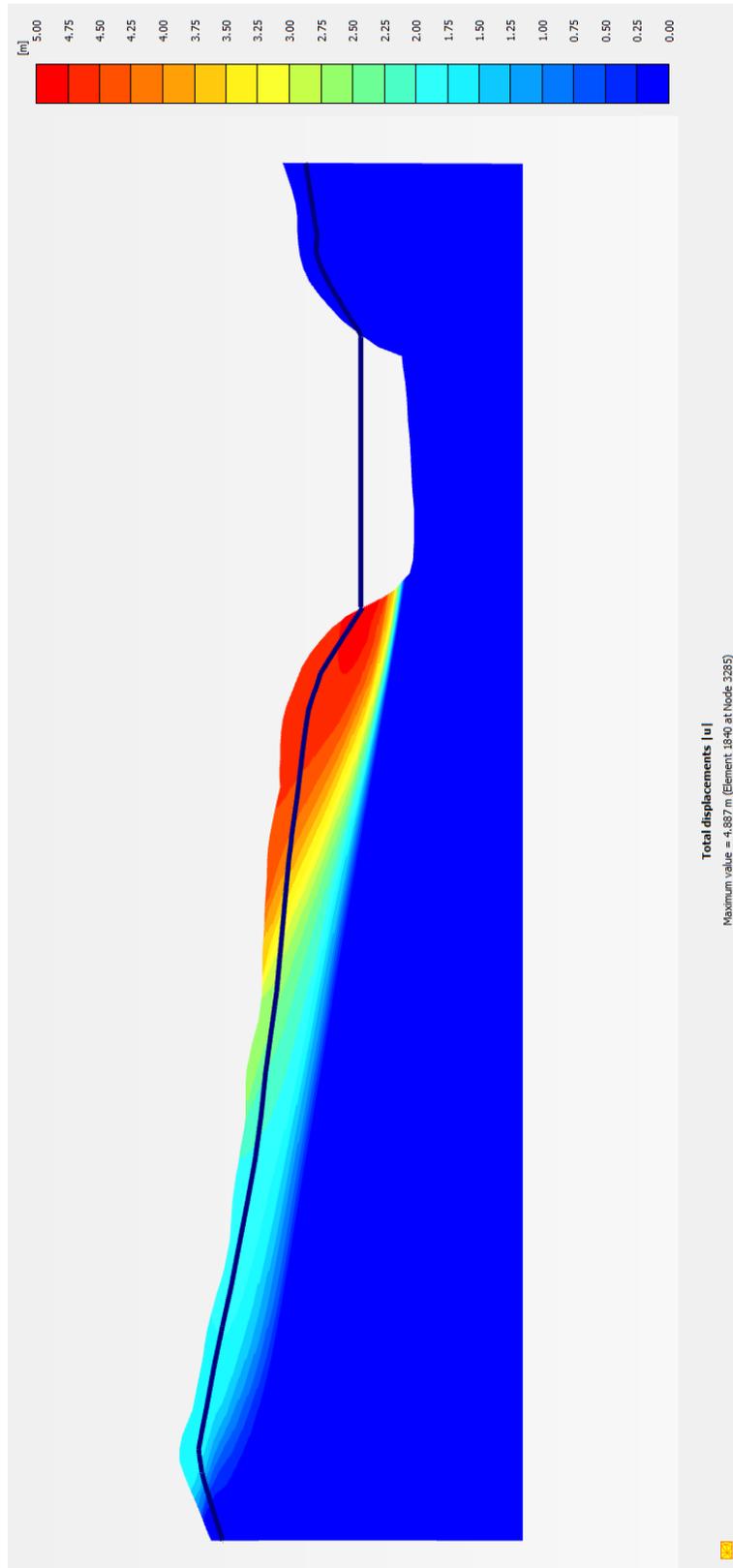


Figura 5.23: Deformaciones totales, con variaciones en el nivel del embalse. Sin la malla ni estratos superpuestos.

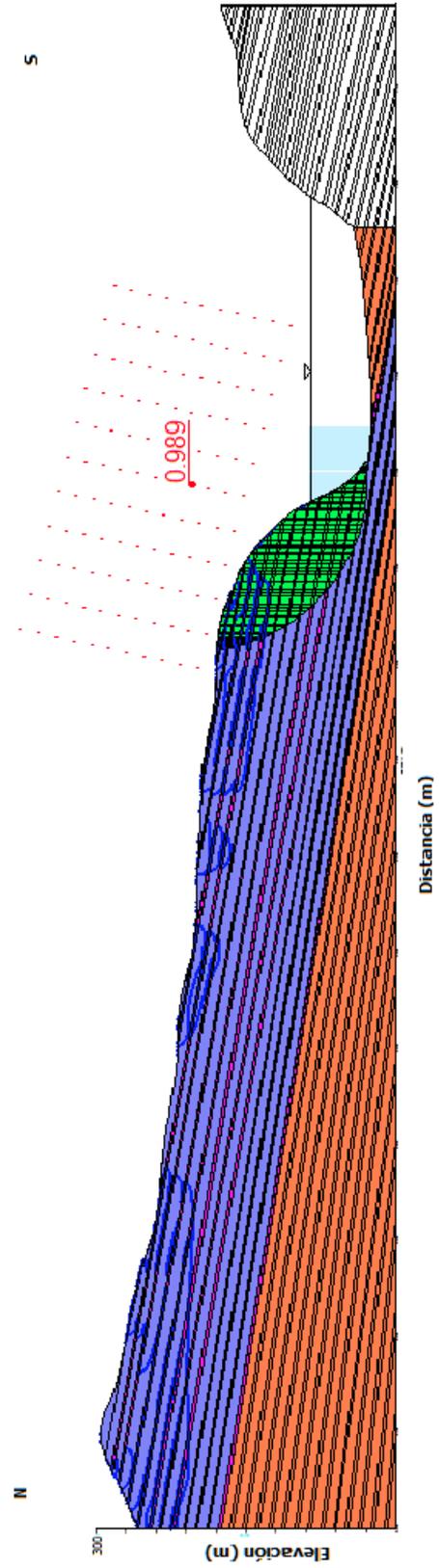


Figura 5.24: Superficie de rotura y factor de Seguridad. Elaborado en *Slope/W*.

5.4.2. Nivel del río constante

Una segunda prueba se realizó con los datos de precipitación real para los días del 10 de Octubre al 04 de Noviembre de 2007, pero en este caso se omitió la variación en el nivel del Río Grijalva y se mantuvo constante en 85 m (Fig. 5.25, 5.26), que es el promedio del nivel durante el período de modelado (ver 5.26).

En este caso, también se tiene una deformación en el frente de la ladera, pero es mínimo comparado con los obtenidos cuando existen variaciones en el nivel del embalse.

Una tercer prueba se realizó con el nivel del río constante a 88 m, esto debido a que el nivel del río aumentó desde el mes de Octubre, debido al escurrimiento de las precipitaciones suscitadas desde este mes.

Se observa que bajo las mismas condiciones a las reales de precipitación y con el nivel del río constante, el colapso de la ladera hubiese sido el día 31 de Octubre con un nivel a 85 m, y el día 02 de Noviembre con un nivel constante a 88 m, lo cual nos puede indicar que el aumento del nivel del río le dio confinamiento a la ladera (Figs. 5.26, 5.27).

Cuadro 5.6: Factor de seguridad con niveles del río Grijalva constante a 85 m. y a 88 m.

Fecha	Precipitación (mm/día)	Factor de Seguridad Elevación Río Grijalva cte (85 m)	Factor de Seguridad Elevación Río Grijalva cte (88 m)
10/Oct/07	290	1.104	1.127
11/Oct/07	210	1.095	1.118
12/Oct/07	9.84	1.089	1.111
13/Oct/07	0	1.083	1.105
14/Oct/07	0	1.078	1.099
15/Oct/07	9.84	1.073	1.093
16/Oct/07	180	1.068	1.089
17/Oct/07	4.8	1.065	1.085
18/Oct/07	4.8	1.06	1.08
19/Oct/07	50	1.056	1.085
20/Oct/07	9.84	1.053	1.073
21/Oct/07	50	1.049	1.068
22/Oct/07	48	1.045	1.064
23/Oct/07	229.92	1.041	1.06
24/Oct/07	80	1.036	1.055
25/Oct/07	9.84	1.032	1.051
26/Oct/07	0	1.028	1.047
27/Oct/07	9.84	1.024	1.042
28/Oct/07	405	1.018	1.036
29/Oct/07	309.84	1.012	1.03
30/Oct/07	250.08	1.005	1.023
31/Oct/07	108	1.002	1.016
01/Nov/07	110	0.995	1.009
02/Nov/07	4.8	0.987	1.0
03/Nov/07	9.84	0.978	0.991
04/Nov/07	3	0.967	0.9804

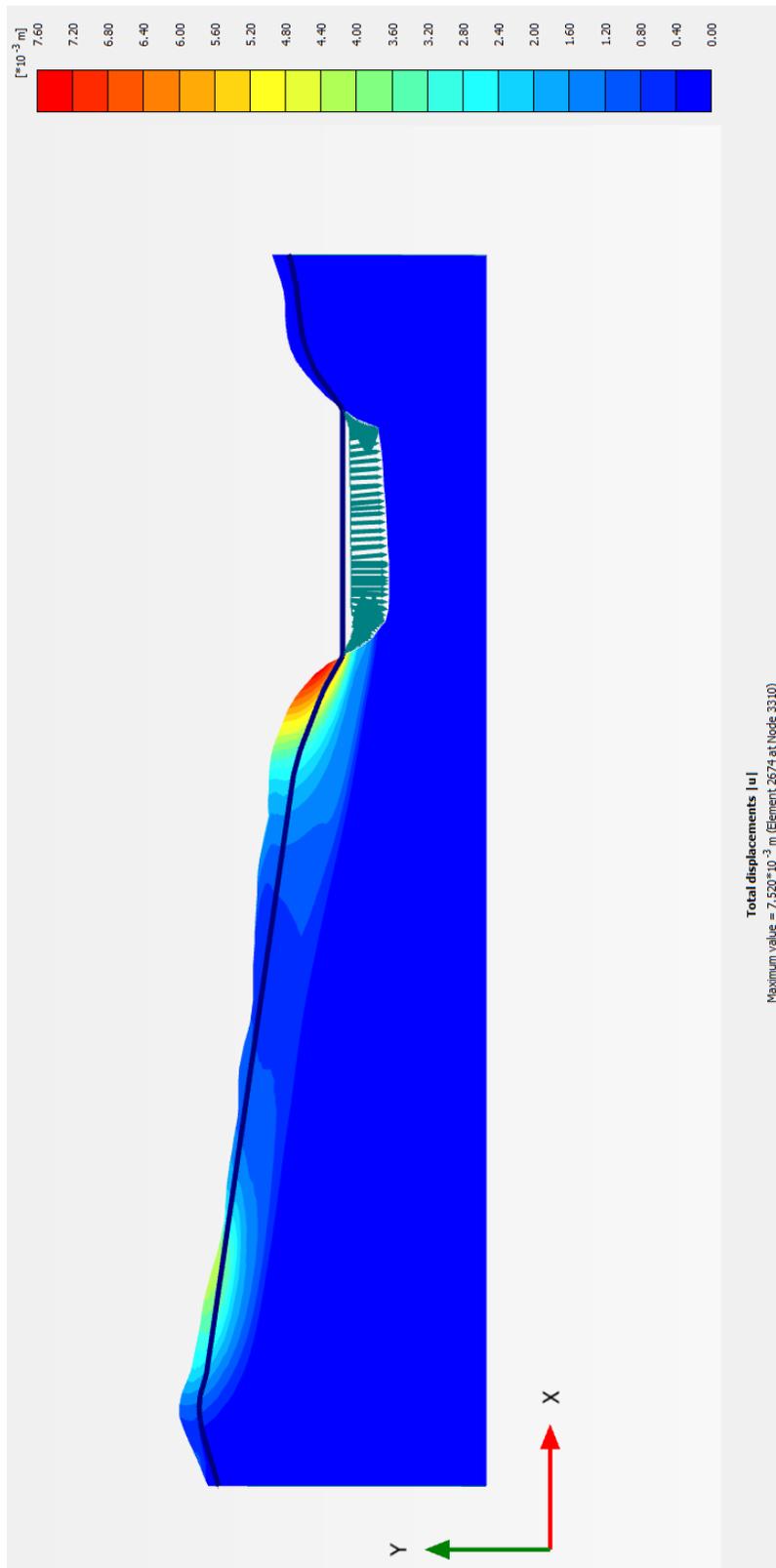
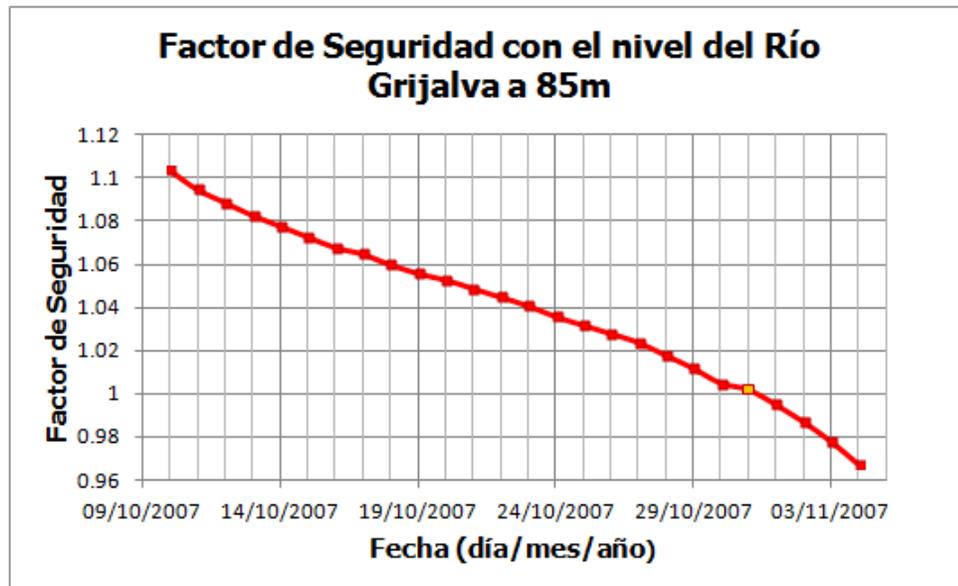


Figura 5.25: Deformaciones totales, con el nivel del embalse constante.



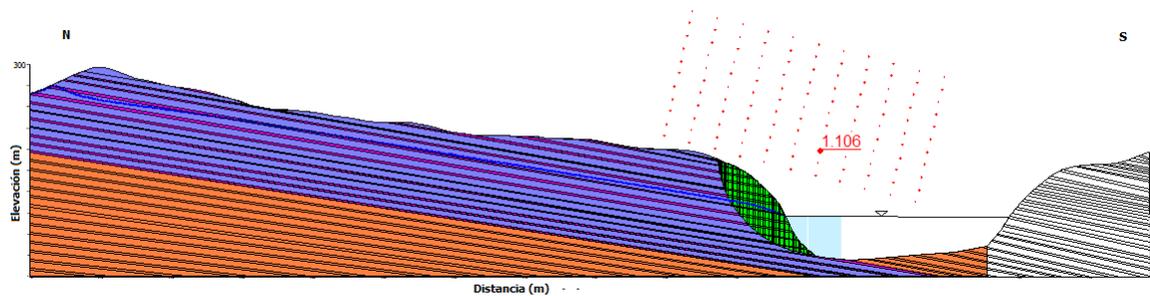


Figura 5.28: Factor de seguridad para el 04 de Noviembre 2007, con precipitación constante a 12.32 mm/día.

5.4.3. Variación en la precipitación

Se rehicieron los cálculos, con variaciones en los procesos involucrados. Primero se asignó una precipitación igual a cero para ver el comportamiento del factor de seguridad. En la segunda prueba se asignó una precipitación constante igual a 12.32 mm/día debido a que este es el promedio de precipitación en la zona del deslizamiento (Fig. 5.28).

5.5. Discusión

El presente trabajo tuvo como objetivo principal realizar un modelo numérico, usando *Plaxis* y *GeoSlope*, de manera que se pudiese conocer de manera más profunda la parte mecánica del deslizamiento, origen y evolución en el tiempo y tener una idea más clara de cuál fue el factor detonante.

Entre los factores condicionantes del deslizamiento, tenemos la precipitación la cual se presentó de manera intensa en la segunda semana de Octubre de 2007 y que debido al frente frío No. 4 generó un pontecial de lluvias del 28 de Octubre de 2007 al 01 de Noviembre de 2007 con lo cual se tuvo un tercio de la precipitación anual en tan sólo 5 días.

Otro factor condicionantes es que en la base de la ladera del Cerro la Pera, se presentaba una socavación provocada por el meandro localizado en la zona. Los estados de esfuerzos en *Plaxis* se observaron mayores en el frente de la ladera cuando el nivel del río varió y cuando éste se mantuvo constante.

Algunos autores, sugieren que además el factor del sismo ocurrido el 30 de Octubre (03:45:03 GMT) de 4.5 grados Richter (INEGI) pudo haber sido otro condicionante. Sólo se empleó este factor en el modelo con *Plaxis*, pero no se observaron cambios significativos cuando se ejecutó con sismo en comparación de cuando este se omitió.

De acuerdo a los resultados del modelo, el factor detonante fue el abatimiento súbito del espejo de agua conformado por el Río Grijalva. Debido a que el nivel del río bajó drásticamente a partir del día 30 de Octubre, cuando se había alcanzado una altura de 91.6m y considerando que del 02 al 04 de Noviembre la velocidad de descenso fue de 1.47m/día.

Al perder la estabilidad de la ladera en su base, provocó que el deslizamiento se suscitara; sin embargo, el aumento en el nivel del río aparentemente le dio confinamiento lo que sugiere que el deslizamiento pudo haberse generado antes del 04 de Noviembre.

Durante el mes de Octubre, la presa Malpaso no tuvo aportaciones al río Grijalva, es por ello que el manejo de compuertas estuvo a cargo de la presa Peñitas. Ante la situación tan precaria (escurrimientos de la cuenca del Grijalva, e inundaciones significativas en el estado de Chiapas y Tabasco), las presas estaban en un riesgo estructural y podrían haber colapsado; eso obligó, de emergencia, la apertura de las compuertas con lo cual, se buscaba evitar así que los daños fueran aún mayores.

Este proceso de remoción en masa se puede clasificar de tipo rotacional en la primer parte, que luego se convirtió en uno de tipo traslacional, ésta es una teoría que ya había sido abordada, y de acuerdo a lo obtenido con el modelo en *Plaxis*, se refuerza dicha teoría. Se considera que cuando el frente de la ladera perdió estabilidad y se deslizó, originó que se desestabilizara el resto de la ladera y colapsara.

5.5.1. Fortalezas y debilidades del modelo.

Dentro de las fortalezas, es que se conjuntaron dos programas computacionales diferentes y en los dos obtuvimos resultados congruentes con lo que sucedió en la realidad y similares entre sí, por los resultados obtenidos. La validación del modelo prácticamente se dio sola.

Haciendo uso de dos programas diferentes, cuando se hicieron variaciones con el nivel del río, en ambos casos mostraban puntos importantes: la deformación mayor

se presentó en el frente de la ladera, y el factor de seguridad alcanzaba el valor menor a uno, cuando, en la escala temporal asignada, marcó el 04 de Noviembre.

Se observa que el factor de seguridad en la ladera aumenta conforme el nivel del río va en aumento y disminuye cuando el río también lo hace. La similitud en cuanto al comportamiento de ambas gráficas (factor de seguridad y variación del río), evidencía la dependencia de uno con respecto al otro; más evidente, en comparación de las gráficas del factor de seguridad con la de precipitación.

Esto nos puede indicar que si bien, un modelo es sólo una aproximación a la realidad, con este modelo se tuvo un acercamiento significativo, los resultados se pudieron comparar con lo reportado en los distintos trabajos referentes a este evento, y con lo que los expertos nos comentaron de su propia experiencia.

Por otro lado, los datos reales del área de estudio con los que se trabajaron fueron relativamente pocos, se obtuvieron de la literatura datos generales como propiedades de las rocas (Lutita y Arenisca), debido a que los estudios en la zona del caído en los meses posteriores al deslizamiento fueron costosos en recursos monetarios y materiales. De haber dispuesto de más datos propios del área de estudio, se pudo haber logrado un trabajo más preciso.

No conocemos con exactitud los niveles del nivel freático antes del deslizamiento e influencia de las precipitaciones que estuvieron presentes desde el mes de Septiembre y Octubre. Una de la teorías que tienen la Comisión Nacional del Agua, es que el nivel freático alcanzó el estrato deslizado y eso disminuyó la cohesión, lo que ayudó a que se deslizará.

Otro factor que pudo haber influenciado en el deslizamiento y no se considera en el modelo es la velocidad del río Grijalva y su efecto en la base de la ladera, como puede ser la erosión, y su efecto cuando atravieza el meandro localizado en la base de la ladera del cerro La Pera; cuando se desfogan las presas la velocidad del río aumenta y disminuye cuando éstas cierran.

En la parte de la modelación con *Plaxis 2D*, la versión del software limitó el poder ver la deformación real de la malla que es lo que se buscaba desde el inicio del trabajo, para luego hacer la comparación con el MDE después del deslizamiento. Una versión de *PlaxFlow* podría mostrar la deformación de la malla y lograr una comparación con el modelo digital de elevaciones después del deslizamiento.

Para un trabajo a futuro, se debe rehacer el modelo agregando el efecto del sismo, que sí se implementó en *Plaxis* pero no en *GeoSlope*, y observar qué efectos se tiene en el modelo o si el sismo no tuvo mayor impacto en el deslizamiento, por la intensidad, distancia y tiempo de un evento con respecto al otro.

El trabajar con programas computacionales como lo es *Plaxis* y *GeoSlope* para PRM, brinda diversas herramientas que facilitan en gran medida el proceso de modelado, y evitan preocuparse por el software en sí.

Están diseñados especialmente para trabajar con fenómenos de este tipo; aunque si no se tiene claridad en lo que se pretende hacer y con ello, lo que se espera lograr; y no se comprende qué es lo que estos programas están haciendo, puede generar diversas dificultades.

A su vez, trabajar con ellos requiere un equipo computacional que soporte las tareas asignadas, debido a la cantidad de parámetros que requieren y los diversos procesos que realizan al mismo tiempo; cada prueba puede durar varias horas.

En caso de presentarse una situación similar a lo ocurrido en Juan del Grijalva, en la misma zona o en una aledaña como la que existe en el meandro localizado aguas abajo de lo que era Juan del Grijalva. De ser necesario un modelo implicaría hacer usos de datos, como lo son: características de la roca, niveles del nivel freático, datos de precipitación, entre otros; por lo que se requieren estaciones meteorológicas en una de las zonas con mayor precipitación en México, además de más estudios en la zona.

Capítulo 6

Conclusiones

El deslizamiento ocurrido el 04 de Noviembre de 2007 en Juan del Grijalva, Chiapas es uno de los deslizamientos más importantes que se tenga registro en nuestro país debido a: el volumen de material desplazado, el tapón que formó en el río Grijalva y que provocó que las presas alledañas se detuvieran desde el 04 de Noviembre al 18 de Diciembre y los efectos a la población en los estados de Chiapas y Tabasco.

Entre los factores condicionantes se pueden mencionar, las precipitaciones atípicas que ocurrieron en la segunda mitad del mes de Octubre de 2007, que alcanzaron una precipitación acumulada de 2500 mm y 1000 mm del 28 al 30 de Octubre provocado por el frente frío No. 4; un sismo ocurrido el 30 de Octubre de magnitud 4.5 grados en la escala de Richter y la socavación de la base de la ladera provocada por el meándro.

La hipótesis se demuestra, ya que el modelo muestra que el factor detonante fue el abatimiento súbito del espejo de agua conformado por el Río Grijalva, sin embargo, el aumento en el nivel del río dio confinamiento a la ladera lo que permitió que se mantuviera más días estable. Al perder la estabilidad en la base de la ladera provocó que el deslizamiento se suscitara; con esto se demuestra la hipótesis.

Este proceso de remoción en masa se puede clasificar de tipo rotacional en la primer parte, que luego se convirtió en uno de tipo traslacional.

En lo que se refiere a *Plaxis* y *GeoSlope*, son herramientas que han sido creadas especialmente para trabajar con fenómenos de este tipo, por lo cual es viable el uso de ellos para la investigación; teniendo objetivos claros y las herramientas (datos) adecuados para ello.

Bibliografía

- [1] Alcántara Ayala I., Echavrría Luna A., Gutiérrez Martínez C., Domínguez Morales L. e Noriega Rioja I., 2014, *Fasciculos de Inestabilidad de Laderas*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), pags. 3, 5-7.
- [2] Alcántara Ayala I., Murillo García Fran Giselle, 2007, *Procesos de remoción en masa en México, hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional*. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. ISSN 0188-4611, Núm. 66, 2008, pp. 47-64
- [3] Alcántara Ayala I., *Landslides: ¿deslizamientos o movimientos de terreno? Definición, clasificaciones y terminología*. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, número 41, 2000. Octubre de 1999. pp 7-25
- [4] Alva Hurtado J.E., PhD, Mayo 1996. *Terzaghi y la Mecánica de Suelos*, Facultad de Ingeniería Civil, Laboratotio Geotécnico del CISMID, Universidad Nacional de Ingeniería. Página consultada el 16 de Junio de 2016. <http://cismid.uni.edu.pe>
- [5] Anderson M.G., Richards K.S., 1989, *Slope Stability. Geotechnical Engineering and Geomorphology*.
- [6] Arvizu-Lara G., 2009, *El deslizamiento en el Río Grijalva, Chis.*, Proyecto, Academia de Ingeniería, México.
- [7] Askarinejad A., Secchi B., Macek M., Springman S., *Effect of unstable layer depth on the pore pressure distribution, case study of the Slano Blato landslide (Slovenia)*, 2013.

- [8] Audermard M. Frank A., Beck C. y Carrillo P. E., 2011. *Deformaciones gravitatorias Profundas en Laderas a lo Largo de la Falla Activa de Boconó en el Sector Central de Los Andes de Mérica, Venezuela Occidental*, Tribuna del Investigador, Vol. 12, No. 2, pag: 28-36.
- [9] Carrillo Ledesma A., Herrera Revilla I., Yates Smith R., 2008. *Método de Elementos Finitos*, Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, pags: 68-83.
- [10] Díaz Díaz Y.A., López Alvarado E.F., 2008. *Plaxis como Herramienta de Modelación para la Solución de Algunos Problemas Geotécnicos Reales en la Ciudad de Punta Arenas*. Trabajo de tesis, Universidad de Magallanes.
- [11] Dikau, R., Brunsten D., Schrott L., Ibsen M.L., 1996, *Landslide recognition identification, movement and causes*. John Wiley & Sons, 251.
- [12] Dramis F., Sorriso-Valvo M., 1994. *Deep-seated gravitational slope deformations, related landslides and tectonics*. Engineering Geology 38 (1994) 231-234.
- [13] García Casillas A. *Determinación del umbral de precipitación en el deslizamiento de la pintada, Guerrero*, tesis de Maestria, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, 2016.
- [14] Garnica P., Rojas E., Mora R., 2011, *Deslizamiento en San Juan del Grijalva, Chiapas*, Instituto Mexicano del Transporte, Universidad Autónoma de Querétaro & Universidad Autónoma de Tabasco.
- [15] González de Vallejo L., 2006, *Ingeniería Geológica*. Ed. Pearson, Prentice Hall.
- [16] Görog P., Török A., 2007, *Slope stability assessment of weathered clay by using field data and computer modelling: A casestudy from Budapest*. Universidad de Budapest de Tecnología y Economía, Departamento de Construcción, Materiales e Ingeniería Geológica. Budapest Hungría.
- [17] Hernández-Madrigal V.M., Mora-Chaparro J., Garduño Monroy V.H., 2010. *Large block slide at San Juan Grijalva Northwest Chiapas, Mexico*. Landslides, 8:109-115.

- [18] Hinojosa Corona, A., V. M. Rodríguez Moreno, L. Munguia Orozco y O. Meillon Menchaca, 2011, *El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el Río Grijalva, Chiapas, México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 63(1): 15-38 p. (PA: 97903)
- [19] Hjort López A., 2014, *Accidente de la presa Vajont*. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Ciudad Universitaria.
- [20] Informe de la Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, Subsecretaría de Protección Civil del Estado de Chiapas, 2010. *Expediente Juan del Grijalva*. Proporcionado por el Subsecretario de Protección Civil, a cargo MC. Luis Manuel García Moreno, en Marzo 2016.
- [21] Kwon Y. Bang H., *The Finite Element Method Using Matlab*. Ed. CRC Press LLC, segunda edición, 2000, pp. 37-43.
- [22] López Pineda G., 2010. *Mecánica de Suelos y Rocas. Introducción a la Modelización de Redes de Flujo Mediante el uso del programa Seep/W 2007*. Departamento de Mecánica. Universidad de Córdoba.
- [23] López Pineda G., 2010. *Introducción al Uso del programa Slope/W 2007*. Departamento de Mecánica, Área de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras; Universidad de Córdoba. Segunda edición.
- [24] Melo A., Maldonado A., 2009, *Estabilidad de Taludes. Estudio de Caso Canal Juan de Grijalva*, tesis Instituto Politécnico Nacional.
- [25] Mora Ortiz, R.S., Rojas González E., 2011, *Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan Grijalva, Chiapas*. Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. XIII, Núm. 1, 2012, 55-68.
- [26] Potter, P.E., 2007, *Exploring the geology of the Cincinnati/northern Kentucky region*, publicación especial 8, p.128.
- [27] Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Ostucán Chiapas. INEGI: Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1

-
- [28] Suárez J., 1998, *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Colombia, 548.
- [29] Villaseñor Reyes C.I., 2014. *Caracterización Geomecánica y Estudio del Deslizamiento el Campestre, Morelia, Mich.*. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [30] Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The Finite Element Method, Volume 1: The Basis*, quinta edición, por Butterworth-Heinemann 2000, pp. 39-46.
- [31] Ciudades rurales. 26 de Octubre de 2015. Sitio Web: <http://www.ciudadesrurales.chiapas.gob.mx/njg-antecedentes>
- [32] PLAXIS 2010 by Geotechnical Software. Web site: <http://www.plaxis.nl/>
- [33] Geo-Slope 2007. Sitio Web: <http://www.geoslope.com/products/geostudio/pricing>
- [34] Google Earth, consultado el 18 de Febrero 2017. Foto subida Septiembre 06 de 2008 por marlvi. Sitio Web: <http://www.panoramio.com/photo/13888580>
- [35] Google Earth, consultado el 18 de Febrero 2017. Foto subida Septiembre 06 de 2008 por marlvi. Sitio Web: <http://www.panoramio.com/photo/13888440>