



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**“Análisis del peligro por inestabilidad de laderas
en el área de Teziutlán, Puebla”**

TESIS

Para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias en Geología Aplicada

Presenta:

Ing. Felipe Baltazar Martínez

Becaria CONACYT n.º 1083684

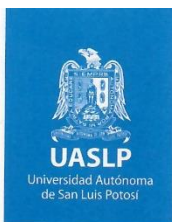
Asesor:

Dr. Lorenzo Borselli

San Luis Potosí, S. L. P.

Agosto de 2022





FACULTAD DE INGENIERÍA

16 de junio de 2022

**ING. FELIPE BALTAZAR MARTÍNEZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Lorenzo Borselli y Lucia Capra Pedol** Asesor y Coasesora de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ciencias en Geología Aplicada**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Análisi del peligro por inestabilidad de laderas en el área de Teziutlán, Puebla.”

1. Introducción
 2. Descripción geográfica y geológica del área del estudio.
 3. Métodos de estabilidad de taludes y simulación de deslizamientos.
 4. Metodología del análisis de peligro por inestabilidad de laderas.
 5. Resultados del análisis de peligro por inestabilidad de laderas.
 6. Discusión.
 7. Conclusiones.
- Bibliografía

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E



DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.
UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE SAN LUIS POTOSI
FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION

PROCESO



www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria - CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

Copia. Archivo
*etn.

“Rumbo al centenario de la autonomía universitaria”



Agradecimientos

Primero que nada, muchas gracias a la Maestría en Ciencias en Geología Aplicada de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, que me dio la oportunidad de crecer ante un grupo de investigadores especializados en el área de las ciencias de la tierra.

Al Dr. Lorenzo Borselli por aceptar ser mi asesor y permitirme trabajar en el Proyecto de Ciencia Básica CB-2016/286764 de CONACYT, gracias por enseñarme a comprender y ver de una manera diferente los procesos de remoción en masa. Y de compartirme todos sus conocimientos y experiencias.

A la Dra. Lucia Capra Pedol por ser mi co-asesora y permitirme realizar una estancia de investigación en el Centro de Geociencias de la UNAM donde tuve la oportunidad de conocer otros investigadores de gran importancia.

A mis compañeros y profesores que apoyaron y acompañaron por estos dos años.

Y lo más importante gracias por todo el apoyo a mi familia, en especial para mis padres ya que sin ustedes no hubiera sido posible realizar la Maestría y a mi novia por apoyarme he impulsarme en crecer más.



Índice

Resumen.....	8
1. Introducción	10
1.1 Hipótesis.....	12
1.2 Objetivos	12
1.3 Justificación	13
2. Descripción geográfica y geológica del área del estudio.	14
2.1 - Antecedentes	14
2.2 - Localización del área de estudio	17
2.3 - Fisiografía	18
2.4 - Geología	18
2.5 - Hidrografía	21
2.6 - Geomorfología	22
3. Métodos de estabilidad de taludes y simulación de deslizamientos.....	24
3.1 Mecanismos de inestabilidad de laderas	24
3.2 Métodos de estabilidad de taludes.....	27
3.2.1 Métodos de equilibrio limite.....	28
3.2.2 Método de Elementos Finitos	33
3.2.3 Métodos de Diferencias Finitas.....	34
3.3 Factor de seguridad.....	35
3.4 Criterio de Mohr-Coulomb.....	36
3.5 Criterio de ruptura de Hoek	39
4. Metodología del análisis de peligro por inestabilidad de laderas.....	41
4.1 Trabajo de campo.....	43
4.1.1 Trabajo de campo en taludes de suelos.....	44
4.1.2 Trabajo de campo en taludes de roca.....	51
4.2 Trabajo de laboratorio	55
4.3 Trabajo de gabinete	56
3.3.1 Análisis de estabilidad de taludes con SSAP.....	56
4.3.2 Simulación de deslizamientos con TITAN 2D	65
4.3.3 Análisis de peligro	71
5. Resultados del análisis de peligro por inestabilidad de laderas	74



5.1 Resultados de pruebas de campo	74
5.2 Resultados de las pruebas de laboratorio.....	79
5.3 Resultados del análisis de estabilidad.....	79
5.4 Resultados de la simulación de deslizamientos	94
5.5 Resultados del análisis de peligro	102
6. Discusión	108
7. Conclusiones	113
Bibliografía.....	117



Índice de figuras

Figura 1: Ubicación de la ciudad de Teziutlán, Puebla.....	10
Figura 2: Flujo de lodo en la colonia La Aurora Teziutlán, Puebla (Capra, L 2003).....	15
Figura 2.1: Precipitación de lluvia de los primeros días de octubre de 1999 (Capra, L 2003).....	15
Figura 2.2: Mapa de ubicación de la ciudad de Teziutlán, Puebla.....	17
Figura 2.3.: Mapa de Litología del municipio de Teziutlán, Puebla.....	19
Figura 2.4: Columna geológico de la carta geológica-minera Teziutlán E14-B15 (Servicio Geológico Mexicano).....	20
Figura 2.5: Mapa de Hidrografía del municipio de Teziutlán, Puebla.....	21
Figura 2.6: Mapa de geomorfología del municipio de Teziutlán, Puebla.....	23
Figura 3.1: Caídos y derrumbes (Fascículo Inestabilidad de laderas, 2008).....	25
Figura 3.2: Flujos (Fascículo Inestabilidad de laderas 2008).....	25
Figura 3.3: Deslizamiento (Fascículo Inestabilidad de laderas 2008).....	26
Figura 3.4: Métodos de análisis de taludes (Modificado de Suarez 2004).....	27
Figura 3.5: Diagrama para determinar el factor fo para el método de Janbú (Suarez, 2004)......	29
Figura 3.6: Fuerzas que actúan sobre las dovelas en el método de Spencer (Suarez, 2004).....	30
Figura 3.7: Diagrama de análisis, método del talud infinito. (Cornforth, 2005 en Suarez, 2004)....	32
Figura 3.8: Malla típica 2D para el análisis de un talud vertical por elementos finitos (Ashford y Sitar, 1994 en Suarez, 2004).....	33
Figura 3.9: Análisis de un talud con un modelo elasto-plástico utilizando diferencias finitas en el código FLAC (Stead et al., 2000 en Suarez, 2004).....	35
Figura 3.10: Criterio de Mohr-Coulomb.....	37
Figura 3.11: Envolventes de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales (a) y de los esfuerzos normal y tangencial (b). tomado de González de Vallejo et al. (2002)......	40
Figura 4.1: Esquema de la metodología de la investigación.....	42
Figura 4.2: Trabajo de campo.....	43
Figura 4.3: Penetrómetro	
Figura 4.4: Puntas de penetrómetro.....	45
Figura 4.5: Ensayo con el penetrómetro en Xoloco	
Figura 4.6: Ensayo con el penetrómetro en La Aurora.....	46
Figura 4.7: Veleta	
Figura 4.8: Puntas de veleta.....	47
Figura 4.9 y 4.10: Pruebas de resistencia al corte con la veleta en La Aurora.....	48
Figura 4.11: TDR-100.....	49
Figura 4.12 y 4.13: Calculo del contenido de humedad de los suelos.....	49
Figura 4.14: Extracción de suelo	
Figura 4.15: Peso de muestra de suelo.....	50
Figura 4.16: Elaboración de hongo	
Figura 4.17: Hongo de punto llamado Xoloco.....	50
Figura 4.18: Hongo de punto llamado La Aurora.....	51
Figura 4.19: Procedimiento para la medición del RQD (Deere, 1956).....	52
Figura 4.20: Calculo del RQD.....	53



Figura 4.21: Calculo del RQD	53
Figura 4.22: Calculo del GSI	54
Figura 4.23: Láser FRITSCH ANALYSETTE 22 NeXT (Tomada de www.fritsch.es).....	55
Figura 4.24: Programa SSAP (Slope Stability Analysis Program)	56
Figura 4.25: Línea piezométrica que intercepta con la pendiente del talud de La Aurora	58
Figura 4.26, 4.27 y 4.28: Grietas de tensión en el talud de La Aurora	59
Figura 4.29: Escenario 1 del talud de La Aurora elaborado en QCAD.....	59
Figura 4.30: Escenario 2 del talud de La Aurora elaborado en QCAD.....	60
Figura 4.31 y 4.32: Talud de La Autopista	61
Figura 4.33: Escenario 1 del talud de La Autopista elaborado en QCAD	62
Figura 4.34: Escenario 2 del talud de La Autopista elaborado en QCAD	62
Figura 4.35: Grietas de tensión en el talud de Xoloco	63
Figura 4.36: Escenario 1 del talud de Xoloco elaborado en QCAD	64
Figura 4.37: Escenario 2 del talud de Xoloco elaborado en QCAD	64
Figura 4.38: Superficie de menor Factor de seguridad	67
Figura 4.39: Ubicación de pilas del talud de la Aurora.....	68
Figura 4.40: Geometría de la pila (Guía de usuario de programa Titan2D)	69
Figura 4.41: Diagrama de Venn de deslizamientos observados y simulados	72
Figura 5.1: Análisis del RQD para el talud de La Autopista	77
Figura 5.2: Análisis del GSI para el talud de La Autopista	78
Figura 5.3: Análisis de estabilidad del talud de La Aurora en condiciones no saturadas	80
Figura 5.4: Mapa de Factor de seguridad local de La Aurora en condiciones no saturadas.....	81
Figura 5.5: Análisis de estabilidad del talud de La Aurora en condiciones saturadas	82
Figura 5.6: Mapa de Factor de seguridad local de La Aurora en condiciones saturadas.....	82
Figura 5.7: Análisis de estabilidad del talud de La Aurora en condiciones saturadas y con medidas de estabilización.....	84
Figura 5.8: Mapa de Factor de seguridad local de La Aurora en condiciones saturadas y con medidas de estabilización	85
Figura 5.9: Análisis de estabilidad del talud de La Autopista en condiciones no saturadas	86
Figura 5.10: Mapa de Factor de seguridad local de La Autopista en condiciones no saturadas	86
Figura 5.11: Análisis de estabilidad del talud de La Autopista en condiciones saturadas	87
Figura 5.12: Mapa de Factor de seguridad local de La Autopista en condiciones saturadas	88
Figura 5.13: Análisis de estabilidad del talud de Xoloco en condiciones no saturadas	89
Figura 5.14: Mapa de Factor de seguridad local de Xoloco en condiciones no saturadas	89
Figura 5.15: Análisis de estabilidad del talud de Xoloco en condiciones saturadas	90
Figura 5.16: Mapa de Factor de seguridad local de Xoloco en condiciones saturadas	91
Figura 5.17: Análisis de estabilidad del talud de Xoloco en condiciones saturadas y con medidas de estabilización.....	93
Figura 5.18: Mapa de Factor de seguridad local de Xoloco en condiciones saturadas y con medidas de estabilización.....	93
Figura 5.19: Distribución y alcance del deslizamiento del evento ocurrió el 5 de octubre de 1999 el La Aurora	95
Figura 5.20: Simulación 1 del talud de La Aurora	96
Figura 5.21: Simulación 2 del talud de La Aurora	97



Figura 5.22: Simulación 3 del talud de La Aurora	97
Figura 5.23: Simulación 4 del talud de La Aurora	98
Figura 5.24: Simulación 5 del talud de La Aurora	98
Figura 5.25: Simulación 6 del talud de La Aurora	99
Figura 5.26: Simulación 7 del talud de La Aurora	99
Figura 5.27: Simulación 8 del talud de La Aurora	100
Figura 5.28: Simulación 9 del talud de La Aurora	100
Figura 5.29: Simulación 10 del talud de La Aurora	101
Figura 5.30: simulación de deslizamientos del talud de La Aurora con el programa Titan2D.....	105
Figura 5.31: Mapa de peligro por inestabilidad de laderas de La Aurora	107
Figura 5.35: Mapa de pendientes de Teziutlán, Puebla	115
Figura 5.36: Mapa de eventos históricos por deslizamientos.....	116
Figura 5.37: Mapa de eventos históricos por deslizamientos.....	116



Resumen

La ciudad de Teziutlán, Puebla ha sido afectada por intensas lluvias debido eventos meteorológicos provocando múltiples procesos de remoción en masa, en particular el 5 de octubre de 1999 ocurrió un flujo de lodo en el panteón de la colonia La Aurora donde ocasiono la muerte de más de 100 personas y casi 300 en la Sierra Nororiental del estado de Puebla.

Debido a esta problemática se propuso una metodología diferente a las existentes que estiman el peligro por inestabilidad de laderas de ocurrencia espacial por deslizamientos mediante un análisis cuantitativo partiendo de un análisis estático y finalizando con un análisis cinemático. Esta metodología pretende ayudar con la predicción de posibles catástrofes por deslizamientos.

La investigación inicio con un análisis estático como el método riguroso de equilibrio limite (LEM), en específico con el método de Morgenstern – Price (1965) con el software SSAP en los taludes de La Aurora, Xoloco y La Autopista en condiciones saturadas y no saturadas. Posteriormente se realizó un análisis de la superficie de menor Factor de seguridad del talud de La Aurora para determinar la geometría y el volumen de la masa de suelos inestable.

El análisis cinemático se realizó con el código Titan2D y en específico con la técnica de Coulomb, la cual consistió en realizar simulaciones de deslizamientos para el talud de La Aurora, las simulaciones se realizaron manteniendo constante el volumen de la masa inestable por lo que solo vario el ángulo de fricción basal para cada simulación.

La parte final de esta investigación consto del cálculo de métricas para el talud de La Aurora las cuales son el coeficiente de similitud de Jaccard (RJ), la relación de porcentaje de longitud (RL), la sensibilidad del modelo (RMS) y la precisión del modelo (RMP) para validar la confiabilidad de las simulaciones con respecto al evento ocurrido el 5 de octubre de 1999 y con ello poder elaborar el mapa de peligro por inestabilidad de laderas para el talud de La Aurora.



Los resultados que se obtuvieron con el análisis estático nos indicaron que el talud de La Aurora y Xoloco se presentaban inestables en condiciones saturadas ya que presentaron Factores de seguridad menores a 1.2 por lo que se realizaron las medidas de estabilización para ambos taludes con el software SSAP.

El análisis de la superficie de menor Factor de seguridad del talud de La Aurora permitió obtener un volumen 7182 m³ de la masa de suelo inestable. Los resultados del análisis cinemático permitieron observar diferentes distribuciones y alcances de posibles deslizamientos en el talud de La Aurora.

Las metodologías que implementan análisis cuantitativos como el análisis estático de estabilidad de taludes a partir del método riguroso de equilibrio limite en específico con el Método de Morgenstern – Price (1965) y un análisis cinemático con el código Titan2D utilizando la técnica de Coulomb para la simulación de deslizamientos permite crear escenarios críticos de deslizamientos.

Estos escenarios permiten elaborar mapas de inestabilidad de laderas que expresan el alcance y la distribución espacial de los deslizamientos a partir de una base físico matemáticas.

Con estos mapas se pueden prevenir y predecir eventos de gran magnitud ya que los análisis se realizan en condiciones muy extremas, como la presencia de agua en todo el talud, lo que nos representa un escenario con gran alcance y distribución.



1. Introducción

En la actualidad la prevención de desastres es un factor muy determinante para la seguridad de la sociedad, por lo que es de gran importancia estudiar su comportamiento de cada uno de ellos ya que en general convivimos con ellos y forman parte de nuestro ambiente natural.

El mundo ha experimentado a lo largo del tiempo diferentes tipos de riesgos geológicos como terremotos, erupciones volcánicas o procesos de remoción en masa como el deslizamiento del 16 de septiembre de 2013 en la comunidad de La Pintada, en el municipio de Atoyac de Álvarez en el estado de Guerrero, donde un solo deslizamiento sepulto prácticamente la mitad de la localidad y provocó la muerte de 71 personas (CENAPRED).

Dentro de la naturaleza los peligros geológicos son muy comunes como por ejemplo los procesos de remoción en masa. Estos se convierten en muy peligrosos cuando se producen en lugares con una alta concentración de población. Este tipo de procesos tienen gran relevancia en la Sierra Nororiental del Estado de Puebla, en específico la ciudad de Teziutlán, Puebla (Figura 1).

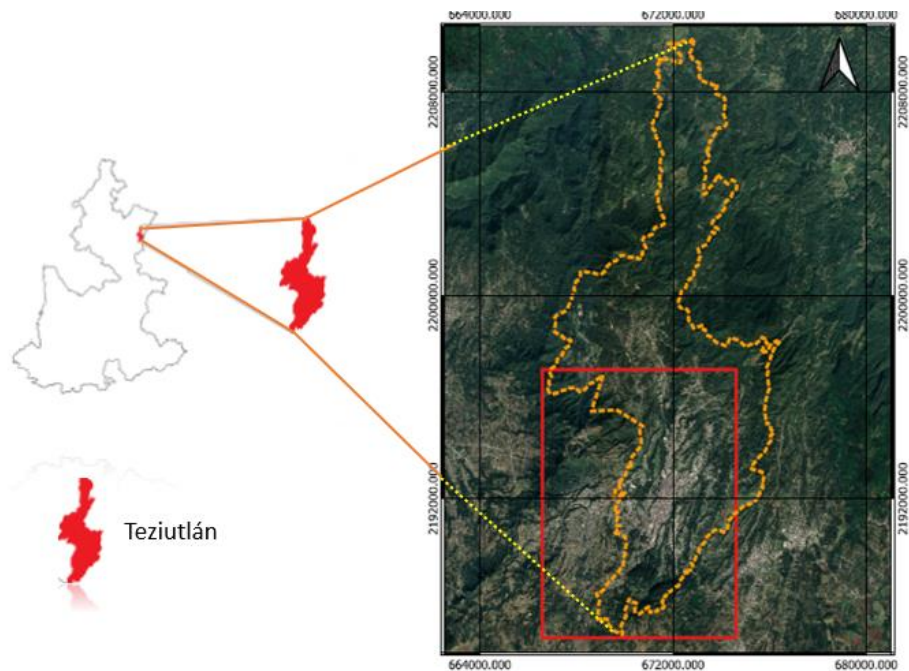


Figura 1: Ubicación de la ciudad de Teziutlán, Puebla.



Los deslizamientos (*Landslides*) consisten en “movimientos de masas de roca, residuos o tierra, hacia abajo de un talud” (Cruden et al., 1991).

Los tipos de inestabilidad de laderas se dividen por sus diferentes mecanismos de inestabilidad. Estos mecanismos sirven a su vez para clasificar los tipos de procesos gravitacionales existentes, de tal modo que se agrupan en cinco categorías principales: caídos o derrumbes, flujos, deslizamientos, expansiones o desplazamientos laterales y movimientos complejos (Alcántara-Ayala et al., 2008).

A su vez, existen diferentes métodos de análisis de estabilidad de taludes que se basan en parámetros físicos-matemáticos que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad. Estos análisis se agrupan en dos categorías, el primer grupo son los métodos determinísticos y el segundo grupo son los métodos no determinísticos (probabilísticos).

Entre los métodos más usados en la estabilidad de taludes se encuentran el Método de Elementos Finitos (FEM) y el Método de Equilibrio Límite (LEM). La metodología propuesta en esta investigación para determinar el Factor de seguridad se basó en el Método de Equilibrio Límite (LEM) con ajustes particulares de acuerdo con las características del área de estudio.

Martínez et al., (2011) menciona que el Método de Equilibrio Límite considera el equilibrio de una fuerza y/o momento de la masa de tierra sobre una superficie potencial de falla. Asume que la masa sobre la potencial superficie de falla es rígida, perfectamente plástica, que la fuerza de corte solo se puede desarrollar en la superficie potencial de falla y que la fuerza de corte disponible se moviliza a la misma velocidad en todos los puntos de la superficie potencial de falla. Como resultado de esto, se obtiene el Factor de seguridad (FS) constante sobre toda la superficie de falla. Es decir, el Método de Equilibrio Límite analiza el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y comparan las fuerzas actuantes con las resistentes que se oponen al movimiento a lo largo de una superficie potencial de falla.



Borselli et al., (2011) hace referencia a que el riesgo de movimientos masivos aumenta por la erosión o excavación que socava el pie de un talud, la pérdida de raíces estabilizadoras debido a la eliminación de vegetación y el aumento de la presión del agua de los poros dentro del perfil del suelo. El aumento de la presión del agua de los poros o una mayor absorción de agua pueden debilitar los enlaces intergranulares, reduciendo la fricción interna y, por lo tanto, disminuyendo la fuerza cohesiva del suelo y, en última instancia, la estabilidad de la pendiente.

En la actualidad se pueden simular el emplazamiento de flujos granular, secos o saturados en agua. El código Titan2D se puede utilizar para definir el alcance de flujos asociado a deslizamiento de rocas, este análisis se realizó con el código Titan2D versión (4.0.0) elaborado por GMFG (Geophysical Mass Flow Group) de la universidad estatal de Nueva York en Buffalo de los Estados Unidos.

1.1 Hipótesis

La evaluación del peligro ante la ocurrencia espacial de los deslizamientos basados en parámetros físico-matemáticos son necesarios para la prevención de eventos de procesos de remoción en masa de gran magnitud, que visualicen las áreas propensas a ser dañadas por un deslizamiento y con ello evitar desastres, principalmente en zonas con alta concentración de población en la ciudad de Teziutlán, Puebla.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Obtener mapas de peligro por inestabilidad de laderas que expresen la ocurrencia espacial de deslizamientos mediante una metodología diferente a partir de una investigación cuantitativa, partiendo de un análisis estático como el método riguroso de equilibrio límite con el software SSAP y un análisis cinemático a partir de la técnica de Coulomb con el código Titan2D. Parte del objetivo de esta investigación es presentar una cartografía que ayude a las autoridades municipales de la ciudad de Teziutlán, Puebla en la toma de decisiones ante el aumento de zonas con población en áreas con peligro por deslizamiento,



Objetivos particulares

1. Determinar el Factor de seguridad de taludes mediante el Método de Equilibrio Limite (LEM), en específico con el método de Morgenstern – Price (1965) con el software SSAP.
2. Realizar simulaciones para reproducir el alcance del flujo generado por el deslizamiento de La Aurora, y eventualmente definir el potencial de inundación en otras porciones de la ladera con el código Titan2D con el método de Coulomb.
3. Elaborar mapas de peligro por inestabilidad de laderas que nos expresen el alcance y la distribución de diferentes escenarios de deslizamientos para el talud de La Aurora.

1.3 Justificación

La localización de la ciudad de Teziutlán y en general de la Sierra Nororiental del estado de Puebla se caracteriza por la presenta de múltiples procesos de remoción en masa, esto debido a su orografía y a la presencia de lluvias desde los meses de junio hasta el mes de octubre.

Por lo que se decidió realizar esta investigación, con la finalidad de aplicar una metodología diferente que nos ayude a determinar el peligro por inestabilidad de taludes que nos exprese la distribución y el alcance de los deslizamientos en áreas específicas a fin de presentar un análisis que ayude con la planificación territorial del municipio y sea determinante en la toma de decisiones ante el crecimiento de las zonas urbanas y con ello prevenir eventos de deslizamientos como lo ocurrido el 5 de octubre de 1999 en la colonia La Aurora.



2. Descripción geográfica y geológica del área del estudio.

La presencia de la Sierra Madre oriental y el Eje Neovolcánico en la Sierra Nororiental del estado de Puebla hacen que la localización del municipio de Teziutlán, Puebla tenga una orografía muy particular de rampas de flujos piroclásticos además de la presencia de valles fluviales muy profundos, estas características aunadas al crecimiento de la población hacen que la ciudad de Teziutlán se caracterice por ser una zona de alto riesgo por deslizamientos en cada temporada de lluvias.

Conocer las características geomorfológicas, la hidrografía, la fisiografía y la litología nos permiten conocer más el comportamiento de los deslizamientos en la ciudad de Teziutlán, también el conocer aquellas investigaciones que se han realizado en taludes del área de estudio nos permitieron conocer las características de los taludes, mientras que los eventos históricos de deslizamientos nos permitieron conocer que tipos de procesos de remoción en masa se presentan en el municipio además de conocer su distribución y alcance.

2.1 - Antecedentes

El municipio de Teziutlán, Puebla ha presentado a lo largo de la historia una serie de eventos por inestabilidad de laderas provocados principalmente por intensas lluvias, como el evento más significativo ocurrido el 5 de octubre 1999 en la colonia La Aurora (Figura 2).

El deslizamiento de la colonia La Aurora en 1999 provocó la muerte de aproximadamente 150 personas a causa de las fuertes lluvias asociadas con la depresión tropical número 11 (Capra et al., 2003) que se mantuvo semiestacionaria debido a que el frente frío número 5 proveniente del noreste del país la mantuvo frenada (Lugo-Hubp et al., 2005) provocando precipitaciones extraordinarias durante los días 4 (300 mm) y 5 (360 mm) de octubre de 1999 (Flores-Lorenzo et al., 2002), en los primeros 10 días del mes de octubre del año de 1999 la precipitación alcanzó los 1200 mm (Vásquez-Conde et al., 2001), la media mensual para la región del mes de octubre es de 183 mm (Morales Domínguez et al., 2016)



y el promedio anual de la región del golfo es de 1229 mm (Mendoza y Noriega, 2002). Toda el área de Teziutlán y alguna porción de la Sierra Norte fueron afectadas por varios movimientos de masas de suelos, que difieren en magnitud y tipo de flujo (Lugo-Hubp et al., 2001).



Figura 2: Flujo de lodo en la colonia La Aurora Teziutlán, Puebla (Capra, L 2003)

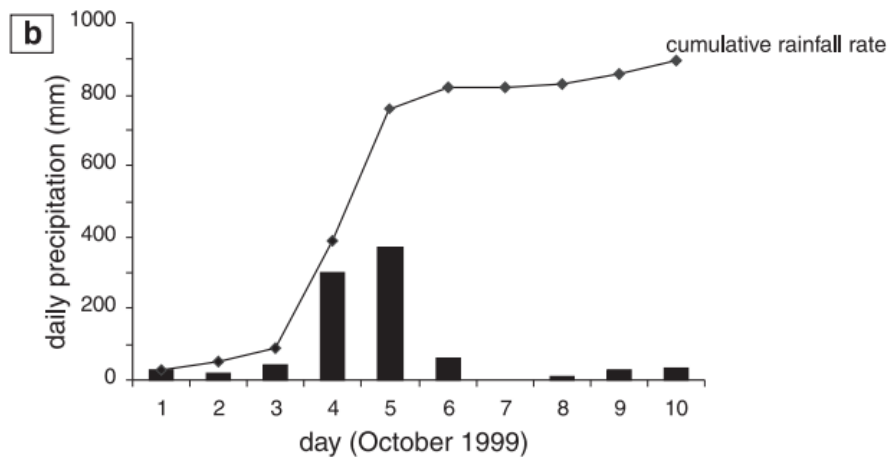


Figura 2.1: Precipitación de lluvia de los primeros días de octubre de 1999 (Capra, L 2003)



Los estudios previos de inventarios de deslizamientos son de gran importancia ya que nos ayudaron a conocer la distribución espacial de los deslizamientos. Murillo-García et al., (2017) elaboró un mapa de inventario de deslizamientos durante el periodo de 1942–2015 para la ciudad de Teziutlán, Puebla basado en el reconocimiento e identificación de campo y el análisis e interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales. El inventario está compuesto por 662 deslizamientos de tierra, en particular en el año de 1999 se identificaron 298 deslizamientos que ocurrieron en el evento del 5 octubre 1999.

Las características geomorfológicas de la zona sirven para entender la ocurrencia de los deslizamientos por lo que Flores-Lorenzo et al., (2002) observó que los procesos de remoción en masa registrados por la secretaria de Protección Civil de Puebla, ocurridos por el evento en octubre de 1999 en la ciudad de Teziutlán se registraron en materiales volcánicos (flujos piroclásticos del plioceno y cuaternario), estos se localizaron en morfologías de rampa y taludes.

Los sistemas de alerta temprana en los riesgos geológicos son de gran relevancia para la sociedad, así como el monitoreo de deslizamientos con instrumentación específica. Equipos de monitoreo como piezómetros y tensiómetros se instalaron por parte del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), además de una estación meteorológica instalada por personal del Centro de Ciencias Atmosféricas de la UNAM en la colonia de San Andrés Teziutlán, Puebla. Garnica-Peña et al., (2014)

A más de 20 años del desastre ocurrido en la Colonia La Aurora en la ciudad de Teziutlán, Puebla, muchas instituciones académicas y gubernamentales han analizado las causas del fenómeno. Noriega et al., (2012) realizó una simulación del deslizamiento de materiales en la colonia La Aurora en Teziutlán con el cálculo de Automatas Celulares (AC), obteniendo escenarios posibles de riesgo en la zona.



2.2 - Localización del área de estudio

La ciudad de Teziutlán se encuentra localizada en la Sierra Nororiental del estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas son los paralelos $19^{\circ} 47' 06''$ y $19^{\circ} 58' 12''$ de latitud norte y $97^{\circ} 18' 54''$ y $97^{\circ} 23' 18''$ de la longitud occidental como se observa en la figura 2.2. El Municipio de Teziutlán tiene colindancias al norte con los municipios de Hueyapan y Hueytamalco, al este con Xiutetelco y Xalacingo, al sur con Atempán y al oeste con Yahonahuac.

El municipio de Teziutlán tiene localidades tanto rurales como urbanas, entre las localidades más importantes del municipio son Acateno, Atoluca, Aire libre, San Sebastián, Xoloateno, San Diego, Xoloco y Teziutlán, esta última la de mayor concentración de número de habitantes y la de mayor interés en este análisis.

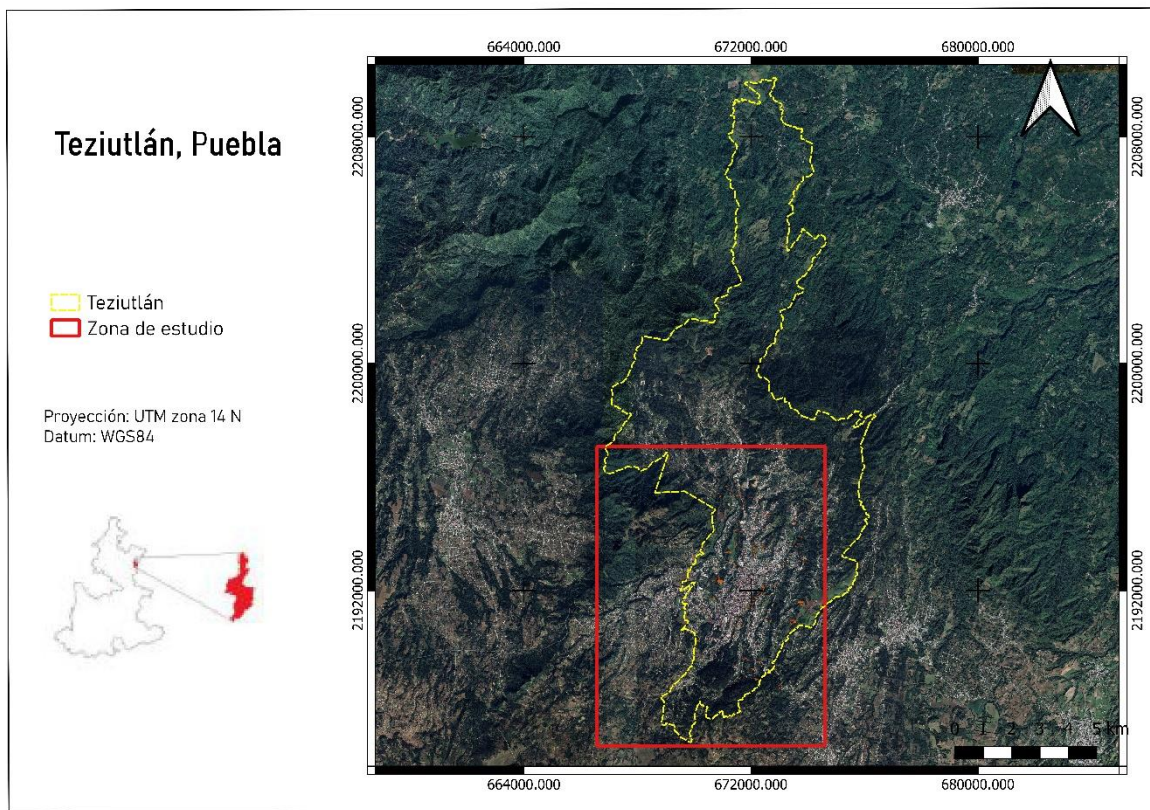


Figura 2.2: Mapa de ubicación de la ciudad de Teziutlán, Puebla



Las principales vías de acceso para el municipio de Teziutlán son la carretera federal No. 129 Teziutlán – Tlapacoyan y la carretera federal No. 131 Teziutlán – Perote, además de la autopista Teziutlán – Puebla.

2.3 - Fisiografía

El área de estudio se localiza en los límites de la Sierra Madre Oriental y el Eje Volcánico, en específico en la subprovincia de Lagos y volcanes de Anáhuac. Debido a lo anterior el municipio presenta una morfología de tipo montañoso y escarpado en donde se encuentran la mayoría de las poblaciones asentadas, principalmente en laderas abruptas.

Las pendientes muy pronunciadas que se presentan en unas zonas son debido a los cerros que se encuentran dentro del municipio entre los que destacan el cerro del Tesivo, El Comal, La Ventilla, Las Cuevas, La Bandera y Ozuma Toxcaixtac. Además, al sur del municipio aproximadamente a 18 kilómetros se encuentra la caldera volcánica de los Humeros.

2.4 - Geología

La morfología compleja que presenta el municipio de Teziutlán es debido a que se encuentra entre los límites de la Sierra Madre Oriental y Eje Volcánico, esto permite observar diferentes tipos de rocas que se encuentran principalmente cubiertas por depósitos volcánicos provenientes de la caldera volcánica de los Humeros al sur del municipio.

La presencia de las provincias fisiográficas en el municipio muestra una transición de rocas del norte al sur. La parte norte del municipio está constituida por rocas sedimentarias del Mesozoico donde se presenta la Sierra Madre Oriental. Mientras que al sur las rocas que se observan se encuentran directamente relacionadas con la caldera volcánica de los Humeros perteneciente a el Eje Volcánico.

El municipio de Teziutlán presenta varias formaciones geológicas de diferentes periodos, las rocas más antiguas que se encuentran en el municipio son el esquisto de la formación Chililis que se originaron con el depósito de sedimentos clástico que posteriormente tuvieron un metamorfismo de bajo grado y por consecuencia se



originó el esquisto que se observa en la localidad de Aire Libre. Los depósitos regionales principalmente de tipo fluvial se observan en algunas elevaciones del municipio en donde pueden observar areniscas, conglomerados y limolitas de la formación Huizachal y formación Cahuastas.

Las rocas volcánicas más antiguas son las lavas andesíticas de la formación Teziutlán (1.5 millones de años) que pueden observarse en algunos cortes de carretera o en el fondo de los actuales valles fluviales. Quizás los tipos de rocas más importantes en Teziutlán sean los depósitos volcánicos de la Ignimbrita Xaltipan, estos depósitos tienen una textura arenosa con presencia de fragmentos de pómez y son los que conforman la rampa de piroclastos que cubrió en gran parte a las rocas sedimentarias y metamórficas (Alcántara et al., 2017).

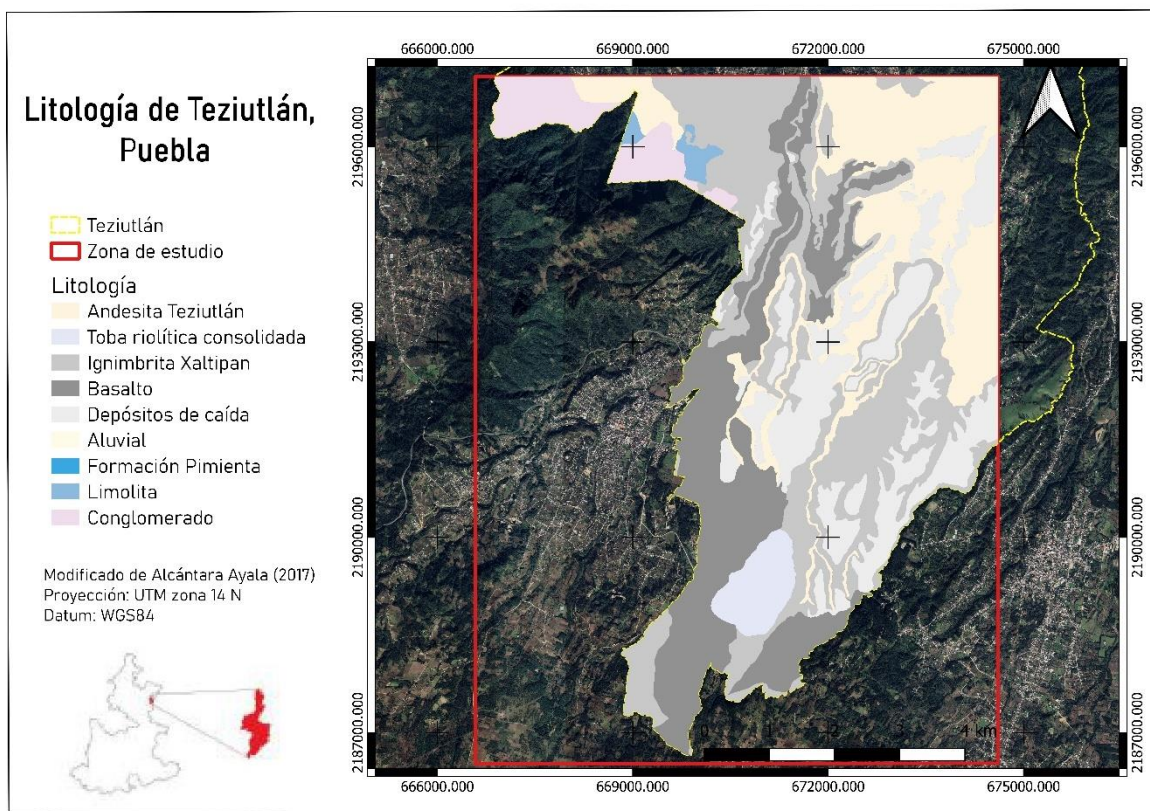


Figura 2.3: Mapa de Litología del municipio de Teziutlán, Puebla



Los actuales ríos han erosionado los depósitos de Ignimbrita formando valles profundos con laderas escarpadas. Finalmente, depósitos volcánicos de caída, conformados por ceniza, lapilli y pómez, cubren en algunas zonas los depósitos de Ignimbrita y corresponden a la actividad volcánica más reciente de la Caldera de los Humeros (Alcántara et al., 2017).

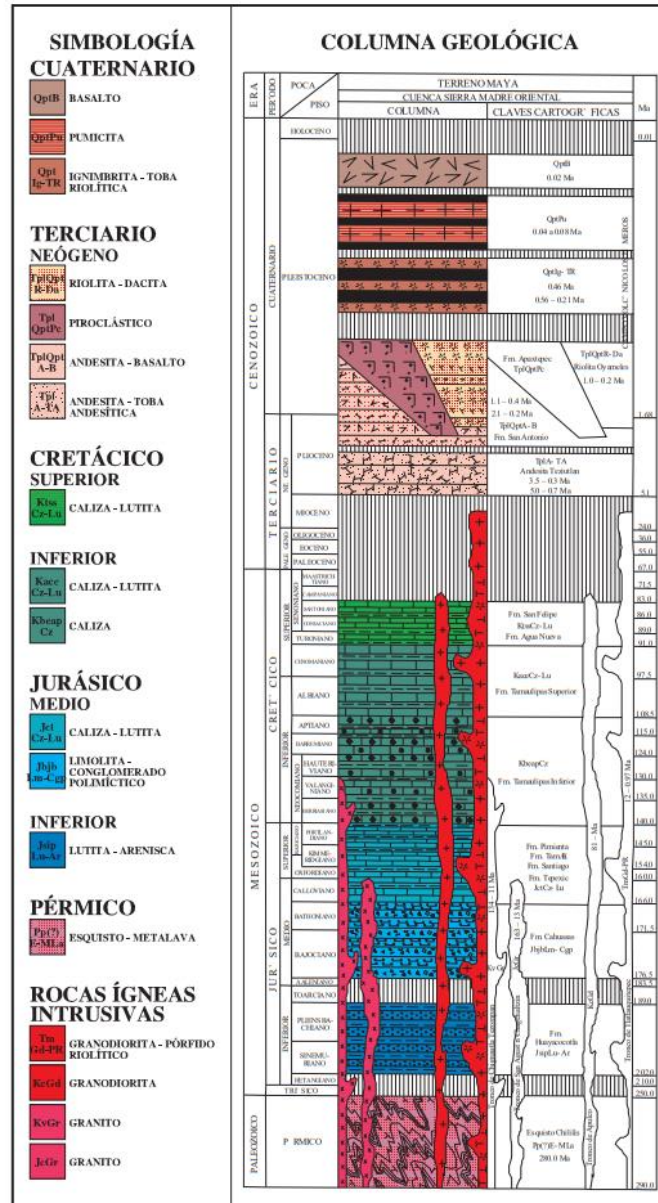


Figura 2.4: Columna geológica de la carta geológica-minera Teziutlán E14-B15 (Servicio Geológico Mexicano)



2.5 - Hidrografía

La mayor parte del territorio de la ciudad de Teziutlán se encuentra en la región Hidrológica RH-27 Tuxpan – Nautla, la parte poniente del municipio forma parte de la cuenca del Río Tecolutla y la parte oriente del municipio forma parte de la cuenca del Río Nautla.

Las principales corrientes de agua que se encuentran en el municipio tienen una dirección de SW – NE y se presentan con una disposición paralela entre ellos.

Los arroyos perenes e intermitentes más importantes del municipio son el Xoloat, María de la Torre, Xatahuatl y Ateta. La dirección de las corrientes de agua nos puede indicar la presencia de lineamientos o zonas débiles en el área de estudio.

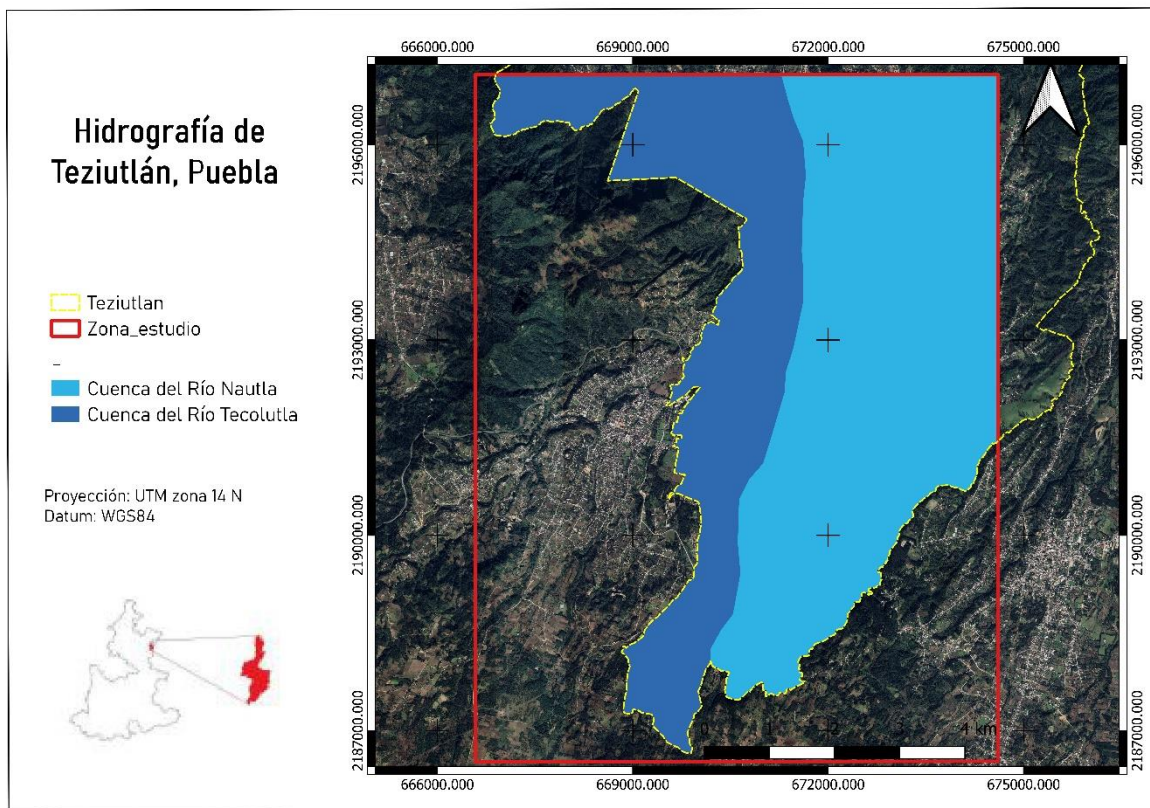


Figura 2.5: Mapa de Hidrografía del municipio de Teziutlán, Puebla



2.6 Geomorfología

De acuerdo con las características topográficas, la zona en estudio presenta una morfología de tipo montañoso y escarpado, que incluye cerros con elevaciones de hasta 2,300 msnm (Sierra de Teziutlán) y algunas planicies o valles. En estos sitios existen comunidades y poblaciones que están asentadas en laderas muy abruptas o en zonas de inundación próximas a ríos y corrientes de agua.

Las mayores altitudes se ubican al Sur del municipio, descendiendo constante de sur a norte en forma de rampa, sin embargo, la parte norte contrasta con presencia elevaciones montañosas, destacándose los cerros de Ozuma Toxcaixtac, Tesivio, La Bandera, Las Cuevas y La Ventilla (PMDUS, 2018-2021).

El municipio de Teziutlán se localiza en la zona de transición de dos unidades fisiográficas. En la parte sur, se presenta el Cinturón Volcánico Transversal, influenciado por la caldera de Los Húmeros, mientras que en la parte norte corresponde a la Sierra Madre Oriental, constituida por rocas sedimentarias del Mesozoico plegadas en el Eoceno (Flores-Lorenzo et al., 2002).

El análisis de las características geológicas representadas por la litología y las estructuras geológicas del municipio permiten entender los procesos que dieron origen al relieve actual y su secuencia. Además, en la zona predomina la presencia de flujos piroclásticos de pómez provenientes de la caldera de Los Humeros, material de origen volcánico del Cuaternario que ha originado la formación de suelos residuales, ya que se ha creado una descomposición de estos materiales poco consolidados con alto contenido de arcilla (Flores-Lorenzo et al., 2002).

En cuanto a la morfogénesis, Flores-Lorenzo et al., (2002) identificaron en Teziutlán diferentes unidades morfogenéticas y su influencia en la ocurrencia de procesos gravitacionales de acuerdo con sus características geológicas, elementos morfológicos y análisis morfométricos. El término morfogénesis está relacionado al



origen de las formas del relieve terrestre, resultado de la interacción de procesos endógenos y exógenos.

De la relación relieve-geología se reconocieron como los tipos de morfología predominante tres grandes unidades: relieve endógeno, relieve estructural-denudativo y relieve exógeno erosivo. Mientras que, en función de las curvas de nivel, se distinguieron laderas montañosas, rampas y valles.

La unidad denominada Rampa Piroclástica ocupa una amplia extensión en la zona de estudio, la cual tiene un descenso suave (5°) de sur a norte y es donde se concentraron la mayor parte de los procesos gravitacionales que ocurrieron en octubre de 1999, debido principalmente a la intercalación de materiales ignimbríticos y suelos arcillosos, lo que provocó una diferencia textural entre los materiales originando una permeabilidad variable y concentración de humedad.

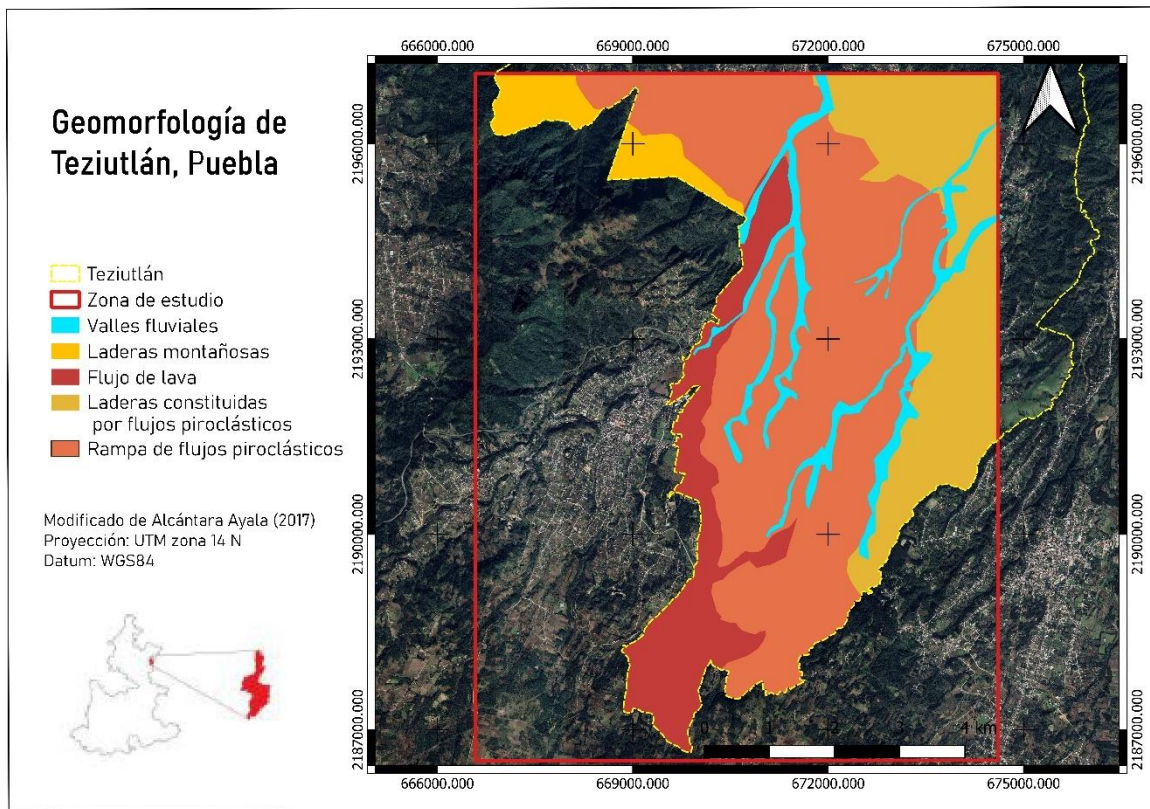


Figura 2.6: Mapa de geomorfología del municipio de Teziutlán, Puebla



3. Métodos de estabilidad de taludes y simulación de deslizamientos

Los riesgos geológicos son muy comunes, los más importantes son las erupciones volcánicas, sismos, deslizamientos de tierra, entre otros. La inestabilidad de laderas está determinada, tanto en su origen como en su desarrollo, por diferentes mecanismos. Estos mecanismos sirven a su vez para clasificar los tipos de procesos de ladera existentes.

3.1 Mecanismos de inestabilidad de laderas

Los mecanismos de inestabilidad describen principalmente el comportamiento de la masa de suelo deslizada. De acuerdo con el fascículo de Inestabilidad de laderas (2008) “La inestabilidad de laderas está determinada, tanto en su origen como en su desarrollo, por diferentes mecanismos. De tal modo que se agrupan en cuatro categorías principales y una derivada de la combinación de éstas. Los mecanismos básicos de inestabilidad son los caídos o derrumbes, flujos, deslizamientos y las expansiones o desplazamientos laterales”

Caídos o derrumbes

De acuerdo con CENAPRED (2008) Los caídos o derrumbes (Figura 3.1) “son movimientos repentinos de suelos y fragmentos aislados de rocas que se originan en pendientes abruptas y acantilados, por lo que el movimiento es prácticamente de caída libre, rodando y rebotando”.



Figura 3.1: Caídos y derrumbes (Fascículo Inestabilidad de laderas, 2008)

Flujos

Uno de los mecanismos de inestabilidad de laderas que generan más daños por su alcance son los flujos y de acuerdo con CENAPRED (2008) son “Movimientos de suelos y / o fragmentos de rocas ladera abajo, en donde sus partículas, granos o fragmentos tienen movimientos relativos dentro de la masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla” (Figura 3.2). Los flujos más importantes son flujos de lodos, flujos de detritos y lahares.

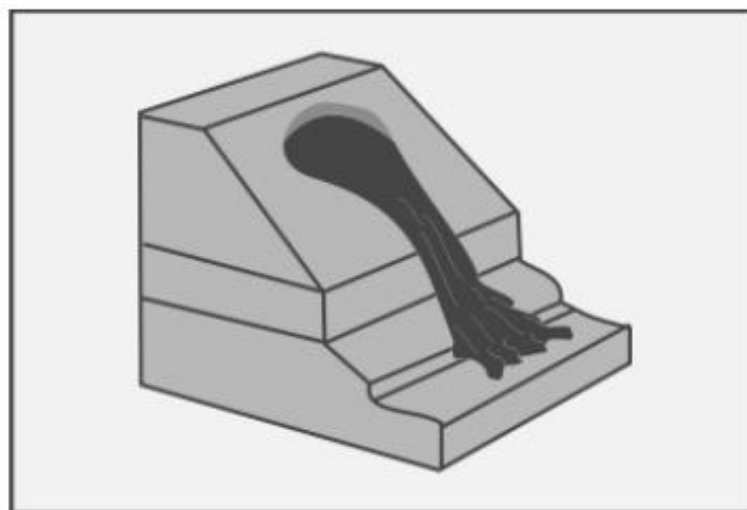


Figura 3.2: Flujos (Fascículo Inestabilidad de laderas 2008)



Deslizamientos

Los deslizamientos son tal vez el mecanismo de inestabilidad de laderas más conocido en por la sociedad y de acuerdo con CENAPRED son “Movimientos de una masa de materiales térreos pendiente abajo, delimitada por una o varias superficies, planas o cóncavas, sobre las que se desliza el material inestable” (Figura 3.3). Dependiendo de la geometría de la superficie crítica se dividen en deslizamientos rotacionales (Superficie cóncava) y deslizamientos traslacionales (Superficie plana).

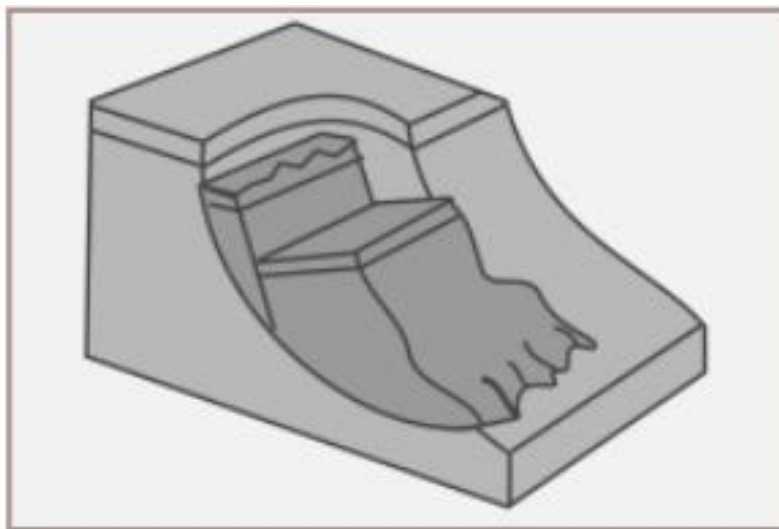


Figura 3.3: Deslizamiento (Fascículo Inestabilidad de laderas 2008)

Indicadores o indicios de inestabilidad de laderas

Los indicadores nos permiten prevenir deslizamientos ya que se pueden manifestar de diferentes formas como postes inclinados, muros, estructuras metálicas o arboles también se manifiestan con grietas en suelo y en paredes, abultamientos, subsidencia en carreteras o caminos, otras manifestaciones son la presencia de tubos de agua rotos o la dificultad del cierre de ventanas o puertas.



3.2 Métodos de estabilidad de taludes

El análisis matemático de los taludes tiene como objetivo determinar las condiciones de estabilidad del talud, determinando la susceptibilidad a diferentes mecanismos de activación (efecto de las lluvias, sismos, etc.), así como proponer diferentes opciones de remediación y diseño óptimo en términos de seguridad, confiabilidad y economía.

Existen muchos métodos para realizar la modelación matemática de la estabilidad de taludes (Figura 3.4). La elección del método dependerá del objetivo del análisis y de los resultados que se deseen obtener.

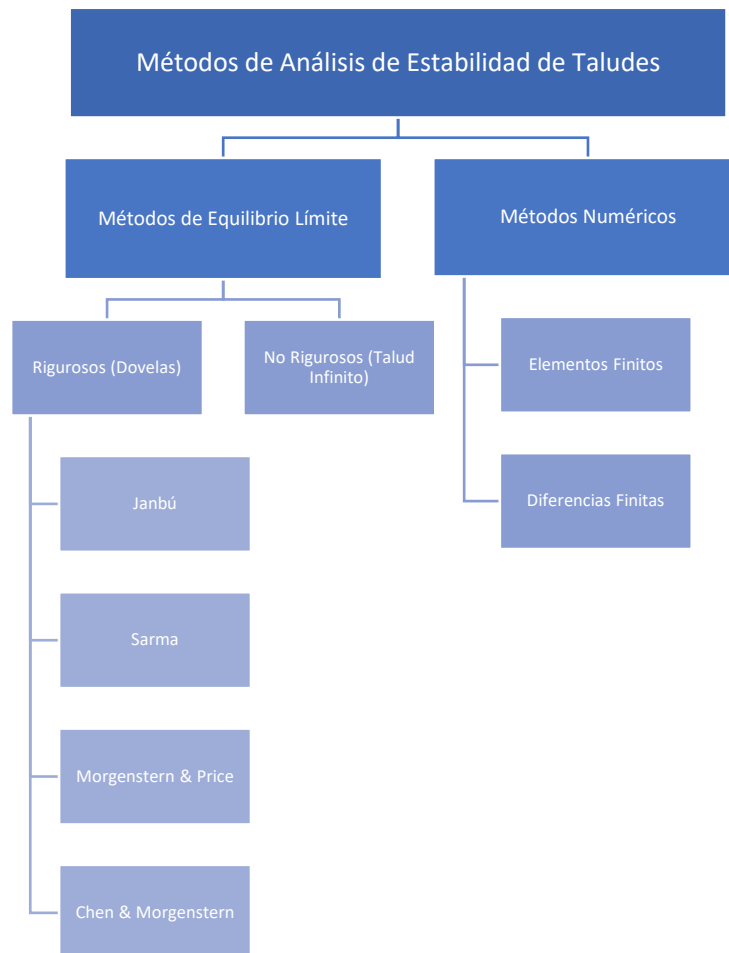


Figura 3.4: Métodos de análisis de taludes (Modificado de Suarez 2004)



3.2.1 Métodos de equilibrio límite (métodos rigurosos y no rigurosos)

Los métodos de equilibrio límite consisten en determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla o deslizamiento. González de Vallejo et al., (2002)

La mayoría de los métodos de límite de equilibrio tienen en común, la comparación de las fuerzas o momentos resistentes y actuantes sobre una determinada superficie de falla.

Existen diversos factores que afectan la estabilidad de los taludes. Los parámetros utilizados en los análisis de equilibrio límite son:

- Geometría del talud
- Parámetros geológicos
- Presencia de grietas de tensión
- Cargas dinámicas por acción de los sismos
- Flujo de agua
- Propiedades de resistencia
- Peso unitario de los suelos, etc.

Sin embargo, no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático de equilibrio límite.

En general el método de equilibrio límite (LEM) es una metodología computacional para evaluar el factor de seguridad Duncan et al., (1996)

Métodos rigurosos (dovelas) (Janbú, Spencer, Sarma, Morgenstern & Price, Chen & Morgestern)

En los métodos con fallas curvas, la masa de la parte superior de la superficie de falla se suele dividir en una serie de tajadas o dovelas verticales. El número de dovelas depende de la geometría del talud y de la precisión requerida para el análisis. Entre mayor sea el número de éstas, habrá mayor precisión en los resultados.



Existen diversos métodos que utilizan dovelas, pero poseen diferencias, especialmente en lo referente a las fuerzas que actúan sobre las paredes laterales de las tajadas.

El SSAP utiliza solo métodos de equilibrio límite (LEM) rigurosos para determinar el cálculo del Factor de seguridad codificado en un marco computacional derivado de Zhu et al., (2005).

Método de Janbú

Este método asume a las fuerzas entre dovelas como horizontales y no toma en cuenta las fuerzas de cortante derivado de Janbú (1954).

Janbú considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares y establece un factor de corrección f_0 , que depende de la curvatura de la superficie de falla (Figura 3.5). Para determinar la estabilidad de un talud, Janbú considera el cálculo de un FS, el cual satisface el equilibrio de esfuerzos, pero no el equilibrio de momentos

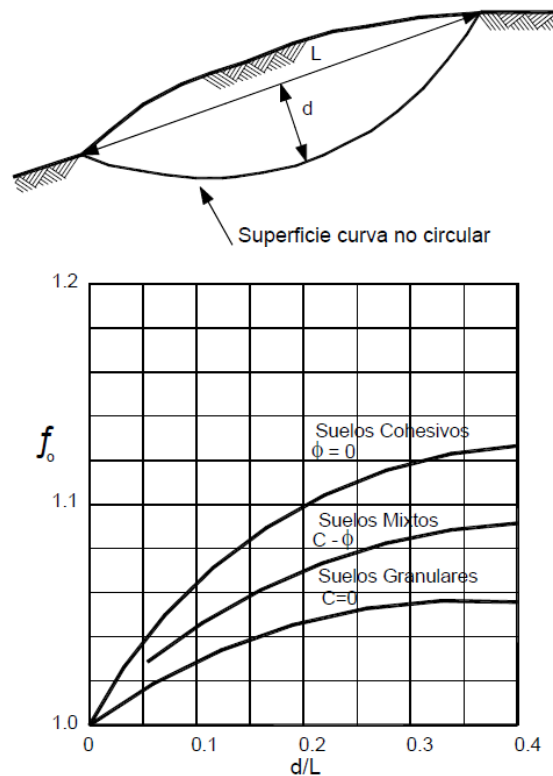


Figura 3.5: Diagrama para determinar el factor f_0 para el método de Janbú (Suarez, 2004).



Método de Spencer

La técnica desarrollada por Spencer (1967) se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas con las otras, es decir tienen el mismo ángulo de inclinación

El método de Spencer es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos.

El procedimiento plantea dos ecuaciones una de equilibrio de fuerzas y otra de equilibrio de momentos, las cuales se resuelven para calcular los factores de seguridad F y los ángulos de inclinación de las fuerzas entre dovelas θ (Figura 3.6). Para resolver las ecuaciones F y θ , se utiliza un sistema de ensayo y error donde se asumen los valores de estos factores (en forma repetitiva) hasta que se alcanza un nivel aceptable de error. Una vez se obtienen los valores de F y θ se calculan las demás fuerzas sobre las dovelas individuales.

El método de Spencer se considera muy preciso y aplicable para casi todo tipo de geometría de talud y perfiles de suelo.

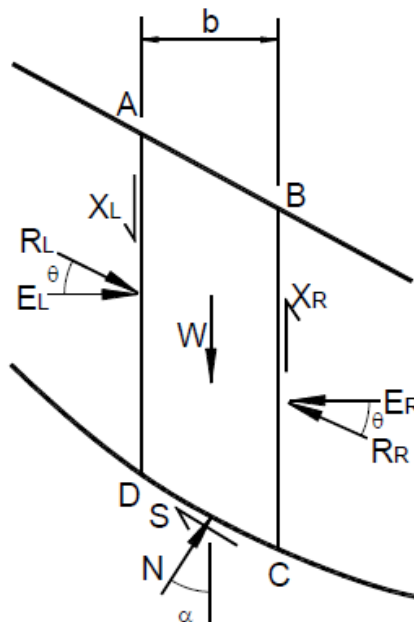


Figura 3.6: Fuerzas que actúan sobre las dovelas en el método de Spencer (Suarez, 2004)



Método de Sarma

Este método considera que el coeficiente sísmico y el factor de seguridad son desconocidos. Se asume entonces, un factor de seguridad (generalmente 1.0) y se encuentra cuál es el coeficiente sísmico requerido para que se obtenga este factor de seguridad derivado de Sarma et al., (2006).

En la técnica de Sarma, la fuerza cortante entre tajadas es una relación con la resistencia al cortante.

Método de Morgenstern & Price

Este método asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas. La función puede considerarse constante, como en el caso del método de Spencer, o puede considerarse otro tipo de función.

El método de Morgenstern y Price, al igual que el de Spencer, es un método muy preciso, prácticamente aplicable a todas las geometrías y perfiles de suelo derivado de Morgenstern et al., (1965).

El hecho de suponer una determinada función para determinar los valores de las fuerzas entre dovelas, lo hace un método más riguroso que el de Spencer, sin embargo, hay muy poca diferencia entre sus resultados.

Método de Chen & Morgenstern

El método de Chen y Morgenstern (1983) es una refinación del método de Morgenstern y Price e intenta mejorar los estados de esfuerzos en las puntas de la superficie de falla derivado de Chen et al., (1992).

Además, Chen y Morgenstern recomiendan las fuerzas entre partículas, deben ser paralelas al talud, en los extremos de la superficie de falla.

Métodos no rigurosos (Talud Infinito)

En los deslizamientos de gran magnitud, la mayor parte de la masa deslizada se mueve aproximadamente en forma paralela a la superficie del terreno. Si la longitud relativa del deslizamiento es muy grande en relación con su espesor, se presenta



una falla paralela a la superficie del talud, por lo que estos deslizamientos se pueden analizar suponiendo un talud infinito.

El principal uso del método del talud infinito es la elaboración de planos de amenaza a los deslizamientos mediante el uso de SIG. Además, es un método muy preciso para el análisis de los suelos estratificados, con falla paralela a la superficie del terreno.

Para un talud uniforme y relativamente largo, en el cual el mecanismo de falla esperado no es muy profundo, los efectos de borde son despreciables y el factor de seguridad puede calcularse (para un talud infinito) a partir de una unidad de área con base en el criterio Mohr - Coulomb.

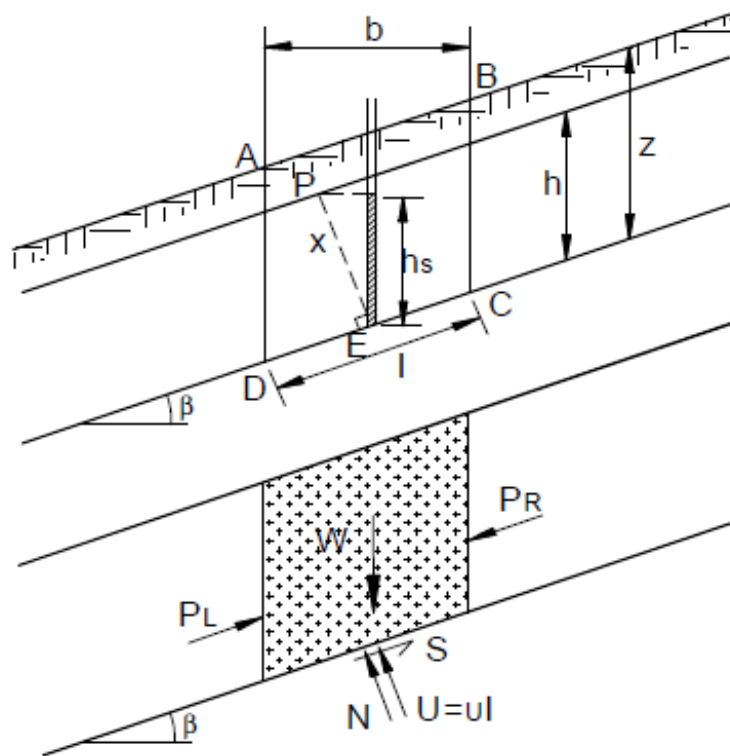


Figura 3.7: Diagrama de análisis, método del talud infinito. (Cornforth, 2005 en Suarez, 2004)



La técnica de elementos finitos puede emplearse para estudiar las diversas posibilidades de falla en un talud o para encontrar los efectos de varios sistemas de estabilización.

En la estabilidad de taludes, los métodos de elementos finitos en 3-D, permiten analizar condiciones que los métodos de equilibrio límite no permiten, por lo que son en la actualidad los métodos más utilizados debido a su versatilidad.

3.2.3 Métodos de Diferencias Finitas

En estos métodos, los materiales son representados por zonas que forman una malla de acuerdo con la geometría (Figura 3.9) y se puede seleccionar una variedad de relaciones esfuerzo/deformación (FLAC 1998). El método se basa en el esquema de cálculo de "Lagrange", el cual permite modelar deformaciones de gran escala y el colapso de los materiales.

El método de diferencias finitas es poco utilizado en la estabilidad de taludes, con excepción de los análisis de flujo, consolidación y transporte de contaminantes. Sin embargo, el método puede manejarse en reemplazo o como complemento del método de elementos finitos. El método de diferencias finitas tiene la ventaja de que no requiere la solución de gran cantidad de ecuaciones y es más fácil introducir modelos especiales de suelo.

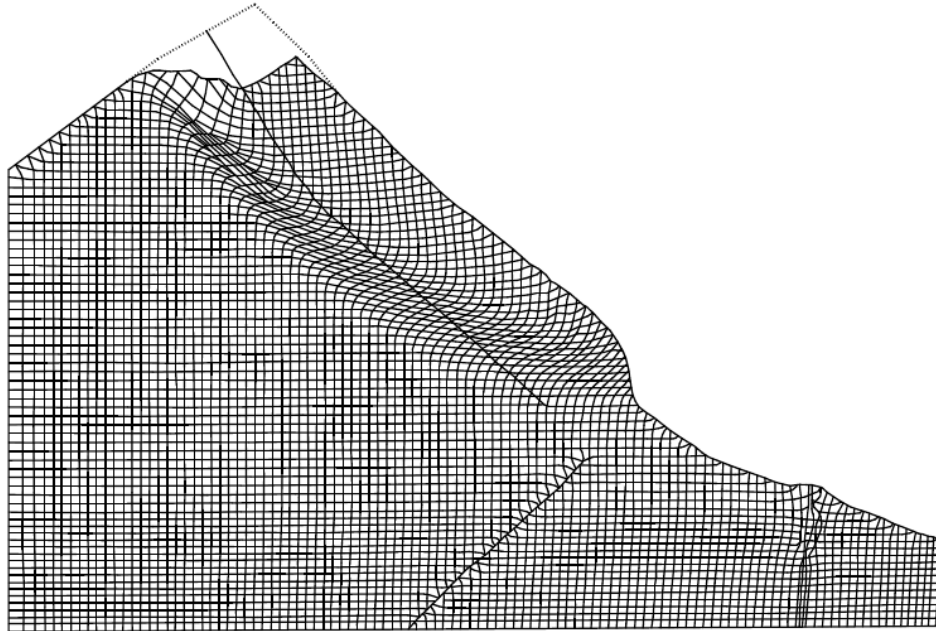


Figura 3.9: Análisis de un talud con un modelo elasto-plástico utilizando diferencias finitas en el código FLAC (Stead et al., 2000 en Suarez, 2004)

En la Tabla 1 se comparan a grandes rasgos los Métodos de Elementos Finitos y Diferencias Finitas.

MÉTODO	CARACTERÍSTICAS	UTILIZACIÓN
Elementos Finitos (FEM)	Se asume una malla de elementos con sus respectivos nodos y las propiedades elastoplásticas de los materiales.	Se aplica a taludes que puedan considerarse como masas continuas sin bloques.
Diferencias Finitas(FDM)	Se elabora una malla con una variedad de relación esfuerzo-deformación.	Se utiliza para modelar masa rocosa con un alto grado de fracturación.

Tabla 1: Principales métodos numéricos para la estabilidad de taludes (Suarez, 2004)

3.3 Factor de seguridad

Representa un indicador de amenaza para que un talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del



material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$F.S = \frac{\textit{Resistencia al corte disponible}}{\textit{Esfuerzo al corte actuante}}$$

Ecuación 1

O bien en superficies circulares:

$$F.S = \frac{\textit{Momento resistente disponible}}{\textit{Momento actuante}}$$

Ecuación 2

En el caso de los métodos de dovelas se calcula el equilibrio de cada bloque por separado y posteriormente se calcula el Factor de Seguridad con la sumatoria de fuerzas o momentos.

$$F.S = \frac{\sum \textit{Resistencias al corte disponibles}}{\sum \textit{Esfuerzos al corte}}$$

Ecuación 3

$$F.S = \frac{\sum \textit{Momentos resistentes disponibles}}{\sum \textit{Momentos actuantes}}$$

Ecuación 4

3.4 Criterio de Mohr-Coulomb

El criterio de rotura de Mohr- Coulomb expresa la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado triaxial de tensiones, obteniéndose la relación entre los esfuerzos normal y tangencial actuantes en el momento de la rotura (González de Vallejo et al, 2004). Es un criterio lineal que se representa mediante la siguiente expresión matemática:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi$$

Ecuación 4



donde:

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

ϕ = ángulo de fricción

τ = tensión tangencial que actúa en el plano de rotura = presión de poro

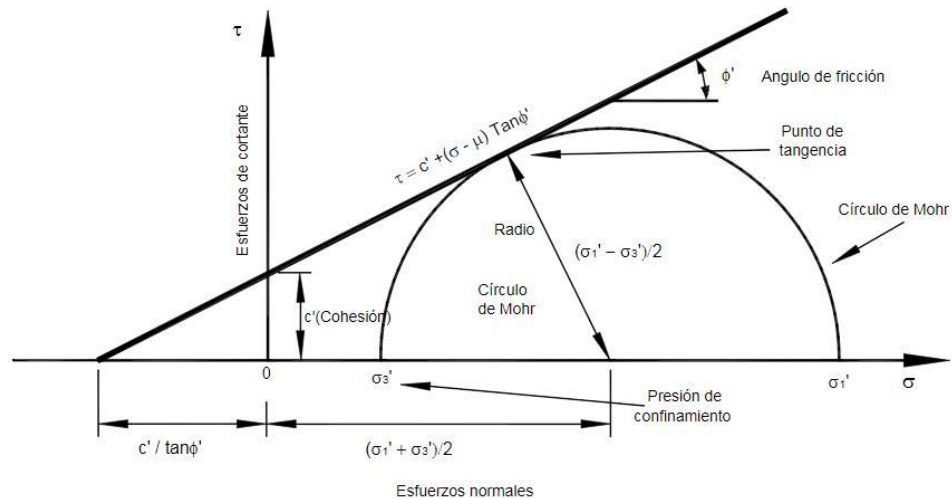


Figura 3.10: Criterio de Mohr-Coulomb

En la Figura 3.10 se muestra que la superficie de rotura es la ecuación de la recta tangente a todos los círculos de falla, es decir, el dominio elástico viene representado por la envolvente de Mohr. Por lo tanto, los puntos del macizo rocoso con estado tensional por debajo de dicha envolvente están en un estado elástico, mientras que los que están situado encima se encuentran en rotura.

El círculo de Mohr es empleado para describir la resistencia al cortante de los suelos, utilizando la envolvente de falla Mohr – Coulomb, lo cual equivale a que una combinación crítica de esfuerzos se ha alcanzado.

Pese a que el comportamiento de las rocas en ensayos triaxiales no concuerda con un modelo lineal, el criterio de Mohr-Coulomb se sigue utilizando mucho por su sencillez. Determinar las resistencias de los materiales de un talud es esencial para un análisis de estabilidad representativo de sus condiciones reales. La forma más común de obtener los parámetros de resistencia al corte es mediante ensayos de laboratorio, pero también es posible a través de ensayos in situ.



Por lo general, las envolventes de falla para suelos y rocas son no lineales en un rango amplio de esfuerzos, por esta razón los ensayos deben ser realizados en un rango de esfuerzos diseñados específicamente para cada caso. Por ejemplo, para deslizamientos poco profundos deben utilizarse esfuerzos normales pequeños y para fallas profundas esfuerzos normales superiores (Suárez-Díaz, J. 1998). Existe también una diferencia entre el tiempo de carga aplicada en un ensayo de laboratorio y la situación real, ya que en el laboratorio se colocan las cargas durante unos minutos u horas, pero en los taludes la carga es permanente.

Resistencia al corte de suelos y de rocas

El proceso geológico que da origen a la formación de los suelos influirá directamente en su resistencia al cortante (Suárez-Díaz, J. 1998). En la Tabla 2 se resume la respuesta de algunos suelos comunes a la resistencia al corte.

	c	ϕ
Suelos no cohesivos saturados	$c = 0$, es decir que la envolvente de falla que pasa por el origen.	El valor de ϕ oscila entre los 27 a 45 grados, dependiendo de factores como la densidad o la distribución y forma de las partículas. A mayor densidad relativa, se incrementa el valor de ϕ . Además, el ángulo de fricción de un suelo bien gradado puede ser superior que el de un suelo uniforme del mismo tamaño y forma de partículas. El efecto de la humedad afecta muy poco el valor de ϕ .
Arcillas normal o ligeramente consolidadas	En ensayos drenados $c = 0$, es decir que la envolvente de falla que pasa por el origen.	En ensayos consolidados no drenados, se desarrolla presión de poros y como resultado la resistencia al corte no drenado será menor que la resistencia drenada.
Arcillas sobreconsolidadas	Cohesión relativamente alta. La envolvente de falla es una línea aproximadamente recta.	
Minerales		Los minerales masivos como el cuarzo, los Feldespatos y la calcita tienen altos valores de ϕ . Mientras los minerales arcillosos muestran diferencias muy importantes entre ϕ' y $\phi r'$.

Tabla 2. Respuesta de suelos comunes a la resistencia al corte (Suárez-Díaz, J. 1998).



En cuanto a las rocas, los parámetros para calcular la resistencia al corte se obtienen comúnmente mediante el ensayo de Compresión Simple o el ensayo de Compresión Triaxial.

A continuación, en la Tabla 3 se describen algunos valores típicos de resistencia para rocas.

Tipo de roca	Peso unitario seco kN/m ³	Cohesión (Mpa)	Angulo de fricción (°)
Rocas ígneas duras: granito basalto	25-30	35-55	35-45
Rocas metamórficas: cuarcita, neiss, pizarras.	25-28	20-40	30-40
Rocas sedimentarias duras: caliza, dolomita, arenisca.	23-28	10-30	35-45
Rocas sedimentarias blandas: arenisca, lutitas, limolitas.	17-23	1-20	25-35

Tabla 3. Valores típicos de parámetros de resistencia para rocas (Hoek & Bray, 1981 en Suárez-Díaz, J. 1998).

3.5 Criterio de ruptura de Hoek

Cuando se evalúa la resistencia de la matriz rocosa resulta más adecuado utilizar un criterio no lineal, donde la representación gráfica de la rotura sea una curva.

Debido a lo anterior, el propuesto por Hoek & Brown es un criterio empírico no lineal que estima la rotura de un medio rocoso isótropo en condiciones triaxiales (González de Vallejo et al., 2002). Mediante la siguiente ecuación se puede dibujar la envolvente para la rotura.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + \sigma_{ci}^2}$$

Ecuación 5

Donde σ_1 y σ_3 son los esfuerzos principales mayor y menor, σ_{ci} es la resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa y m_i es una constante que depende de las propiedades de la matriz rocosa. El valor de σ_{ci} se determina en ensayos de laboratorio y el parámetro m_i puede obtenerse en la literatura cuando no sea posible obtenerlo a partir de ensayos triaxiales.



A su vez, la expresión del criterio de rotura en función de los esfuerzos tangenciales y normales está representada por la ecuación:

$$\tau = A\sigma_{ci} \left(\frac{\sigma_n - \sigma_t}{\sigma_{ci}} \right)^B$$

Ecuación 6

Donde σ_t , es la resistencia a tracción y A, B son constantes dependientes del valor de m_i .

Al igual que para el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, en el criterio de Hoek & Brown los estados de tensiones encima de la curva están en rotura, mientras que los interiores están en el dominio elástico (Figura 3.11).

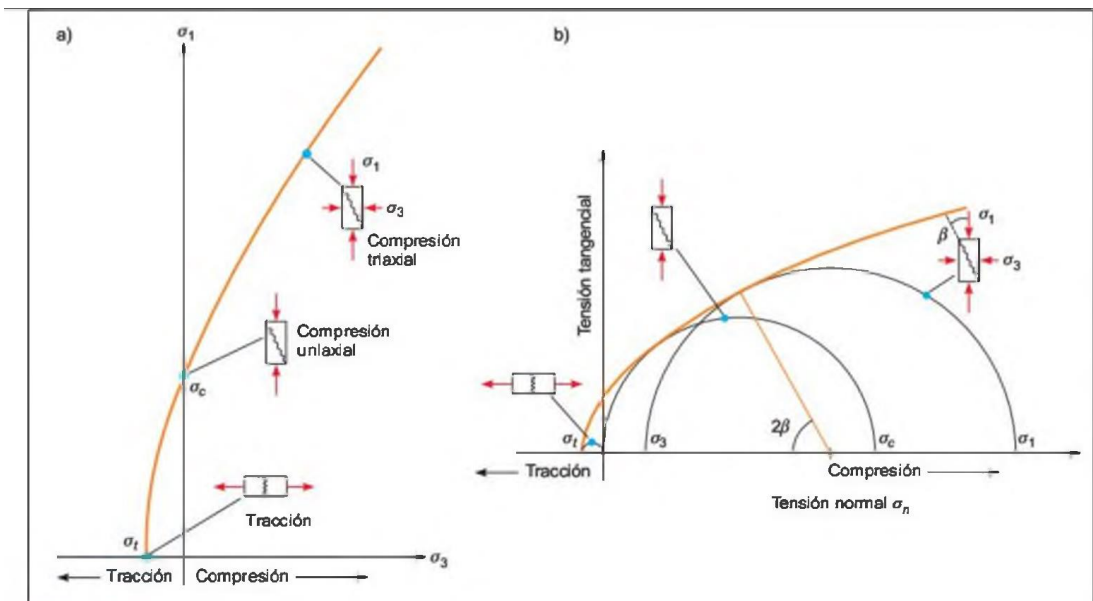


Figura 3.11: Envolventes de rotura del criterio de Hoek y Brown en función de los esfuerzos principales (a) y de los esfuerzos normal y tangencial (b). tomado de González de Vallejo et al. (2002).



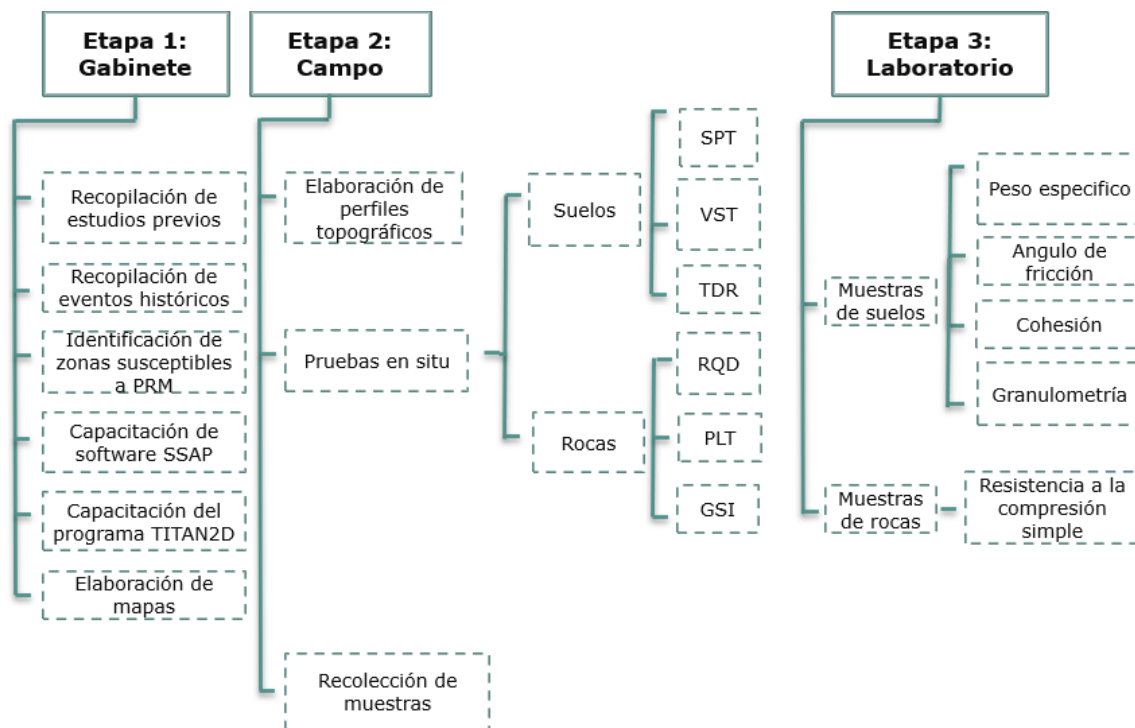
4. Metodología del análisis de peligro por inestabilidad de laderas

La metodología que se aplicó en este análisis permite alcanzar los objetivos descritos anteriormente. La metodología se divide principalmente en cuatro etapas, como lo podemos ver en la figura 4.1.

La primera etapa es la recopilación de estudios previos y eventos históricos de procesos de remoción en masa, la elaboración de mapas y capacitación del software SSAP Y el código Titan2D.

La segunda etapa constó de la salida a campo donde se realizaron pruebas in situ de taludes de roca y suelo. La tercera etapa se desarrolló en laboratorio y se realizaron diferentes pruebas de laboratorio a las muestras recolectadas en campo.

La cuarta etapa se elaboró en gabinete o escritorio y es la etapa más larga del análisis, en esta etapa se realizó el cálculo del Factor de seguridad, la estabilización de taludes, simulación de deslizamientos y el análisis de peligro por inestabilidad de laderas.



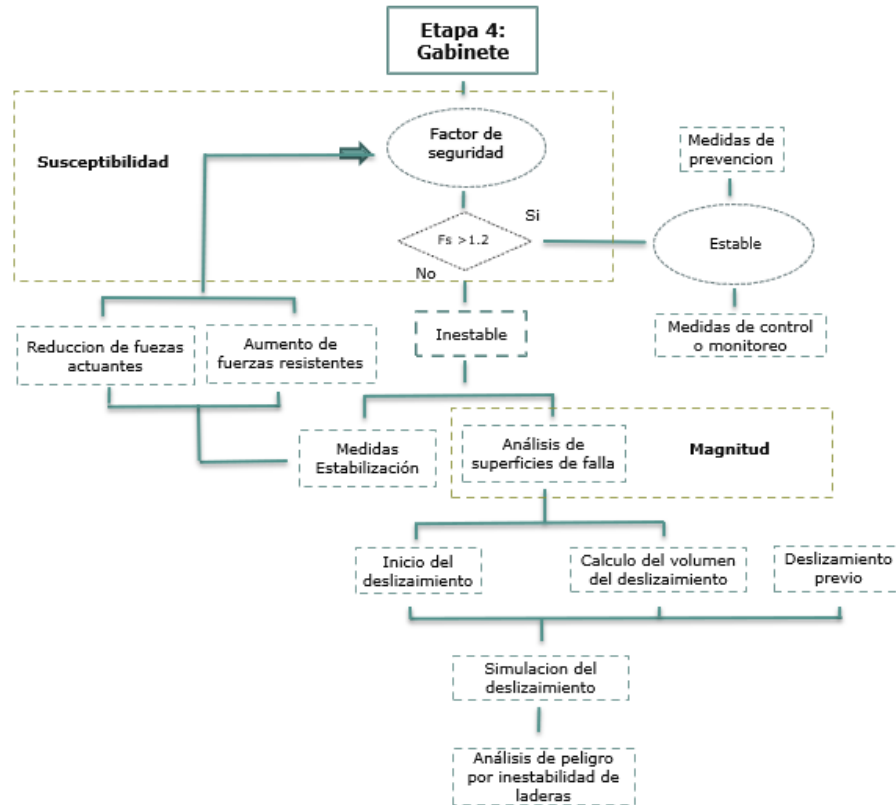


Figura 4.1: Esquema de la metodología de la investigación

El proyecto constó de analizar tres taludes los cuales ya se han mencionado anteriormente, dos de ellos compuestos de suelos y el tercero compuesto de rocas. Para el análisis del cálculo del Factor de seguridad se tuvieron limitantes ya que no se cuenta con el equipo para realizar los análisis necesarios como pruebas triaxiales para obtener el ángulo de fricción interna y la cohesión de los materiales compuestos por suelos por lo que se optó por obtener dichos parámetros con estudios previos.

Las limitantes en campo para el análisis en los taludes compuestos por roca es que no se obtuvieron testigos de perforación para hacer el cálculo del RQD.



4.1 Trabajo de campo

Parte esencial en el análisis de la estabilidad de taludes fue realizar un correcto levantamiento de campo y una correcta caracterización geomecánica de los materiales.

El trabajo de campo consto de 2 campañas (Figura 4.2), en la primera visita se obtuvo la caracterización de geomecánica de los materiales, en esa campaña de campo se realizó el reconocimiento del terreno tomando muestras de ensayos para el laboratorio, la segunda visita a campo fue para corroborar los primeros resultados preliminares de análisis.



Figura 4.2: Trabajo de campo

La primera a visita a campo se realizó en el mes de julio del 2021 donde se procedió a realizar el levantamiento topográfico de los diferentes taludes que conforman el análisis de estabilidad de laderas.

En los taludes de rocas se realizaron análisis de RQD (Rock quality designation) y GSI (Geological Strength Index), también se realizó la recolección de muestras de roca para realizarles ensayo de resistencia a la compresión simple en el laboratorio.



En taludes de suelos se realizó la recolección de muestras de suelos para realizar el análisis granulométrico en laboratorio. La visita en campo también consto de la identificación de la litología y otras características de los suelos y rocas.

4.1.1 Trabajo de campo en taludes de suelos

La caracterización geomecánica in situ en taludes de suelo se llevó a cabo con la toma de muestras en el terreno que conforman la ladera como ensayos de sondeos con pruebas invasivas y destructivas como (VST) (Vane Shear Test) ensayo veleta o molinete para determinar la resistencia al corte de los suelos, ensayos de penetración a presión estática y el contenido de humedad de los suelos con el Time Domain Reflectometry (TDR).

- Ensayo de penetración

El pocket penetrometer o penetrometro de bolsillo se utilizó para realizar pruebas geotécnicas in situ que nos ayudó a estimar la resistencia a la compresión de suelos cohesivos y semicohesivos. La resistencia a la compresión no confinada se puede leer directamente en el instrumento.

El análisis se realizó con un penetrómetro de bolsillo modelo 16-T0163 (Figura 4.3), el cual está compuesto por un resorte de compresión que determina la resistencia a la compresión. El penetrometro está compuesto de una punta cilíndrica atornillada en la parte inferior del instrumento la cual se introduce al suelo. El penetrometro 16-T0163 cuenta con un resorte de compresión cuya rigidez es de 7N/mm.

El instrumento cuenta con tres puntas con diferentes diámetros (Figura 4.4). La punta de mayor diámetro es de 8.99 mm, la punta estándar o mediana es de 6.35 mm, mientras que la punta de menor diámetro es de 4.55 mm. De acuerdo con el manual de uso del penetrómetro tipo 16-T0163 la punta más grande mide una resistencia de hasta 0.5 MPa y la medida resultante debe dividirse por dos. La punta mediana mide una resistencia de 1 MPa y la punta de menor tamaño mide una resistencia de hasta 2 MPa y la media obtenida debe multiplicarse por dos.



Figura 4.3: Penetrómetro



Figura 4.4: Puntas de penetrómetro

El procedimiento para obtener la resistencia a la compresión de los suelos de las tres áreas de estudio fue realizado en 8 medidas de penetración en el suelo en diferentes puntos que conforman la ladera, la punta mediana o estándar se utilizó en el punto llamado Xoloco (Figura 4.5), en el punto llamado La Aurora (Figura 4.6) se utilizó la punta gruesa por lo que el resultado se dividió entre dos. Para cada área de estudio se realizó un promedio para obtener la medida a la resistencia a la compresión simple no confinada.



Figura 4.5: Ensayo con el penetrómetro en Xoloco



Figura 4.6: Ensayo con el penetrómetro en La Aurora

- Vane shear test VST

El ensayo VST nos permite calcular la resistencia al corte de suelos en condiciones no drenados. “La resistencia al corte se obtiene igualando el torque al momento producido por los esfuerzos de cortante sobre la superficie cilíndrica” Suarez Días (1998). El ensayo de la veleta consiste en introducir la veleta al suelo, posteriormente se aplica un esfuerzo para generar un torque y generar una falla hasta la ruptura del terreno. La aplicación de este ensayo es en condiciones no drenadas, suelos saturados cohesivos.

Para el análisis se utilizó un Pocket vane o paleta de bolsillo modelo 16 -T0174 (Figura 4.7), este instrumento puede medir hasta 260 KPa, el cual consta de un cuerpo cilíndrico con un resorte torsional y tres paletas conformados por cuatro placas de acero ortogonalmente entre ellas (Figura 4.8), la paleta grande tiene un tamaño de 50.8 mm de altura por 25.4 mm de diámetro, la paleta mediana tiene un tamaño de 40 mm altura por 20 mm de diámetro, la paleta pequeña tiene un tamaño de 32 mm de altura por 16 mm de diámetro.



Figura 4.7: Veleta



Figura 4.8: Puntas de veleta

El procedimiento que se utilizó para obtener la resistencia al corte de suelo cohesivos no drenados para en el punto llamado La Aurora (Figura 4.9 y 4.10) fue insertando la paleta pequeña que tiene un tamaño de 32 mm de altura por 16 mm de diámetro en la ladera, a lo largo del talud se realizaron 8 medidas, Las palas se introdujeron al subsuelo, una vez introducidas las palas se ejerció una fuerza para rotar las palas (la velocidad de rotación debe ser constante), posteriormente se midió el momento de torsión T hasta que el terreno se rompió. Dicho momento de torsión nos indicó la resistencia residual del terreno.



Figura 4.9 y 4.10: Pruebas de resistencia al corte con la veleta en La Aurora

- Time Domain Reflectometry (TDR)

El medidor de humedad del suelo (TDR) Time Domain Reflectometry o Reflectómetro en Dominio del Tiempo nos permitió calcular el contenido de humedad en el suelo, estos instrumentos son eléctricos y se utilizan para determinar las características de las líneas eléctricas mediante el uso de un pulso de ondas eléctricas reflejadas.

Para el análisis se utilizó un medidor de humedad del suelo TDR-100 (Figura 4.11), el cual nos permitió calcular el contenido de humedad real en porcentaje absoluto. Este instrumento está integrado por una consola que incluye el software y un sensor de humedad con dos varillas cuya longitud es de 75 mm.

La medición se realizó para los suelos de Xoloco y La Aurora. El procedimiento que se utilizó para obtener el contenido de humedad con el TDR-100 fue a partir de muestras de suelos de los taludes, posteriormente se ingresaron los suelos a un recipiente y como paso final se colocó el sensor, insertando las dos varillas de metal a los suelos (Figura 4.12 y 4.13).



Figura 4.11: TDR-100

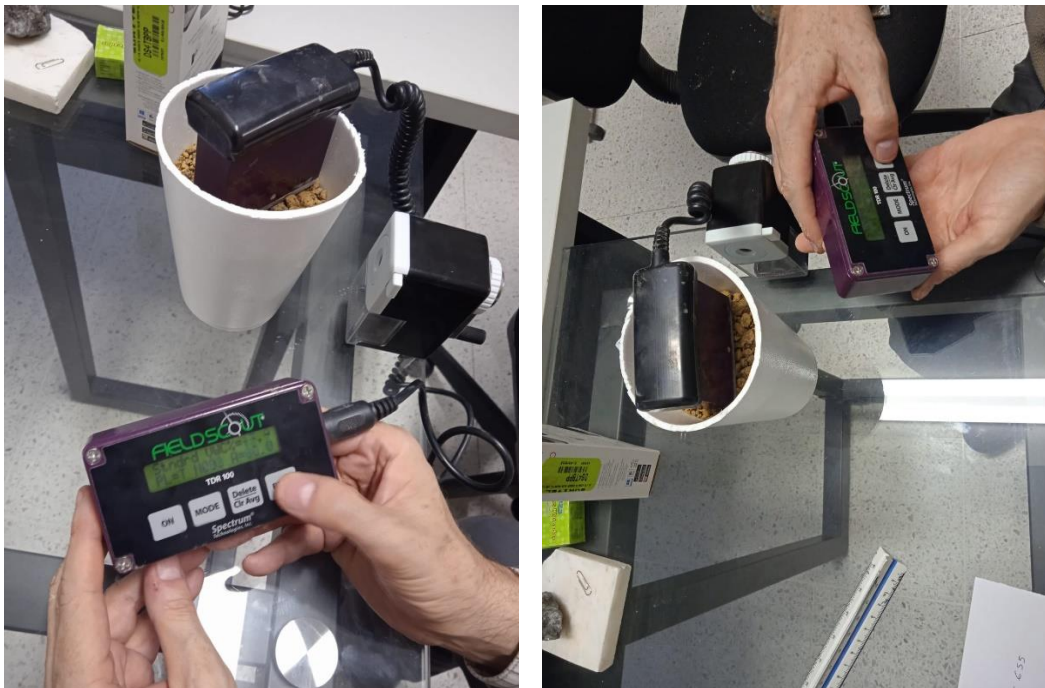


Figura 4.12 y 4.13: Cálculo del contenido de humedad de los suelos

- Densidad de los materiales

El cálculo de la densidad de los suelos nos permitió obtener el peso unitario por medio de una serie de pasos y ecuaciones. El cálculo de la densidad de los suelos se determinó para los taludes de Xoloco y La Aurora.



La densidad es la masa por unidad de volumen de un material, partiendo de eso se procedió a extraer suelo del talud (Figura 4.14), posteriormente se realizó una medición de la masa de suelo obtenida (Figura 4.15), una vez extraída la masa de suelo se origina un orificio que fue rellenado de espuma de poliestireno (Figura 4.16), el resultado del enfriamiento de la espuma se le llamó “hongo” el cual nos permitió obtener el cálculo del volumen del suelo para los taludes de Xoloco (Figura 4.17) y La Aurora (Figura 4.18).



Figura 4.14: Extracción de suelo



Figura 4.15: Peso de muestra de suelo



Figura 4.16: Elaboración de hongo



Figura 4.17: Hongo de punto llamado Xoloco



Figura 4.18: Hongo de punto llamado La Aurora

4.1.2 Trabajo de campo en taludes de roca

Como se mencionó antes, la caracterización adecuada de los geomateriales de los suelos y las rocas permitieron realizar una investigación adecuada ya que los resultados obtenidos fueron de gran ayuda para la correlación de los datos.

La estimación de los parámetros de resistencia de rocas se realizó de acuerdo con la clasificación geomecánica, fue muy importante tener una caracterización geológica de los macizos rocosos como la litología, el grado de fracturamiento, etc., que nos ayudaron a evaluar el grado de calidad del macizo rocoso. Las clasificaciones más utilizadas para evaluar el grado de calidad de las rocas fueron el Geological Strength Index (GSI).

Las pruebas que se realizaron in situ para taludes conformados por rocas fueron el (RQD) Rock Quality Designation, el (GSI) Geological Strength Index y el (PLT) Point load test.



- (RQD) Rock Quality Designation

El Rock Quality Designation (RQD) determina de manera cuantitativa la calidad de la roca a partir de núcleos extraídos por sondeos mecánicos. La frecuencia de las discontinuidades permitió definir la relación en por ciento de la longitud total de la roca sana de 10 cm o más de longitud de un tramo de roca de 1 metro (Figura 4.19).

El RQD se determinó para el talud de la Autopista y se realizó en el afloramiento de las rocas, ya que no se contó con núcleos en el área de estudio. Para obtener el RQD del talud de la Autopista se realizó una medida de dos metros de longitud del talud, por lo que se determinaron aquellas secciones de roca sana mayores a los 10 cm de longitud (Figura 4.20 y 4.21).

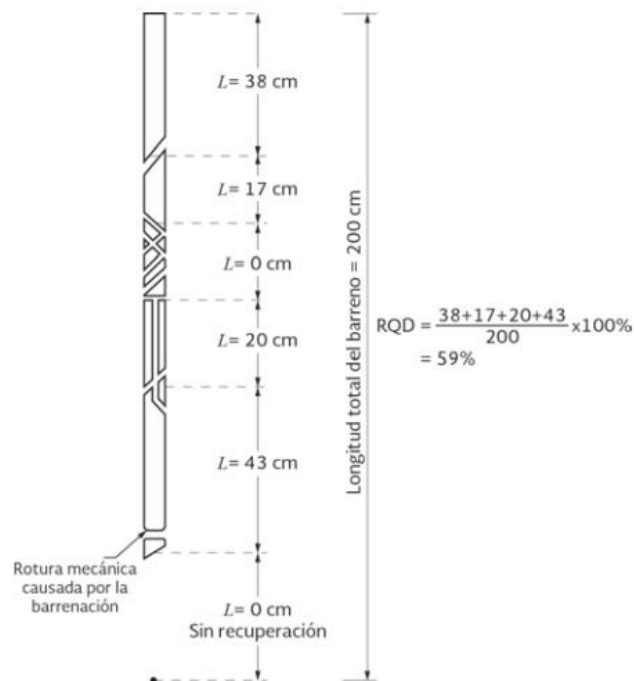


Figura 4.19: Procedimiento para la medición del RQD (Deere, 1956)



Figura 4.20: Calculo del RQD



Figura 4.21: Calculo del RQD



- (GSI) Geological Strength Index

El índice geológico de resistencia permitió evaluar la calidad del macizo rocoso a través de las características físicas de las rocas como el grado de fracturación, la alteración de las discontinuidades, etc. “El índice GSI se basa en estimaciones cualitativas, y en modelos simples que rara vez coinciden con las condiciones reales” Gonzales de Vallejo et al., (2004).

Para determinar el índice geológico de resistencia de las rocas se necesitó realizar observaciones en campo para determinar la apariencia del macizo rocoso, atreves de la tabla de Hoek 1995 que se basa en las descripciones geológicas, esta tabla tiene cinco clasificaciones cuantitativas de la estructura del macizo rocoso y de la calidad de los planos de las rocas.

El Geological Stregth Index se aplicó en el talud de la Autopista, ya que está conformado de macizos rocosos de granito. El GSI se realizó en un punto que presentara las características promedio del macizo rocoso. En este punto se observó la estructura del macizo rocoso para determinar si la roca era intacta, bloquizada, muy bloquizada, tectonizada, desintegrada o presentar algún grado de laminación, también observar si los planos de las rocas eran muy rugosas, rugosas, onduladas, pulidas o falladas (Figura 4.22) y con esto poder determinar el GSI.



Figura 4.22: Calculo del GSI



4.2 Trabajo de laboratorio

- **Granulometría**

La distribución granulométrica de los suelos del talud de La Aurora y Xoloco se determinaron con la norma de ASTM D 2387-93, esta norma clasifica la fracción fina y gruesa a partir de 0.075 mm, la fracción fina la divide en arcillas menores a 0.002 mm y limos entre 0.075 mm a 0.002 mm, la fracción gruesa la divide en arenas y gravas, las arenas entre 4.75 mm a 75 mm y las grabas son cuando son mayores a los 75 mm.

El análisis de granulometría se realizó con el láser FRITSCH ANALYSETTE 22 NeXT (Figura 4.23), es un instrumento que permite determinar el tamaño de las partículas en un rango de 0.5 a 1500 μm en un tiempo de medición menor a un minuto, funciona con un solo laser que registra todo el rango de mediciones en una solo toma.



Figura 4.23: Láser FRITSCH ANALYSETTE 22 NeXT (Tomada de www.fritsch.es)

La distribución granulométrica se obtuvo para los suelos de La Aurora y Xoloco, como primer paso se separaron las muestra finas y gruesas, posteriormente se pesaron las muestras. En el segundo paso se ingresaron las muestras de suelos finos de ambos puntos y como resultado se obtuvieron los porcentajes de las muestras.



4.3 Trabajo de gabinete

4.3.1 Análisis de estabilidad de taludes con SSAP

En la actualidad es muy importante realizar análisis de estabilidad de taludes en zonas propensas a procesos de remoción en masa, por lo que el análisis de estabilidad de taludes se realizó en tres taludes de la ciudad de Teziutlán, Puebla. El cálculo del Factor de seguridad de los tres taludes se obtuvo con el software SSAP (Slope Stability Analysis Program) elaborado por el Dr. Lorenzo Borselli.

Para poder determinar el Factor de seguridad con el software SSAP (Figura 4.24) se necesitaron parámetros geomecánicos, como el ángulo de fricción, la cohesión, el peso unitario en condiciones secas y saturadas, esto para taludes de suelos.

Los parámetros geomecánicos para taludes conformados por rocas son el GSI (Geological Strengths Index), etc. El programa necesita de un perfil topográfico de cada punto para poder calcular el Factor de seguridad. El software SSAP puede emplear el Método de Equilibrio Límite (LEM), por lo que se decidió utilizar el método de cálculo de MORGESTERN – PRICE (1965) para determinar el F_s .



Figura 4.24: Programa SSAP (Slope Stability Analysis Program)



De acuerdo con la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) el Factor de seguridad para cargas estáticas es igual 1.3 y para cargas sísmicas debe de ser de 1.1. Para realizar este análisis se determinó que el factor de seguridad se dividiera en tres niveles:

- Estable = Factor de seguridad mayor a 1.2
- Metaestable = Factor de seguridad entre 1 y 1.2
- No estable = Factor de seguridad menor de 1

Acorde con la metodología propuesta para esta investigación, el análisis de la estabilidad de los tres taludes se realizó en dos condiciones hidrológicas determinando la profundidad del agua subterránea, las simulaciones varían con el cambio de la línea piezométrica.

Talud de La Aurora

Los parámetros que se utilizaron para el análisis del cálculo del Factor de seguridad para suelos de ignimbrita no soldada e ignimbrita soldada son los siguientes:

- Ignimbrita no soldada

$$\Phi = 34 \text{ grados}$$

$$C = 9 \text{ KPa}$$

Parámetros tomados de Borselli et al., (2003)

$$\text{Peso unitario} = 14 \text{ KN/m}^3$$

$$\text{Peso unitario saturado} = 16 \text{ KN/m}^3$$

- Ignimbrita soldada

$$\Phi = 42 \text{ grados}$$

$$C = 4 \text{ KPa}$$

Parámetros tomados de Alcantara et al., (2003)

$$\text{Peso unitario} = 20 \text{ KN/m}^3$$

$$\text{Peso unitario saturado} = 22 \text{ KN/m}^3$$



Los dos escenarios que se analizaron para cada talud en condiciones saturadas y no saturadas, esto se justifica por los eventos históricos que se han suscitado en la Sierra Nororiental en el estado de Puebla, en específico en la ciudad de Teziutlán.

La fluctuación de la línea piezométrica depende directamente del agua pluvial producto de las lluvias (Figura 4.25), en la campaña de campo no se podía determinar el nivel piezométrico exacto, por lo que se procedió a realizar el análisis en condiciones donde el talud se presentara totalmente saturado y no saturado.

También para determinar el Factor de seguridad se realizó el análisis con la presencia de grietas de tensión ya que se observaron en campo (Figura 4.26, 4.27 y 4.28).



Figura 4.25: Línea piezométrica que intercepta con la pendiente del talud de La Aurora





Figura 4.26, 4.27 y 4.28: Grietas de tensión en el talud de La Aurora

Escenario 1

Para este escenario el Factor de seguridad del talud de La Aurora (Figura 4.29) se calculó en condiciones en las cuales el talud se encuentra totalmente en seco o no saturado, en este caso la línea piezométrica no existe. Fue necesario tomar en cuenta la presencia de grietas de tensión en el talud de La Aurora por lo que se activó la opción de “Tension cracks” en el software SSAP.



Figura 4.29: Escenario 1 del talud de La Aurora elaborado en QCAD



Escenario 2

En el segundo escenario del talud de La Aurora (Figura 4.30) se presentó totalmente saturado, como lo sucedido en el evento del 5 de octubre de 1999. En este escenario la línea piezométrica se encuentra en la cima del talud, la presencia de grietas de tensión se encuentra totalmente rellenas de agua por lo que se activó la herramienta de “Tension cracks” en el software SSAP.



Figura 4.30: Escenario 2 del talud de La Aurora elaborado en QCAD

Una vez el calculado del Factor de seguridad en ambas condiciones se analizaron los resultados obtenidos, de acuerdo con nuestra metodología nos indica que si el Factor de seguridad es mayor a 1.2 es estable y si se encuentra entre 1.2 – 1 es metaestable y si es menor a 1 es inestable por lo que se realizaron las medidas de estabilización para disminuir las fuerzas actuantes y aumentar las fuerzas resistentes.

Talud de La Autopista

Los parámetros geomecánicos que se utilizaron para determinar el Factor de seguridad para la roca granito que conforma el talud de La Autopista son los siguientes:

- Granito

SigCi = 8 MPa

GSI = 65

Mi = 30



$D = 0.70$

Peso unitario = 28 KN/m^3

Peso unitario saturado = 30 KN/m^3

El cálculo del Factor de seguridad se realizó en dos escenarios diferentes en condiciones saturadas y no saturadas, realizando un cambio en la línea piezométrica, tomando el escenario en el cual el talud se presentó totalmente saturado y no saturado, para ambos escenarios se realizó el análisis con la presencia de grietas de tensión.



Figura 4.31 y 4.32: Talud de La Autopista

Escenario 1

Para determinar el Factor de seguridad del talud de La Autopista en el escenario 1 se determinó que la línea piezométrica no existe por lo que el talud se encuentra totalmente seco o no saturado y con la presencia de grietas de tensión. (Figura 4.33)

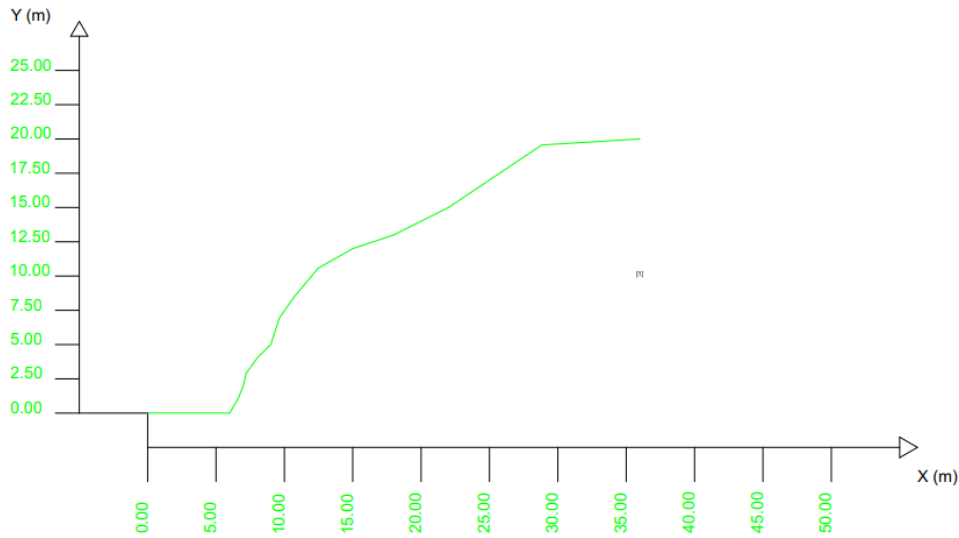


Figura 4.33: Escenario 1 del talud de La Autopista elaborado en QCAD

Escenario 2

En este escenario el talud de La Autopista se presentó en condiciones totalmente saturado, la línea piezométrica se encuentra en la cima del talud y se realizó el análisis con la presencia de grietas de tensión rellenas de agua. (Figura 4.34)

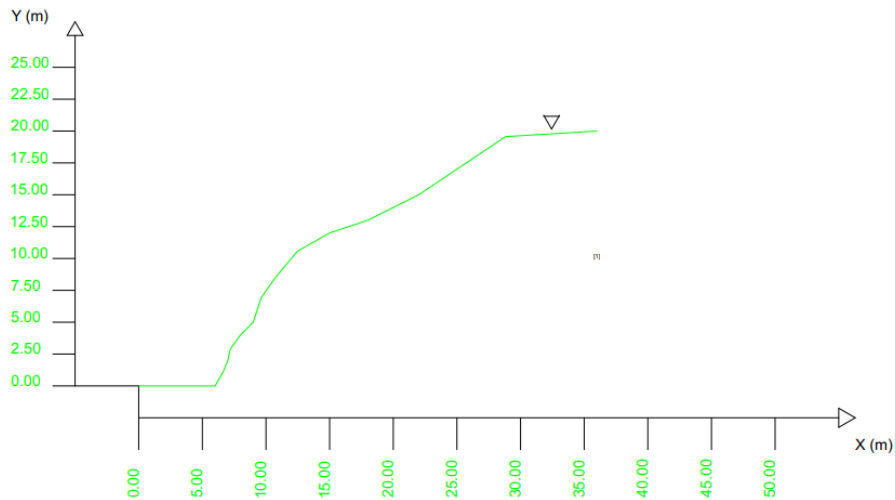


Figura 4.34: Escenario 2 del talud de La Autopista elaborado en QCAD

Talud de Xoloco

Los datos geomecánicos que se necesitaron para realizar el análisis de estabilidad del talud de Xoloco para los suelos de ignimbrita soldada y no soldada son los siguientes:



- Ignimbrita no soldada

$\Phi = 34$ grados

$C = 9$ KPa

Parámetros tomados de Borselli et al., (2003)

Peso unitario = 14 KN/m^3

Peso unitario saturado = 16 KN/m^3

- Ignimbrita soldada

$\Phi = 42$ grados

$C = 4$ KPa

Parámetros tomados de Alcantara et al., (2003)

Peso unitario = 20 KN/m^3

Peso unitario saturado = 22 KN/m^3

De acuerdo con la metodología propuesta para este análisis se calculó el Factor de seguridad en dos escenarios diferentes en condiciones saturadas y no saturadas, la línea piezométrica fluctúa en el talud. El Factor de seguridad se determinó con la presencia de grietas de tensión observadas en campo. (Figura 4.35)



Figura 4.35: Grietas de tensión en el talud de Xoloco



Escenario 1

En el escenario 1 se calculó el Factor de seguridad en condiciones las cuales el talud de Xoloco se encuentra totalmente seco y con la presencia de grietas de tensión (Figura 4.36).

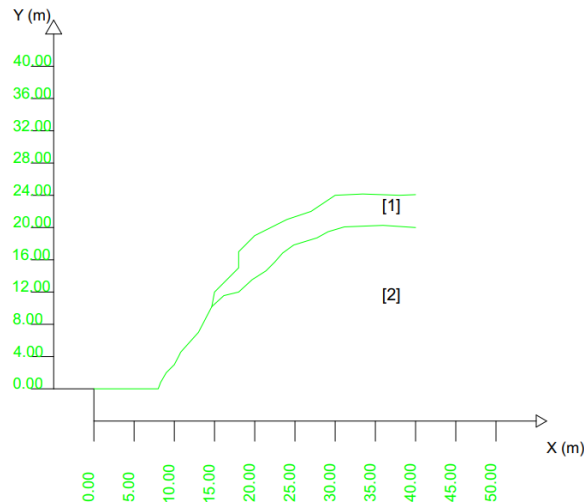


Figura 4.36: Escenario 1 del talud de Xoloco elaborado en QCAD

Escenario 2

En el segundo escenario el talud de Xoloco se encuentra totalmente saturado, en este escenario la línea piezométrica se encuentra en la corona del talud y con la presencia de grietas de tensión totalmente rellenas de agua. (Figura 4.37)

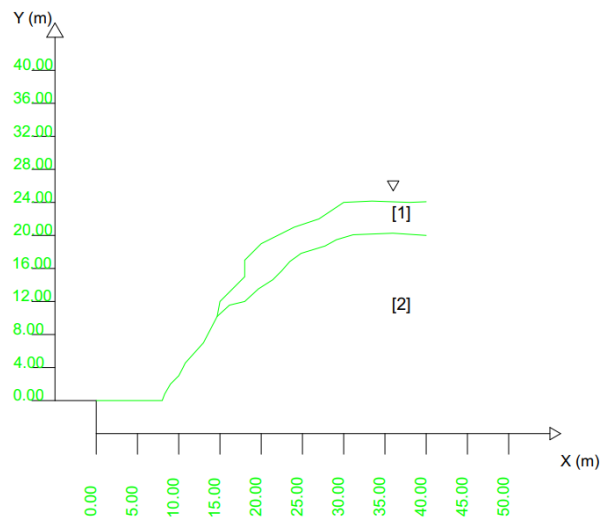


Figura 4.37: Escenario 2 del talud de Xoloco elaborado en QCAD



Teniendo los resultados del cálculo del Factor de seguridad para ambos escenarios del talud de Xoloco y de acuerdo con la metodología propuesta, si el Factor de seguridad es menor a 1.2 se considera metaestable y por lo que se realizaron las medidas de estabilización y con ello reducir las fuerzas actuantes he incrementar las fuerzas resistentes.

4.3.2 Simulación de deslizamientos con TITAN 2D

La simulación de flujos de masas de suelos o rocas fue parte fundamental para determinar un análisis de peligro por inestabilidad de laderas ya que existen diferentes programas para modelar flujos granulares secos, principalmente asociados a procesos volcánicos como flujos piroclásticos o avalanchas de escombros.

Además, con ciertas restricciones, se puede simular flujos de agua y sedimentos, flujos de dos fases constituidos por una fase continua líquida (agua y sedimento fino, limo y arcilla) y una fase granular.

Los programas que se puede encontrar para modelar flujos de masas de suelos son el Titan2D, VolcFlow, LAHARZ, etc. La simulación de esta investigación se llevó a cabo con el programa Titan2D versión (4.0.0) elaborado por GMFG (Geophysical Mass Flow Group) de la universidad estatal de Nueva York en Buffalo en los Estados Unidos.

De acuerdo con la guía de usuario del Titan2D - Geophysical Mass-Flow Simulation Software, "El programa Titan2D combina simulaciones numéricas de un flujo con datos digitales de elevación del terreno natural apoyados a través de una interfaz de Sistema de Información Geográfica (GIS)".

Para poder alcanzar el objetivo final de esta investigación fue necesario realizar diez simulaciones para el talud de La Aurora. Las simulaciones del deslizamiento de tierra suponen una pila de material que se desliza cuesta abajo por acción de la gravedad, en la cual se introduce la dimensión de la pila, las coordenadas de partida, el tiempo de la simulación, el ángulo de fricción interna y ángulo de fricción basal.



El código Titan2D utiliza diferentes reologías para la simulación de los deslizamientos de tierra como los modelos de Coulomb, TwoPhases – Pitman - LeVoellmy – Salm y Pouliquen – Forterre. Se puede encontrar más información del programa Titan2D versión 4.0.0 en las diferentes guías de usuarios en <https://vhub.org/resources/titan2d/supportingdocs>.

Para la elaboración de los diferentes escenarios de deslizamientos del talud de La Aurora fue necesario realizar tres pasos para poder cumplir con el objetivo de la simulación de deslizamientos con el código Titan2D.

Paso 1 – El primer paso de la simulación de deslizamientos fue realizar un análisis de los resultados del grado de estabilidad del talud de La Aurora, donde se obtuvo la superficie de menor Factor de seguridad y con ello nos permitió determinar la profundidad de la masa inestable. En este paso también se determinó el punto de descentralización de la masa inestable a partir de la superficie crítica, también se extrajeron las coordenadas de mencionado punto en coordenadas UTM.

Paso 2 – El segundo paso determino la posible área de deslizamiento a partir del punto de descentralización obtenido en el paso 1, en este paso se obtuvieron las dimensiones del eje mayor y eje menor del área expuesta, posteriormente se calculó el volumen de la pila a deslizarse de acuerdo con el manual del programa Titan2D.

En el paso 2 también se determinaron los parámetros necesarios para simular los deslizamientos con el código Titan2D, estos parámetros son el volumen, las coordenadas de descentralización, el tiempo máximo de simulación, el ángulo de fricción interna, el ángulo de fricción basal, la orientación de la simulación, etc.

Paso 3 – Para el tercer paso se realizaron las operaciones con el código titan2D como la conversión del DEM al formato que Titan2D que pueda reconoció con la herramienta “DEM converter for Titan2D”, posteriormente se utilizó la herramienta de simulación de deslizamiento “TITAN2D MASS-FLOW SIMULATION TOOL” a través de la plataforma Vhub.com.



Paso 2. Teniendo en cuenta la profundidad de las dos pilas obtenidas en el paso 1 se procedió a estimar las dimensiones exteriores de las pilas. La pila 1 de color rojo en de la figura 4.39 se ubicó en la cima del talud y cuyas dimensiones son de 27 metros del eje mayor y de 15 metros del eje menor.

La pila 2 de color amarillo en la figura 4.39, se ubicó en la parte baja de la pila 1, las dimensiones de la pila 2 son de 26 metros de largo del eje mayor y 15 metros del eje menor.



Figura 4.39: Ubicación de pilas del talud de la Aurora

El cálculo del volumen de las pilas se obtuvo con la metodología propuesta por código de Titan2D (Figura 4.40), de acuerdo con la guía de usuario del programa Titan2D la pila 1 que conforma el volumen de la masa a deslizarse es un elipsoide.

El volumen se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2} * \pi * Eje\ mayor * Eje\ menor * h$$

Ecuación 7

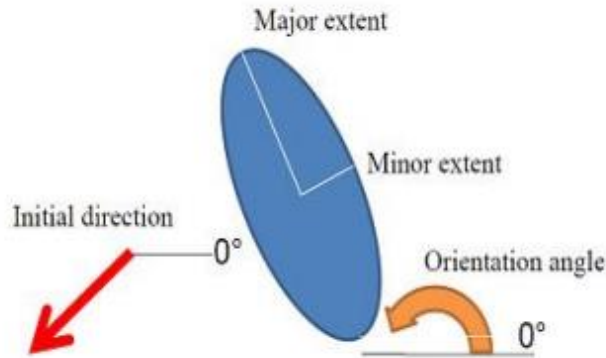


Figura 4.40: Geometría de la pila (Guía de usuario de programa Titan2D)

Según Borselli et al., (2003) señaló que el volumen total del deslizamiento ocurrido el 5 de octubre de 1999 en Teziutlán, Puebla es de 6000 m^3 , tomando en cuenta el volumen de las dos masas y de acuerdo con lo descrito por Alcántara-Ayala et al., (2014) determinó que el volumen de la masa desplazada fue de $7,350 \text{ m}^3$.

Para establecer los parámetros (Tabla 4) que se necesitaron para realizar las simulaciones de deslizamientos con el código Titan2D se tomó en cuenta las recomendaciones de la guía de usuario del programa. Los parámetros de las pilas las podemos observar en la tabla 5.

	Tiempo máximo de simulación (s)	Número máximo de pasos
Pila 1	300	1000
Pila 2	300	1000

Tabla 4: Parámetros para ejecutar el programa Titan2D



	Tipo de pila	Espesor	Centro del volumen inicial X	Centro del volumen inicial Y	Eje mayor	Eje menor	Orientación (°)	Dirección inicial (°)
Pila 1	1	7.5	672449	2192321	27	15	89	10
Pila 2	1	4	672499	2192321	26	15	89	10

Tabla 5: Parámetros de las pilas ejecutar el programa Titan2D

Paso 3 – En el paso 3 se convirtió el Modelo de Elevación Digital (DEM) a formato que el código Titan2D pueda reconocer. Posteriormente en la pestaña “TITAN2D MASS-FLOW SIMULATION TOOL” se creó el nuevo proyecto en “Load/Save”, una vez creado el proyecto nuevo se procedió a ingresar los parámetros en la pestaña de “Run parameters” del tiempo máximo de simulación (s) y el número máximo de pasos, descritos en la tabla 5. Posteriormente se ingresaron los datos de las características de las pilas en la pestaña “Piles” como el tipo de pila, espesor, etc.

Los parámetros antes mencionados no cambiaron para cada simulación ya que cada uno de esos parámetros se determinaron con múltiples iteraciones, aproximadamente 50 simulaciones.

Para poder elaborar las diferentes simulaciones del deslizamiento del talud de La Aurora se determinó realizarlos con el análisis del modelo de Coulomb, los dos parámetros que necesitó este modelo son el ángulo de fricción interna asociado al rozamiento interno de las partículas de la masa de suelo y al ángulo de fricción basal que representa la fricción de la masa deslizante con el substrato.

Se realizaron 10 simulaciones del deslizamiento, variando el ángulo de fricción basal, ya que, según Sheridan et al., (2005) demostró que el valor del ángulo de fricción interna no influye en el alcance del deslizamiento. Mientras que el ángulo de fricción basal es el parámetro que ejerce una notable influencia en la distribución y alcance de los flujos de masas como lo describió García et al., (2011).



En este trabajo se realizaron las simulaciones con un ángulo basal de 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 y 30 grados (Tabla 6).

Escenario	Pilas	Ángulos de fricción (°)	
		Interna	Basal
1	1 - 2	34	3
2	1 - 2	34	6
3	1 - 2	34	9
4	1 - 2	34	12
5	1 - 2	34	15
6	1 - 2	34	18
7	1 - 2	34	21
8	1 - 2	34	24
9	1 - 2	34	27
10	1 - 2	34	30

Tabla 6: Parámetros del escenario 1

4.3.3 Análisis de peligro

El análisis de peligro por inestabilidad de laderas se realizó solo para el talud de La Aurora ya que, de acuerdo con la metodología propuesta para esta investigación, cumple todos los requisitos para poder realizarse.

Parte fundamental para realizar el análisis de peligro fue el evento histórico ocurrido el 5 de octubre de 1999 en el talud de La Aurora ya que sin él no se pudo determinar las siguientes métricas: el coeficiente de similitud de Jaccard (RJ), la relación de porcentaje de longitud (RL), la sensibilidad del modelo (RMS) y la precisión del modelo (RMP). Estas métricas nos ayudaron con la validación y la confiabilidad de las simulaciones con respecto al deslizamiento observado.

Validación del modelo

La confiabilidad del modelo se realizó con la comparación de las métricas basadas en el teorema de bayes como lo son el RJ, el RMS y el RMP. Estas métricas nos ayudaron a determinar el porcentaje de área del deslizamiento observado que la simulación predice correctamente, además de determinar áreas que se



consideraban fuera del alcance de los deslizamientos simulados que son realmente afectados por el deslizamiento observado.

De acuerdo con Charbonnier et al., (2017) la relación de porcentaje de longitud (RL) compara la longitud del deslizamiento observado (Dobs) y el deslizamiento simulado (Dsim) y se determina con la siguiente ecuación:

$$RL = \frac{l_{sim}}{L_{obs}} \times 100$$

Ecuación 8

Para entender las métricas (RJ, RMP y RMS) fue necesario tener claro el diagrama de Venn (Figura 4.41) que nos ilustra las áreas de deslizamientos observados (Dobs) y las áreas de deslizamientos simulados (Dsim).

La relación entre los verdaderos positivos (VP) que representan áreas que interceptan deslizamientos observados como simulados, falsos positivos (FP) que representan solo áreas de los deslizamientos simulados, falsos negativos (FN) que nos indican solo las áreas del deslizamiento observado y los verdaderos negativos (VN) que son áreas en donde no se encuentran deslizamientos observados ni deslizamientos simulados.

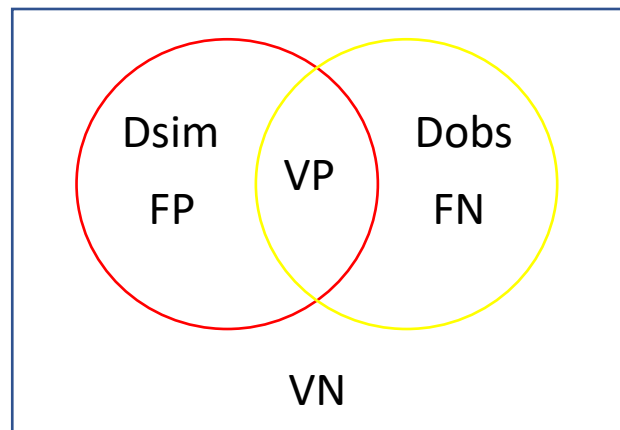


Figura 4.41: Diagrama de Venn de deslizamientos observados y simulados



El índice de similitud de Jaccard permitió medir la similitud entre dos conjuntos, para nuestro estudio se interpretó como la relación de la unión del deslizamiento observado (Dobs) y el deslizamiento simulado (Dsim) con respecto a la unión de los dos deslizamientos como lo observamos en las siguientes ecuaciones.

$$RJ = \frac{|Dobs \cap Dsim|}{|Dobs \cup Dsim|} \times 100$$

$$RJ = \frac{VP}{VP+FP+FN} \times 100$$

Ecuación 9

Las dos métricas restantes (RMP y RMS) se derivan del teorema de Bayes, de la cual se pudo determinar que la Pr(Dobs) es la probabilidad de que el área de un deslizamiento simulado sea inundada por un deslizamiento real o la Pr(Dsim) la probabilidad de que el área del deslizamiento real sea inundado por un deslizamiento observado.

De acuerdo al diagrama de Venn El Pr(Dobs) también es llamado precisión del modelo (RMP) o valor predictivo positivo y el Pr(Dsim) es la sensibilidad del modelo (RMS) y podemos expresarlas de la de la siguiente manera:

$$\text{Pr(Dobs) o RMP} = \frac{VP}{VP+FP} \times 100$$

Ecuación 10

$$\text{Pr(Dsim) o RMS} = \frac{VP}{VP+FN} \times 100$$

Ecuación 11



5. Resultados del análisis de peligro por inestabilidad de laderas

Los resultados de las pruebas realizadas en campo, los ensayos de laboratorio, los procesados de los análisis de estabilidad de taludes y de las simulaciones de deslizamientos permitieron obtener los resultados deseados en nuestros objetivos antes descritos.

5.1 Resultados de pruebas de campo

Los resultados que se obtuvieron en las pruebas de Vane shear test (VST) y prueba de penetrómetro para obtener la resistencia al corte y a la compresión simple respectivamente se presentan a continuación. También se obtuvo el cálculo del peso unitario y contenido de humedad, para taludes de suelo.

- Ensayo de penetración

Para el área de estudio de La Aurora se realizaron 8 medidas (Tabla 7) a lo largo del talud, para este análisis se utilizó la punta grande de diámetro de 8.99 mm obteniéndose valores de resistencia a la compresión no confinada de entre 0.6 y 0.3 MPa, por lo que se realizó un promedio de los valores obteniendo 0.4125 MPa, pero de acuerdo al manual de uso esta medida se dividió entre 2 para obtener el valor real de la resistencia a la compresión la cual es de 0.2062 MPa o 206 KPa.

Ensayo de penetración La Aurora
0.6 MPa
0.5 MPa
0.3 MPa
0.4 MPa
0.4 MPa
0.3 MPa
0.4 MPa
0.4 MPa

Tabla 7



Para el segundo punto llamado Xoloco se realizaron 8 medidas (Tabla 8) con la punta mediana cuyo diámetro es de 6.35 mm obteniendo valores de resistencia a la compresión no confinada de entre 0.8 y 0.4 MPa, por lo que realizo un promedio de los datos y se obtuvo un valor de resistencia a la compresión no confinada de 0.52 Mpa o 520 KPa para el punto Xoloco.

Ensayo de penetración Xoloco
0.8 MPa
0.5 MPa
0.8 MPa
0.4 MPa
0.5 MPa
0.4 MPa
0.5 MPa
0.6 MPa

Tabla 8

- Vane shear test VST

La prueba de resistencia al corte de suelos en condiciones no drenadas solo se aplicó en el talud La Aurora. Se realizaron 8 medidas (Tabla 9) de resistencia corte a lo largo del talud obteniendo medias de 2.3 a 5.8 T, por lo que realizo un promedio de los datos y se obtuvo un valor de 4.46 T. De acuerdo con las medidas de la paleta de la veleta y al momento de torsión que se obtuvo el calculó de la cohesión no drenada (Cu) = 6 KPa.

Ensayo de veleta La Aurora
2.3 T
5.8 T
4.3 T
4.8 T
4.9 T
4.5 T
4.3 T
4.3 T

Tabla 9



- Time domain reflectometry (TDR)

El contenido de humedad de los suelos en los taludes de La Aurora y Xoloco presentaron diferentes porcentajes de humedad. El porcentaje de humedad en el talud de La Aurora fue del 21% y el porcentaje de humedad del talud Xoloco fue del 45%. (Tabla 10)

Punto	Porcentaje de humedad
La Aurora	21
Xoloco	45

Tabla 10

- Densidad de los materiales

Para realizar el análisis de estabilidad de taludes se necesitaron una serie de parámetros para verificar el grado de estabilidad de los taludes. Entre los parámetros más importantes fue el peso específico de los materiales del suelo.

Las muestras obtenidas en los taludes de La Aurora y Xoloco presentaron diferentes pesos unitarios, los suelos del talud de La Aurora presentaron un peso unitario de 13.97 KN/m³ y el peso unitario de los suelos del talud de Xoloco es de 12.12 KN/m³.

Tabla 11

Punto	Peso Unitario
La Aurora	13.97 KN/m ³
Xoloco	12.12 KN/m ³

Tabla 11



Los resultados de las pruebas del RQD y GSI nos permitió determinar la calidad de la roca granito. El trabajo de campo permitió observar que la roca que conforma el talud es Granito muy tectonizado y rugoso con la presencia de tres familias de fracturas, dichas fracturas no se encontraron rellenas de algún mineral y las aberturas no superaban los 3 milímetros.

- (RQD) Rock Quality Designation

El RQD se calculó en el talud de La Autopista para determinar la calidad de la roca a partir de un afloramiento del macizo rocoso donde se analizaron un total de 2 metros de longitud.

En el análisis del RQD se encontraron 6 bloques de roca mayores a los 10 centímetros en los 2 metros que se analizaron (Figura 5.1). Los bloques de roca que superaron los 10 centímetros (polígonos rojos de la figura 5.1) fueron de 25, 21, 14, 32, 26 y 14 centímetros. El RQD que se obtuvo fue del 66% para el talud de La Autopista.

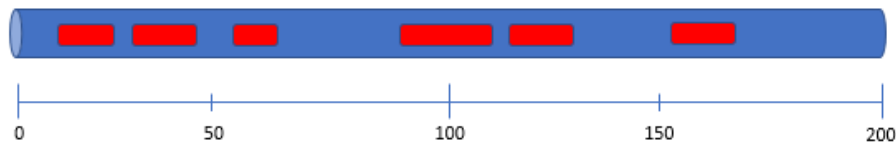


Figura 5.1: Análisis del RQD para el talud de La Autopista

- (GSI) Geological Strength Index

Determinar el índice de resistencia geológica nos permitió calcular el Factor de seguridad en el talud de La Autopista. La estructura y las condiciones de superficie del macizo rocoso nos permitió determinar que la estructura presenta bloques cúbicos formados por tres interacciones de sistemas de discontinuidades (Fracturada) y presento condiciones de superficie rugosa y ligeramente meteorizada (Buena).



Con este análisis se permito obtener un GSI entre el rango de 67 a 64, por lo que se determinó tener un GSI de 65 (Figura 5.2) para el análisis de estabilidad de taludes.

<p>INDICE DE ESFUERZO GEOLOGICO PARA ROCAS UNIDAS (HOEK& MARINOS, 2000)</p> <p>Desde la litología, estructura y condiciones de superficie de las discontinuidades, se estiman el valor promedio del GSI. No intentar ser muy preciso. Un rango de 33 a 37 es más real que tomar un GSI de 35. Note que la tabla no aplica a las fallas controladas estructuralmente. Donde los planos estructurales débiles están presentes en una dirección desfavorables con respecto a la excavación, estos dominaran el comportamiento del macizo rocoso. Las zonas de fallas son propensas a la alteración como resultado de cambios de humedad que puede reducir cuando el agua está presente. Cuando trabajamos en rocas regular o mala calidad cambian las condiciones por el cambio de humedad. La precisión del agua es tratada por análisis de esfuerzos efectivos.</p> <p>ESTRUCTURA</p>	CONDICIONES DE SUPERFICIE				
	MUY BUENA Superficie muy rugosas, no meteorizadas, frescas	BUENA Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas, manchadas con hierro	REGULAR Superficies lisas, moderadamente meteorizadas, y alteradas	POBRE Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos compactos	MUY POBRE Superficie con espejos de falla, alto grado de meteorización y rellenos de arcillas suave
<p>INTACTA O MASIVA Rocas intactas o masivas in-situ, rocas con discontinuidades amplias y espaciadas.</p>	90		N/A		N/A
<p>FRACTURADA Macizo rocos con bloques enclavados, bloques cúbicos formados tres intersecciones de sistemas de discontinuidades.</p>	80		N/A		N/A
<p>MUY FRACTURADA Macizo perturbado con bloques entrabados y angulares formados por la intersección de 4 o mas sistemas</p>	70		N/A		N/A
<p>FRACTURADA/PERTURBADA/SORBIDA Macizo plegados formado por bloques angulares productos de la intersección de varios sistemas de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificación</p>	60		40		N/A
<p>DISGREGADO Pobremente enclavado, macizo altamente fracturado con mezcla de fragmentos angulares y redondeados</p>	50		30		N/A
<p>LAMINADA/FOLIADA Se carece de bloques debido al débil material en los planos de esquistosidad y cizalla</p>	N/A		20		10

Figura 5.2: Análisis del GSI para el talud de La Autopista



5.2 Resultados de las pruebas de laboratorio

- Granulometría

Los resultados de la granulometría de los suelos de La Aurora y Xoloco con el láser FRITSCH ANALYSETTE 22 NeXT, permitió obtener los porcentajes de arcilla, limo, arena y grava que constituían las laderas.

Los puntos de La Aurora y Xoloco presentaron un mayor porcentaje de material de limos del 82 y 50 % respectivamente, los demás porcentajes se describen en la tabla 12 y 13.

Muestra	Porcentaje
Arcilla	9.070129954
Limo	82.035697
Arena	3.631273043
Grava	5.262836683

Tabla 12: Porcentaje de suelos de La Aurora

Muestra	Porcentaje
Arcilla	6.271326019
Limo	50.65592737
Arena	37.80984661
Grava	5.262836683

Tabla 13: Porcentaje de suelos de Xoloco

5.3 Resultados del análisis de estabilidad

Se realizó el análisis de estabilidad de taludes para los puntos llamados La Aurora, Xoloco y La Autopista observándose diferentes grados de estabilidad en dos condiciones, saturadas y no saturadas. Los taludes de La Aurora y Xoloco presentaron Factores de seguridad muy bajos en condiciones saturadas por lo que se procedió a realizar diferentes medidas de estabilización en cada talud.



Resultados del análisis de estabilidad de taludes en La Aurora

Escenario 1

El análisis de estabilidad de talud de La Aurora (Figura 5.3) presento un Factor de seguridad de 1.27 en condiciones no saturadas y con la presencia de grietas de tensión lo cual nos indicó que en dichas condiciones es estable.

El mapa de Factor de seguridad local (Figura 5.4) presentó cuatro zonas de plasticidad tres de ellas de dimensiones muy pequeñas, la zona de mayor dimensión se observó en la corona del talud y presentó una gran área de plasticidad, esta se encuentra en su mayoría en la ignimbrita no soldada.

De acuerdo con el mapa se pudo observar que la superficie de menor Factor de seguridad se presenta en la corona del talud y tiene una profundidad aproximada de 5 metros, también se pudo observar que en la corona se presentan dos principales zonas que podrían generar plasticidad y posteriormente una ruptura.

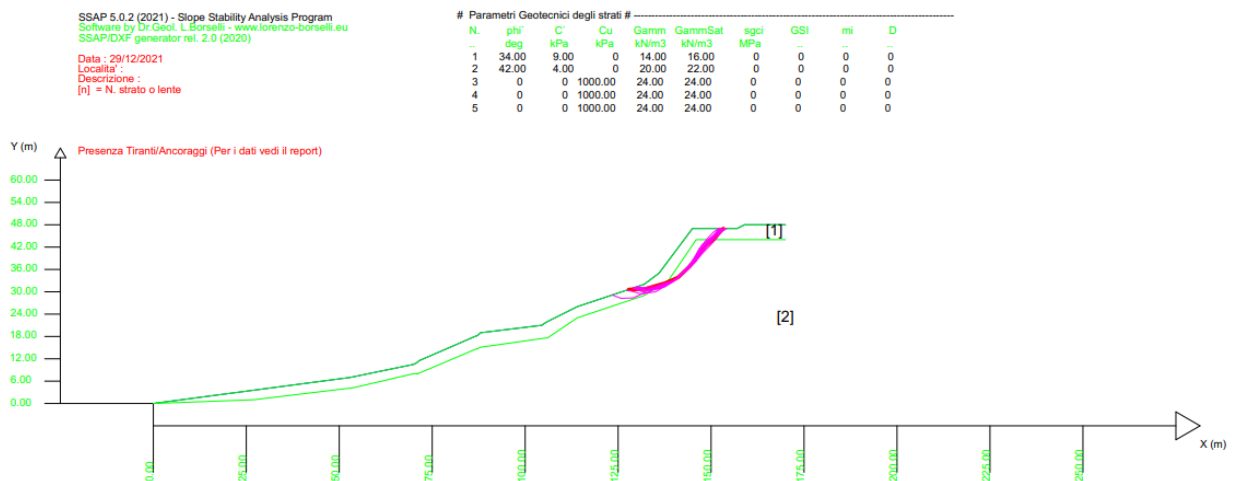


Figura 5.3: Análisis de estabilidad del talud de La Aurora en condiciones no saturadas

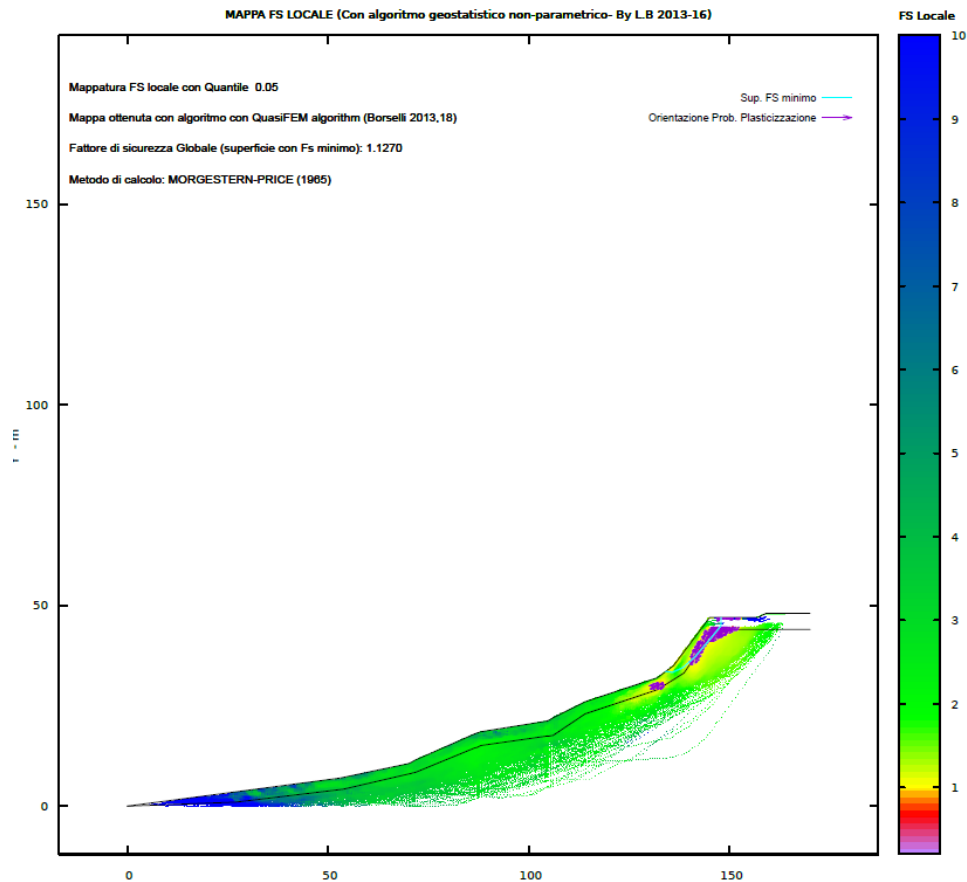


Figura 5.4: Mapa de Factor de seguridad local de La Aurora en condiciones no saturadas

Escenario 2

El análisis de estabilidad del talud de La Aurora en condiciones saturadas y con presencia de grietas totalmente rellenas de agua (Figura 5.5) presento un Factor de seguridad de 0.39 el cual nos indicó que es completamente inestable en dichas condiciones.

El mapa de Factor de seguridad local (Figura 5.6) nos indicó tres principales zonas con posible plasticidad y por consecuencia presentar ruptura local, el área de mayores dimensiones se presentó en la cima del talud indicándonos la superficie de menor Factor de seguridad teniendo aproximadamente 7 metros de profundidad. Las otras dos áreas que se observaron en el mapa del Factor de seguridad local son de menor dimensión presentándose en la parte media y baja del talud.



La presencia de estas dos zonas que se observaron, que son de dimensiones menores se tomaron en cuenta en la parte de la estabilización del talud de La Aurora.

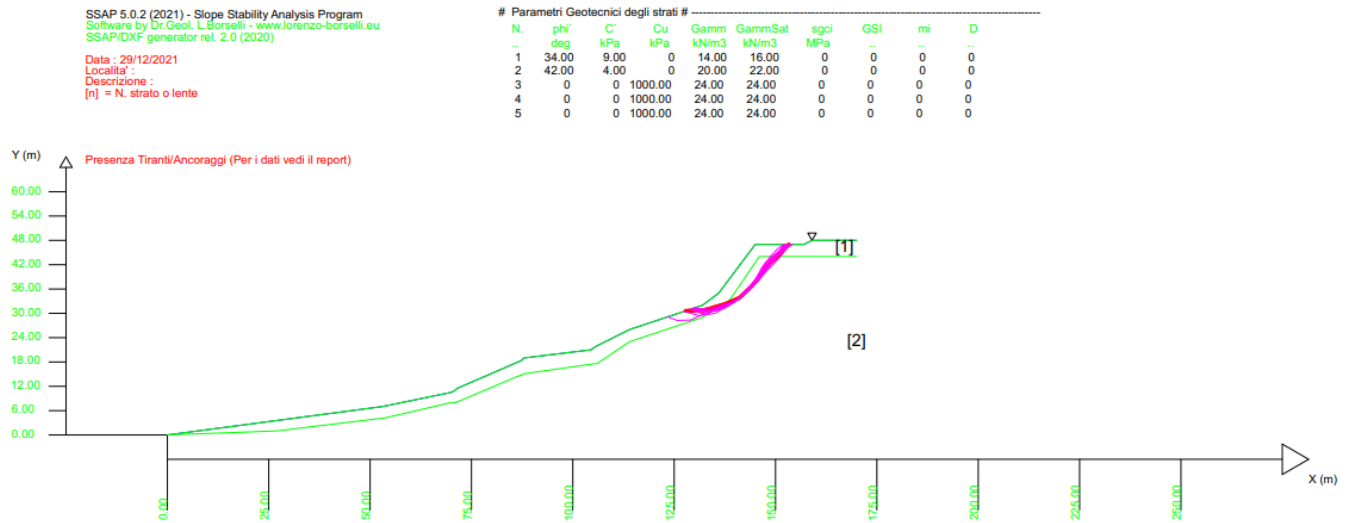


Figura 5.5: Análisis de estabilidad del talud de La Aurora en condiciones saturadas

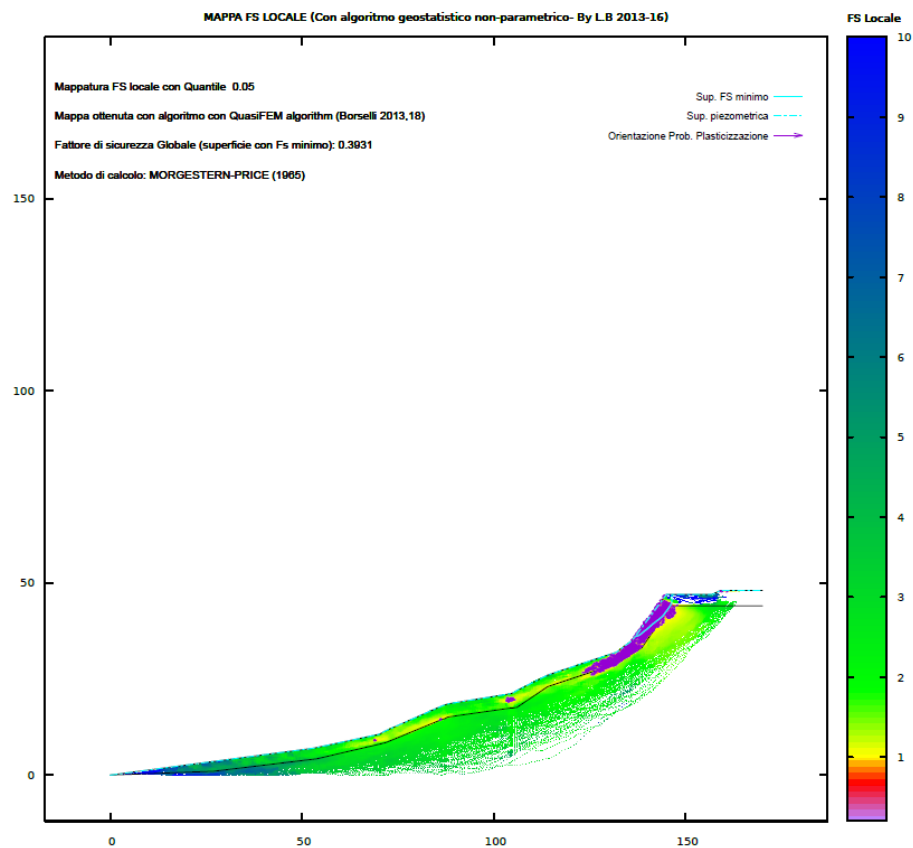


Figura 5.6: Mapa de Factor de seguridad local de La Aurora en condiciones saturadas



El análisis de estabilidad de taludes para el punto llamado La Aurora en condiciones saturadas y con la presencia de grietas de tensión rellenas de agua presentó un valor de 0.39 el cual indicó que es totalmente inestable por lo que se procedió a realizar medidas de estabilización para disminuir las fuerzas actuantes y aumentar las fuerzas resistentes.

- Medidas para reducir las fuerzas actuantes

En la estabilización del talud de La Aurora en el escenario 2 se disminuyeron las fuerzas actuantes que desestabilizan el talud, en específico para este talud se necesitó remover los materiales inestables y la reducir del peso del material acumulado en la cima de la ladera, por lo que se modificó la geometría del talud de La Aurora.

- Medidas para incrementar las fuerzas resistentes

Para incrementar las fuerzas resistentes del talud de La Aurora se aplicó la construcción de obras de contención como la colocación de diez clavos en la parte superior del talud, los clavos tienen 10 metros de largo con una inclinación de -15 grados, una rigidez de 500 KN/m y con el 20% del clavo cementado en la base.

También se realizó la construcción de tres muros de contención a lo largo del talud principalmente en la parte media e inferior del talud, las dimensiones de los muros de contención de hormigón son de 1.5 metros de ancho por 5 metros de profundidad y tienen un soporte de presión de 1000 KPa.

Asimismo, se propuso la construcción de drenaje para ayudar con la reducción de fuerzas actuantes (presiones hidrostáticas) y el incremento de las fuerzas resistentes (incrementar la resistencia de los materiales).

La solución que se propuso remover la capa de suelo superficial y posteriormente inyectar cemento en las grietas de tensión para eliminar la presión ejercida a partir de la presencia de agua, para eliminar la presencia de las grietas de tensión. También aplicar materiales geosintéticos en la parte superior del talud para impedir la erosión de los suelos y la infiltración del agua superficial al talud, estas medidas ayudarán a aumentar el Factor de seguridad en el talud de La Aurora.



El cálculo del Factor de seguridad (Figura 5.7) en condiciones saturadas y con las medidas de estabilización se presento un Fs de 1.36 lo cual nos indicó que con diez clavos y con tres muros de contención es estable en condiciones donde el talud está totalmente saturado.

En el mapa de Factor de seguridad local (Figura 5.8) se pudieron observar 7 zonas de que podrían presentar plasticidad y posteriormente un ruptura local, dos de las zonas son de dimensiones muy pequeñas y se presentaron en la parte inferior del talud, mientras que tres de las zonas intermedias se presentaron en la parte media del talud y se encuentran entre los muros de contención y las dos zonas de mayor dimensión se encontraron cerca de la corona del talud en el área en donde se emplazaron los clavos a la ignimbrita soldada.

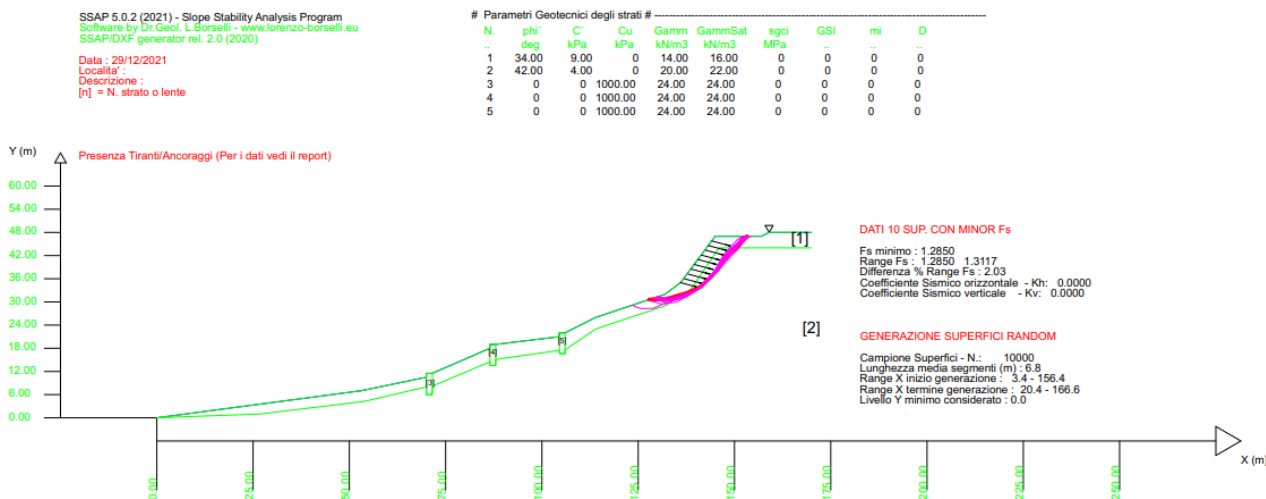


Figura 5.7: Análisis de estabilidad del talud de La Aurora en condiciones saturadas y con medidas de estabilización

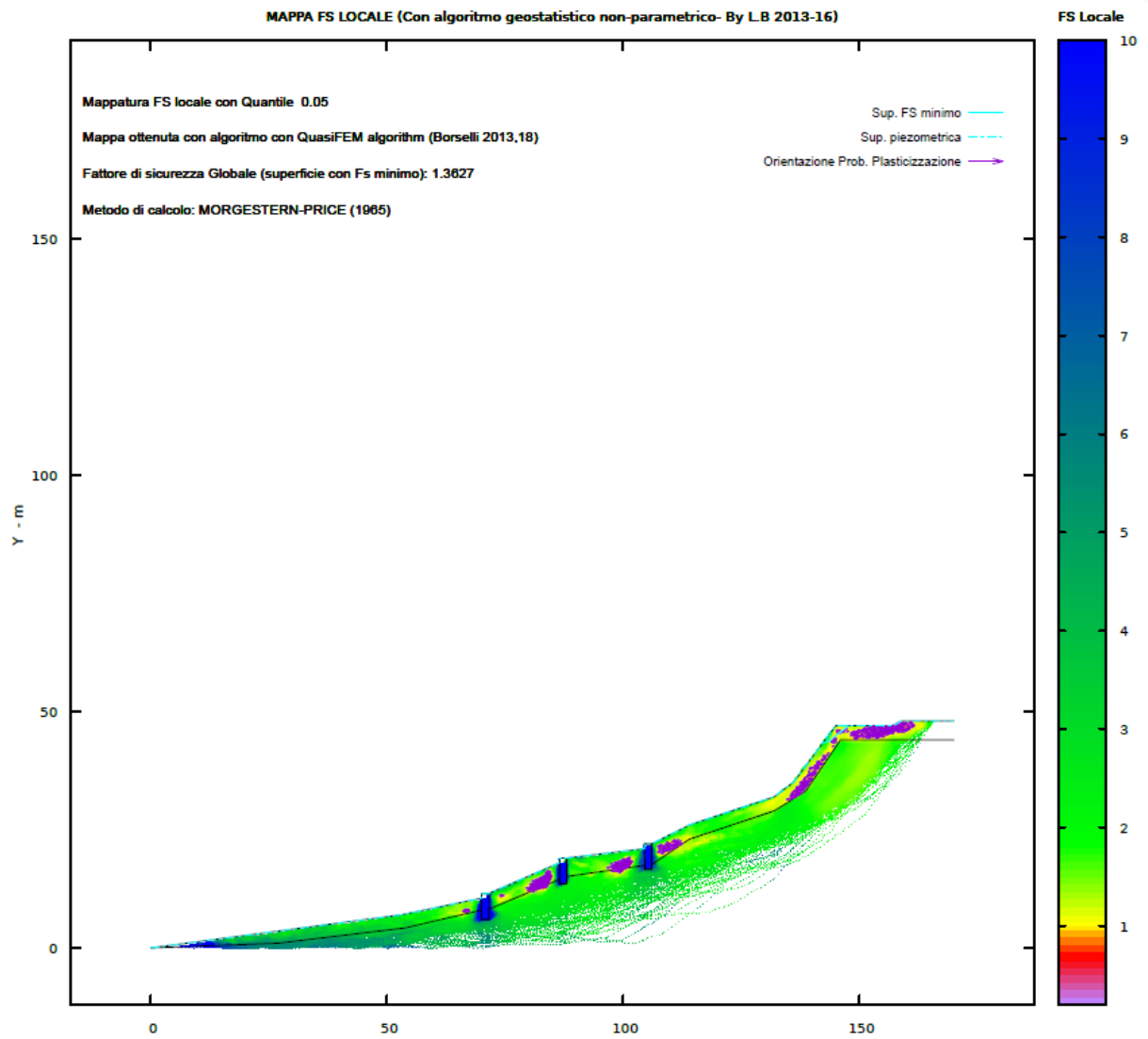


Figura 5.8: Mapa de Factor de seguridad local de La Aurora en condiciones saturadas y con medidas de estabilización

Resultados del análisis de estabilidad de taludes en La Autopista

Escenario 1

El análisis de estabilidad de taludes (Figura 5.9) en la Autopista presento un Factor de seguridad de 3.59 en condiciones no saturadas y con la presencia de grietas de tensión, lo cual nos indicó que en dichas condiciones es estable. El mapa del Factor de seguridad local (Figura 5.10) presento dos áreas estables de color azul y verde que nos indicó que el talud no presento áreas locales con posible plasticidad y posteriormente presentar ruptura local.

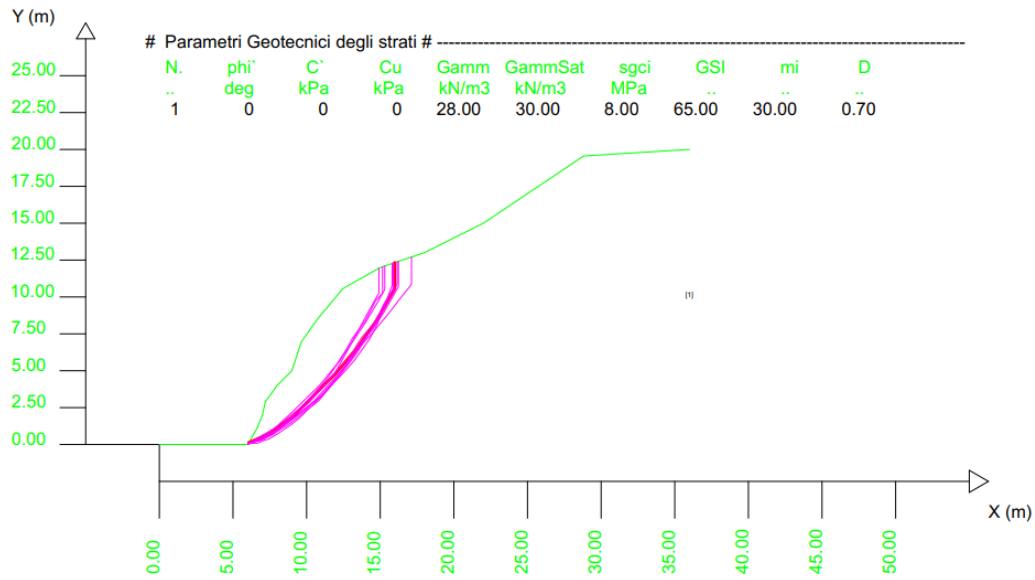


Figura 5.9: Análisis de estabilidad del talud de La Autopista en condiciones no saturadas

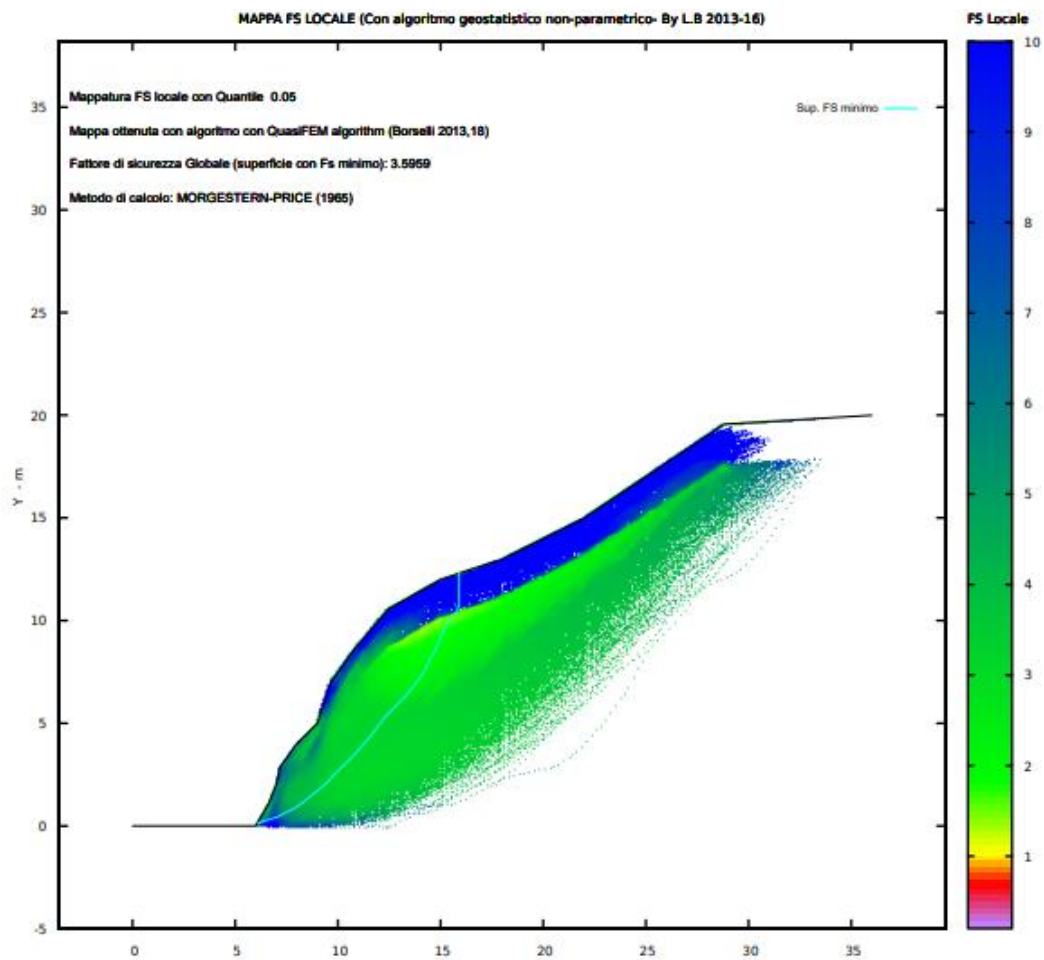


Figura 5.10: Mapa de Factor de seguridad local de La Autopista en condiciones no saturadas



Escenario 2

El resultado del análisis de estabilidad de taludes (Figura 5.11) del punto llamado La Autopista en condiciones saturadas y con la presencia de grietas de tensión rellenas de agua indico un Factor de seguridad de 2 lo cual nos indicó que es estable en mencionadas condiciones.

Como resultado del análisis obtuvimos el mapa de Factor de seguridad local (Figura 5.12) donde pudimos observar una zona de color amarillo que podría presentar plasticidad y posteriormente ruptura, esto teniendo en cuenta que la menor superficie crítica es superior a 2.

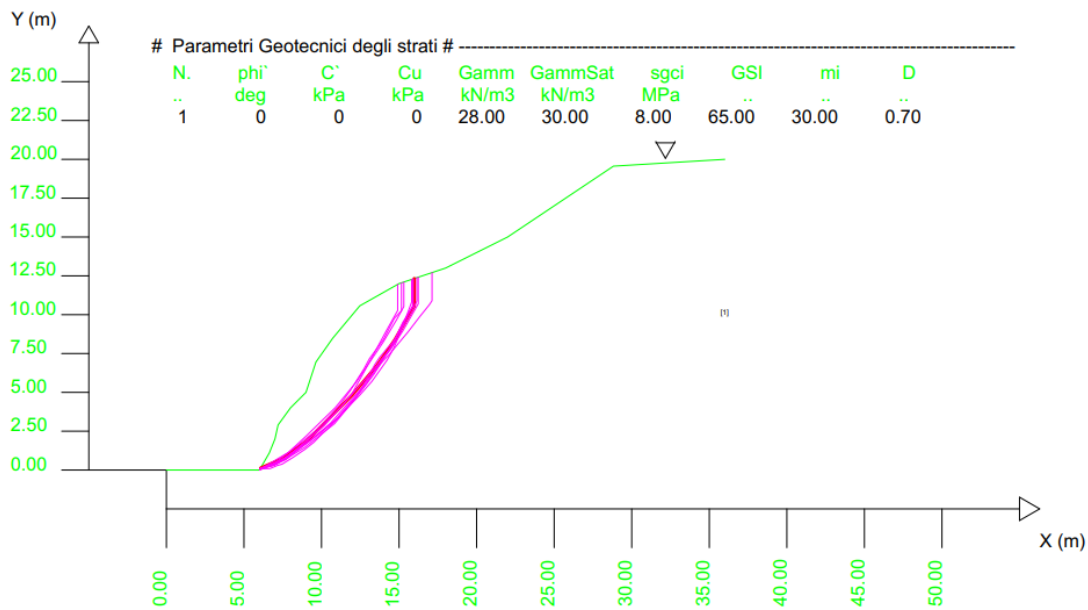


Figura 5.11: Análisis de estabilidad del talud de La Autopista en condiciones saturadas

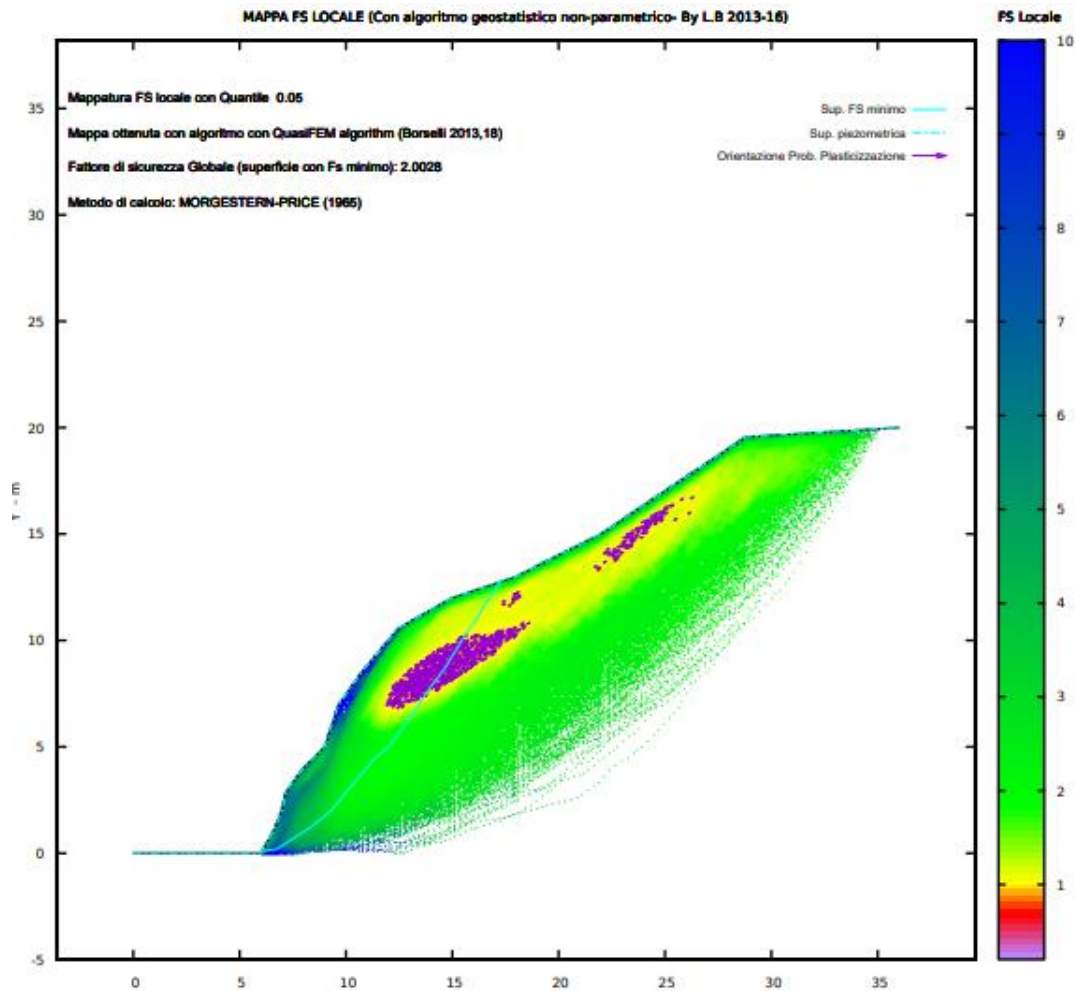


Figura 5.12: Mapa de Factor de seguridad local de La Autopista en condiciones saturadas

Resultados del análisis de estabilidad de taludes de Xoloco

Escenario 1

Los resultados del análisis de estabilidad del talud de Xoloco (Figura 5.13) presento un Factor de seguridad de 1.35 lo que nos indicó que es estable en condiciones secas o no saturadas y con la presencia de grietas de tensión.

El mapa del Factor de seguridad local (Figura 5.14) presento una zona que probablemente podría presentar plasticidad y posteriormente una ruptura local, esta zona se encuentro en la cima del talud entre la ignimbrita soldada y la ignimbrita no soldada.

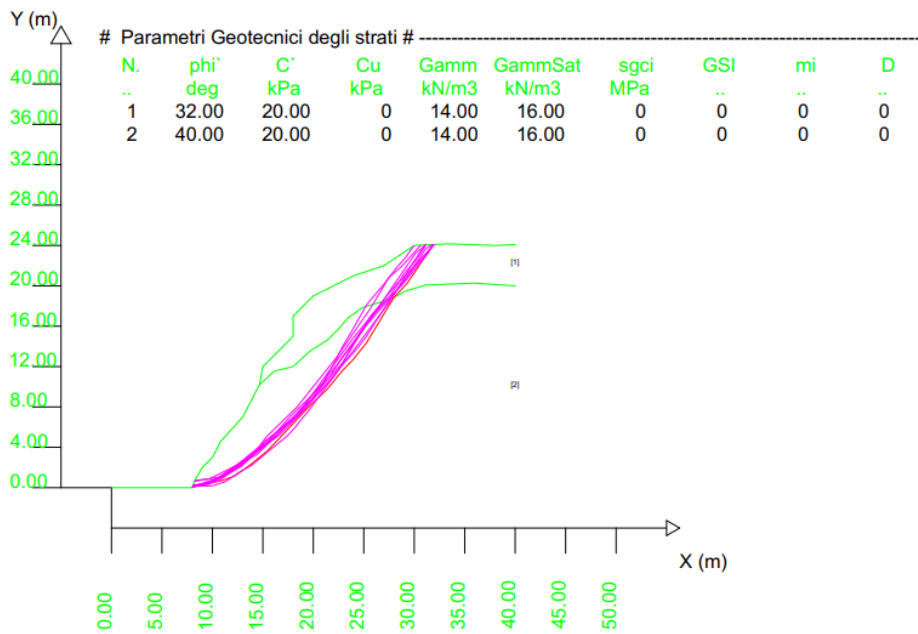


Figura 5.13: Análisis de estabilidad del talud de Xoloco en condiciones no saturadas

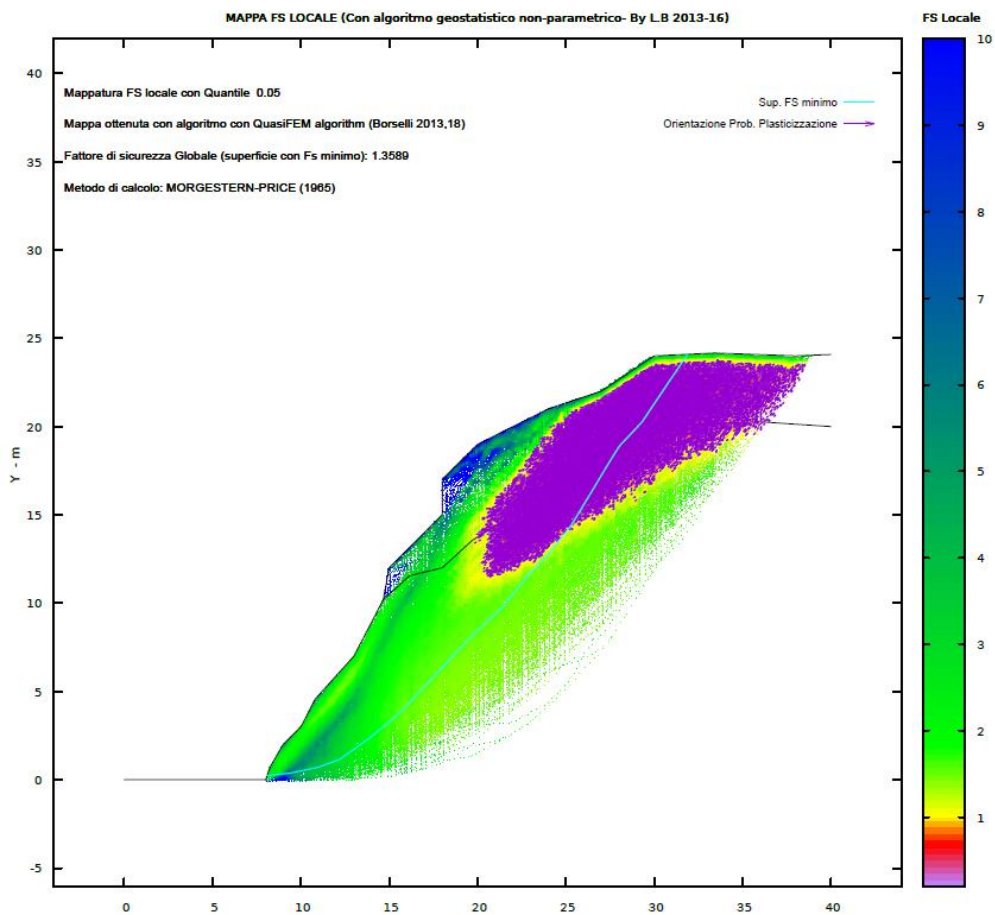


Figura 5.14: Mapa de Factor de seguridad local de Xoloco en condiciones no saturadas



Escenario 2

Los resultados del análisis de estabilidad taludes del punto llamado Xoloco (Figura 5.15) en condiciones totalmente saturadas y con la presencia de grietas de tensión rellenas de agua, presento un Factor de seguridad de 0.97 lo que nos indicó que el talud es inestable en dichas condiciones.

El mapa del Factor de seguridad local (Figura 5.16) presento una zona con posible plasticidad y por consecuencia podría presentar una ruptura, esta zona se observa en la ignimbrita no soldada donde se encuentro la superficie de menor factor de seguridad, la superficie critica tiene una profundidad promedio de 5 metros de profundidad.

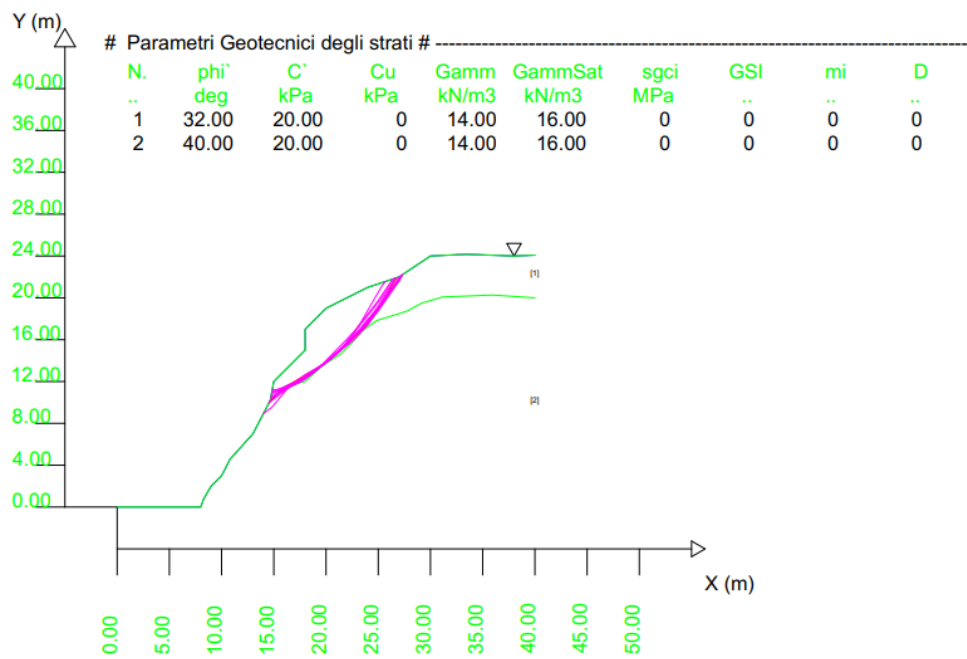


Figura 5.15: Análisis de estabilidad del talud de Xoloco en condiciones saturadas

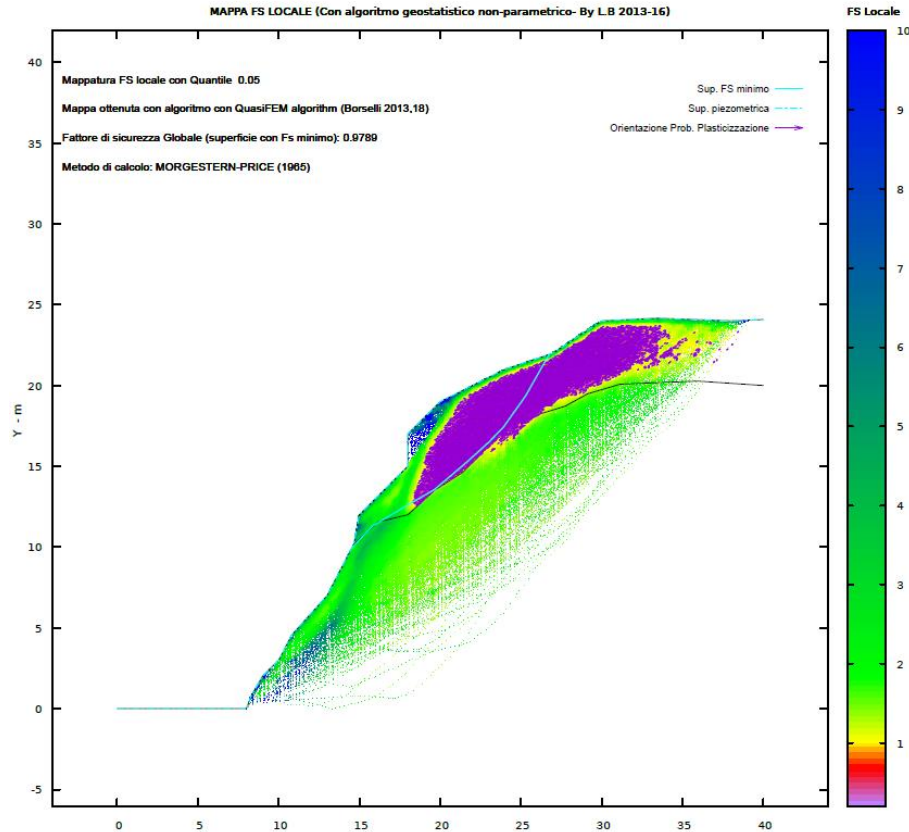


Figura 5.16: Mapa de Factor de seguridad local de Xoloco en condiciones saturadas

El análisis de estabilidad de taludes en el punto llamado Xoloco presento resultados de 0.95 en condiciones saturadas y con grietas de tensión totalmente rellenas de agua lo cual nos indicó que es inestable por lo que se realizaron las medidas de mitigación o estabilización.

- Medidas para reducir las fuerzas actuantes

El talud de Xoloco se presentó inestable cuando se encuentra totalmente saturado y las medidas para la reducción de las fuerzas actuantes fueron las siguientes, la primera medida consto en modificar la geometría de la ladera a un ángulo de menor inclinación, en la segunda medida se realizaron cuatro bermas de 2 X 2 metros en la parte superior de la ladera, la remoción de materiales inestables y de material acumulado en la corona de la ladera.



- Medidas para incrementar las fuerzas resistentes

Para estabilizar el talud de Xoloco se realizó la construcción de un muro de contención de hormigón en el pie del talud, cuyas dimensiones del muro fueron de 1.5 metros de ancho por 5 metros de profundidad con un soporte de presión de 1000 KPa.

Para aumentar el Factor de seguridad en el talud de Xoloco se decidió recomendar la construcción de drenaje superficial y subterráneo que ayudara a reducir las actuantes como presiones hidrostáticas y el aumento de las fuerzas resistentes al impedir que se reduzcan la resistencia de los materiales.

También se recomienda remover la capa superficial del suelo y posteriormente inyectar cemento en las grietas de tensión y al final aplicar materiales geosintéticos en la cima del talud para evitar la infiltración del agua pluvial y residual, además de impedir la erosión de los suelos.

El cálculo del Factor de seguridad (Figura 5.17) con las medidas de mitigación y en condiciones donde el talud está totalmente saturado presento un Fs de 1.22 lo cual nos indica que con la elaboración de bermas, la modificación de la ladera y la colocación de un muro de contención el talud es estable y las medidas son correctas para estabilizar el talud de Xoloco.

El mapa del Factor de seguridad local (Figura 5.18) exhibió dos zonas que podrían presentar plasticidad, pero la más importante y de mayor dimensión es la zona que se encuentra en la cima del talud de Xoloco.

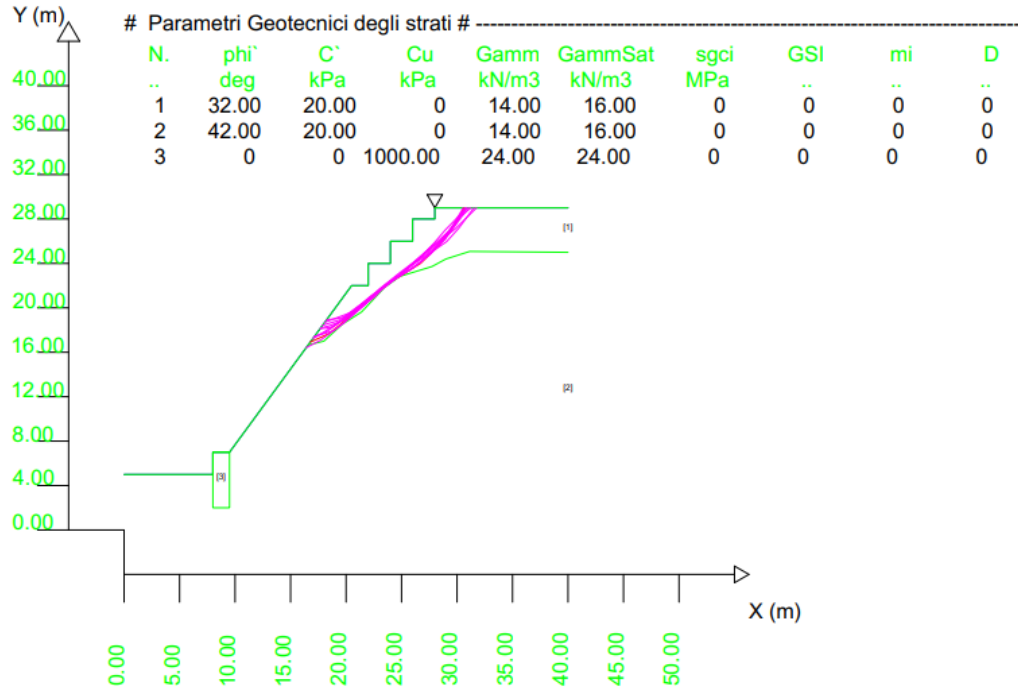


Figura 5.17: Análisis de estabilidad del talud de Xoloco en condiciones saturadas y con medidas de estabilización

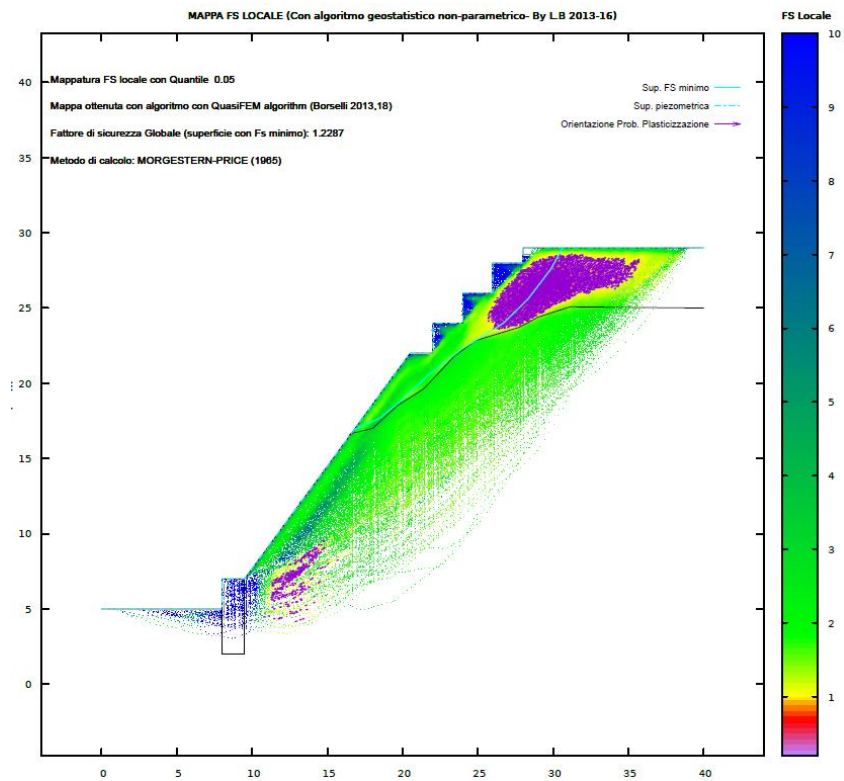


Figura 5.18: Mapa de Factor de seguridad local de Xoloco en condiciones saturadas y con medidas de estabilización



5.4 Resultados de la simulación de deslizamientos

La simulación de flujos de masas con el código Titan2D para el talud de La Aurora nos permito observar la distribución y alcance de posibles deslizamientos. En cada talud se realizaron diez simulaciones en función del incremento o disminución al ángulo de fricción basal y manteniendo constante el volumen, el punto de descentralización, la orientación, la dirección, el ángulo de fricción, etc.

Con el incremento o disminución del ángulo de fricción basal se observaron diferentes distribuciones y alcances de deslizamientos, en el talud de la Aurora se observó que al disminuir al ángulo de fricción basal a 3 grados y al mantener constante el ángulo de fricción interna la distribución de la simulación se comportó similar a lo sucedido el 5 de octubre de 1999 en el Talud de la Aurora.

Talud de La Aurora

La simulación de los flujos de masas con el código Titan2D permitió realizar 10 diferentes escenarios, presentando diferentes alcances y distribuciones, esto variando el ángulo de fricción basal y con un ángulo de fricción interna de 34 grados, los demás parámetros se mantuvieron constantes como se mencionó anteriormente.

Para realizar los diferentes escenarios simulados se tomó en consideración el deslizamiento del 5 de octubre de 1999 en el talud de La Aurora, tomando en cuenta las características del flujo de masa deslizado como la evolución, distribución y alcance del deslizamiento (Figura 5.19).

El volumen de la masa inestables se mantuvo constante en todas las simulaciones, este volumen fue de 7182 m³ y se determinó a partir de la geometría del talud y la menor superficie del Factor de seguridad antes mencionada. Estas características nos ayudaron para modelar de una manera correcta los escenarios y predecir un escenario correcto.

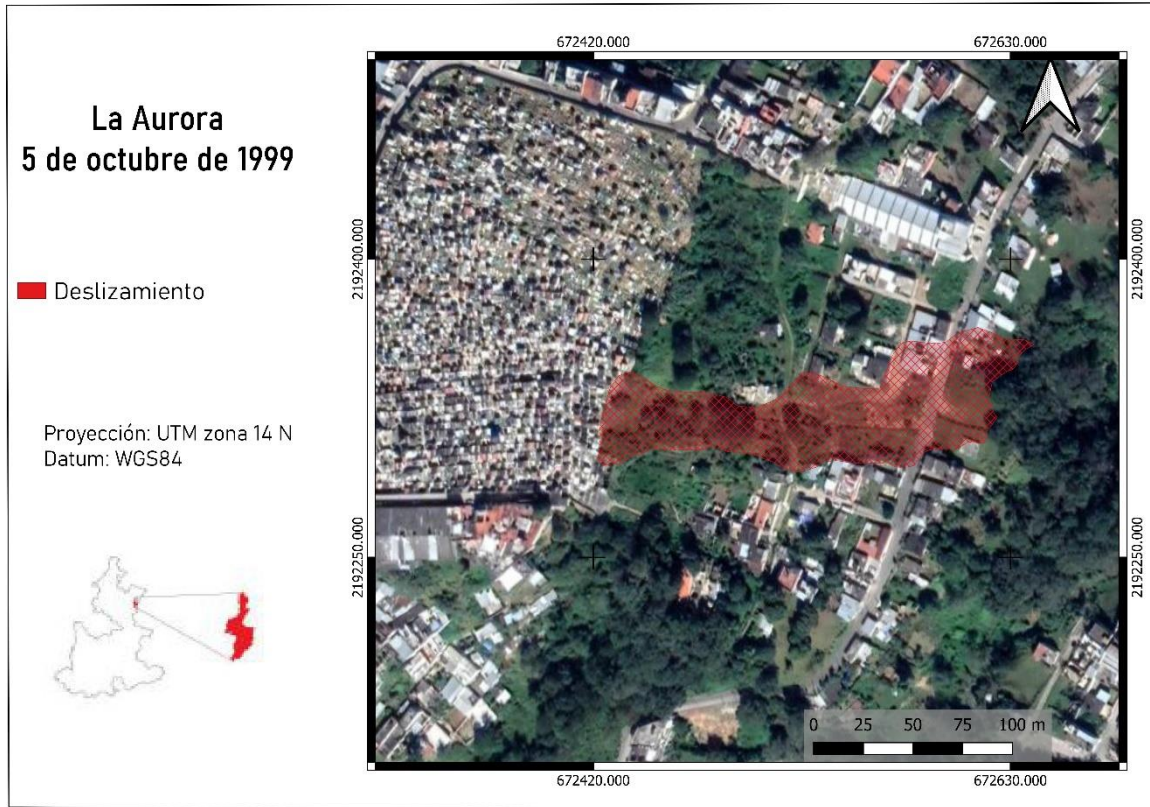


Figura 5.19: Distribución y alcance del deslizamiento del evento ocurrió el 5 de octubre de 1999 el La Aurora

La primera simulación (Figura 5.20) consideró un ángulo de fricción basal de 3 grados, eso permitió tener el escenario más similar al evento ocurrido el 5 de octubre de 1999.

El área expuesta de la simulación 1 fue de 7 750 m² y tuvo un alcance de más 200 metros de longitud. La segunda simulación (Figura 5.21) se modeló con un ángulo de fricción basal de 6 grados, el área expuesta que se obtuvo con esta simulación fue de 7605 m² y tuvo un alcance menor a los 200 metros de longitud. El tercer escenario (Figura 5.22) se simuló con un ángulo de fricción basal de 9 grados, tuvo un recorrido aproximado a los 150 metros de longitud y presentó un área expuesta de 7 022 m². La cuarta simulación (Figura 5.23) se realizó con ángulo de fricción basal de 12 grados y presentó un área expuesta de 6 755 m² y un alcance superior a los 100 metros de longitud.



La simulación cinco (Figura 5.24) se representó con ángulo de fricción basal de 15 grados y presento un área expuesta de 6 012 m² y un alcance superior a los 100 metros de longitud. El sexto escenario (Figura 5.25) se simulo con ángulo de fricción basal de 18 grados y presento un área expuesta de 5 708 m² y un alcance superior a los 100 metros de longitud. El séptimo escenario (Figura 5.26) se simulo con ángulo de fricción basal de 21 grados y presento un área expuesta de 4 998 m² y un alcance superior a los 100 metros de longitud. El escenario ocho (Figura 5.27) se simulo con ángulo de fricción basal de 24 grados y presento un área expuesta de 4 252 m² y un alcance superior a los 100 metros de longitud. La simulación nueve (Figura 5.28) se realizó con ángulo de fricción basal de 27 grados y presento un área expuesta de 3 397 m² y un alcance de 100 metros de longitud. El último escenario (Figura 5.29) se simulo con ángulo de fricción basal de 30 grados y presento un área expuesta de 3 427 m² y un alcance de 100 metros de longitud.

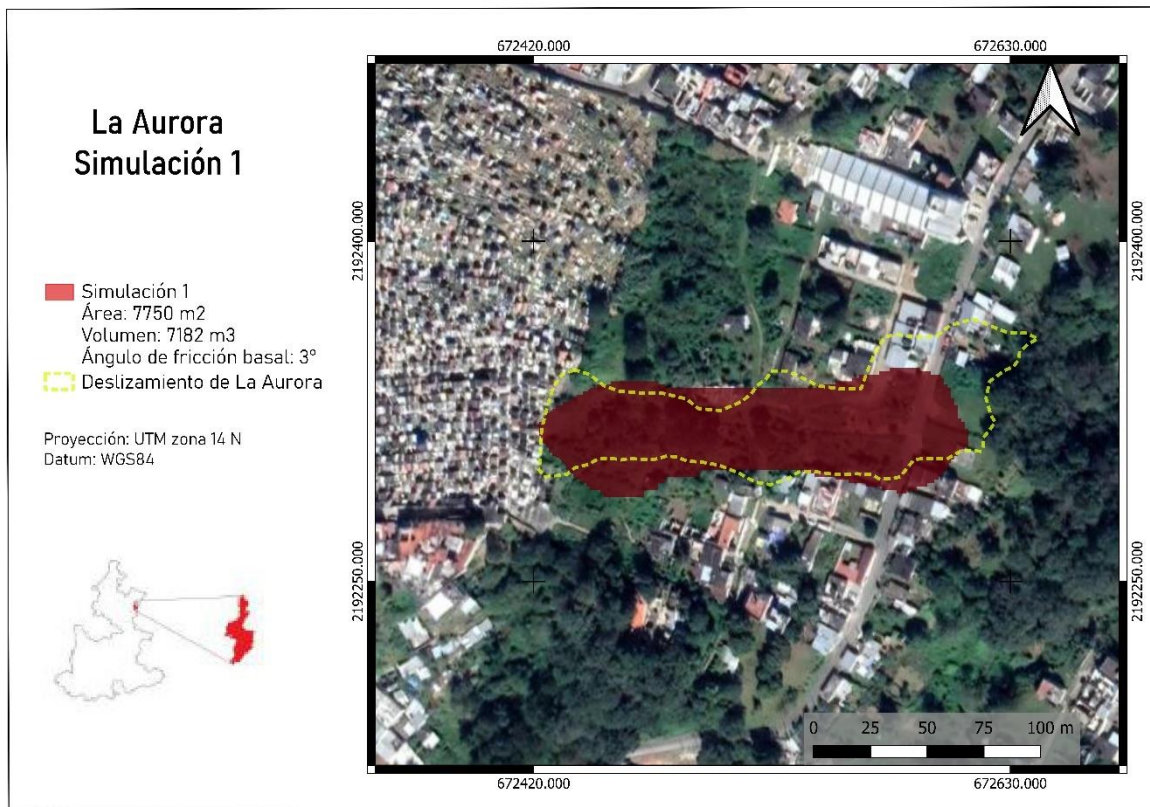


Figura 5.20: Simulación 1 del talud de La Aurora

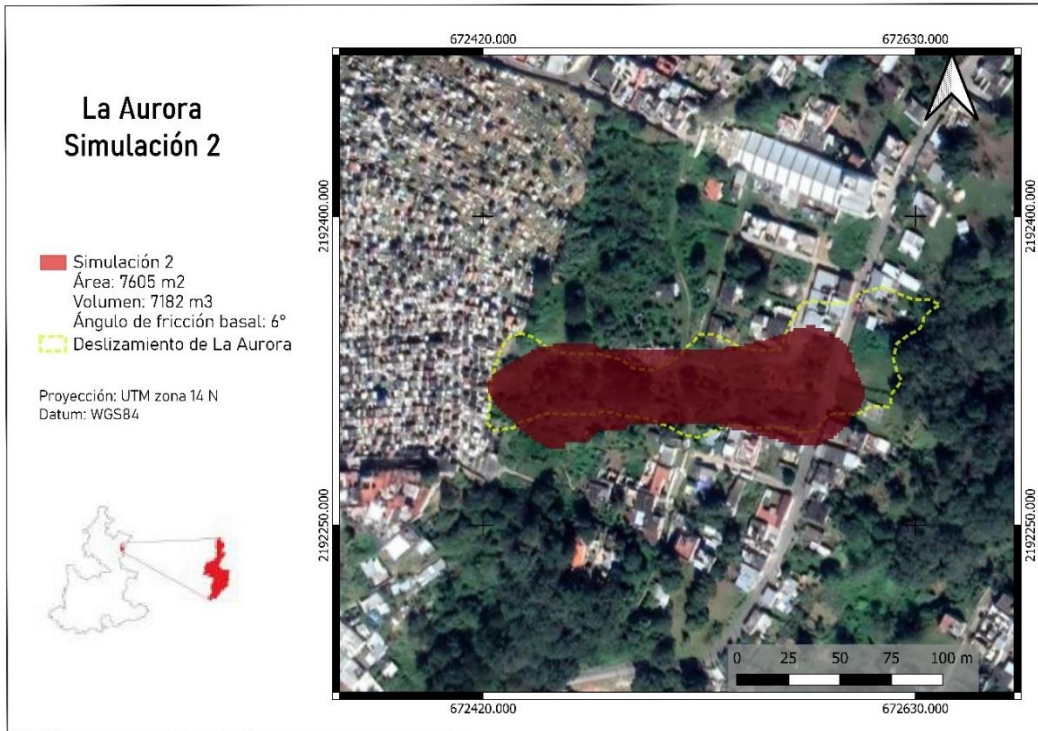


Figura 5.21: Simulación 2 del talud de La Aurora

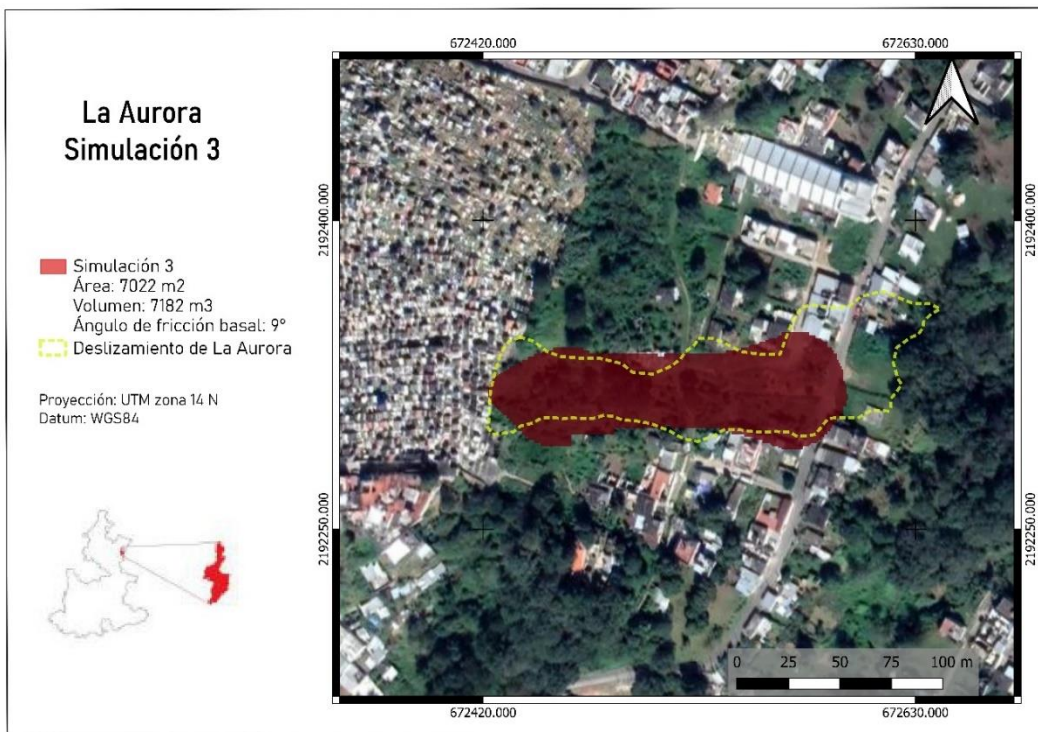


Figura 5.22: Simulación 3 del talud de La Aurora

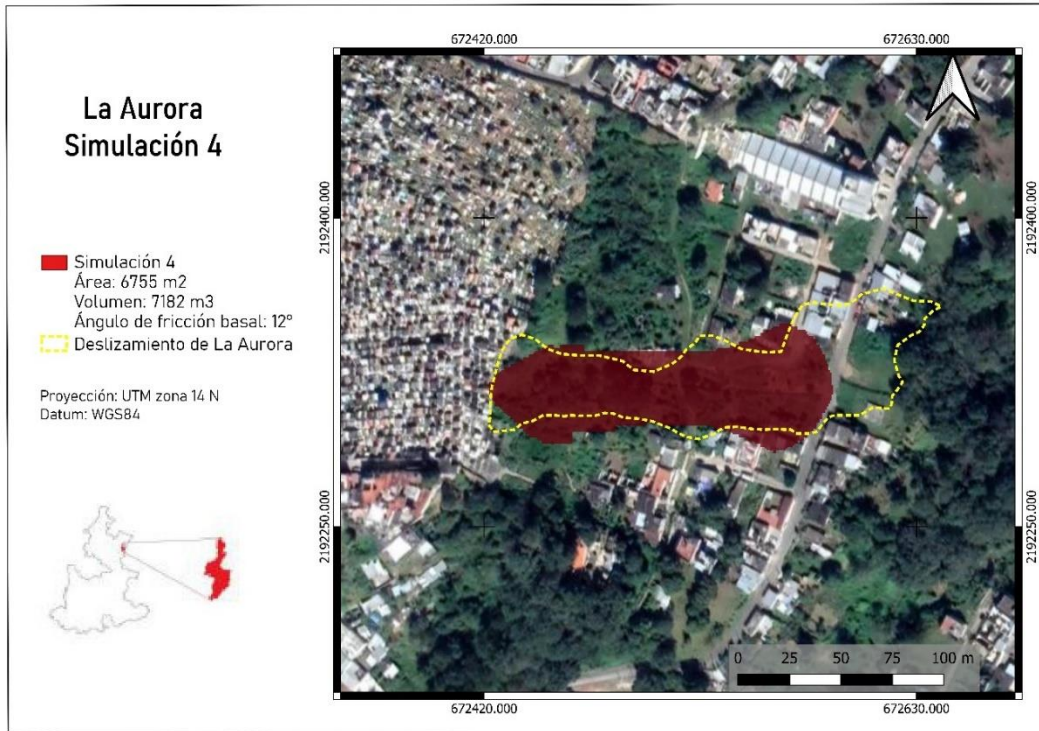


Figura 5.23: Simulación 4 del talud de La Aurora

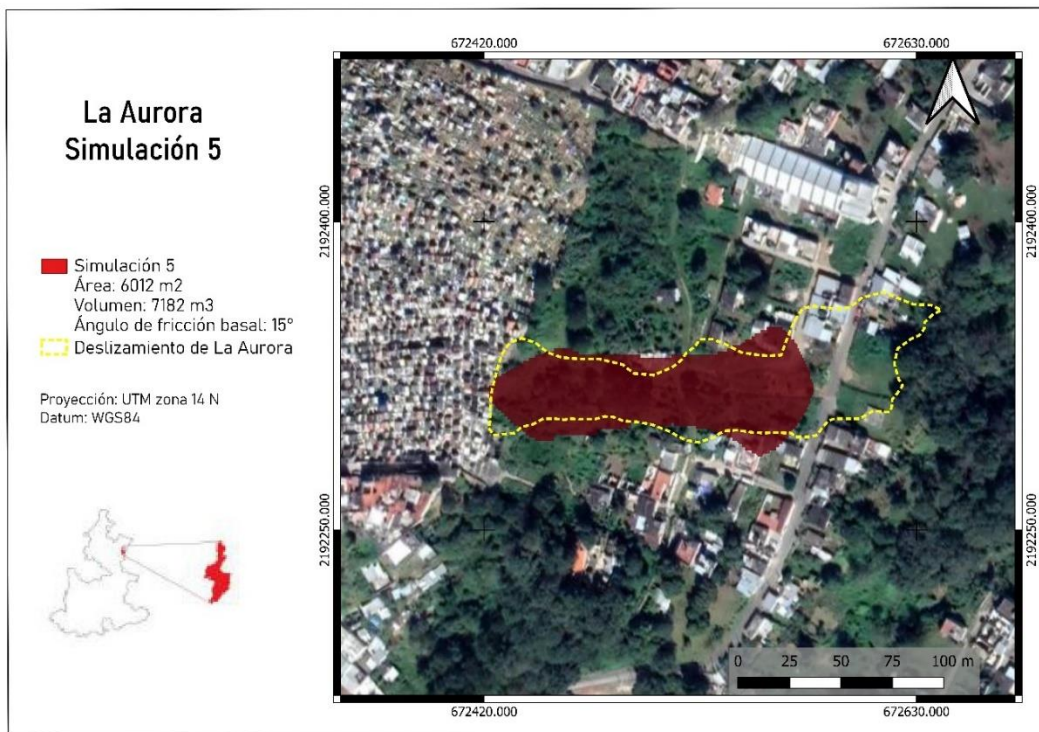


Figura 5.24: Simulación 5 del talud de La Aurora

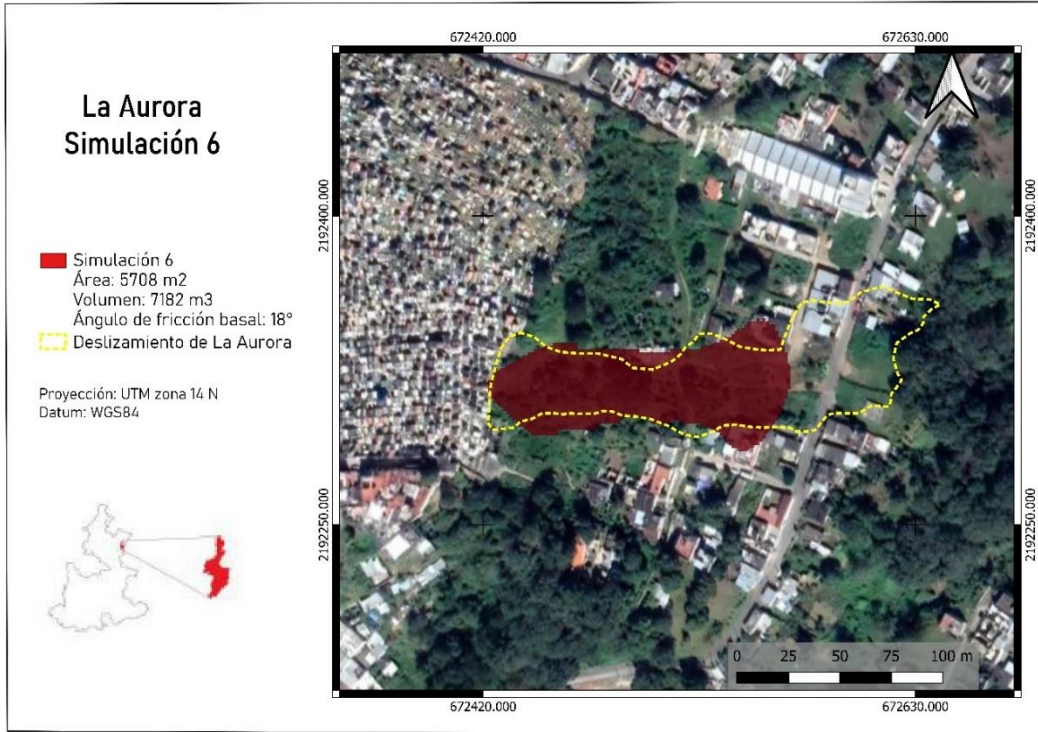


Figura 5.25: Simulación 6 del talud de La Aurora

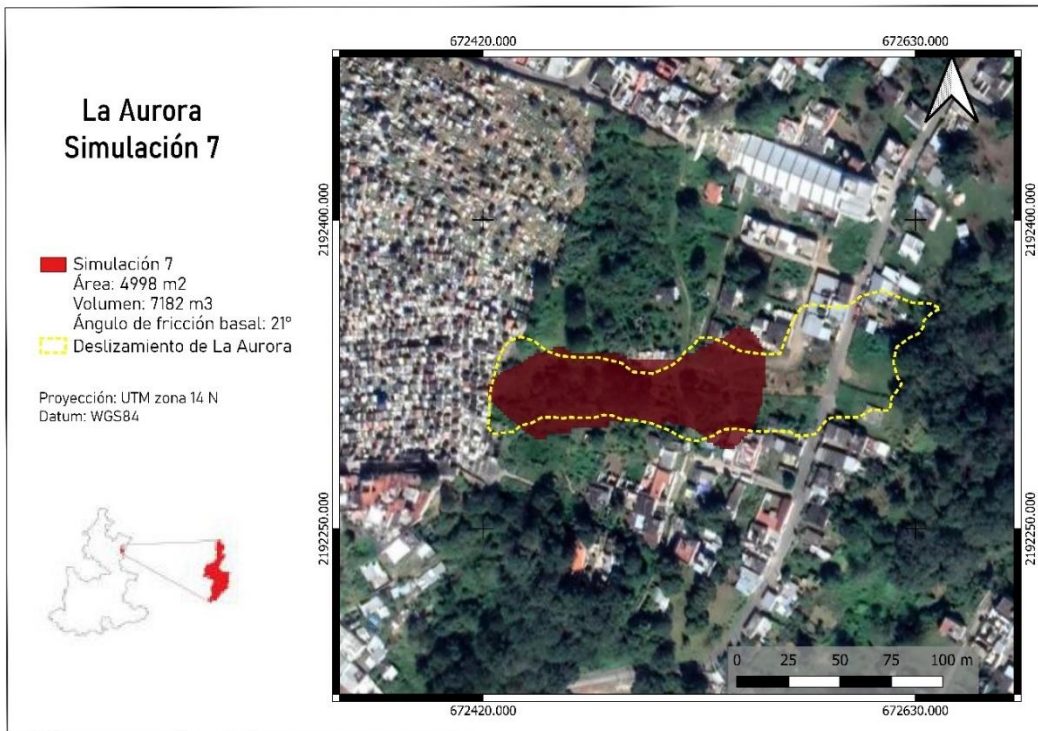


Figura 5.26: Simulación 7 del talud de La Aurora

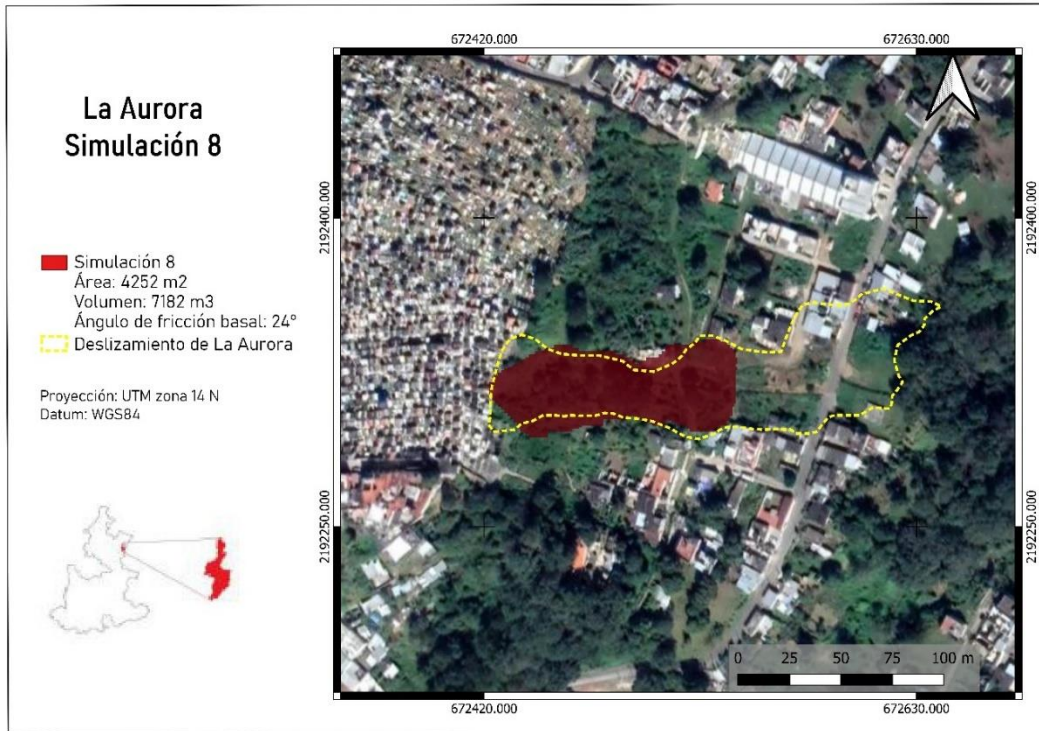


Figura 5.27: Simulación 8 del talud de La Aurora

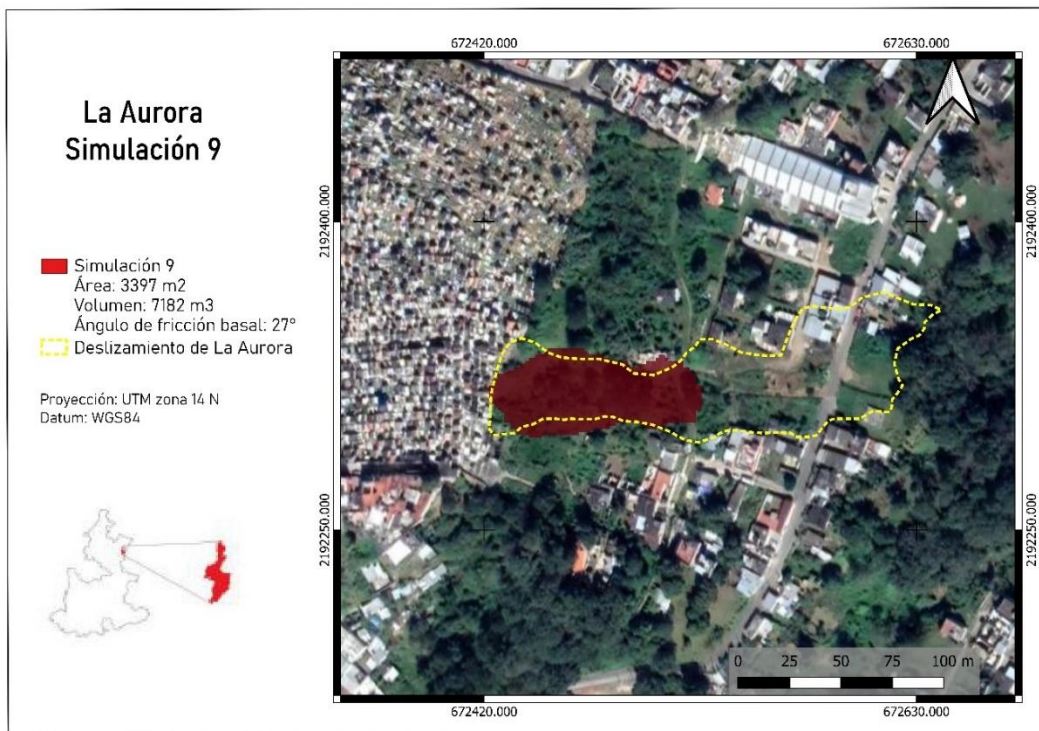


Figura 5.28: Simulación 9 del talud de La Aurora

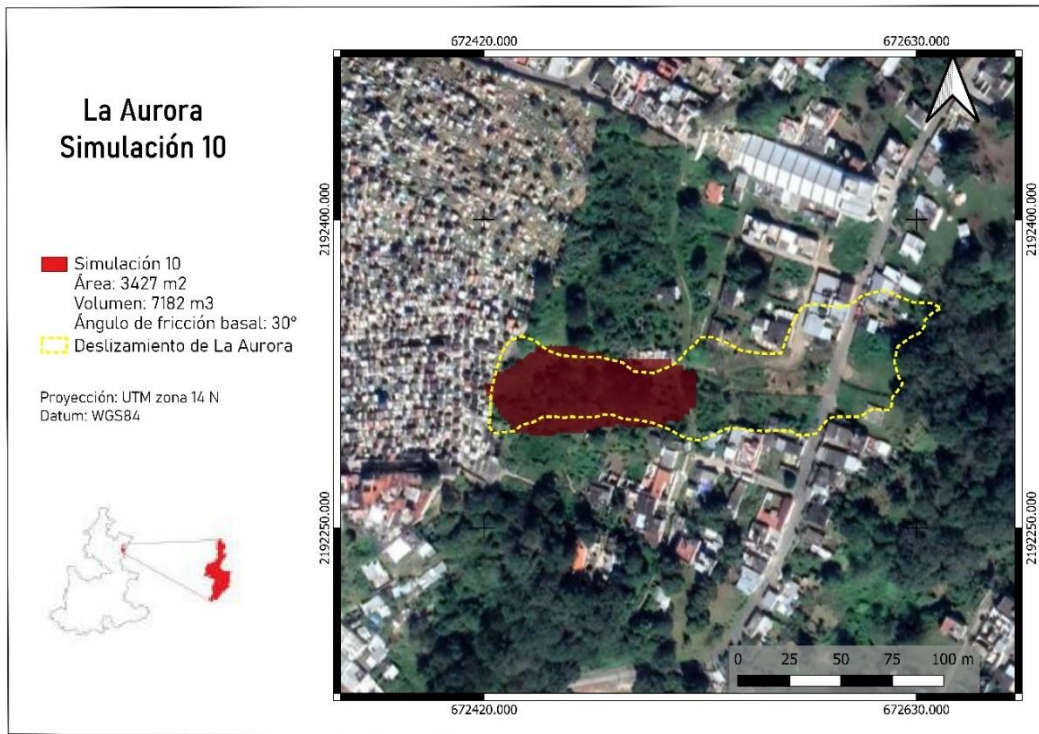


Figura 5.29: Simulación 10 del talud de La Aurora



5.5 Resultados del análisis de peligro

Parte fundamental del análisis de peligro por inestabilidad de laderas fue generar diferentes escenarios que permitieran observar el alcance del deslizamiento por lo que se generaron diez escenarios diferentes para el talud de La Aurora ya que de acuerdo con la metodología propuesta para esta investigación el talud de La Aurora presentó un Factor de seguridad menor a 1.2 y se contaba con un deslizamiento previo, por lo que se realizó el análisis de peligro.

Resultados de la validación del modelo

El cálculo de las diferentes métricas como el coeficiente de similitud de Jaccard (RJ), la relación de porcentaje de longitud (RL), la sensibilidad del modelo (RMS) y la precisión del modelo (RMP) se determinaron para cada escenario del deslizamiento con respecto al evento ocurrido el 5 de octubre de 1999.

El escenario 1 presentó un 97.77 % de la relación del porcentaje de longitud (RL). De acuerdo con el diagrama de Venn la interacción del Dobs y Dsim presentó 6 184 m² de verdaderos positivos (VP), 1 567 m² de falsos positivos (FP) y 2 155 m² de falsos negativos (FN). El coeficiente de similitud de Jaccard (RJ) fue del 62.42 %, mientras la sensibilidad del modelo (RMS) fue del 74.15 % y la precisión del modelo (RMP) fue del 79.78 %.

El escenario 2 tuvo un 90.55 % de relación del porcentaje de longitud (RL). De acuerdo con el diagrama de Venn 6 034 m² representaron la intersección entre el Dobs y el Dsim o los verdaderos positivos (VP), 1 570 m² de falsos positivos (FP) y 2 305 m² de falsos negativos (FN). El coeficiente de similitud de Jaccard (RJ) fue del 60.89 %, la sensibilidad del modelo (RMS) fue del 72.35 % y la precisión del modelo (RMP) fue del 79.35 %.

El escenario 3 presentó 86.11 % de la relación de porcentaje longitud (RL) y basándonos en el diagrama de Venn los verdaderos positivos (VP) fueron de 5 688 m², 1 333 m² de falsos positivos (FP) y 2 651 m² de falsos negativos (FN). El escenario 3 presentó un 58.80 % de similitud de Jaccard (RJ), un 68.2 % de sensibilidad del modelo (RMS) y un 81.01 % de precisión del modelo (RMP).



El escenario 4 tuvo una relación de porcentaje de longitud (RL) del 81.66 %. De acuerdo con el diagrama de Venn la interacción del Dobs y Dsim presento 5 397 m² de verdaderos positivos (VP), 1 358 m² de falsos positivos (FP) y 2 944 m² de falsos negativos (FN). El coeficiente de similitud de Jaccard (RJ) fue del 55.65 %, la sensibilidad del modelo (RMS) fue de 64.71 % y la precisión del modelo (RMP) fue del 79.89 %.

El escenario 5 tuvo el 76.11 % de relación de longitud (RL) y basándonos en el diagrama de Venn los verdaderos positivos (VP) fueron 4 847 m², 1 169 m² de falsos positivos (FP) y 3 472 m² de falsos negativos (FN). El escenario 5 presento un 50.97 % de similitud de Jaccard (RJ), un 58.12 % de sensibilidad del modelo (RMS) y un 80.56 % de precisión del modelo (RMP).

El escenario 6 presento una relación de porcentaje de longitud (RL) del 70.55 %. De acuerdo con el diagrama de Venn la interacción del Dobs y Dsim presento 4 515 m² de verdaderos positivos (VP), 1 193 m² de falsos positivos (FP) y 3 824 m² de falsos negativos (FN). El coeficiente de similitud de Jaccard (RJ) fue del 47.36 %, la sensibilidad del modelo (RMS) fue de 54.14 % y la precisión del modelo (RMP) fue del 79.09 %.

El escenario 7 tuvo 63.88 % de la relación de porcentaje longitud (RL) y basándonos en el diagrama de Venn los verdaderos positivos (VP) fueron 4 090 m², 907 m² de falsos positivos (FP) y 4 248 m² de falsos negativos (FN). El escenario 7 presento un 44.22 % de similitud de Jaccard (RJ), un 49.05 % de sensibilidad del modelo (RMS) y un 81.84 % de precisión del modelo (RMP).

El escenario 8 presento un 55 % de la relación del porcentaje de longitud (RL) De acuerdo con el diagrama de Venn la interacción del Dobs y Dsim presento 3 613 m² de verdaderos positivos (VP), 639 m² de falsos positivos (FP) y 4 726 m² de falsos negativos (FN). El coeficiente de similitud de Jaccard (RJ) fue del 40.24 %, mientras la sensibilidad del modelo (RMS) fue del 43.32 % y la precisión del modelo (RMP) fue del 84.97 %.



El escenario 9 presento 46.11 % de la relación de porcentaje longitud (RL) y basándonos en el diagrama de Venn los verdaderos positivos (VP) fueron 2 771 m², 625 m² de falsos positivos (FP) y 5 576 m² de falsos negativos (FN). El escenario 9 presento un 30.88 % de similitud de Jaccard (RJ), un 33.19 % de sensibilidad del modelo (RMS) y un 81.59 % de precisión del modelo (RMP).

El ultimo escenario (10) tuvo una relación de porcentaje de longitud (RL) del 44.44 %. De acuerdo con el diagrama de Venn la interacción del Dobs y Dsim presento 2 760 m² de verdaderos positivos (VP), 666 m² de falsos positivos (FP) y 5 578 m² de falsos negativos (FN). El coeficiente de similitud de Jaccard (RJ) fue del 30.65 %, la sensibilidad del modelo (RMS) fue de 33.10 % y la precisión del modelo (RMP) fue del 80.56 %.

Simulaciones de deslizamientos de La Aurora				
No	RL (%)	RJ (%)	RMS (%)	RMP (%)
1	97.77	62.42	74.15	79.78
2	90.55	60.89	72.35	79.35
3	86.11	58.8	68.2	81.01
4	81.66	55.65	64.71	79.89
5	76.11	50.97	58.12	80.56
6	70.55	47.36	54.14	79.09
7	63.88	44.22	49.05	81.84
8	55	40.24	43.32	84.97
9	46.11	30.88	33.19	81.59
10	44.44	30.65	33.1	80.56

Tabla 23: Tabla de resultados de las métricas del talud de La Aurora

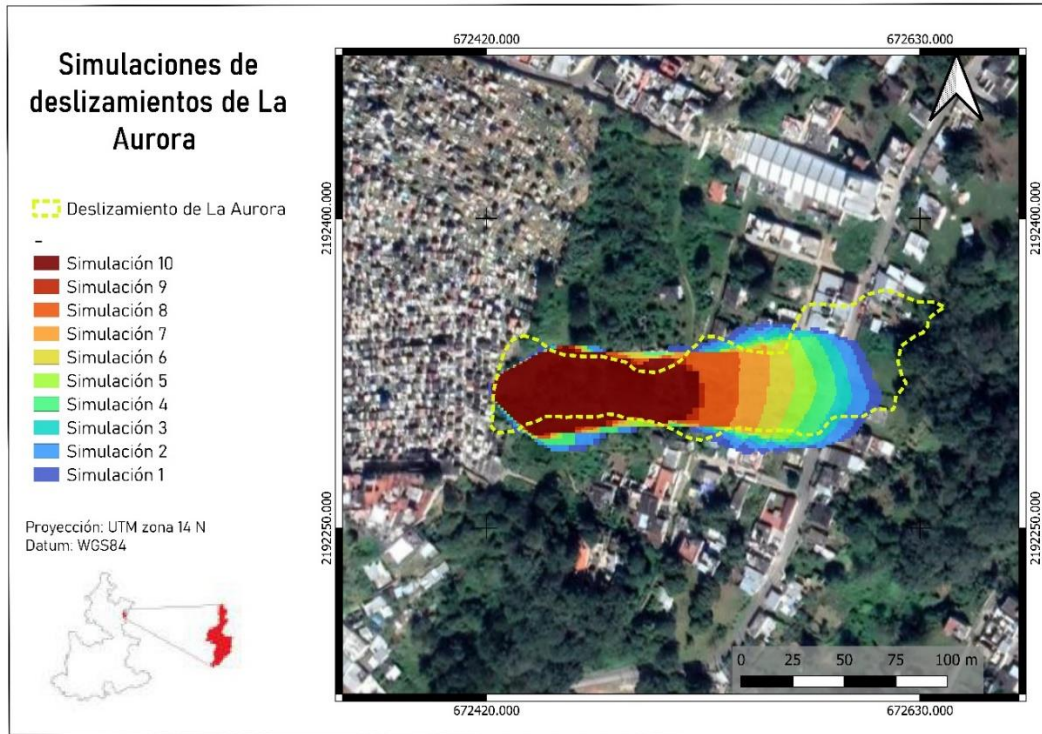


Figura 5.30: simulación de deslizamientos del talud de La Aurora con el programa Titan2D



Resultados del análisis de peligro por inestabilidad de laderas

El análisis de confiabilidad permitió validar la semejanza de los deslizamientos simulados (Dsim) y los deslizamientos observados (Dobs), permitiendo observar áreas de verdaderos positivos (VP), falsos positivos (FP) y falsos negativos (FN) en términos de áreas. Las comparaciones de los Dsim y Dobs de las diferentes métricas que conforman el análisis de confiabilidad son expresados en porcentajes.

La sensibilidad del modelo (RMS) es la métrica esencial para elaborar el mapa de peligro por inestabilidad de laderas ya que nos indica la probabilidad de que el área del deslizamiento real sea inundada por un deslizamiento observado, por lo que los porcentajes que resultaron del RMS se normalizaron sin distorsionar las diferencias entre cada simulación y con ello poder usar una escala en común de 0 a 1.

Con la normalización de los datos se pudo realizar algebra de mapas y dividir el mapa resultante en intervalos de 0 – 0.2, 0.2 – 0.4, 0.4 – 0.6, 0.6 – 0.8, 0.8 – 1. indicándonos Muy baja probabilidad, baja probabilidad, media probabilidad, alta probabilidad y muy alta probabilidad respectivamente.

En el mapa 5.31 que nos representa el mapa de peligro por inestabilidad de laderas de La Aurora, nos indica áreas de color rojo que representa muy alta probabilidad, áreas de color naranja que nos indica alta probabilidad, áreas de color amarillo que nos presenta media probabilidad, áreas de color verde que nos indica baja probabilidad y áreas de color azul que nos representa muy baja probabilidad.

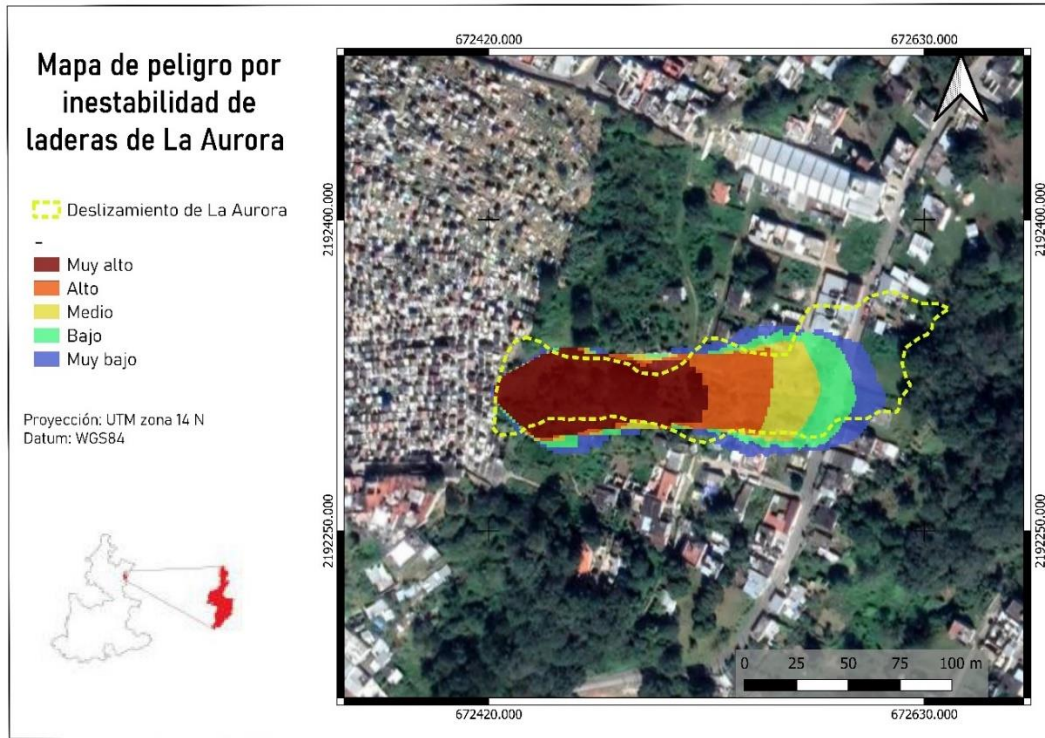


Figura 5.31: Mapa de peligro por inestabilidad de laderas de La Aurora



6. Discusión

La ciudad de Teziutlán, Puebla presenta áreas con alto grado de susceptibilidad por procesos de remoción en masa de acuerdo con el mapa de nacional de susceptibilidad por inestabilidad de laderas de CENAPRED (2020), por lo que ha sido tema de interés de investigaciones de diferentes autores como la ocurrencia de los deslizamientos a partir del evento ocurrido el 5 de octubre de 1999 en la colonia La Aurora, algunos de los trabajos más importantes son los propuestos por Lugo-Hubp et al., (2001) o Capra, L., et al., (2003).

Además de este tipo de investigaciones se han desarrollado estudios, como los propuestos por Flores-Lorenzo et al., (2002) que determino que los deslizamientos ocurridos en octubre de 1999 en Teziutlán se registraron en materiales volcánicos o Murillo-García et al., (2017) elaborando un mapa de inventario de procesos de remoción en masa del año de 1942–2015 para la ciudad de Teziutlán.

Mi trabajo está relacionado con la propuesta de una metodología diferente que exprese el peligro por ocurrencia espacial de deslizamientos con un enfoque cuantitativo. Diferentes autores recomiendan hacer análisis de susceptibilidad, peligro y riesgo por deslizamiento a escalas locales y con un análisis cuantitativo como lo descrito por Corominas, J et al., (2014), ya que este tipo de análisis cuantifica el peligro ante deslizamientos.

La inclusión de metodologías que implementen análisis cuantitativos para taludes locales partiendo de un análisis de estático como lo es el análisis de estabilidad de taludes a partir del método riguroso de equilibrio limite en específico con el Método de Morgenstern – Price (1965) y finalizando con un análisis cinemático con el código Titan2D, permiten hacer análisis de prevención por deslizamientos.

El análisis de estabilidad de taludes se realizó con el método riguroso de equilibrio límite con el software SSAP, esto permitió obtener el Factor de seguridad para los tres taludes, el análisis se realizó con la presencia de grietas de tensión considerando que el talud se encuentra en condiciones saturadas y no saturadas.



El Factor de seguridad del talud de La Aurora en condiciones saturadas presento un Fs de 0.39 el cual indico que es totalmente inestable y se procedieron a realizar las medidas de estabilización la cual consto de tres muros de contención y 10 clavos, además de la modificación de la geometría de la ladera e implementar drenes superficiales y subterráneos, con dichas medidas de estabilización el talud se comporta estable en condiciones saturadas y no saturadas.

El talud de La Autopista presento un Factor de seguridad mayor a 1.2 en condiciones saturadas y no saturadas, esto nos permitió determinar que el talud de La Autopista es estable en ambas condiciones por lo que no se realizan medidas de estabilización.

El talud de Xoloco presento un Factor de seguridad de 0.97 el cual nos indica que es inestable en condiciones cuando se encuentra totalmente saturado por lo que se realizaron las medidas de estabilización, las cuales fueron la modificación de la geometría de la ladera, la elaboración de 4 bermas de 2 X 2 metros en la cima del talud, la construcción de un muro de contención en la base del talud, también se implementa la construcción de drenes superficiales y subterráneos.

La medida de remediación para los taludes de La Aurora y Xoloco con la presencia de grietas de tensión es remover la capa superficial de la cima del talud e inyectar cemento para rellenarlas y posteriormente generar una capa superficial de geosintéticos que ayudaran a disminuir la erosión de los suelos y evitar la infiltración del agua pluvial al subsuelo.

El software SSAP permite obtener un mapa del Factor de seguridad local el cual nos permite observar zonas con plasticidad y por consecuencia una posible ruptura, estas zonas que presenta el mapa del Factor de seguridad local son de gran ayuda en la toma de decisiones en las medidas de estabilización de cada talud inestable.

El mapa del Factor de seguridad permite observar la superficie del menor Factor de seguridad o también llamada superficie de deslizamiento, la superficie crítica del talud de La Aurora presento a una profundidad de 7.5 metros y se encuentra en la



cima del talud, mientras que la superficie de deslizamiento del talud de Xoloco presento a una profundidad de 4 metros de profundidad.

Con el análisis de las superficies de menor F_s obtenidas en software SSAP se pudo determinar la profundidad de la masa de suelo inestable y con ello establecer la geometría de pila a deslizarse, además de establecer un punto de inicio del deslizamiento he implementar medidas correctas de estabilización para cada talud.

Parte fundamental de esta metodología propuesta es la unión del análisis estático con el análisis cinemático, el cual se pudo llevar a cabo determinando el volumen real de la masa inestables para poder realizar simulaciones de deslizamiento que se aproximen a la realidad para el talud de la Aurora, las cuales se obtuvieron a partir de la superficie de menor F_s obtenida con el software SSAP.

Las dimensiones de la pila 1 de la masa de suelos inestables son de 27 metros de largo, 15 metros de ancho y 7.5 metros de profundidad, mientras que las dimensiones de la pila 2 son de 26 metros de largo, 15 metros de ancho y 4 metros de profundidad, con estas medidas se determinó la geometría de la masa inestable, obteniendo un volumen de 7182 m^3 y un punto de inicio del movimiento de la masa de suelo inestable.

El punto de inicio y el volumen de la masa inestable del talud de La Aurora se comparó con lo propuesto por Borselli et al., (2003) donde establece que el volumen de masa de suelo desplazado fue de 6000 m^3 , mientras que Alcántara -Ayala et al., (2014) determinó que el volumen de la masa de suelo desplazada fue de $7,350 \text{ m}^3$, ambas propuestas corroboran que el volumen obtenido a partir de la superficie de falla está estimado dentro de un rango considerable o de lo real, por lo cual se pudieron realizar las simulaciones de deslizamientos del talud de La Aurora.

Las simulaciones de los deslizamientos del talud de La Aurora se elaboraron con el código Titan2D con la técnica de Coulomb cuyos parámetros de entrada son el ángulo de fricción interna y ángulo de fricción basal, Sheridan et al., (2005) demostró que el valor del ángulo de fricción interna no influye en el alcance y la distribución del deslizamiento. Mientras que el ángulo de fricción basal es el parámetro que



ejerce una notable influencia en la distribución y alcance de los flujos de masas como lo describió García et al., (2011).

De acuerdo con lo descrito por los autores anteriores se determinó en cambiar el ángulo de fricción basal desde los 3° hasta los 30° para obtener 10 simulaciones de deslizamientos para el talud de La Aurora, mientras que los demás parámetros necesarios para realizar las simulaciones se mantienen constantes como lo es el volumen, el punto de inicio, la orientación y la dirección de la masa de suelos.

Con los parámetros se pudieron realizar las 10 simulaciones de los deslizamientos para el talud de La Aurora, para cada escenario se presentó un alcance y distribución diferente, con las simulaciones de los deslizamientos se pudo observar que entre menor sea el ángulo de fricción basal se tiene un mayor alcance y distribución.

Las áreas inundadas variaron por cada simulación como lo podemos ver en la simulación 1 que inunda un área de 7750 m² y presenta un alcance de más de 200 metros de longitud esto con un ángulo de fricción basal de 3°, mientras que la simulación 10 realizada con un ángulo de fricción basal de 30° inunda 3427 m² y tiene un alcance de aproximadamente 100 metros de longitud.

Los diferentes escenarios que se simularon para el talud de La Aurora en el código Titan2D permitió realizar comparaciones entre cada simulación con respecto al evento observado que ocurrió el 5 de octubre de 1999, esta comparación partió con el diagrama de Venn que determina aquellas áreas que interceptan el deslizamiento observado (Dobs) y el deslizamiento simulado (Dsim) el cual se llama verdaderos positivos (VP).

Con el diagrama de Venn se pudo observar que la simulación 1 presenta una mayor área de verdaderos positivos (VP) la cual es de 6184 m², mientras que la simulación 10 presenta una menor área de verdaderos positivos (VP) con 2750 m².

Teniendo los resultados del diagrama de Venn se pudo determinar las métricas de comparación las cuales son el coeficiente de similitud de Jaccard (RJ), la relación



de porcentaje de longitud (RL) la sensibilidad del modelo (RMS) y la precisión del modelo (RMP).

La relación del porcentaje de longitud (RL) determinó una semejanza del 97.77 % de la simulación 1 y la simulación 10 tiene semejanza del 44.44 %. El coeficiente de similitud de Jaccard (RJ) determinó que la simulación 1 tiene una similitud del 62.42 % y la simulación 10 tiene una similitud del 30.65 %. La sensibilidad del modelo de la simulación 1 presento el 74.15% y la simulación 10 presento un valor del 33.1 %.

Con los resultados obtenidos de las métricas pudimos determinar que la simulación 1 se comporta de manera similar al evento que ocurrió el 5 de octubre de 1999 en la colonia La Aurora, esto permitió elaborar el mapa de peligro por inestabilidad de laderas.

Esta metodología resulto ser de gran utilidad para elaborar el mapa de peligro por inestabilidad de laderas que expresa la ocurrencia espacial de los deslizamientos para taludes puntuales que representen riesgo a elementos que se encuentren expuestos, esta metodología se basó en un análisis cuantitativo que involucra parámetros físico-matemáticos como el análisis de estabilidad de taludes con método riguroso de equilibrio límite en específico con el método de Morgenstern – Price (1965) implementando el software SSAP y la aplicación de la técnica de Coulomb en el código de Titan2D.



7. Conclusiones

Esta investigación propone una metodología diferente para realizar un análisis de peligro por inestabilidad de laderas. La metodología propone un análisis cuantitativo que nos pueda indicar contemporáneamente el grado de inestabilidad de taludes, la distribución y el alcance de posibles deslizamientos en una determinada área.

Parte fundamental de la investigación de este trabajo fue realizar el análisis de estabilidad de taludes en condiciones extremas con la presencia de agua en todo el talud y con la presencia de grietas de tensión, con el Método de Morgenstern – Price (1965).

El mapa de Factor de seguridad local del software SSAP resulto ser una herramienta innovadora en esta investigación ya que el mapa presenta zonas de plasticidad con posible comportamiento de ruptura, estas zonas ayudan en la decisión de las obras de estabilización de los taludes en el software SSAP.

Con los resultados obtenidos con el Método de cálculo riguroso basado en el Equilibrio Limite (LEM) se fortalece que es una técnica muy precisa para determinar superficies de falla curvas que nos expresen superficies de deslizamiento, ya que considera totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos, además de aplicarse a cualquier geometría de taludes.

La superficie crítica permitió determinar las dimensiones de la geometría de la masa de suelo inestable, permitiendo calcular un volumen de la masa de suelo del talud de La Aurora, el resultado del cálculo del volumen resulto ser similar al evento ocurrido el 5 de octubre de 1999 por lo que se comprueba que el software SSAP estima superficies de deslizamiento reales.

El volumen correcto de la masa de suelo inestable permitió realizar simulaciones con el código Titan2D con el método de Coulomb ya que el parámetro de ángulo de fricción interna ya se asumía desde el análisis de estabilidad de taludes por lo que las simulaciones de los deslizamientos se realizaron variando el ángulo de fricción basal desde los 3° hasta los 30°.



Las métricas propuestas en esta investigación resultaron ser gran herramienta para cumplir el objetivo final en la elaboración de un mapa de peligro por inestabilidad de laderas para el talud de La Aurora.

Las métricas del coeficiente de similitud de Jaccard (RJ), la relación de porcentaje de longitud (RL) la sensibilidad del modelo (RMS) y la precisión del modelo (RMP) permitieron determinar que la simulación 1 tiene una mayor precisión ante un posible deslizamiento ya que presentaron los mayores porcentajes para cada métrica.

La sensibilidad del modelo (RMS) permitió elaborar el mapa de peligro por inestabilidad de laderas ya que la métrica RMS nos expresa el porcentaje del área del flujo observado que la simulación predice correctamente.

El mapa de peligro por inestabilidad de laderas puede prevenir y predecir eventos de gran magnitud ya que los análisis se realizan en condiciones muy extremas, como la presencia del agua en todo el talud, esto ayuda a determinar la superficie crítica de un posible deslizamiento y por consecuencia realizar simulaciones de deslizamientos reales.

Este análisis permitió elaborar una metodología diferente y cuantitativa que exprese el peligro por inestabilidad de laderas de ocurrencia espacial por deslizamiento en taludes puntuales que se consideren inestables y representen un peligro ente la sociedad.



Anexos

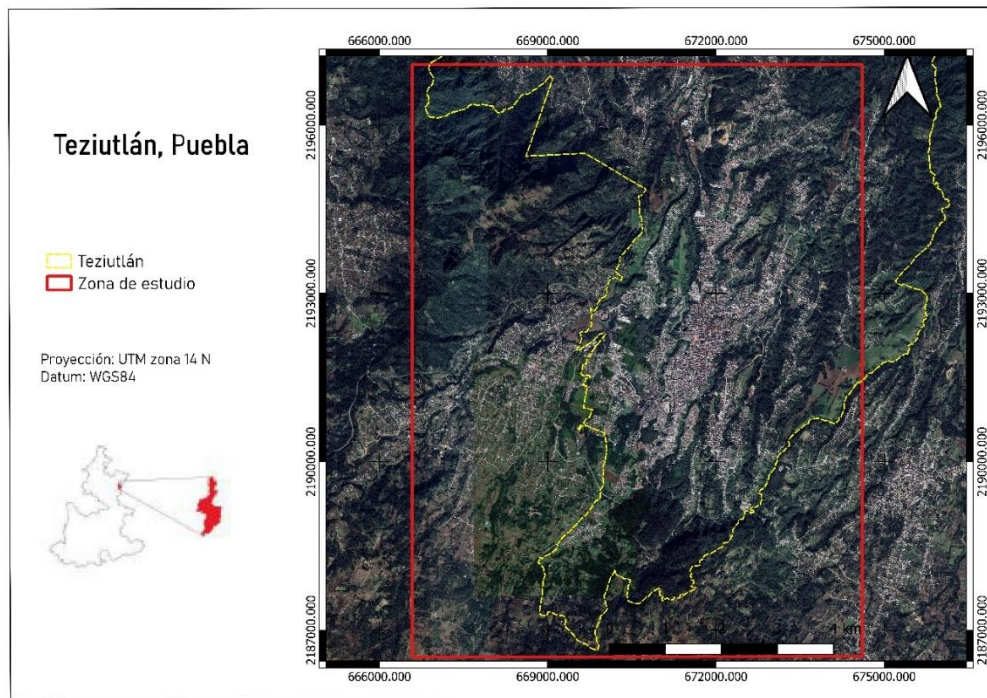


Figura 5.32: Mapa de zona de estudio

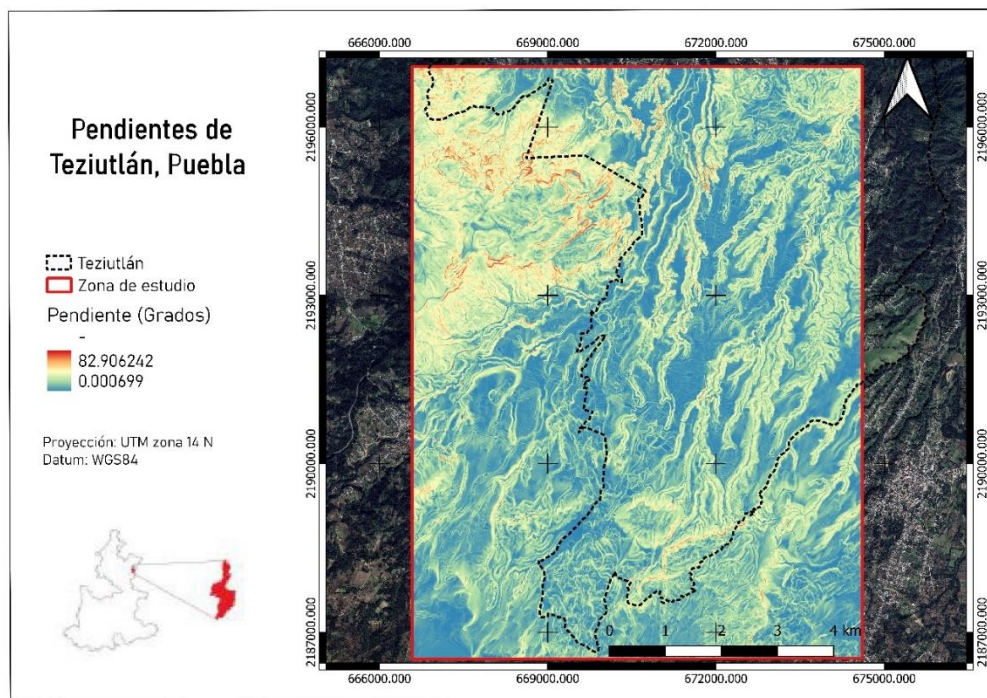


Figura 5.35: Mapa de pendientes de Teziutlán, Puebla

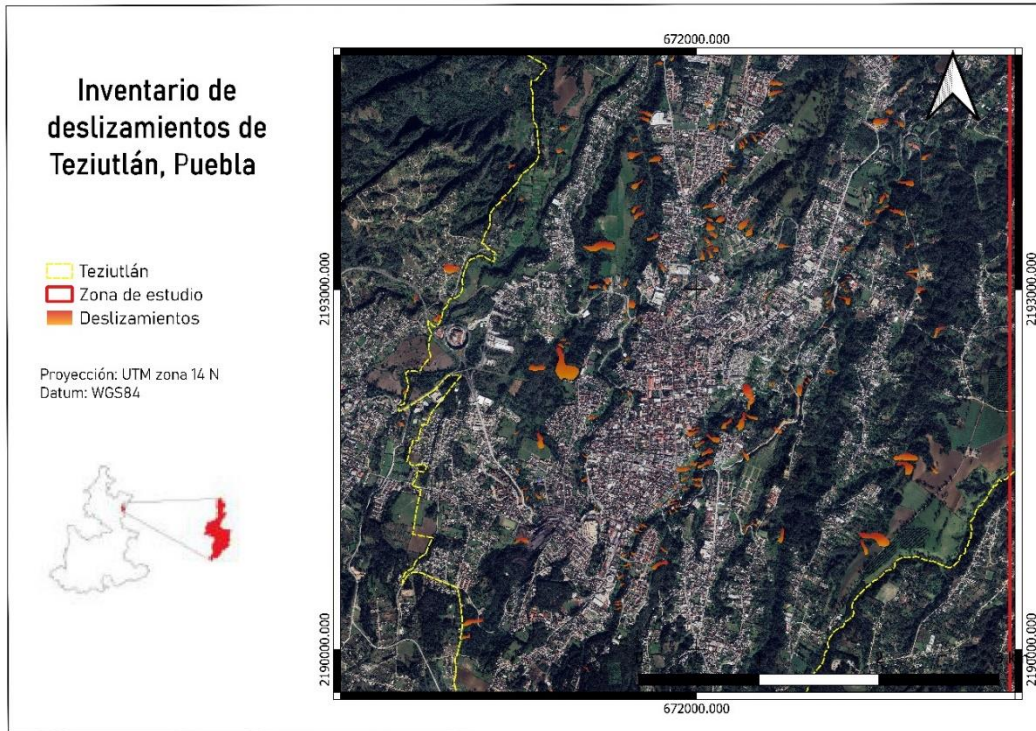


Figura 5.36: Mapa de eventos históricos por deslizamientos

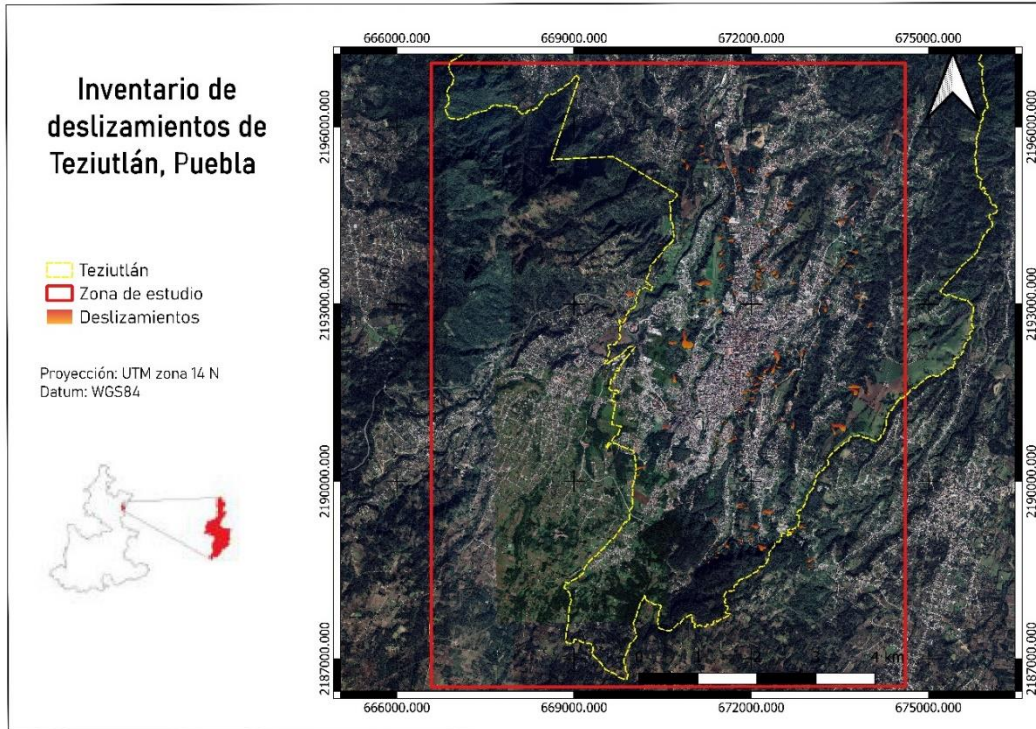


Figura 5.37: Mapa de eventos históricos por deslizamientos



Bibliografía

- Agenda para el desarrollo municipal. (2014). Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFED). México.
- Alcántara Ayala, I., Echavarría Luna, A., Gutiérrez Martínez, C., Domínguez Morales, L., & Noriega Rioja, I. (2008). Fascículo de Inestabilidad de laderas. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. Grupo de Trabajo MILADERA. 2nda edición. 39 pp.
- Alcántara Ayala, I., Garnica Peña, R. J., Coll-Hurtado, A., & Gutiérrez Vázquez de MacGregor, M. T. (2017). Inestabilidad de laderas en Teziutlán, Puebla. Universidad Nacional Autónoma de México. 224 pp.
- Borselli, L., Salvador Sanchis, P., Bartolini, D., Cassi, P., & Lollino, P. (2011). PESERA-L model: An addendum to the PESERA model for sediment yield due to shallow mass movement in a watershed. CNR-IRPI, Italy Report.n.82. Scientific report deliverable 5.2.1. Desire Project.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., & Borselli, L., (2003). Mass movements in tropical volcanic terrains: the case of Teziutlán (México). *Engineering Geology*. 68(3-4): 359-379.
- Charbonnier, S. J., Connor, C. B., Connor, L. J., Sheridan, M. F., Oliva Hernández, J. P., & Richardson, J. A. (2018). Modeling the October 2005 lahars at Panabaj (Guatemala). *Bulletin of Volcanology*, 80(1), 1-16.
- Chen, Z.Y., (1992). Random Trials Used In Determining Global Minimum Factors Of Safety Of Slopes. *Can.Geotech. J.* 29, 225-233.
- Cruden, D. M. (1991). A suggested method for a landslide summary. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l' Association Internationale de Géologie de l' Ingénieur*, 43(1), 101-110.



- Duncan, J. M. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 13-Soil slope stability analysis. Transportation Research Board Special Report 247.
- Flores Lorenzo, P., & Alcántara Ayala, I. (2002). Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla. *Investigaciones geográficas*, (49), 7-26.
- García, A. M., Murcia, H. F., Cortés, G. P., & Laverde, C. A. (2011). Simulación de flujos piroclásticos en el volcán Galeras con el código TITAN2D. *Geología Colombiana*, 36, 135-162.
- Garnica-Pena, R., Domínguez-Morales, L., & Alcántara-Ayala, I. (2014). Towards landslide instrumentation and monitoring in Teziutlán, Puebla, Mexico in *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. Springer, Cham. 113-116.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Education. Madrid. 744 pp.
- Janbu, N., (1954). Application of Composite Slip Surfaces for Stability Analysis. *Proc. of European Conf. On Stability of Earth Slopes*, Stockholm Vol.3, 43-49.
- Hernández-Madrigal, V., Garduño-Monroy, V., Alcántara-Ayala, I. Estudio geológico para entender los procesos de remoción en masa en la región de Zacapoaxtla, Puebla, México. (2007). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Tomo 59, Núm: 2. 147-162.
- Lugo-Hubp, J., Vázquez-Conde, M.T., Melgarejo-Palafox, G., García-Jiménez, F., & Matias-Ramírez, G., (2001). Procesos gravitacionales en las montañas de Puebla. *Ciencias y Desarrollo* 27, 24– 33.
- Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J. J., Capra, L., Inbar, M., & Alcántara-Ayala, I. (2005). Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: causa y efectos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 212-228.



- Martínez, R., Barrera, S., & Gómez, P. (2011). El método pseudoestático de estabilidad en presas: un análisis crítico. *Obras y proyectos*, (9), 30-37.
- Mendoza, M. J., Domínguez, L., & Melara, E. E., (2002). Deslizamiento y flujo de tierras en una ladera debidos a un sismo: el caso de “Las Colinas”, Santa Tecla, El Salvador C. A., del 13 de enero del 2001. *Memorias de la XXI Reunión Nal. de Mec. de Suelos, Querétaro, Qro., SMMS, Vol. 1.* 399-408.
- Morales Domínguez, L., Castañeda Martínez, A., & Gonzáles Huesca, A. E. (2016). Análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en sistemas de alerta temprana por inestabilidad de laderas.
- Morgestern, N.R. & Price, V.E., (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*. 15, 70-93.
- Murillo-García, F. G., & Alcántara-Ayala, I. (2017). Landslide inventory, Teziutlán municipality, Puebla, México (1942–2015). *Journal of maps*, 13(2), 767-776.
- Noriega, I., & García, S., (2004) Autómatas celulares para el modelado espacial del deslizamiento y flujo de suelos de la colonia La Aurora. *Reunión Anual de Mecánica de Suelos e ingeniería Geotécnica 2012*.
- Programa Municipal de Desarrollo Urbano Sustentable de Teziutlán, Puebla (PMDUS). 2018 - 2021.
- Sarma, S. K., & Tan, D., (2006). Determination of critical slip surface in slope analysis. *Geotechnique*, 568, 539–550.
- Sheridan, M.F., Stinton, A.J., Patra, A., Pitman, E.B., Bauer, A., & Nichita., C.C. (2005). Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Volume 139, Issues 1–2, 89-102.
- Spencer, E., (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Géotechnique*, 17(1): 11–26.



Suárez, J. (2003). Nomenclatura y Clasificación de los Movimientos. Deslizamientos: Análisis Geotécnico, 1, 1-36.

Vázquez-Conde, M.T., Lugo, J., Matías, L.G. (2001). Heavy rainfall effects in Mexico during early October 1999. Grunfest, E., Handmer. pp. 289 – 299.