



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

FACULTAD DE INGENIERIA

**ANALISIS DE RIESGO POR SUSCEPTIBILIDAD A
DESLIZAMIENTOS DE LADERA EN LA COLONIA BENITO
JUÁREZ, MUNICIPIO DE TEZIUTLÁN, PUEBLA, MEDIANTE
MÉTODOS CUALITATIVOS Y DETERMINISTAS.**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LIC. INGENIERO GEOFÍSICO**

**PRESENTA:
LEONARDO CORTINAS RUÍZ**

**ASESOR INTERNO:
M.C. JOSÉ SERRANO ORTIZ**

**ASESOR EXTERNO:
ING. LEOBARDO DOMÍNGUEZ MORALES**

**Vo.Bo.
José Serrano Ortiz**

28 de abril de 2024



Oficio No. SAC/0755/2024

**C. Leonardo Cortinas Ruíz -201100269-
Pasante de la Licenciatura en Ingeniería
Geofísica
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“ANÁLISIS DE RIESGO POR SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS DE LADERA EN LA COLONIA BENITO JUÁREZ, MUNICIPIO DE TEZIUTLÁN, PUEBLA, MEDIANTE MÉTODOS CUALITATIVOS Y DETERMINISTAS”

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Director de Tema al Mtro. José Serrano Ortiz.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente
“Pensar bien para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 19 de abril de 2024

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



M'ACGZ/M'VGL/barv
C.c.p. Archivo

Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
222 229 55 00 Ext. 7610

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e.

El que suscribe: Mtro. José Serrano Ortiz, director del tema de tesis

"ANÁLISIS DE RIESGO POR SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS DE LADERA EN LA COLONIA BENITO JUÁREZ, MUNICIPIO DE TEZIUTLÁN, PUEBLA, MEDIANTE MÉTODOS CUALITATIVOS Y DETERMINISTAS"

Presentada por el C. Leonardo Cortinas Ruíz -201100269-, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/0755/2024 con fecha de emisión 18 de abril de 2024, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z. a 19 de abril de 2024



M.C. José Serrano Ortiz
Director del tema de tesis

D'AAPC/barv
C.c.p. Archivo

Dedicatorias:

Dedico con mucho cariño y aprecio este trabajo de tesis, a las personas que más quiero y que siempre me han apoyado para su realización, a mis padres y mi hermana por haber creído siempre en mí y contar con su apoyo incondicional, a mis compañeros que siempre brindaron ayuda, a mis profesores de la carrera, ya que gracias a ellos adquirí las herramientas necesarias, y por último a mis amigos que siempre estuvieron conmigo a lo largo de todo el camino.

A todo el personal de Protección Civil y CENAPRED, se le extiende un gran reconocimiento por su importante labor a nivel nacional y gran responsabilidad.

Agradecimientos:

Agradezco a:

Ing. Leobardo Domínguez Morales, Maestro José Serrano Ortiz, Maestro Marco Alejandro Vera Zeller, a todo el personal del CENAPRED y a todas aquellas personas que de alguna u otra forma contribuyeron para llevar a cabo este trabajo.

A la Facultad de Ingeniería y al Colegio de Geofísica de la BUAP.

Por el apoyo técnico a la unidad de Protección Civil del Municipio de Teziutlán. Que sin ellos no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

Introducción:

Análisis de riesgo por susceptibilidad a deslizamientos de ladera en la colonia Benito Juárez, Municipio de Teziutlán, Puebla, mediante métodos cualitativos y deterministas consiste en una interesante propuesta la cual adquiere importancia y utilidad en el aspecto académico como examen profesional para obtener el grado en Ing. Geofísica y desde el punto de vista demográfico integra procesos geotécnicos que permiten conocer los hechos de manera fiable, ayudar a detectar nuevos peligros, reforzar conocimientos y mediante la experiencia adquirida mejorar y complementar los trabajos de prevención por parte de habitantes y autoridades de la localidad ante el fenómeno natural de deslizamiento de laderas. Actualmente en nuestro país se cuenta con metodología y recursos necesarios para llevar a cabo dichos estudios, sin embargo, aún existen puntos de mejora ya que para llevarse a cabo con eficacia se requiere especial atención por parte de todas las partes involucradas, tanto autoridades como población en general.

El planteamiento del problema en la zona de estudio tiene que ver directamente con la ocurrencia de fenómenos naturales de deslizamiento de laderas y la realización de estudios para conocer el grado de probabilidad de que exista o no. Aunado a esto la colonia se ubica en zona de alto riesgo poniendo en riesgo la vida de sus más de 100 habitantes e infraestructura provocando daños materiales y consecuencias económicas.

Objetivo general: Estudiar la ladera aledaña a la colonia Benito Juárez mediante un análisis multivariable, además de aplicar los métodos y protocolos establecidos por CENAPRED, para conocer si existe o no la posibilidad de generarse un deslizamiento, mismo estudio ayudará a tomar las medidas necesarias ante el fenómeno natural, así como evitar pérdidas humanas y daños materiales.

Mediante la metodología que se expondrá en los siguientes capítulos, se llevarán a cabo los siguientes **objetivos específicos**:

- Identificar los factores que determinan las ocurrencias de deslizamientos mediante métodos e instrumentación cualitativos y cuantitativos para la evaluación del riesgo de deslizamientos.
- Estimar el factor de seguridad (FS) en la ladera de la colonia Benito Juárez mediante información obtenida con el penetrómetro dinámico (Panda II) y de pruebas de suelo analizadas en el laboratorio de mecánica de suelos CENAPRED, determinar el grado de susceptibilidad y la posibilidad de la ocurrencia de un deslizamiento, mediante el software Slide.
- Comparar modelos digitales obtenidos de esta zona mediante la correlación de mapas previamente realizados por CENAPRED y formatos establecidos para validación de los resultados obtenidos.
- Realizar un Modelo Digital de Elevación (MDE) de la ladera a través tomas aéreas realizadas con un VANT propiedad del CENAPRED.

Este trabajo integra varias técnicas o metodologías para el análisis antes mencionado, ya que cada caso es particular y se debe tratar de manera específica, es decir de la forma más eficiente de obtener los resultados, se divide en dos grupos; Métodos cuantitativos y cualitativos. En cuanto a los cuantitativos son: cálculo de Factor de Seguridad de la ladera (FS) mediante el método Mohr-Coulomb y la elaboración de un Modelo Digital de Elevación (MDE). En el apartado cualitativo se apoya en la: Aplicación del Formato para la Estimación de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas utilizado y creado por el CENAPRED, y correlación de mapas de susceptibilidad. (Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas).

Este trabajo se integra de 4 capítulos los cuales se describen a continuación:

Capítulo 1. Contexto de la zona de investigación: Capítulo que permite conocer los aspectos descriptivos antes de involucrar temas metodológicos, por ejemplo: conocer la geología local y regional del lugar, aspectos fisiográficos, edafológicos, y climáticos del municipio de Teziutlán, características importantes para el entendimiento de la región.

Capítulo 2. Teorías de la investigación: Del marco teórico sobre la investigación, teorías, metodologías, y definiciones más importantes que son necesarias en la realización de este trabajo, así como también la explicación de fenómenos que intervienen, citando las principales obras de autores especializados en deslizamientos de laderas.

Capítulo 3. Metodología. En este apartado se abordan las metodologías empleadas para complementar el estudio de la ladera, se dividieron en dos para este trabajo: Métodos cuantitativos y cualitativos, ya que cada uno evalúa ciertos aspectos importantes dado a su naturaleza propia de evaluación, de igual forma se incluye la descripción del equipo e instrumentación empleada y los datos obtenidos, explicando uno por uno posteriormente.

Capítulo 4. Procesamiento e interpretación Consiste en el análisis y manejo de los datos obtenidos en campo y laboratorio, obteniendo resultados y mediciones cuantitativas como cualitativas de la ladera estudiada, dando lugar a una interpretación de los resultados para poder llegar a recomendaciones y conclusiones aquí mencionadas.

Al final de este trabajo se incluyen dos anexos en los cuales se pueden encontrar de forma detallada, el proceso de cómputo para diferentes resultados mencionados anteriormente en la metodología, así como también los datos obtenidos en campo y laboratorio que fueron necesarios para llegar a las conclusiones aquí mencionadas.

Índice general:

Dedicatorias:.....	IV
Agradecimientos:.....	V
Introducción:.....	VI
Objetivo general.....	VI
Índice general:.....	IX
Índice de Dibujos	XI
Índice de Fotografías	XI
Índice de Gráficas	XII
Índice de Imágenes.....	XII
Índice de Mapas.....	XIII
Índice de Perfiles	XIII
Índice de Tablas.....	XIV
1.- Contexto de la zona de investigación: Teziutlán, Puebla.....	1
1.1 Descripción geológica y geomorfológica de la zona	1
1.2 Geología del Estado de Puebla, Sierra Norte.....	5
1.3 Geología, Municipio de Teziutlán.....	7
1.4 Fisiografía del Municipio de Teziutlán.....	9
1.5 Edafología, Estado de Puebla (Sierra Norte).....	10
1.6 Clima en la Sierra Norte de Puebla.....	11
1.7 Clima en el Municipio de Teziutlán	11
2.- Teorías metodológicas de investigación.....	13
2.1 Diagnósticos de riesgo.....	13
2.2 Estudios de peligro	14
2.3 Movimientos de ladera	15
2.3.1 Caídos o derrumbes	15
2.3.2 Flujos	16
2.3.3 Flujos o avalancha de detritos (tipo de flujo).....	16
2.3.4 Lahares (tipo de flujo)	16
2.4 Tipos de deslizamientos	16
2.4.1 Rotacionales:	17
2.4.2 Traslacionales:.....	17
2.4.3 Expansiones o desplazamientos laterales:	17
2.5 Partes y características que definen una ladera y a un deslizamiento.....	18
2.6 Factores que determinan la inestabilidad de laderas	20

2.6.1 Factores internos	20
2.6.2 Factores externos	23
2.6.3 Presión de poro.....	27
2.6.4 Suelo residual	27
2.7 Factor de seguridad FS	28
2.8 Antecedentes de deslizamientos en México y en la zona de interés.	29
2.8.1 Antecedentes del sitio de interés: Teziutlán.....	30
2.8.2 Problemática en la zona de interés: Colonia Benito Juárez.....	30
3- Metodología:	32
3.1 Metodología cuantitativa:	33
3.1.1 Método cuantitativo o determinista:	33
3.2 Trabajo de campo y laboratorio:	33
3.3 Exploración Geotécnica	34
3.3.1 Instrumentación y operación del equipo PANDA II	34
3.3.2 Pruebas con Penetrómetro Dinámico PANDA II:	35
3.3.3.- Localización de sondeos PANDA:	37
3.3.5 Procesamiento de datos PANDA:	42
3.4 Modelo Digital de Elevación (MDE).	47
3.4.1 Procesamiento de MDE:	49
3.5 Metodología cualitativa:	56
3.5.1. Método cualitativo:	56
3.6 Formato para la Estimación de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas, CENAPRED	56
3.7 Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas	62
4- Procesamiento e interpretación:	64
4.1 Factor de seguridad con saturación de agua	64
Peso Volumétrico:	66
Ángulo de fricción	66
4.2 Factor de seguridad sin saturación de agua	69
Peso Volumétrico:	70
Angulo de fricción:	70
Resultados obtenidos con metodología cualitativa y cuantitativa.....	73
Conclusión general:	77
Recomendaciones:	79
Anexo 1	80
Procesado de mapas de curvas de nivel, y visualización en 3D del MDE	80
Curvas de nivel:	80
Anexo 2	88
Penetrogramas obtenidos en campo	88
Bibliografía:	92
	X

Índice de Dibujos

Dibujo 1. Tipos de movimientos de ladera	15
Dibujo 2. Partes que componen un deslizamiento	18
Dibujo 3. Efectos de la presión del agua sobre la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.....	23
Dibujo 4. Suelo residual	27

Índice de Fotografías

Fotografía 1. Toma aérea de Teziutlán.....	2
Fotografía 2. Penetrómetro portátil PANDA II.....	36
Fotografía 3. Operación del penetrómetro portátil Panda II	36
Fotografía 4. Toma aérea de ubicación del sondeo 1.....	39
Fotografía 5. Toma aérea, ubicación de sondeo 3.....	40
Fotografía 6. Toma de sondeos 4 y 5.	41
Fotografía 7. Mapa de ubicación de secciones transversales	57

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Curva de anomalías	43
Gráfica 2. Secciones transversales.....	46
Gráfica 3. Sondeo 1 PANDA.....	88
Gráfica 4. Sondeo 2 PANDA.....	89
Gráfica 5. Sondeo 3 PANDA.....	89
Gráfica 6. Sondeo 4 PANDA.....	90
Gráfica 7. Sondeo 5 PANDA.....	90
Gráfica 8. Sondeo 6 PANDA.....	91

Índice de Imágenes

Imagen 1. Ejemplo de modelo digital de elevación	48
Imagen 2. Nube de puntos en formato ráster	50
Imagen 3. Nube de puntos exportada en ArcMap.....	50
Imagen 4. Clasificación de intervalos de capas.	51
Imagen 5. Modelo Digital de Elevación.....	52
Imagen 6. Modelo Digital 3D de la ladera.	55
Imagen 7. Proceso de representación de curvas de nivel	81
Imagen 8. Curvas de Nivel sobre MDE.....	81
Imagen 9. Curvas de nivel, visualización en ArcScene.....	82
Imagen 10. Visualización el 3D en ArcScene	83
Imagen 11. Procesado para visualización en 3D.....	84
Imagen 12. Resultado en 3D del MDE.....	84
Imagen 13. Arc tool box.	85
Imagen 14. Layer to KML.....	86
Imagen 15. Modelo Digital generado por sobrevuelo de VANT.	87

Índice de Mapas

Mapa 1. Ubicación del municipio de Teziutlán.....	3
Mapa 2. Geología del Municipio de Teziutlán.....	5
Mapa 3. Litología regional de Teziutlán.....	7
Mapa 4. Ubicación de la colonia Juárez.....	31
Mapa 5. Ubicación de sondeos y perfiles transversales.....	37
Mapa 6. Modelo digital de Elevación.....	53
Mapa 7. Mapa de equidistancias.....	54
Mapa 8 . Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas.....	63

Índice de Perfiles

Perfil 1. Sondeo 1 y 2 caso saturado.....	67
Perfil 2. Sondeo 3 y 4 caso saturado.....	67
Perfil 3. Sondeo 5 y 6 caso saturado.....	68
Perfil 4 Sondeo 1 y 2 caso no saturado.....	70
Perfil 5. Sondeos 3 y 4 caso no saturado.....	71
Perfil 6. Sondeo 5 y 6 caso no saturado.....	72
Perfil 7. Conclusiones FS.....	73
Perfil 8. Conclusiones FS.....	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Clima de Teziutlán.	12
Tabla 2. Factor de Seguridad.....	28
Tabla 3. Coordenadas de los puntos marcados para los sondeos.	38
Tabla 4. Intervalos de capas cada 20m.	52
Tabla 5. Factores topográficos e históricos, formato de susceptibilidad	58
Tabla 6. Factores geotécnicos.	59
Tabla 7. Factores geomorfológicos y ambientales.....	60
Tabla 8. Estimación de grado de susceptibilidad de deslizamiento.	61
Tabla 9. Valores de cohesión para cada sondeo.	65
Tabla 10. Valores de cohesión para cada sondeo.	69
Tabla 11. Conclusiones FS.....	73
Tabla 12. Conclusiones FS.....	74

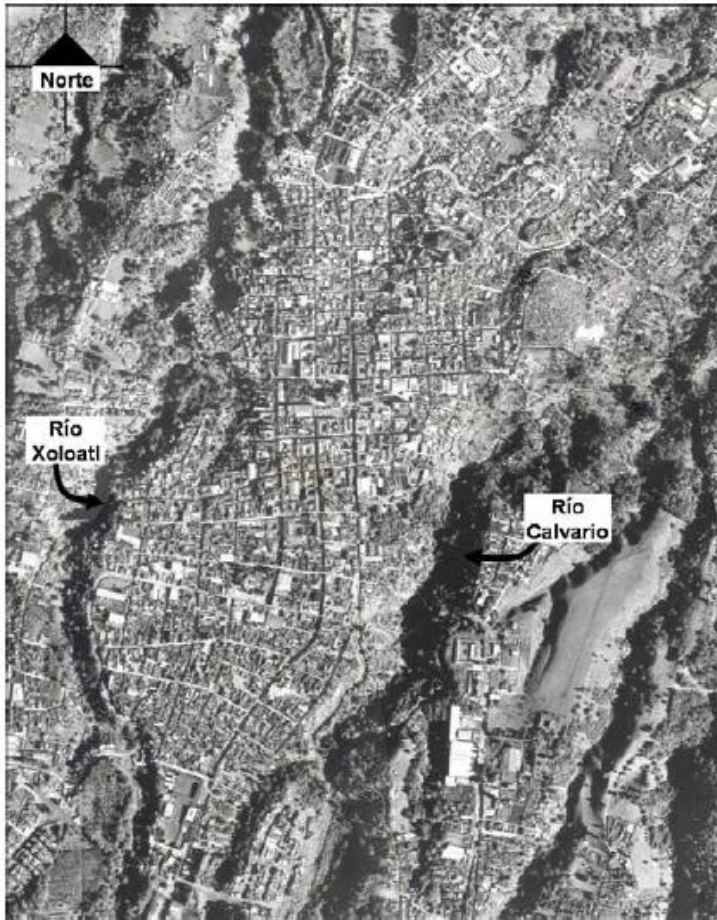
1.- Contexto de la zona de investigación: Teziutlán, Puebla.

La zona de investigación fue designada en conjunto con la Dirección del Laboratorio de Mecánica de Suelos, CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) en la Ciudad de México, como uno de los lugares que presenta un mayor número de deslizamientos y movimientos de suelo en el estado de Puebla, razón por la cual fue escogida para realizar este trabajo. Aunado a esto, la zona no cuenta con suficientes estudios realizados en distintas colonias de la ciudad. A continuación, se describen algunos aspectos más importantes de Teziutlán: Ubicación, geología, fisiografía, hidrología, edafología, su clima local y regional según bibliografía de CENAPRED, para tener el contexto general de la zona y un mayor marco de referencia.

1.1 Descripción geológica y geomorfológica de la zona

La ciudad de Teziutlán está localizada al noreste de la ciudad de Puebla, con 1940 m.s.n.m. de altitud, ubicada sobre el eje Neovolcánico Transmexicano colinda al norte con el municipio de Hueytamalco, al sur con Chinautla, al este con Xiutetelco y al oeste con Jalacingo y Tlatlauqui, con una superficie de aproximadamente $2,400\text{km}^2$. En el centro se ubica sobre una meseta con una ligera inclinación hacia el norte, dentro de zona de barrancos, con diversas inclinaciones con diferente ángulo. Hacia el oriente y poniente de la ciudad, la planicie cambia a laderas naturales con poca pendiente y acantilados con pendientes escarpadas. (SEDATU, 2014).

En la zona generalmente compuesta de material rocoso de origen ígneo (tobas y brechas), con una cementación media perteneciente del cuaternario, que compone el eje Neovolcánico, así como derrames basálticos de conos volcánicos ubicados al sur de la ciudad. Estas rocas de mediana cementación son las que dan origen a los suelos residuales



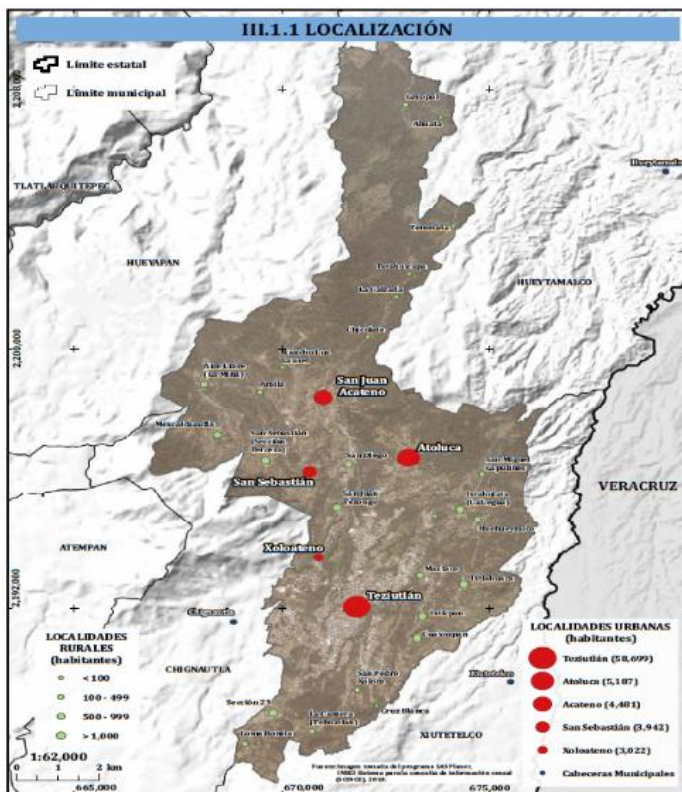
Fotografía 1. Toma aérea de Teziutlán.

Fuente: CENAPRED, 1999.

En la fotografía 1, se observa como la ciudad está integrada en el sistema montañoso antes mencionado, mostrando pendientes escarpadas a lo largo de todo el territorio, así como delimitada por el cauce de sus dos ríos principales río “Calvario” y “Xoloatl”.

El resultado del proceso de descomposición de las rocas ígneas ocurre debido al clima templado y húmedo de toda la región, con espesores relativos de 6-8m de profundidad, que se extienden por el oriente y norte de la ciudad, precisamente estos suelos son los que presentan mayor inestabilidad, ya que son propensos a saturarse con el agua de las lluvias intensas y prolongadas de la región disminuyendo su resistencia cortante, provocando deslizamientos y desprendimientos.

Al oeste de la ciudad existen acantilados de brechas y tobas que presentan pseudoestratificación haciendo alusión a eventos eruptivos secuenciales de los conos volcánicos anteriormente mencionados, en general estas rocas son de grano fino a medio, aunque también existen fragmentos rocosos y gravas en la misma matriz de grano fino, otras capas existentes son pumíticas, vidrio volcánico y obsidiana. Contiguo a estos acantilados, en la zona menos escarpada, existen construcciones pertenecientes a las colonias La Gloria, Siete Sabios, Cruz Verde y El Carmen, entre otras ubicadas a lo largo del río Xolóatl. (SEDATU, 2014).



Mapa 1. Ubicación del municipio de Teziutlán.

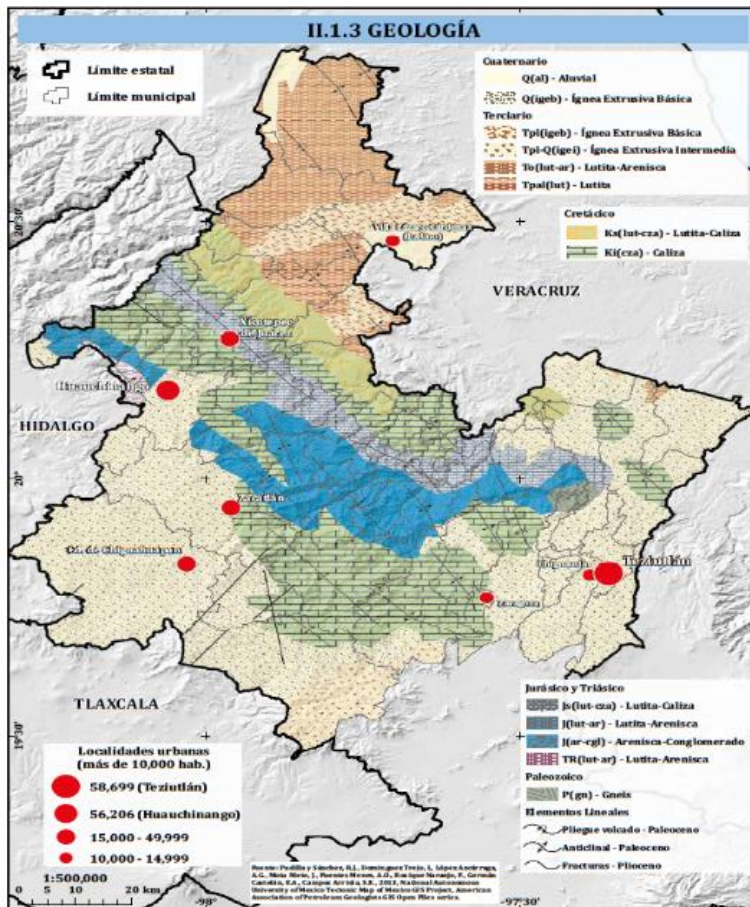
Fuente: SEDATU, Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Teziutlán, Puebla, 2014.

En el mapa 1 tomado de un atlas de la SEDATU (Secretaría de Desarrollo agrario, Territorial y Urbano), se muestra a continuación la cantidad de habitantes de las localidades representados en círculos en color rojo, colocando a Teziutlán dentro de las localidades urbanas más habitadas de la zona. Siendo así importante la cantidad de viviendas en la zona.

Hacia el noroeste, las pendientes son suaves, pero los materiales se encuentran más alterados, siendo también de origen volcánico. Las laderas hacia el sureste (Ávila Camacho, Benito Juárez y Campo Verde) son más escarpadas que las del noreste (La Aurora y El Calvario) respectivamente como resultado del intemperismo generando suelos residuales en algunas zonas de la ciudad, con propiedades mecánicas peculiares, mostrando una gran sensibilidad y respuesta al secado y variaciones importantes de resistencia debido al régimen de succión mátrica. (SEDATU, 2014).

1.2 Geología del Estado de Puebla, Sierra Norte.

La Sierra Madre Oriental (Sierra Norte de Puebla) formada por rocas sedimentarias mesozoicas a su vez cubiertas por rocas volcánicas más jóvenes del plioceno, las más jóvenes hacen referencia a la caldera de los humeros (Sistema Volcánico Transversal). Las rocas sedimentarias se originaron en el jurásico tardío y el cretácico, cuando la región se encontraba sumergida bajo agua, en jurásico el agua ingresó en el territorio mexicano que provino de la provincia del pacifico oriental a través de Oaxaca, cubriendo al país en el jurásico tardío, posteriormente por fuerzas orogénicas provenientes del suroeste se inició el levantamiento tectónico.



Mapa 2. Geología del Estado de Puebla.

Fuente: SEDATU, Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Teziutlán, Puebla.2014.

En el Mapa 2, se observa la distribución de la geología del Estado de Puebla, en el cual Teziutlán está ubicado en el sureste del Estado siendo conformado principalmente por rocas ígneas extrusivas intermedias y de manera local, cuenta con presencia de rocas metamórficas y sedimentarias.

Las rocas metamórficas son del paleozoico, por otro lado, los esquistos, dioritas y conglomerados, conforman el basamento sobre el cual subyacen las rocas sedimentarias. Las rocas formadas en el cenozoico son de origen volcánico continental, las cuales tuvieron su depósito sobre sedimentos marinos mesozoicos que sobreyacen también a rocas pre-mesozoicas las cuales constituyen el antepaís de la sierra madre oriental.

Las fracturas y fallas originadas durante la actividad volcánica del terciario formaron rocas que su origen se remonta al terciario, constituidas por derrames andesíticos con espesores de 300m, a este periodo corresponden las unidades de Teziutlán y Cruz Blanca.

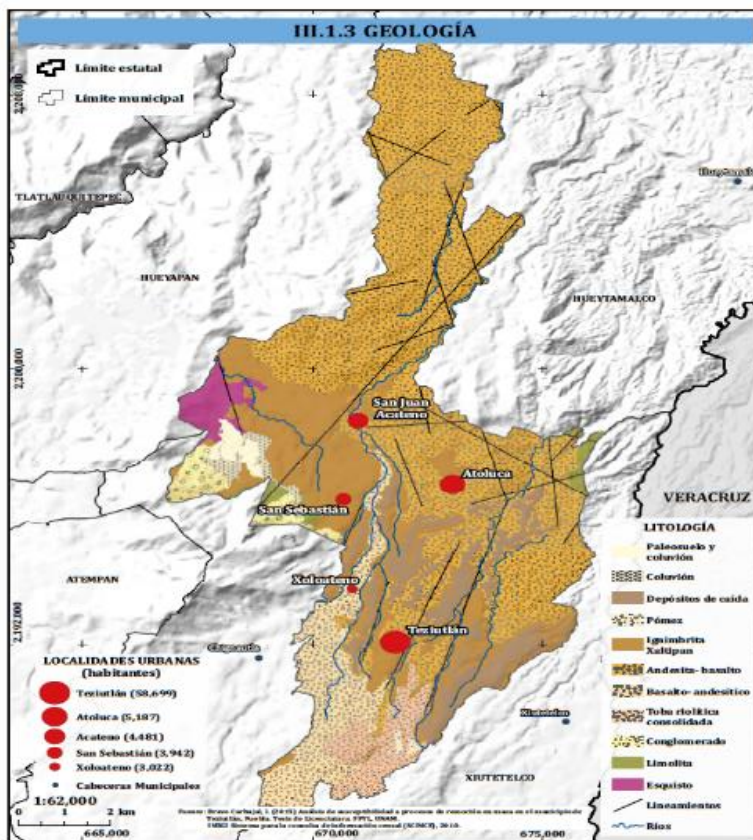
Los espesores de roca correspondientes al cuaternario sobreyacen a rocas volcánicas del terciario, como rocas de origen marino de formación en periodos antecedentes, estas unidades se componen de materiales piroclásticos dacíticos y riolíticos, su fuente principal es la Caldera de los Humeros.

Hablando regionalmente, el sistema montañoso de Zaragoza se cuenta con una gran variedad de rocas y suelos, mismos que conforman la sierra. Hablando de rocas sedimentarias presentes: calizas, lutitas, limonitas y areniscas, todas ellas de origen sedimentario marino, se cuenta con fósiles de origen marino, también con la presencia de rocas magmáticas y volcánicas (basaltos y tobas) producto de emisiones de lava, lapílis y ceniza depositados en diferentes eventos por la Caldera de los Humeros. (SEDATU, 2014).

1.3 Geología, Municipio de Teziutlán.

Teziutlán tiene una gran diversidad geológica a cuál incluye rocas sedimentarias mesozoicas (calizas, conglomerados, areniscas, lutitas y limolitas), mezcladas y sobre ellas se tienen rocas volcánicas cenozoicas (basaltos, andesitas, riolitas y tobas).

Mediante el intemperismo y la desintegración se han conformado los suelos que cubren a las montañas, agentes como: humedad temperatura y vegetación han sido clave para la descomposición de los minerales dando origen a suelos con características cohesivas como lo son suelos arcillosos y limosos, y suelos friccionantes como gravas, arenas y limos inorgánicos.



Mapa 3. Litología regional de Teziutlán.

Fuente: SEDATU, CENAPRED, Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Teziutlán, Puebla. 2014).

En el mapa 3 mostrado anteriormente, se observa la distribución litológica local mostrando el municipio de Teziutlán, donde se muestra la distribución espacial de las principales litologías presentes. Compuesto por rocas ígneas, andesíticas y de basalto, a su vez se registran más tipos de rocas sedimentarias en el municipio.

En cuanto a las rocas sedimentarias son de origen marino mismas presentes en todo Teziutlán, pertenecientes al jurásico y cretácico, presentan un alto grado de erosión fluvial. Las calizas cuentan con un plano de estratificación y espesores que varían de entre 1 y 20m, estas formaciones son estables cuando su inclinación es contraria al buzamiento de los planos estratigráficos, la estabilidad de las laderas conformadas por lutitas y limolitas es frágil por contar con poco espesor en sus planos de foliación. En cuanto al vulcanismo en el relieve se cuenta con unidades pertenecientes al cuaternario, con estructuras menores y depósitos piroclásticos mismos que cubren a las rocas sedimentarias. Este tipo de suelos friccionantes de origen volcánico son inestables cuando el ángulo de fricción interno es superado por la inclinación del talud y su comportamiento depende de su cohesión, depende del contenido de agua, estando secos son muy resistentes, pero cuando se satura, fluyen como un líquido. (SEDATU, 2014).

1.4 Fisiografía del Municipio de Teziutlán

Teziutlán se ubica entre la Sierra Madre Oriental y el Eje Neovolcánico, también abarca una parte de la Llanura Costera del Golfo, la Sierra Madre Oriental se compone de varias sierras formadas por plegamientos, principalmente sedimentarios calcáreos y arcillosos del mesozoico, principalmente de origen marino, cuyas altitudes van desde 2000 a 3000m. El Eje Neovolcánico está constituido por sierras volcánicas, coladas de lava, conos cineríticos, escudos-volcanes basálticos y depósitos de arenas y cenizas originando cuerpos de agua en las planicies delimitadas por elevaciones.

El vulcanismo es producido por la subducción de la placa tectónica de cocos con la de Norteamérica en el plioceno. La Llanura Costera del Golfo está definida como una costa de emersión ya que cuenta con rasgos propios, fósiles marinos entre otros (arcillas, arenas y conglomerados), cuya antigüedad aumenta conforme nos alejamos de la costa, se formó por la acumulación de material detrítico, por erosión de la tierra emergida a finales del cretácico. Esta provincia fisiográfica se constituye de lomeríos y mesetas que se aplanan hacia la costa, la Sierra Norte de Puebla tiene una extensión desde huauclilla, en el oeste justo hasta Teziutlán, también se extiende hasta los estados de Hidalgo y Veracruz.

La Sierra Norte de Puebla cuenta con depresiones y laderas, compuesta por material sedimentario, también cuenta con fallas normales junto a anticlinales y largos sinclinales. La altitud de la SNP tiende a descender en dirección del suroeste al noreste, misma dirección que cuenta con los cauces más importantes los cuales originan valles y barrancos por su erosión, la altitud va desde 300m hasta su máximo 3000m siendo estos en Teziutlán y Tlatlauquitepec, (SEDATU, 2014).

1.5 Edafología, Estado de Puebla (Sierra Norte).

En cuanto al relieve, clima y microorganismos de la Sierra Norte de Puebla, generan el desarrollo de los tipos de suelos presentes en la región de estudio, los materiales volcánicos han generado suelos del tipo andosoles, en este tipo de relieve los suelos son poco profundos y jóvenes en materiales del cuaternario, la parte que comprende a Teziutlán, se asocia con materiales del Sistema Volcánico Transversal y se caracteriza por tener suelos someros de grano medio a grueso y bajo contenido orgánico.

Según fuentes del CENAPRED, en su Atlas Nacional de Riesgos, 2014 los andosoles se constituyen de materiales volcánicos depositados de grano medio. Los luvisoles cuentan con poca materia orgánica, son poco profundos y cuentan con estratos rocosos generalmente a los 50m de profundidad, siendo favorables para la agricultura.

Los regosoles presentan poca evolución relacionados a la fuerte actividad erosiva con material transportado y acumulado de zonas más altas, contando con una profundidad variable dependiendo de las topoformas existentes, son empleados en diferentes actividades ya que se encuentran poco consolidados y facilitan su explotación. (SEDATU, 2014).

1.6 Clima en la Sierra Norte de Puebla

De acuerdo con los rasgos más importantes del clima de la sierra norte de Puebla la fisiografía de Teziutlán es lo que mayormente determina la configuración climatológica de la zona obtenidos del atlas de riesgos de Teziutlán de la SEDATU, (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano) existen dos regiones climáticas:

La primera es del tipo húmedo subtropical con influencia del golfo de México con altitud media de los 200 a los 1200 msnm contando con una temperatura de 24°C.

Existiendo la segunda región semiseca más orientada hacia el interior de la SNP con una temperatura variable de 14°C aproximadamente y heladas poco frecuentes existiendo microclimas en la región asociados a la serranía y diversos cambios de altitud que a veces pueden ser de más de 1000 m en menos de 20km de distancia en plano. (SEDATU, 2014).

1.7 Clima en el Municipio de Teziutlán

Con base en información obtenida del Atlas de Riesgos Municipal de Teziutlán, de la SEDATU, se tiene que, el clima de Teziutlán es predominantemente templado con lluvias todo el año. Teziutlán se posiciona como la región más lluviosa de todo el estado. El coeficiente de escurrimiento alcanza valores altos, dadas las fuertes pendientes y la creciente deforestación; varía del 10 a más del 30% para la mayor parte de la región. (SEDATU, 2014).

A continuación, en la tabla 1 se muestra una relación del clima, con el porcentaje del municipio que este ocupa, y su área en kilómetros cuadrados.

Clima	Temperatura	Precipitación	Área (km2)	% del territorio municipal
(A)c(fm)	Semicálido húmedo del grupo c, temperatura media anual mayor de 18 ^a c temperatura del mes más frío menor que 18 ^a c temperatura del mes más caliente mayor de 22 ^a c.	Precipitación del mes más seco mayor a 40mm; lluvias entre verano e invierno y porcentaje de lluvia invernal menor al 18% del total anual.	11.9	12.9
C(m)(f)	Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12 ^a c y 18 ^a c temperatura del mes más frío entre -3 ^a c y 18 ^a c y temperatura del mes más caliente bajo 22 ^a c.	Precipitación del mes más seco menor de 40mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.	16.8	18.1
C(f)	Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12 ^a c y 18 ^a c temperatura del mes más frío entre -3 ^a c y 18 ^a c y temperatura del mes a más caliente bajo 22 ^a c.	Precipitación en el mes más seco mayor a 40mm; lluvias todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.	63.8	69.0

Tabla 1. Clima de Teziutlán.

Fuente: SEDATU, Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Teziutlán, Puebla. 2014.

2.- Teorías metodológicas de investigación

El marco teórico se compone a continuación de diferentes obras que sirvieron como referencia y apoyo a esta investigación, para fines de recopilación de procesos y metodologías adoptadas por los autores: Manuel J. Mendoza López, Leobardo Domínguez Morales, Ignacio Noriega Rioja y Enrique Guevara Ortiz. En sus obras como “Monitoreo de laderas con fines de valuación y alertamiento”. “Estimación del peligro y el Riesgo de deslizamientos”, “Comparación de Métodos Cualitativos y Cuantitativos en la Determinación del grado de Estabilidad de la ladera Aledaña a la comunidad La pintada, Municipio de Atoyac de Álvarez, Gro.” así como la “Guía Básica para la Elaboración de atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos” establecidos por la subdirección de mecánica de suelos y procesos gravitacionales, CENAPRED, SEGOB, así como el Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Teziutlán, Puebla. 2014 publicado por parte de la SEDATU sirvió de gran referencia para cuestiones de investigación y revisión de mapas. Este trabajo toma como ejemplo la línea metodológica de autores mencionados anteriormente para crear un marco de referencia integral en cuanto a los métodos y técnicas empleados en este trabajo, ya que los mismos cuentan con la experiencia y desarrollo en estos temas que son de suma importancia y que han adquirido mayor seriedad a lo largo del tiempo, ya que el crecimiento de la población así lo amerita. A continuación, se muestra información valiosa que tiene como propósito describir con mayor detalle, lo expuesto referente al tema de susceptibilidad de deslizamiento de laderas.

2.1 Diagnósticos de riesgo

Los diagnósticos de riesgo se refieren a determinar el evento o escenario más grave posible que pueda pasar, está relacionado con la probabilidad de ocurrencia, con el peor escenario nos referimos a los efectos que el fenómeno o distintos fenómenos ocasionan a la infraestructura construida por el ser humano. Con esta definición es importante dejar claro que el estudio del fenómeno nos lleva a la determinación del peligro que existe en el sitio, dicho esto se dice que la estimación del riesgo tiene que ver con las consecuencias, y

dependen directamente de las características físicas de los asentamientos, así como de la infraestructura y de los métodos para aminorar los efectos de dicho fenómeno.

(J. Mendoza y L. Domínguez M, 2006).

2.2 Estudios de peligro

Los estudios de peligro toman en cuenta información física que no cambia con el tiempo, y son más objetivos, a diferencia de los estudios de riesgo que son mucho más elaborados pues indican la relación entre los fenómenos naturales, el ambiente, y la de éstos con los sistemas físicos y por causas antropogénicas, los estudios de peligro se aplican para áreas más grandes, donde las condiciones son similares, en cambio de los estudios de riesgo que son locales y dependen de las condiciones específicas de la zona.

Algo característico de los estudios de riesgo es que lo que se expone al fenómeno varía en tiempo, cantidad y demás características. Para representar los resultados ya sea de peligro o de riesgo, existen mapas a distintas escalas en los cuales se identifican las intensidades de eventos que puedan ocurrir, ofreciendo una amplia gama de posibilidades para su representación. Una colección de este tipo constituye un Atlas (Atlas Nacional de Riesgos).

Los sistemas de informática en la actualidad permiten representar los mapas de manera mucho más completa y precisa de diversas situaciones, así como generar mapas para plasmar un tipo específico de información para un uso en cuestión. Estos mapas son los mejores para los estudios de riesgo, donde se busca representar escenarios de fenómenos con peligro y las afectaciones generadas por los mismos. Estos sistemas facilitan la actualización y la preparación de las representaciones de mapas para cada caso. Un Atlas Nacional pretende proporcionar la información de la manera más completa posible sobre los peligros y sobre la ocurrencia repetitiva de los fenómenos a nivel regional, no así con la ocurrencia de fenómenos a manera local, para este caso se hablaría más de un Atlas Nacional de peligros más que de riesgos. (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.3 Movimientos de ladera

Este apartado adquiere gran importancia ya que definir correctamente los movimientos de ladera es primordial para el entendimiento de esta, los factores que lo provocan, y como medir su ocurrencia, los deslizamientos se definen por los movimientos talud abajo de materiales térreos que resultan de los movimientos de suelos, rocas y vegetación bajo la acción de la gravedad. Dichos materiales se pueden mover por derrumbe o caída, deslizamiento, flujo o desplazamiento lateral, algunos desplazamientos son rápidos, mientras que otros pueden tomar, días, semanas, meses o incluso lapsos mayores para que se desarrollen a continuación, en el Dibujo 1 se muestran los tres tipos de movimientos de ladera principales, (Mendoza y Domínguez, 2006).



Dibujo 1. Tipos de movimientos de ladera

Fuente: SEGOB, CENAPRED, Guía básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, 2006.

2.3.1 Caídos o derrumbes

Los caídos o derrumbes son movimientos rápidos y de forma súbita de suelos y fragmentos separados de roca que se forman en inclinaciones fuertes., por lo que el movimiento es prácticamente de caída libre, rodando y rebotando.

(Mendoza y Domínguez, 2006).

2.3.2 Flujos

Movimientos los cuales los fragmentos de roca y partículas tienen movimientos internos dentro de la masa que va en movimiento o se desliza en la superficie de falla.

(Mendoza y Domínguez, 2006).

2.3.3 Flujos o avalancha de detritos (tipo de flujo)

Corresponde a un movimiento súbito de una mezcla de varios componentes de tipos de roca los cuales contienen fragmentos, vegetación agua, partículas sueltas de roca, formando una masa viscosa y que fluye ladera abajo.

(Mendoza y Domínguez, 2006).

2.3.4 Lahares (tipo de flujo)

Este tipo corresponde a un flujo producido por una mayor cantidad de agua se origina en volcanes o laderas con fragmentos volcánicos, generado por deshielo, lluvias intensas, desbordamiento de aguas represada o por sismos.

(Mendoza y Domínguez, 2006).

2.4 Tipos de deslizamientos

Dentro de los movimientos de ladera vistos anteriormente se encuentran los deslizamientos de ladera los cuales, según Mendoza y Domínguez, 2006 se pueden definir como: 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. Existen los siguientes tipos:

2.4.1 Rotacionales:

Deslizamientos en los cuales la superficie principal adquiere forma cóncava, señalando a un movimiento circular o rotacional de la masa inestable de suelo, tienen su mayor ocurrencia en suelos arcillosos blandos, aunque se puede formar en formaciones de roca blanda también. (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.4.2 Traslacionales:

Deslizamientos en los cuales la masa de suelo hacia afuera y abajo, sobre una superficie de forma plana, sin movimiento de rotación, generalmente se presentan en suelos granulares o en zonas rocosas de debilidad, como planos de estratificación, y zonas de cambio de meteorización. (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.4.3 Expansiones o desplazamientos laterales:

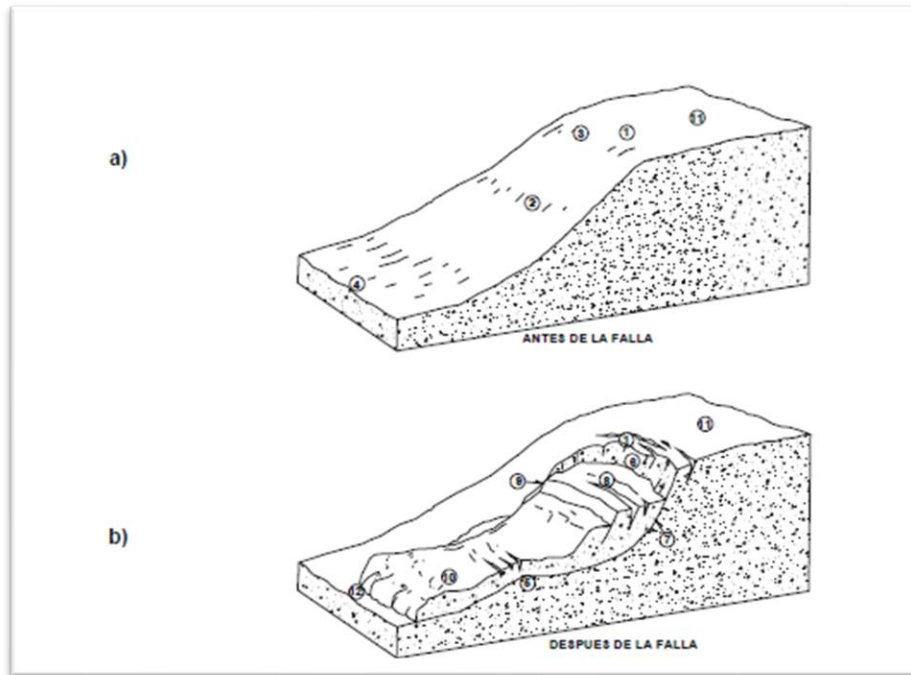
Movimientos en los cuales la masa de suelo se mueve sobre pendientes muy suaves originando movimientos horizontales ocasionados por licuación, efecto que toma el suelo cuando los materiales que lo componen están suelos y saturados, arenosos y limosos adquieren el comportamiento de un fluido. (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.4.4 Movimientos complejos:

Estos movimientos se originan por el cambio del movimiento inicial en otro tipo de movimiento en su movimiento cuesta abajo, por ejemplo, una avalancha rocosa o un flujo deslizante. (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.5 Partes y características que definen una ladera y a un deslizamiento

Para la definir correctamente una ladera, existe terminología específica misma se muestra a continuación:



Dibujo 2. Partes que componen un deslizamiento

Fuente: SEGOB, CENAPRED, Estimación del peligro y riesgo de deslizamientos en laderas, 2006.

1. **Corona:** El material que permanece en su lugar, prácticamente no desplazado y adyacente a las partes más altas de la escarpa principal.
2. **Superficie original del terreno:** Es la superficie inclinada o talud de una ladera antes de que ocurra el movimiento o deslizamiento.
3. **Hombro:** La zona que se encuentra en la transición de la superficie inclinada o talud de una ladera y la corona.
4. **Pie de la ladera:** Parte más baja de la ladera.

5. **Pie de la superficie de falla:** La línea de intersección (en ocasiones cubierta) entre la parte inferior de la superficie de falla y la superficie original del terreno
 6. **Escarpa principal de falla:** Es el escalón o superficie abrupta localizada en la parte superior de la ladera y contigua a la corona.
 7. **Superficie de falla o ruptura:** Zona o lugar geométrico donde se rompe o pierde el equilibrio de una porción de los materiales que componen una ladera y se deslizan ladera abajo por la acción de la gravedad, separándose de la ladera remanente.
 8. **Cuerpo principal:** Aquella parte del material desplazado sobre la superficie de ruptura.
 9. **Flanco:** Es el costado de un deslizamiento de tierras. Se indica derecho o izquierdo, refiriéndose al deslizamiento observado desde la corona.
 10. **Zona de acumulación o base:** El área dentro de la cual el material desplazado queda encima de la superficie original del terreno; esto es el área cubierta por el material fallado, abajo del pie de la superficie de falla.
 11. **Plataforma:** Porción superior del talud más allá de la corona.
 12. **Punta o uña:** La base del deslizamiento que se encuentra más distante de la corona.
- (CENAPRED,2006).

2.6 Factores que determinan la inestabilidad de laderas

Los causantes de deslizamientos o de inestabilidad de laderas se dividen en internos y externos; dependen directa o indirectamente con los esfuerzos cortantes actuantes y resistentes que se desarrollan en superficie de falla o de deslizamiento a veces estos factores se combinan siendo confuso distinguir cual fue el detonante específico. Con cambios en el ambiente interno y cambios causados por la mano del hombre son causas importantes para desencadenar deslizamientos de ladera (Mendoza y Domínguez, 2006).

Existen casos en los que es difícil distinguir que factores afectan la estabilidad de una ladera por eso se recomienda analizarlos por separado. A continuación, se presenta la definición y descripción de los principales factores internos y externos que afectan la estabilidad de laderas.

2.6.1 Factores internos

Estos factores son los que la propia naturaleza de la ladera ya cuenta, es decir: De acuerdo con lo mencionado en el artículo “Estimación del peligro y el riesgo de deslizamientos en laderas” por Mendoza y Domínguez, 2006, Los factores internos están directamente relacionados con el origen y las propiedades de los suelos que componen la ladera, así como por su distribución espacial y de manera muy particular, por la presencia de agua; la presión que ejerce dentro de la masa de suelo provoca la disminución de su resistencia al esfuerzo cortante. El agua, es la principal causa que provoca una disminución de la resistencia de los suelos en la potencial superficie de falla. (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.6.1.1 Propiedades de los suelos y rocas

Las características de resistencia de los suelos que conforman las laderas varían en relación con las condiciones geológicas y del clima de la región, y cambian con el tiempo y espacio.

La resistencia cortante del suelo puede ser determinada por pruebas de laboratorio o en campo. Las fuerzas actuantes por peso y por cargas aplicadas se determinan con suficiente precisión a partir de sus condiciones geométricas y de pesos volumétricos. Así es posible cuantificar valores necesarios para el cálculo de factor de seguridad.

En los suelos usualmente tienen que ver dos o más eventos desestabilizadores (factores externos) tales como lluvias intensas, cambios en el nivel del agua del terreno, actividad sísmica o actividad volcánica. La lluvia, produce un aumento en la saturación del terreno y en el aumento del peso del suelo; así como del nivel virtual del agua, lo que se traduce en el incremento de su presión.

Las bajas temperaturas constituyen otro factor de alteración que poco a poco reducen la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. La formación de láminas o lentes de hielo dentro de la masa del suelo generan esfuerzos horizontales y un aumento de presión de poro durante el deshielo (saturación de suelo). Otras fuentes de agua, las generan fugas de agua y la distribución de agua potable y drenajes en zonas urbanas (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.6.1.2 Estratigrafía y estructuras geológicas

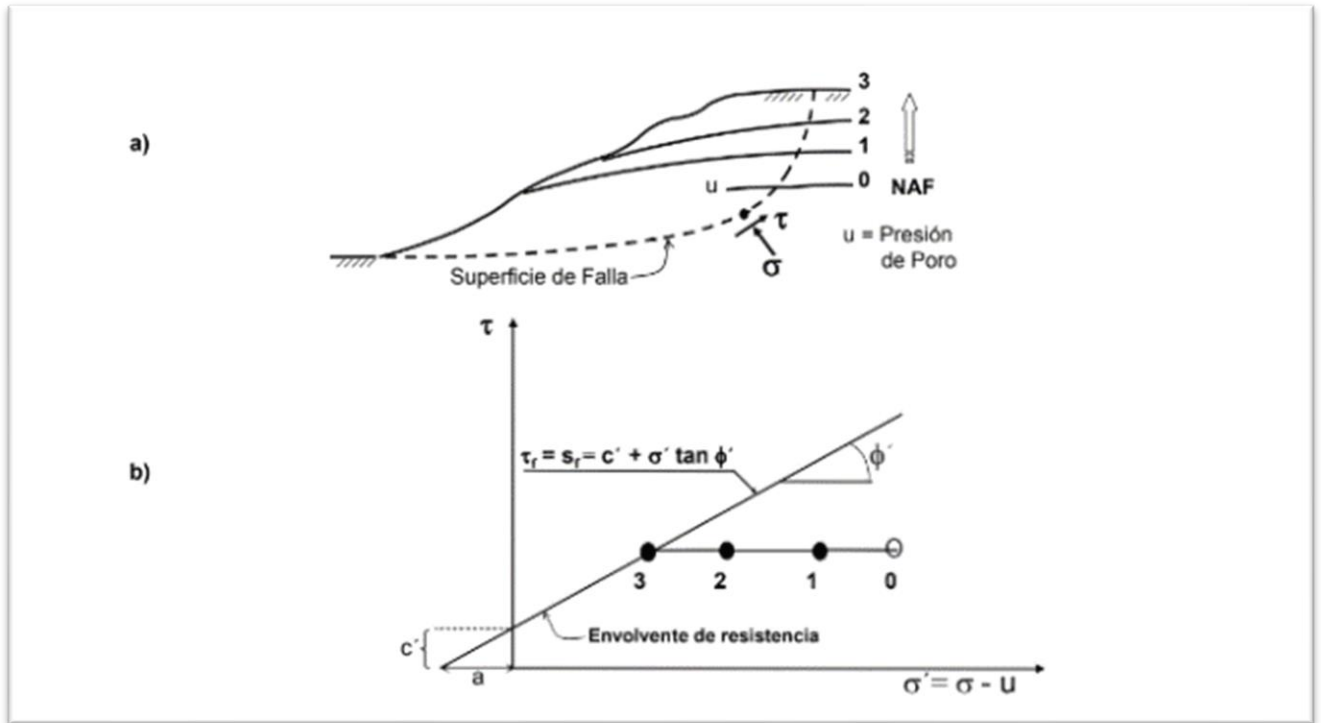
Los planos de estratificación, discontinuidades o zonas de contacto de formaciones geológicas son potenciales superficies de falla en la ladera, mayormente cuando los planos de estratificación y zonas de contacto cuentan con mucha pendiente haciéndolas propensas al deslizamiento. En zonas del país donde originaron sus materiales debido a formaciones volcánicas en eventos relativamente recientes, dichos materiales se depositaron en un

estado muy disgregado con pendientes o echados paralelos a los taludes existentes, atendiendo a la morfología de su ladera en su etapa temprana. Esto ha generado que estos materiales sean susceptibles a deslizamientos o a afectaciones por los factores externos. (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.6.1.3 Mecanismo de falla por aumento de la presión del agua.

En cada ladera ocurren cambios en los niveles del agua del suelo debido al cambio de las estaciones y por consecuencia el clima. Así, en la temporada de sequía el suelo se mantiene parcialmente saturado, generando tensión o presión negativa en el agua, lo que define una resistencia cortante relativamente alta del material. Al ocurrir lluvias intensas y prolongadas esa succión se pierde y se genera una presión positiva en el agua (también conocida como presión de poro); en el dibujo 3, a, se esquematiza el aumento del nivel de agua dentro del suelo de la ladera (niveles 0, 1, 2 y 3), que es lo que sucedería internamente ante lluvias intensas. El aumento de presión de poro (u) en la superficie potencial de falla, cambia junto con la resistencia del suelo, atendiendo al principio de los esfuerzos efectivos. La ecuación incluida en el dibujo 3, establece que la resistencia al esfuerzo cortante (s_f) es proporcional al esfuerzo normal efectivo (σ' , que es igual al esfuerzo total menos la presión de poro) dada su naturaleza friccionante; los parámetros de resistencia son la cohesión efectiva (c') y el ángulo de fricción interna (ϕ'); así pues, cuando la presión de poro aumenta (por la elevación del nivel de aguas freáticas, NAF) el nivel de esfuerzos efectivos disminuye, y consecuentemente también se reduce la resistencia efectiva del suelo. (Mendoza y Domínguez, 2006).

En el dibujo 3 se muestra la trayectoria de esfuerzos efectivos al aumentar la presión de poro (secuencia 0, 1, 2 y 3), hasta tocar la envolvente de resistencia.



Dibujo 3. Efectos de la presión del agua sobre la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos
Fuente: SEGOB, CENAPRED, Estimación del peligro y riesgo de deslizamientos en laderas, 2006.

Lo antes expuesto resulta para el único caso en zonas no pobladas, ya que en zonas urbanizadas o rurales aunado al fenómeno de las lluvias debe sumársele factores humanos, por ejemplo: fugas de agua de alcantarillado y suministro de agua potable.

2.6.2 Factores externos

A continuación, se presentan los factores externos cuya presencia casi siempre son los detonantes para el caso de los deslizamientos ya que son ajenos a la ladera y cambian constantemente.

son sistemas ajenos a la ladera que generan cambios en su estabilidad; generalmente producen un incremento de los esfuerzos cortantes actuantes, aunque de manera indirecta pueden producir un cambio en la resistencia al esfuerzo cortante del material que compone el talud. Los factores externos se originan ya sea por fenómenos naturales, tales como las lluvias intensas y prolongadas, los sismos fuertes y la actividad volcánica; o bien por actividades humanas, (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.6.2.1 Lluvias intensas y prolongadas

La lluvia, factor de los más importantes en inestabilidad debido al efecto que tiene en la saturación del terreno, en el aumento del peso volumétrico del suelo y en la reducción de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos aparte las lluvias propician socavación, deslizamientos y cambios en la geometría de las laderas, la mayoría de los deslizamientos detonados por lluvias intensas y de larga duración se han presentado en laderas constituidas por suelos residuales y depósitos de origen sedimentario o aluvial. Los deslizamientos en su gran mayoría son inducidos por lluvias cortas y localizadas de intensidad alta, y éstos ocurren prácticamente al mismo tiempo que se presenta el máximo de la lluvia horaria. La lluvia antecedente de unos cuantos días puede ser importante para la ocurrencia de deslizamientos menores, en un deslizamiento mayor afecta en poco, en cambio, una lluvia intensa de aproximadamente 70 mm/h parece ser el valor del límite del cual ocurren los deslizamientos. La lluvia de 24 horas generalmente refleja lluvias cortas de intensidad alta, y ésta puede usarse como un indicador de la probabilidad de deslizamientos. Una lluvia de 24 horas de menos de 100 mm es muy improbable que provoque un deslizamiento mayor, (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.6.2.2 Sismos

Los sismos requieren una especial consideración a tomar en cuenta para evaluar a un deslizamiento de ladera, ya que son considerados factores externos que pueden incrementar o decrecer la inestabilidad de una ladera, algunas causas humanas se pueden sumar a la ocurrencia de un sismo para generar un deslizamiento. Cuando ocurre un sismo su fuerza horizontal de movimiento favorece al deslizamiento siendo esta una fracción del peso de la masa potencialmente deslizante delimitada por la superficie de falla se calcula como el producto de un coeficiente sísmico (C_s) multiplicado por el peso de la masa inestable de suelo, (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.6.2.3 Cargas sobre la ladera

Este factor resulta de suma importancia, ya que tiene que ver directamente con el fenómeno de deslizamientos y son determinantes en los efectos que provocan, dicho esto se entiende que estas cargas extras en la ladera atienden a construcciones de obras o materiales acumulados en la ladera, y actúan sobre los esfuerzos cortantes actuantes en la potencial superficie de falla. Los asentamientos humanos a lo largo del talud y corona de la ladera generan desestabilidad a lo largo de la ladera, ya que provocan fugas de agua, cortes en el suelo y vibraciones de vehículos y/o maquinaria.

Las construcciones demasiado pesadas cerca del hombro de la ladera pueden representar un riesgo potencial a otras más debajo de la ladera, ya que generan una inestabilidad local con una alta posibilidad de suscitar un deslizamiento general. Aunado a esto contamos con causas humanas en general que provocan aún más inestabilidad, (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.6.2.4 Causas humanas o antrópicas

Son las actividades humanas que incrementan la ocurrencia de deslizamientos, algo que se debe establecer es que, bajo las mismas condiciones de altura, pendiente y materiales de composición de la ladera, un área con asentamientos humanos es más probable a presentar un deslizamiento que un área rural. Existen 3 principales causas expuestas por Mendoza y Domínguez, 2006. mismas que están presentes en la ladera estudiada en la colonia Benito Juárez, ya que un número considerable de árboles fueron talados, alcantarillado en mal estado y viviendas en el hombro de la ladera. A continuación, se muestran las 3 principales actividades humanas que afectan a una ladera dentro de las cuales hay causas que lo provocan.

I. Cambios en el régimen de la presión del agua del subsuelo

- Concentración de infiltraciones por la rotura de drenajes o de los sistemas de abastecimiento de agua.
- Cambio en el régimen de las aguas superficiales
- Cambio o incluso impedimento de cauces en cañadas
- Construcción de vasos o tanques de almacenamiento
- Infiltraciones por fosas sépticas
- Impermeabilización para la urbanización, lo que reduce la evaporación e infiltración, y aumenta la escorrentía.

II. Cambio en la topografía de la ladera y la imposición de sobrecargas

- Aumento del ángulo del talud por la ejecución de cortes
- Sobrecargas por la construcción de muros de retención, rellenos, casas y edificios
- Vibraciones provocadas por maquinaria
- Explosiones para la explotación de canteras, minas y bancos de material
- Inyección de morteros cerca del talud.

III. Deforestación

- Tala de bosques
- Agricultura, pastoreo y quema
- Modificaciones del uso del suelo. (2006).

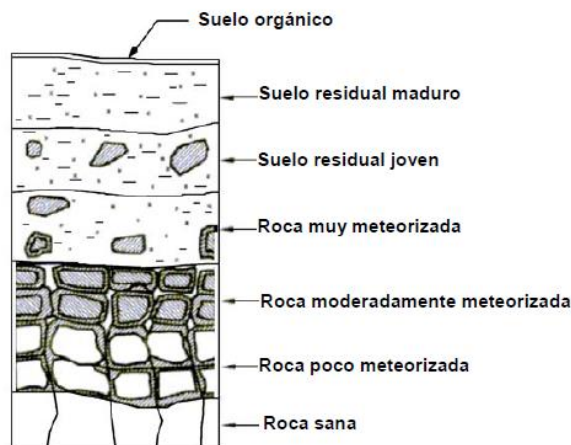
Es sumamente importante el correcto uso de suelo en zonas urbanas, y tratar de generar el menor impacto posible sobre las características físicas naturales de los suelos y en caso de tener que hacerlo, realizarlo con las medidas de prevención necesarias para evitar el desarrollo de un deslizamiento de ladera.

2.6.3 Presión de poro

Este efecto es uno de los más importantes en un deslizamiento, ya que es uno de los factores que mayor probabilidad de suscitar un deslizamiento en suelos residuales, tal como lo es la ladera aquí estudiada col. Benito Juárez (Teziutlán). De acuerdo con las leyes de la hidráulica los suelos que se encuentran por debajo del nivel freático son suelos saturados, y genera una presión positiva en los poros del suelo, de igual magnitud en todas direcciones. Este fenómeno se origina en suelos residuales mayormente cuando en la ladera existen lluvias intensas y de larga duración, saturando el suelo y desestabilizándola (Mendoza y Domínguez, 2006).

2.6.4 Suelo residual

Este tipo de suelo residual predomina en la localidad donde se realizó el estudio, razón por la cual resulta de gran importancia el análisis de este tipo de suelos ya que provocan mayor cantidad de deslizamientos en México. Estos suelos generalmente son producto de la alteración química de las rocas que lo originan en el mismo lugar. Se generan mediante altas temperaturas en ambientes tropicales, donde existe una alta precipitación de lluvias. En la zona de estudio, municipio de Teziutlán, se distingue por adquirir un color rojizo. (Mendoza y Domínguez, 2006).



Dibujo 4. Suelo residual

Fuente: (M. Mendoza L. L. Domínguez y otros, 2002, Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento).

2.7 Factor de seguridad FS

En la medida que se avanza en el entendimiento y evaluación de la zona de estudio, es importante explicar en qué consiste la medida que se emplea para tomar en cuenta la susceptibilidad a un deslizamiento, es decir, mediante el método determinista poder cuantificar el peligro en la ladera de acuerdo con el Centro Nacional de Prevención del Desastre CENAPRED. El factor de seguridad (FS) de una ladera se describe como el cociente mínimo entre la resistencia media al esfuerzo cortante (τ_f), y el esfuerzo cortante medio que actúa en la superficie de falla (τ); este esfuerzo actuante lo determina el peso del material sobre el talud. Si se considera la existencia de una ladera, se asume que $\tau_f > \tau$, y que por tanto el cociente FS es mayor que la unidad. La condición de falla en una ladera ocurre cuando se cumple $\tau_f = \tau$, y por tanto $FS = 1$, esta relación se muestra a continuación en la tabla 2.

Factor de seguridad	Ladera estable	falla
$FS = \tau_f / \tau$	$FS > 1$ $(\tau_f > \tau)$	$FS = 1$ $(\tau_f = \tau)$

Tabla 2. Factor de Seguridad.

Fuente: CENAPRED, Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, 2006.

Para que se cumpla esta relación, el esfuerzo cortante medio actuante debe incrementar y/o la resistencia media al esfuerzo cortante del suelo debe bajar. Los factores externos e internos de la ladera dependen los cambios que estas dos variables puedan sufrir (τ_f y τ) debido a fenómenos naturales o artificiales. Entre los primeros, que intervienen directamente en el valor de τ , se pueden considerar las posibles cargas sobre la ladera aplicados, cambio en la inclinación o de la altura de la ladera, etc. Por otro lado, entre los segundos se pueden englobar los mecanismos que provocan una reducción de la

resistencia cortante, τ_f ; tales como el intemperismo y la erosión, que generan disgregación y descomposición de materiales. Sin embargo, el factor más importante para reducir la resistencia en el suelo es la existencia de presión de poro (presión en el agua que ocupa los poros, espacios del suelo o las grietas de formaciones rocosas); ello ocurre cuando el agua se acumula en el suelo de la ladera.

(CENAPRED, 2006).

2.8 Antecedentes de deslizamientos en México y en la zona de interés.

Conocer los antecedentes de ocurrencia de este fenómeno en nuestro país, lleva a entender mejor el cómo y porque de su presencia en ciertas localidades, ya que sus causas están relacionadas directamente a los factores mencionados en este trabajo. México está formado por dos terceras partes de sistemas montañosos donde intervienen factores geológicos, geomorfológicos, estructurales y climáticos entre sí, mismos que definen las zonas de inestabilidad. Sumado a lo anterior, existen gran cantidad de asentamientos rurales, expuestos a peligro de deslizamientos generando riesgo para los habitantes de la zona. Los factores más importantes que determinan este peligro tienen que ver con su región climática y esta misma tiene que ver con sus aspectos físicos, topográficos y geográficos.

Atendiendo este punto se tiene que el periodo que comprende del mes de mayo a noviembre es cuando se tiene una mayor cantidad de lluvias en todo el año en el país, es por esto por lo que la mayor cantidad de ocurrencia de deslizamientos en ese periodo de tiempo son en los estados de: Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Chiapas, Morelos, Michoacán, Puebla e Hidalgo. (L. Domínguez y Coautores, 2006).

2.8.1 Antecedentes del sitio de interés: Teziutlán.

En vista de analizar el fenómeno de deslizamientos de forma más local, se hace una revisión de los antecedentes de la zona, teniendo eventos de suma importancia hace más de 20 años (octubre de 1999). Ya que la zona de estudio ha presentado numerosos eventos de este tipo en el pasado hasta el día de hoy, haciendo aún más importante su estudio.

La forma de analizar eventos ocurridos con anterioridad hace imaginar un posible evento en el futuro, ya que crea una idea de lo es posible que suceda y la magnitud del evento.

Los deslizamientos que tuvieron lugar en el mes de septiembre de 1999 fueron originados por un ciclón tropical y frente frío, ocasionando fuertes lluvias y prolongadas alcanzando columnas de agua de más de 350mm registrados en pluviómetros monitoreados por el CENAPRED. El deslizamiento de mayor tamaño se registró en una colonia aledaña a la zona de estudio (colonia La Aurora), la cual su ladera tenía más de 100m de longitud por 40m de ancho y una inclinación de 23° aproximadamente según registros del reporte generado por CENAPRED, en el sitio se registraron viviendas impactadas por el deslizamiento provocando la muerte de 110 personas. (Domínguez et al.,2006).

Devastador escenario para los ciudadanos y cualquiera que haya presenciado el desastre, había pertenencias de las viviendas por todas partes en el material de deslizamiento, evidencia física de las victimas que fueron sepultadas por la masa de tierra. Se trata de un desagradable recordatorio que nos impulsa a tratar de hacer todo lo posible para que no vuelva a suceder, o tratar o al menos de mitigar la probabilidad.

2.8.2 Problemática en la zona de interés: Colonia Benito Juárez.

Partiendo de lo más importante, la principal problemática de la zona de estudio tiene como antecedente en toda la zona circundante, deslizamientos debido al tipo de suelo en toda la región, esto posiblemente generado por las cargas extras ocasionadas por nuevos asentamientos humanos y al dudoso manejo pluvial que se tiene en la zona. Si se analizan en conjunto estos factores, y le sumamos las características propias del medio (fuerte

pendiente en la ladera y la susceptibilidad de saturación del suelo) se cuentan con los ingredientes para producir deslizamientos en dicha zona, y adquiere su importancia en el hecho que hay viviendas a lo largo de toda la colonia Benito Juárez, como se aprecia en el mapa 4.

A continuación; se muestra en el mapa 4 en contorno de color rojo, los límites de la colonia Benito Juárez, se puede apreciar a simple vista la cantidad de casas que se encuentran asentadas en esta zona. En la parte más baja de la ladera, recorre el río Xolóco, mostrado en color azul en el mapa 4 incluido únicamente para representar la cantidad de viviendas y su relación y distribución a lo largo de la colonia.



Mapa 4. Ubicación de la colonia Juárez

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Como parte de la problemática principal de la zona de interés, es la elección de las áreas disponibles para construcción del municipio, ya que la población se asentó irregularmente en las mismas áreas, fenómeno conocido coloquialmente en México como “paracaidismo”.

Algunas características importantes de la zona:

- La colonia Benito Juárez está asentada en la ladera oriente de la ciudad, por cuyo pie corre el río Xolóco, y a su vez al sur del Barrio Campo Verde.
- Las laderas en esta zona tienen inclinaciones de hasta 40° y sobre éstas se construyeron un número considerable de viviendas que hoy en día se encuentran habitadas en su mayoría. Aquí, las fallas de talud ocurrieron primordialmente en las capas de rocas alteradas, provocando muchos colapsos de casas, así como un deterioro severo de otras tantas que quedaron en una condición delicada de estabilidad.

Así, por lo tanto, es de gran interés conocer los resultados de los estudios sobre la ladera analizada.

3- Metodología:

El análisis de la estabilidad de una ladera o de un talud requiere el empleo de conocimientos técnicos y experiencia para definir el o los métodos a utilizar, tanto para el análisis numérico de la estabilidad como para la selección de las técnicas de exploración y determinación de las propiedades de los suelos, así como del uso y manejo de información geológica, geotécnica, hidrológica, hidráulica y morfológica. En cuanto a la metodología para llevar a cabo el estudio, se divide en dos apartados: los métodos cuantitativos y los métodos cualitativos, los cuales se definen a continuación en los siguientes subcapítulos.

3.1 Metodología cuantitativa:

Para el desarrollo de la metodología cuantitativa fue necesario la realización de trabajo de campo y en el laboratorio de mecánica de suelos del CENAPRED los cuales se complementan para integrar la metodología cuantitativa, la cual se plantea a continuación:

3.1.1 Método cuantitativo o determinista:

El método cuantitativo refiere al planteamiento físico del problema, con hipótesis válidas para un espacio y tiempo determinado, en el que intervienen las fuerzas que se oponen a la falla (fuerzas resistentes, FR) y las que provocan fuerzas (fuerzas actuantes, FA), mismas que permiten determinar, a través de lo que en ingeniería se conoce como Factor de Seguridad (FS), el grado de estabilidad de una ladera o talud. (Domínguez, 2018).

Este método es el que permite comprobación numérica de los resultados, es decir puede cuantificar propiedades de los fenómenos a evaluar, siendo estos al final de la evaluación resultados a interpretación, razón por lo cual es el método que más importancia tiene para la toma de decisiones, ya que los procesos numéricos permiten comprobar mediante ecuaciones, una teoría, la cual en este caso se trata de conocer la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural.

A continuación, se describen los métodos y equipo empleados para la adquisición y procesamiento de los datos para conocer el resultado de interpretación del estudio:

3.2 Trabajo de campo y laboratorio:

En el siguiente apartado, se expone como se llevó a cabo la adquisición de datos en campo, los métodos empleados y el procedimiento del cálculo del método determinista, así como las características del equipo empleado (Penetrómetro Portátil PANDA II) así como

parámetros de cohesión, ángulo de fricción peso volumétrico, los cuales fueron necesarios para la realización de la metodología empleada basada en cálculos establecidos para ingresar a software y generar perfiles que muestran el Factor de Seguridad de la ladera estudiada. Posteriormente se explica el proceso de la toma de datos con el VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado), con el cual fue posible elaborar un modelo digital en 3D de la ladera a estudiar, y generar mapas a partir de los datos, se puede ver paso a paso en el anexo 1 de este trabajo el procedimiento para su elaboración.

3.3 Exploración Geotécnica

Para esta investigación, se determinó utilizar el Penetrómetro Dinámico de Energía Variable, por sus siglas en francés PANDA, el cual permite conocer la resistencia de los suelos y su grado de compactación con los registros es posible estimar posibles planos de falla al realizar sondeos en zonas seleccionadas en base a la importancia que tienen con relación al riesgo de un deslizamiento que cuentan debido a su ubicación, ya que es una zona habitada y cuenta con una morfología diversa. También con un vuelo realizado en vehículo aéreo no tripulado (VANT) se tomaron datos para la mejor representación de la ladera y zona de estudio, que posteriormente sirvieron para generar imágenes y un modelo digital de la ladera estudiada como se había mencionado anteriormente.

3.3.1 Instrumentación y operación del equipo PANDA II

El equipo **PANDA** es un penetrómetro dinámico ligero a energía su funcionamiento básicamente consiste en golpear una varilla con punta cónica que va penetrando el terreno, y mide la energía necesaria para que la varilla penetre el terreno, calculando la resistencia del suelo. Cuando el martillo golpea la varilla esta trasmite el esfuerzo a la punta siendo esta la que penetre el terreno. Para cada golpe de martillo se registra de manera continua la penetración alcanzada (e) y la resistencia de punta del suelo (q_d).

$$q_d = \frac{1}{A_c} \times \frac{E}{e} \times \frac{M}{M + P}$$

- Donde M es la masa del martillo empleado,
- E la energía aplicada, e la penetración de la punta en el suelo por cada golpe de martillo,
- A_c es el área de la punta
- P la masa del tren de barras y de la cabeza de golpe.

Una vez que se realiza la toma de los sondeos panda, es posible observar en tiempo real la señal penetrométrica medida y las capas de suelo detectadas, en términos de la resistencia q_d . Los valores máximos para la resistencia de punta q_d varían entre 20.0 a 30.0 (MPa).

3.3.2 Pruebas con Penetrómetro Dinámico PANDA II:

La profundidad de exploración que alcanza este equipo resultó muy apropiada para los estudios de campo realizados, dado el espesor de los suelos de unos cuantos metros en los sitios de interés. La fácil operación del equipo, y su poco peso, permiten transportarlo a las zonas de difícil acceso como son barrancas y cañadas, en las que otros equipos de exploración geotécnica difícilmente podrían ser llevados.

El equipo está diseñado de tal forma que durante la prueba es posible observar en tiempo real la profundidad de avance y la resistencia del suelo para cada tramo penetrado. Al final del proceso es posible obtener una gráfica continua de la resistencia del suelo a la penetración de la punta en relación con la profundidad, con lo que se puede detectar las capas y espesores de suelos blandos.



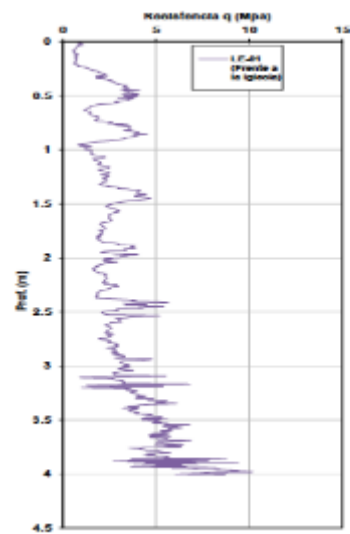
Fotografía 2. Penetrómetro portátil PANDA II

Fuente: (Sol solutions, 2023)



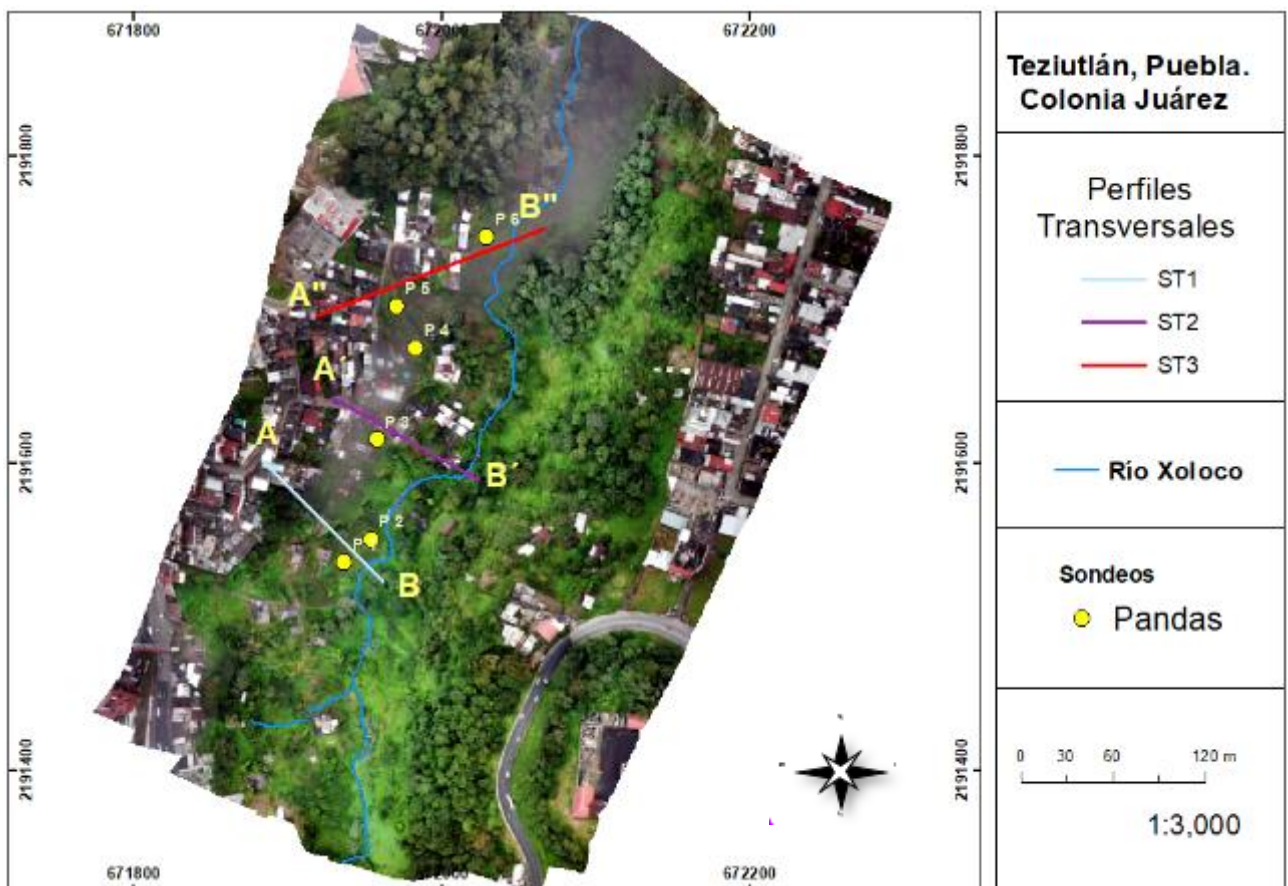
Fotografía 3. Operación del penetrómetro portátil Panda II

Fuente: (Sol Solutions, 2023)



3.3.3.- Localización de sondeos PANDA:

Fue necesario como paso inicial de la toma de datos para el estudio y la elección de los puntos de medición en el terreno, el Centro Nacional de Riesgos determino el área como propensa a presentar deslizamientos ya que por antecedentes y nuevos testimonios el área presentaba pequeños deslizamientos de baja velocidad. Se realizaron **6 diferentes** sondeos en 6 puntos previamente seleccionados de la zona de estudio, En el mapa 5 se muestra la localización marcada en puntos amarillos de cada sondeo, ubicados en el flanco izquierdo de la ladera ya que es donde se ubican la mayor cantidad de viviendas, por consecuencia se considera la zona crítica. Los sondeos fueron realizados a lo largo de 3 días sobre la ladera lo más cerca posible de las viviendas durante la misma visita al municipio de Teziutlán en el mes de abril de 2022.



Mapa 5. Ubicación de sondeos y perfiles transversales.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

A continuación, en la tabla 3, se muestran las coordenadas de los puntos marcados en el mapa 5 anteriormente mostrado, tomado con un GPS propiedad de CENAPRED.

# Sondeos	Coordenadas
P1	19°48'44" N 97°21'30" W
P2	19°48'45" N 97°21'29" W
P3	19°48'46" N 97°21'29" W
P4	19°48'49" N 97°21'29" W
P5	19°48'50" N 97°21'29" W
P6	19°48'51" N 97°21'26" W

Tabla 3. Coordenadas de los puntos marcados para los sondeos.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

En la tabla 3 se encuentran las coordenadas establecidas para iniciar con las mediciones en los sondeos ya que es información necesaria para que quede registro y llevar un control en nuestras mediciones, a manera de control de calidad de los datos, así como ingresarlas en los procesos de software espacial.

Las coordenadas fueron tomadas con un dispositivo de posicionamiento global propiedad del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

Una vez designados los puntos con coordenadas, se procedió a la adquisición de datos con penetrómetro portátil, mismo que se explica a continuación en el capítulo 3.3.4

3.3.4.- Adquisición de datos, sondeos PANDA:

Siguiendo el protocolo paso por paso según metodología utilizada por el CENAPRED se recabaron los datos satisfactoriamente. El acceso no fue fácil, se requirió el apoyo de 3 brigadistas de protección civil para realizar el trabajo exitosamente. Cabe señalar que en el lugar se cuenta con la presencia de restos de casas del último deslizamiento sucedido años atrás. Se procedió a ubicar los restos superficialmente para poder realizar las pruebas.

Para la elección del primer sondeo, se tomó en cuenta diferentes variables, la accesibilidad al predio, autorización de los habitantes de la zona y su configuración morfológica, ya que presentaba un deslizamiento de baja velocidad. Se trata de un predio en el que se realizaba algún tipo de siembra o actividad de cultivo, a simple vista se observan casas sepultadas por antiguos deslizamientos y material nuevo cubriendo algunas partes de terreno cuesta abajo.



Fotografía 4. Toma aérea de ubicación del sondeo 1.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

En los primeros sondeos (1,2) existe una capa de alta resistencia a la penetración a una profundidad de 2.7 a 3 m indicando un cambio en la resistencia del suelo. En base a la

información recabada por el CENAPRED se sabe que esa área fue cubierta con material de relleno años posteriores al deslizamiento ocurrido (deslizamiento de 1999).

El tercer sondeo se realizó dentro de una propiedad, a la cual se consiguió la autorización correspondiente para ingresar y elaborar la prueba, Se trata de un suelo compacto y resistente a la penetración, con valores máximos alcanzados en capas a 1.8m de profundidad.



Fotografía 5. Toma aérea, ubicación de sondeo 3.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Con información de los habitantes del predio, y algunas preguntas que se hicieron a los habitantes, se sabe que la propiedad fue construida sobre rocas de gran tamaño, que se encontraban en el lugar, a manera de cimientos. En este apartado se enfoca únicamente a evaluar la resistencia del suelo a la penetración, es decir, conocer el grado de compactación, información que es necesaria para la realización del cálculo del estudio (FS).

En las pruebas posteriores (sondeo 4 y 5) se registró una resistencia muy baja a la penetración del dispositivo del orden de los 2.5 – 4 MPa de resistencia, debido a la presencia de material blando y una delgada capa vegetal.

Se registró profundidades mayores a las de los primeros sondeos que comprenden desde los 3m a los 5m, indicando la presencia de una cantidad considerable de material de relleno o suelo residual.



Fotografía 6. Toma de sondeos 4 y 5.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

En la fotografía 7, se aprecia como es la manipulación del equipo penetrómetro portátil PANDA II, el cual requiere la operación de 3 personas simultáneamente para operar correctamente y poder adquirir los datos para su posterior procesado, cada golpe en la varilla de penetración fue guardada en la memoria interna del equipo para después descargarse por cable a una computadora portátil, para su posterior procesado, mismo que se muestra a continuación en el siguiente capítulo 3.3.5.

3.3.5 Procesamiento de datos PANDA:

Una vez que los datos fueron adquiridos en campo, es necesario su procesamiento en un laboratorio computacional, ya que en ese momento los datos se encuentran “crudos”. Con los datos de campo registrados y con las medidas requeridas de seguridad y metodología, se procedió a realizar con Excel, una conversión del sistema inglés (pulgadas/ libras) al Sistema Métrico Decimal (centímetros/ mega Pascales), para generar un gráfico de profundidad (penetrograma) con relación a la resistencia del cono, estos gráficos se muestran en el anexo 2, p 89.

Posteriormente, se prosiguió a eliminar anomalías en los datos presentes en cada sondeo, (curvas derivadas de escombros u otros objetos o factores ajenos a la masa de tierra al momento de realizar los sondeos), todo esto con la intención de conseguir la mayor precisión de la medición, (resistencia del terreno). En la imagen mostrada a continuación. (Gráfica de curvas de anomalías), se observa una gráfica representativa de un sondeo ejemplo, se muestran los cambios anómalos que se identifican por los picos de mayor amplitud (círculos verdes). Dichos picos pueden deberse a la presencia de bloques, o clastos de roca, suelos duros e incluso, huecos o cavidades en la masa de suelo analizada.

Para la obtención del posible plano de falla, fue necesario interpretar los cambios de compactación del suelo, a través de los penetrogramas obtenidos con el dispositivo panda, es decir, picos altos de la gráfica, según fuera el cambio de resistencia del suelo, posteriormente el programa “Slide” generará un plano de falla virtual con los parámetros proporcionados.



Gráfica 1. Curva de anomalías

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

El factor de seguridad FS de una ladera se expresa, desde el enfoque de un análisis de estabilidad global como el cociente entre la resistencia media al esfuerzo cortante medio, que actúa en la potencial superficie de falla. Para obtener dicho factor se consultó en los principios de la mecánica de suelos, la resistencia del suelo está dada por los parámetros de cohesión y fricción, los cuales definen la Ley de la Resistencia de los Suelos de Mohr-Coulomb.

Ecuación 1: Factor de seguridad

$$FS = \tau_f / \tau$$

La resistencia media al esfuerzo cortante (τ_f) o fuerza resistente es la que proporciona estabilidad a los suelos o rocas y a las laderas y taludes, se debe principalmente a características propias de los suelos y rocas que a su vez está relacionada con el origen y naturaleza estas, así como la forma en la que el agua y la humedad actúan para modificar dicha resistencia. El esfuerzo cortante actuante (τ) o fuerza actuante que es la que interviene para producir inestabilidad en la ladera, se debe mayormente al peso del material que la compone. (L Domínguez et al., 2018).

para el caso discutido en este trabajo se consideraron dos posibles condiciones, mismas que se podrían llevar a cabo en el mismo sitio:

- Sin presencia de agua
- Con presencia de agua.

Para fines de este trabajo, el FS se obtuvo por medio de un software especializado libre en el análisis de estabilidad de laderas y taludes, donde se consideran las condiciones antes mencionadas. Para el caso no drenado se modela una línea de agua representando la infiltración potencial del agua que modifica las características de los diversos parámetros, y en particular la saturación de los poros (teniendo en cuenta para este caso una saturación del 100%). Como es de esperarse con cada caso se obtienen resultados diferentes ya que la respuesta del suelo depende del efecto que el agua produce en el comportamiento de los suelos.

Para este caso dadas las limitantes en la obtención de muestras de suelo inalteradas el parámetro de cohesión se determina con base en los registros de resistencia contra profundidad obtenidos con las pruebas PANDA, obteniéndose así, diferentes valores medios de resistencia del suelo en diferentes sitios de la ladera.

De acuerdo con la ley de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, la estabilidad global de una ladera se logra siempre que las fuerzas actuantes no superen el valor máximo de la resistencia al esfuerzo cortante (τ_{max}) de los suelos que componen la ladera, (Domínguez et al., 2018).

Este valor máximo se define a partir de la relación Mohr-Coulomb:

Ecuación 2: MOHR COULOMB

$$\tau_{max}=c + \sigma * \tan(\phi)$$

Donde:

c , es la cohesión del material, es decir la fuerza que mantiene unidas las partículas del terreno.

σ es la presión efectiva normal, que depende esencialmente del contenido de agua (presión de poro) del material

$$\tau_{max} = c + \sigma * \tan(\phi)$$

ϕ es el ángulo de fricción interna entre las partículas de los suelos.

Para conocer el FS del suelo, fue necesario determinar los parámetros de cohesión y el ángulo de fricción de los materiales que conforman la ladera de estudio. Para ello se utilizaron los resultados obtenidos con el PANDA.

Mediante la siguiente relación empírica propuesta por (Benz y Gracia, 2018), colaboradores de la empresa que desarrollo el equipo PANDA (Sol-Solutions).

Ecuación 3: sol-solution (cohesión).

$$Cu = qd/Nkt$$

Donde:

Cu es la resistencia no drenada (MPa) (presencia de agua).

qd es la resistencia a la penetración dinámica obtenida con las pruebas PANDA. En MPa.

Nkt es el coeficiente de regresión.

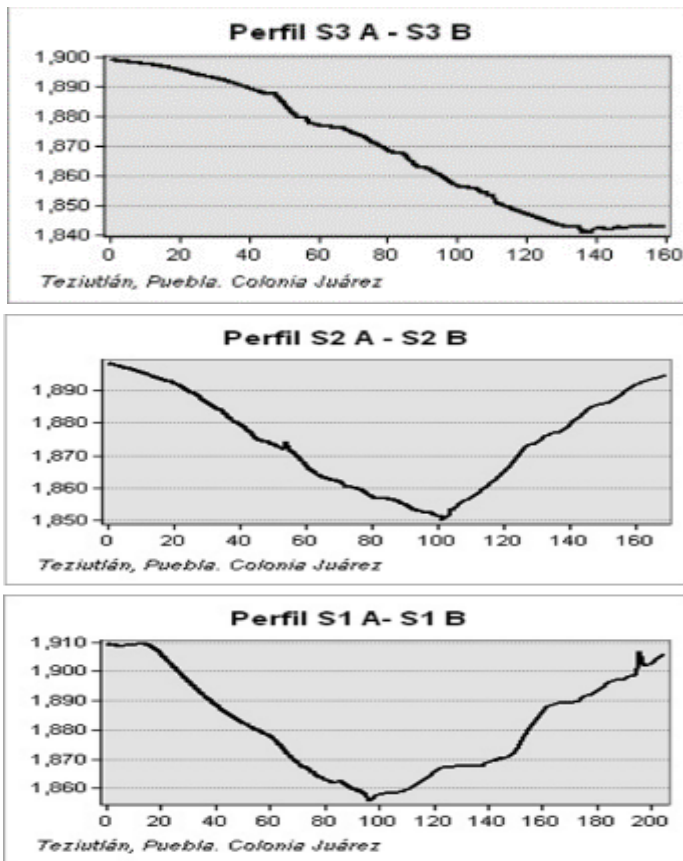
El valor de Nkt se obtuvo a partir del valor del índice de plasticidad del suelo estudiado (datos proporcionados por el laboratorio de mecánica de suelos (CENAPRED, 2021). El índice de plasticidad representa la extensión de la gama de contenidos de agua entre los cuales el suelo se mantiene plástico, en otras palabras, la capacidad de los materiales del suelo (cuando están húmedos) de poder cambiar continuamente pero no de volumen, bajo

el efecto de presión constante, y de mantener la forma tomada cuando la presión desaparece.

Después de las pruebas de laboratorio se determinó el valor de N_{kt} para las pruebas realizadas mediante la siguiente relación, la cual se obtuvo por cada muestra obtenida de suelo con base a la clasificación unificada de suelos por la (*unified soil classification system*, USCS).

Ecuación 4: N_{kt}

$$N_{kt} = 0.285 * I_p + 7.64$$



Gráfica 2. Secciones transversales

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Posteriormente en Excel se calculo el valor C_u (resistencia no drenada) con los resultados obtenidos con los sondeos PANDA en las 3 secciones transversales que indica grafica 2 (gráficas de secciones transversales) para los cuales el valor de qd (resistencia del suelo) se dividió entre Nkt (coeficiente de regresion).

Ecuacion 5: (Resistencia no drenada).

$$C_u = \text{resistencia}/Nkt * 1000 = KPa$$

Posteriormente, habiendo procesado los datos panda, anteriormente comentado en el subcapítulo 3.3.1 pruebas panda con los datos de profundidad obtenidos por el panda, y el relieve de la ladera obtenido para el MDE, se genera un modelo de la ladera en el programa “Slide”, se procede a ingresar los valores de cohesión, peso volumétrico y ángulo de fricción necesarios para la generación de 6 perfiles donde arroja valores de Factor de Seguridad, los cuales se observan más adelante en el capítulo 4 “Procesamiento e interpretación”.

3.4 Modelo Digital de Elevación (MDE).

Con el propósito de representar de manera más detallada y para complementar la información ya existente de la zona, se generó un Modelo Digital de Elevación de la ladera de estudio, a partir del sobrevuelo con el VANT.

El modelo digital de elevación funciona como una representación de las elevaciones del terreno mediante valores numéricos, generalmente es una forma simplificada de la geometría de la superficie del terreno basada en la interpolación de los datos de curvas de nivel. Consiste en una serie de puntos con coordenadas conocidas referenciadas a un sistema de coordenadas bidimensionales a las que se les asocia un valor tal como se muestra gráficamente en la imagen 1 a continuación.

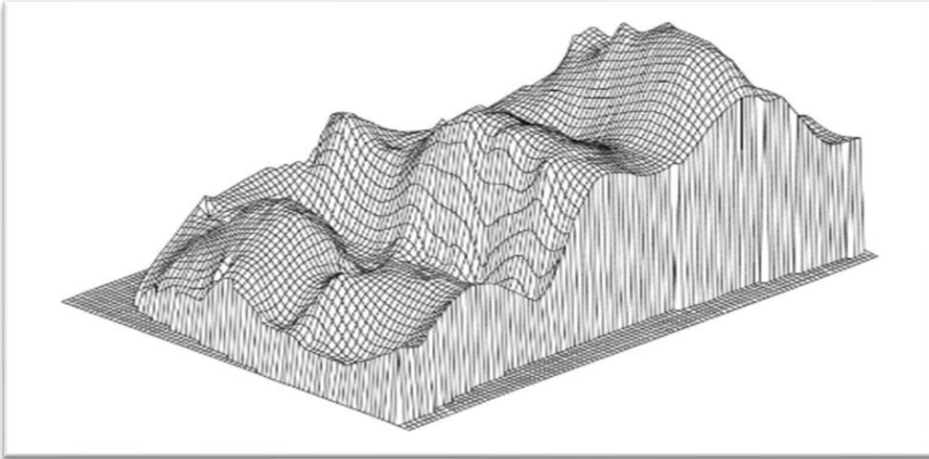


Imagen 1. Ejemplo de modelo digital de elevación
Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

En otras palabras, un MDE representa puntos sobre la superficie del terreno cuya ubicación geográfica está definida por coordenadas “x” y “y” a las que se les agrega un valor “z” que corresponde a la elevación, distribuidos y espaciados de forma regular, de acuerdo con un patrón que corresponde a una cuadrícula o malla.

Para el caso de que las “celdas” de una cuadrícula “ráster” se les asignen valores correspondientes a los intervalos de alturas diferenciados por gamas, ya sea de tonos grises o colores, su presentación puede ser en 2D o 3D. El MDE es la capa de información sobre la cual se sobrepondrán las otras capas de información disponibles para el análisis de susceptibilidad.

Con el propósito de generar el MDE, que pudiera utilizarse para el cálculo del grado de estabilidad de la ladera, durante la visita de campo se realizó un vuelo con un vehículo aéreo no tripulado (VANT) propiedad del laboratorio de mecánica de suelos, el cual permitió el análisis de estabilidad con el método determinista. Con esta técnica se reducen costos para un levantamiento topográfico del terreno y se obtienen datos con una gran precisión que pueden ser usados posteriormente con otro software.

El modelo fue creado con imágenes digitales. Las imágenes se obtuvieron en dos vuelos realizados manualmente en los que se cubre la zona a estudiar (colonia Benito Juárez).

Además de las imágenes se realizó la toma de dos videos con los cuales se realizó el procesamiento del modelo. El cual posteriormente nos serviría para generar los mapas de altura, equidistancias, curvas de nivel y visualización en 3D de la ladera.

A continuación, se expone como es el proceso en software del Modelo Digital de Elevación de la ladera analizada:

3.4.1 Procesamiento de MDE:

Se trata de un modelo digital para recrear la ladera estudiada y poder observar mejor su morfología, así como identificar zonas de interés, las cuales son útiles en el estudio de esta.

Para obtener el Modelo Digital de Elevación del Terreno se obtuvieron fotografías aéreas que posteriormente fueron procesadas en programa denominado "Metashape".

Se procesan los metadatos de las fotografías aéreas y con ello el programa realiza un procedimiento para poder generar una nube de puntos densa del terreno, una vez concluida la nube de puntos se generan un MDE en la pestaña "flujo de trabajo" del programa "Metashape" y de igual manera se obtiene el orto mosaico.

A continuación, en la imagen 2 se observa la nube de puntos generada con la toma aérea, se exporto el archivo al programa "Arcmap", donde se procede a ajustar su escala de color para su mejor visualización de la profundidad de sus capas.

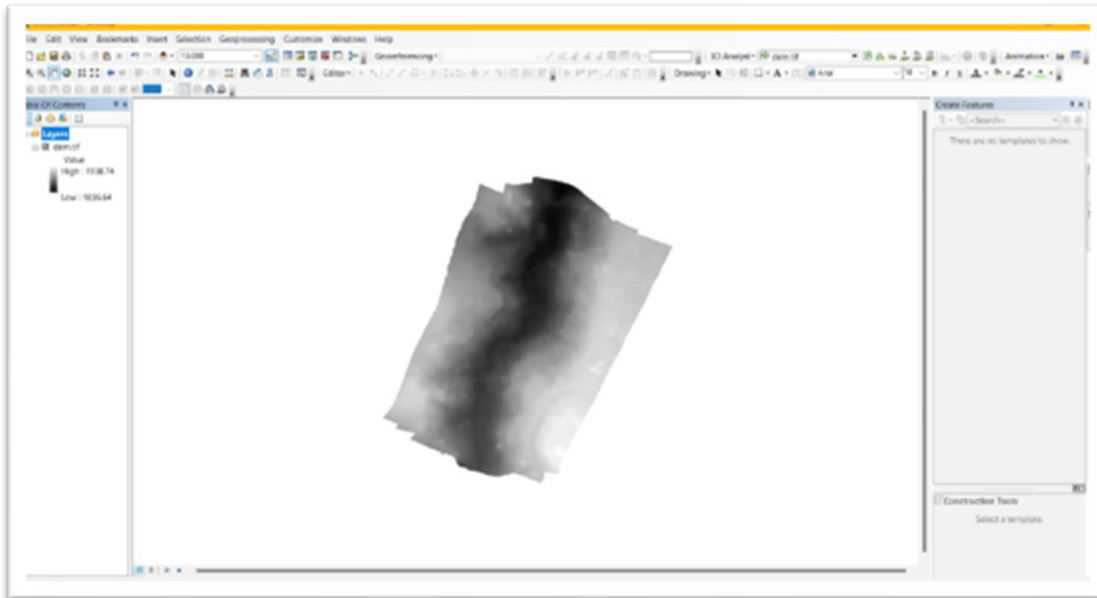


Imagen 2. Nube de puntos en formato ráster
Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Posteriormente el MDE ya siendo exportado en Arcmap, en formato ráster como se muestra en la imagen 2, se procede con su clasificación de clases de intervalos donde se selecciona el MDE en la tabla de contenidos y se ajustan las propiedades “*layer properties*” > *symbology*” y >” *classified*”, o clasificar.

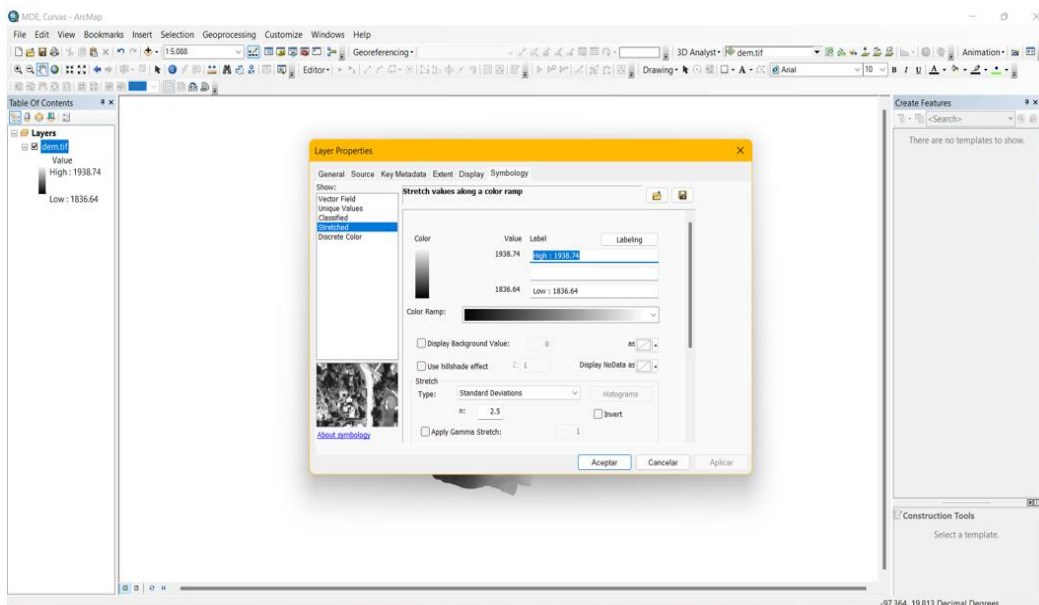


Imagen 3. Nube de puntos exportada en ArcMap.
Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

En la ventana emergente se muestra la clasificación, se seleccionaron 5 clases, donde posteriormente se selecciona la escala de colores para cada clase de intervalos verde, amarillo naranja rojo y azul consecutivamente de mayor a menor, mostrado a continuación en la imagen 4, estos colores únicamente fueron elegidos para diferenciar entre capa y capa como se muestra más adelante en la imagen 5.

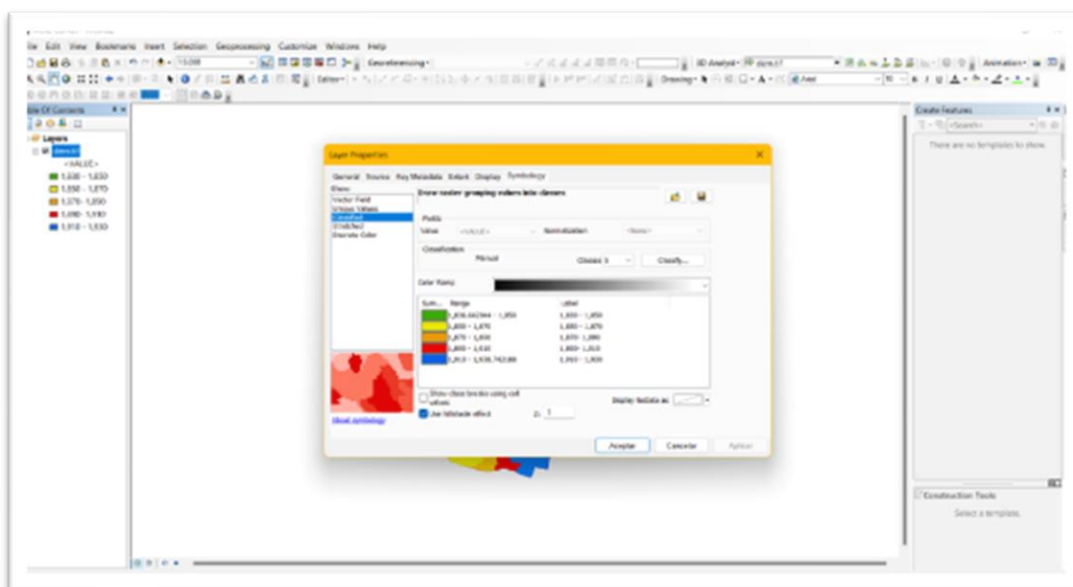


Imagen 4. Clasificación de intervalos de capas.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

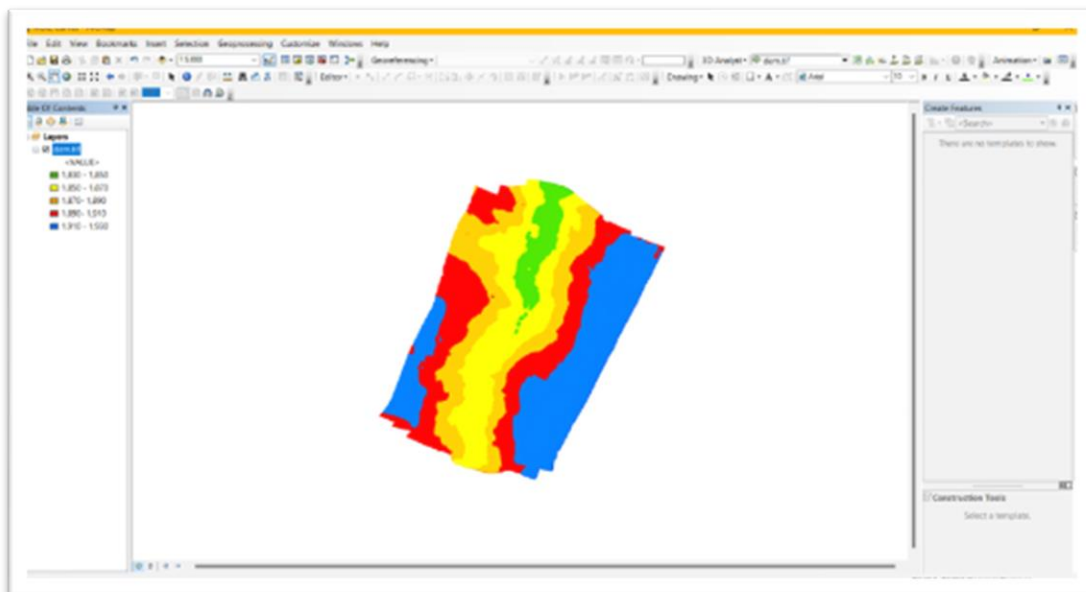
Intervalos de capas:

Intervalos
1830-1850
1850-1870
1870-1890
1890-1910
1910-1930

Tabla 4. Intervalos de capas cada 20m.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

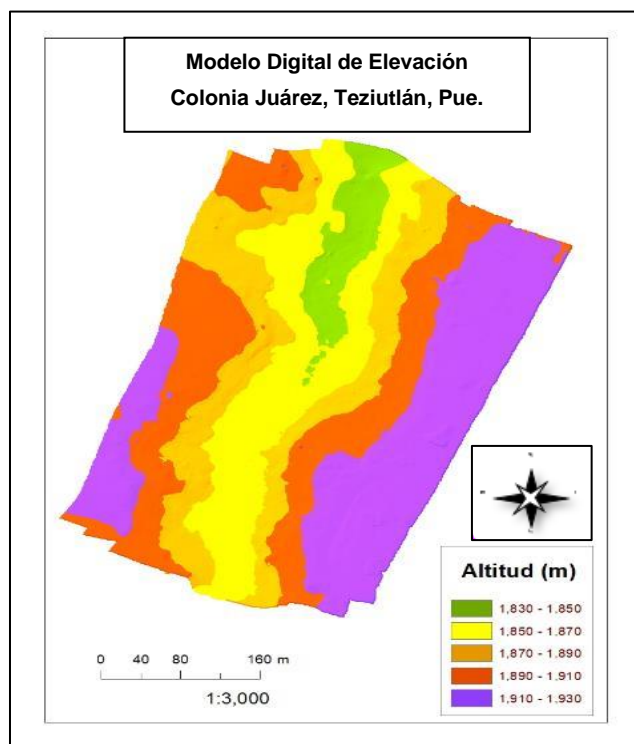
Al seleccionar su escala de colores activamos la herramienta “*Hill Shade Effect*” o sombreado al igual que sus valores son redondeados para visualizar mejor sus capas, y dar una mejor presentación de los datos como se muestra en la siguiente imagen 5, colores elegidos únicamente para diferenciación de altitudes de capas.



Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Imagen 5. Modelo Digital de Elevación.

A continuación, se muestra un mapa elaborado a partir de las imágenes aéreas tomadas de la ladera, en donde las zonas de mayor altitud se representan en color morado, y las de menor altitud en color verde en metros sobre el nivel del mar, pasando por una escala de colores con intervalos de altitud cada 20m hasta llegar al color verde (zona de menor altitud), en cuanto a la zona de color naranja corresponde a la que presenta una mayor pendiente, donde se realizaron la mayoría de los sondeos con el penetrómetro.

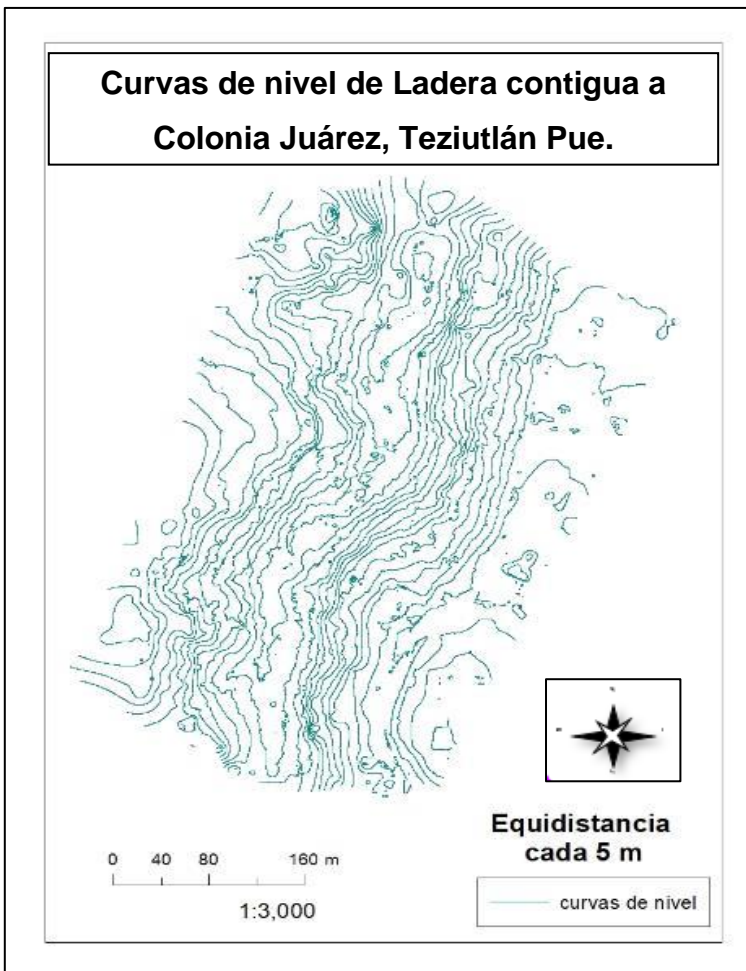


Mapa 6. Modelo Digital de Elevación

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021

A continuación, se muestra un mapa de curvas de nivel (Mapa 7) el cual conecta todos los puntos que tienen la misma altura mostrando equidistancias cada 5m, sirve para representar el relieve de la ladera, su procedimiento se puede observar en el anexo 1,

(p,81). de este trabajo. Generado de igual forma a partir del Modelo Digital de la ladera se muestra una visualización en 3D de la ladera (imagen 6), con el programa ArcGIS.



Mapa 7. Mapa de equidistancias

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021

A continuación, se muestra en la imagen 6 un modelo en 3D generado a partir del mapa de equidistancias, útil para una visualización completa de la ladera y en el ahorro de tiempo para la construcción de modelos. En la fotografía 8 se muestra, una toma aérea de la ladera, obtenida con el vehículo aéreo no tripulado (VANT) propiedad del CENAPRED, la cual sirvió para el procesado de datos y posterior análisis de la ladera.

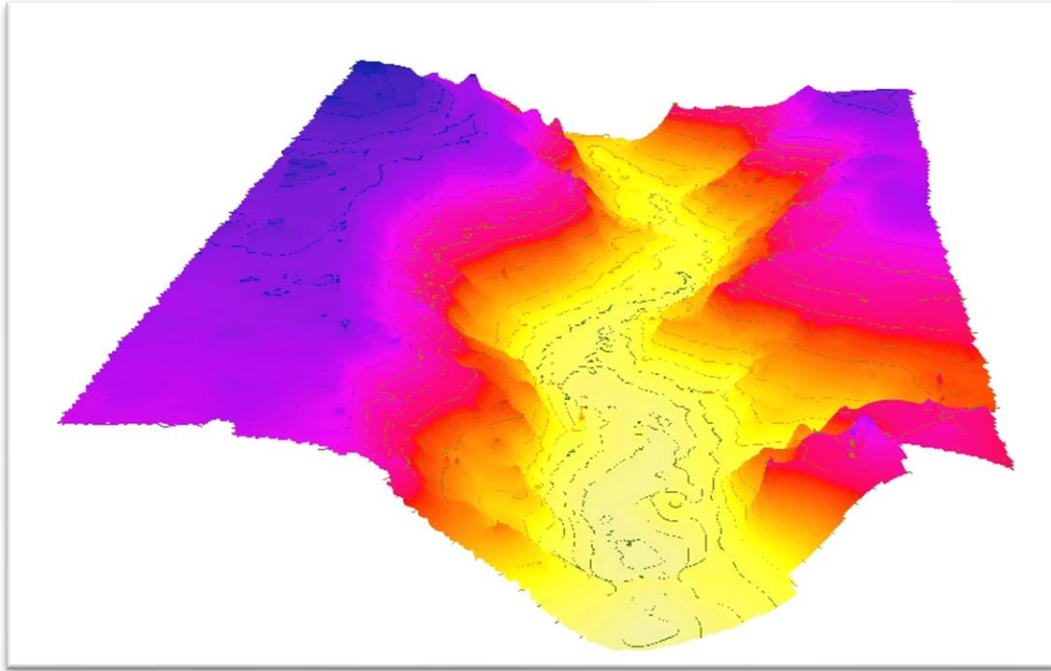


Imagen 6. Modelo Digital 3D de la ladera.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021



Fotografía 8. Orto Mosaico de la Colonia Benito Juárez

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

3.5 Metodología cualitativa:

En este apartado en cuanto a los métodos cualitativos se utilizó el Formato para la Estimación de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas, por CENAPRED, 2019 para correlación de los resultados obtenidos por los perfiles de FS (Factor de Seguridad) así como análisis de los datos del formato de susceptibilidad con el Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas, hecho con algoritmos desarrollados anteriormente por el CENAPRED.

3.5.1. Método cualitativo:

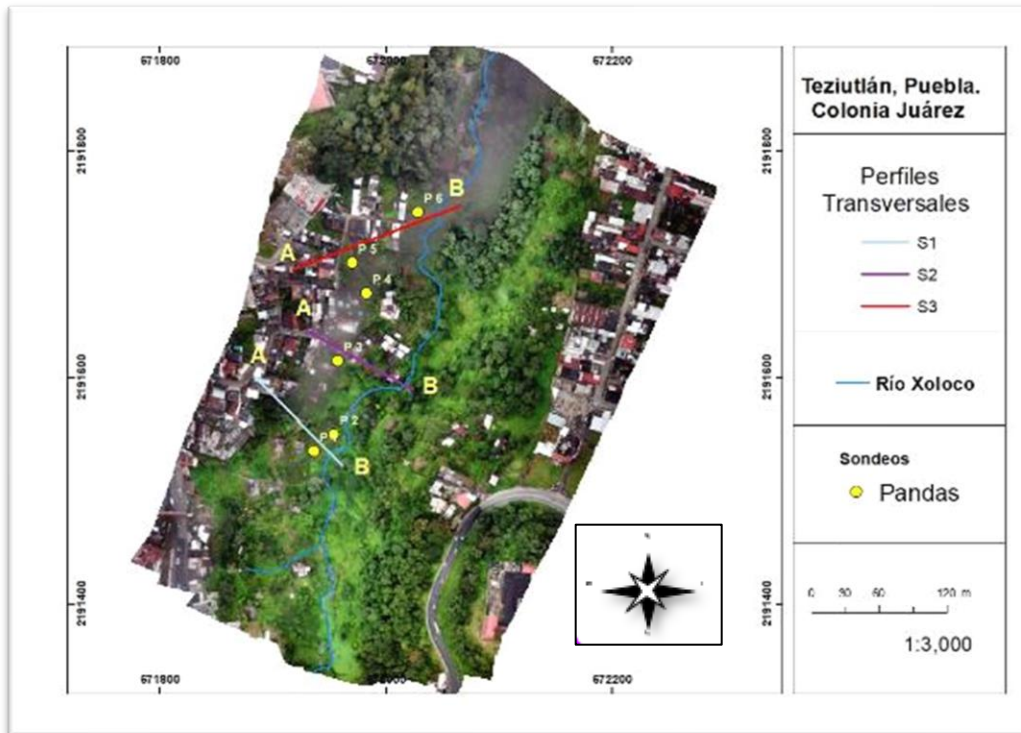
Estos contemplan una evaluación de los factores que condicionan y detonan la inestabilidad, basados principalmente en el análisis de casos documentados para determinar el peso específico o grado de influencia de las variables que influyen en los procesos de inestabilidad. Los valores asignados involucran las experiencias del pasado y cada nueva experiencia debe irse considerando dentro del contexto de información global de la zona. (Suarez, 2002). Por lo tanto, se determinó apropiado emplear el Formato para la Estimación de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas, desarrollado por CENAPRED en correlación con el Mapa Nacional de Susceptibilidad por inestabilidad de Laderas para llevar a cabo este análisis.

3.6 Formato para la Estimación de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas, CENAPRED

Con fines de correlación de resultados, se aplicó el Formato de Evaluación de la Susceptibilidad a la Inestabilidad de Laderas, (SEGOB, CENAPRED, 2018). Se trata de una metodología de naturaleza cualitativa y empírica, que estipula su susceptibilidad al deslizamiento en una ladera; Es una versión modificada y ampliada de los criterios citados por (Suarez,1998). De acuerdo con Mendoza y Domínguez, 2018, los valores y los intervalos de susceptibilidad de cada parámetro a evaluar y que se incluyen en dicho

formato, calificó el grado de influencia relativa que los factores citados tienen en la ocurrencia de un deslizamiento.

A continuación, se muestran las tres secciones transversales (S1, S2 y S3) las mismas que fueron utilizadas para generar el MDE y que se utilizaron para tomar los parámetros de dicho formato.



Fotografía 7. Mapa de ubicación de secciones transversales

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

La susceptibilidad a la inestabilidad de laderas que se determinó aplicando dicho formato es la que se resume en el siguiente formato integrado por las siguientes tablas (5,6 y7) del siguiente apartado.

En cuanto a la toma de los datos para ingresar al formato, se requirió la ayuda de personal de protección civil, ya que una sola persona es la encargada de tomar la medición, mientras los ayudantes movilizan el equipo la persona encargada manipula las herramientas, los datos fueron tomados satisfactoriamente en la zona oeste de la ladera la cual presenta la mayor pendiente y número de viviendas.

Consiste en la identificación de atributos geotécnicos, geológicos y topográficos que juntos permiten hacer una estimación cualitativa del peligro a un deslizamiento, agrupándose en un formato o tablas de evaluación medidas en campo, asignando valores numéricos cuya magnitud indique el grado de posibilidad a que se presente un deslizamiento.

Factores topográficos e Históricos						
Factor	Intervalos o categorías	Atributo relativo	Observaciones	calificación		
Inclinación de los taludes	Mas de 45°	2.0	Estimar el valor medio, úsese clinómetro.	S1	S2	S3
	35 a 45°	1.8		1.80	1.80	1.60
	25 a 35°	1.4				
	15 a 25°	1.0				
	Menos de 15°	0.5				
Altura	Menos de 50 m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Úsese revelaciones, planos o cartas topográficas. Niveles dudosos con GPS.	1.60	1.60	1.60
	50 a 100m	1.2				
	100 a 200m	1.6				
Antecedentes de deslizamientos en el sitio, área o región	Mas de 200	2.0	Reseñas verosímiles de los lugareños.	0.60	0.60	0.60
	No se sabe	0.3				
	Algunos someros	0.4				
	Si, incluso con fechas	0.6				

Tabla 5. Factores topográficos e históricos, formato de susceptibilidad

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Factores geotécnicos							
Factor	Intervalos o categorías		Atributo relativo	Observaciones	Calificación		
Tipo de suelos o rocas	Suelos granulares medianamente compactos a sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas.		1.5 a 2.5	Vulnerables a la erosión o suelos de consistencia blanda	2.0	2.0	2.0
	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas.		1.2 a 2.0				
	Suelos arcillosos consistentes o arena limosos compactos		0.5 a 10	Multiplicar por 1.3 si esta agrietado.			
	Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc).		0.3 a 0.6	multiplicar por 1.2 o 1.5 según sea el grado de meteorización.			
	Rocas ígneas (granito. Basalto, riolita, etc).		0.2 a 0.4	Multiplicar por 2 o 4 según el grado de meteorización.			
	Espesor de la capa de suelo	Menos de 5m		0.5	Revisense cortes y cañadas, o bien recúrrase a la exploración manual	1.0	0.50
5 a 10m		1.0					
10 a 15m		1.4					
15 a 20m		1.8					

Tabla 6. Factores geotécnicos.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021

En el apartado de factores geotécnicos, tipo de roca o suelo, se consultó la carta topográfica E14B15 INEGI para llenar el apartado en el formato correspondiente, obteniendo los datos satisfactoriamente. Ya que no se tuvo ningún imprevisto con los habitantes ni con la manipulación del equipo, obteniendo los datos en crudo de la forma esperada, con un control de calidad bueno y confiable.

Factores geomorfológicos y ambientales						
Factor	Intervalos o categorías	Atributo relativo	Observaciones	Calificación		
Evidencias geomorfológicas de huecos en laderas contiguas	Inexistentes	0.0	Formas de concha o de embudo	1.00	1.00	1.00
	Volúmenes moderados	0.5				
	Grandes volúmenes faltantes	1.0				
Vegetación y uso de la tierra	Zona urbana	2.0	Considérese no sólo la ladera, sino también la plataforma en la cima.	1.50	1.50	1.50
	Cultivos anuales	1.5				
	Vegetación intensa	0.0				
	Rocas con raíces de arbustos en sus fracturas	2.0				
	Vegetación moderada	0.8				
	Área deforestada	2.0				
Régimen de agua de la ladera	Nivel freático superficial	1.0	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud.	0.0	0.0	0.0
	Nivel freático inexistente	0.0				
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o la plataforma	1.0				
			Sumatoria:	10.6	10.1	9.8

Tabla 7. Factores geomorfológicos y ambientales

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021

Los factores geomorfológicos y ambientales se consultaron *in-situ* en la ladera analizada, ya que la observación fue clave para su designación en el formato.

Al sumar los atributos asignados a cada uno de estos factores determinantes de la estabilidad de una ladera, se establece finalmente el grado de susceptibilidad al deslizamiento.

Estimación del grado de susceptibilidad de deslizamiento		
Grado	Descripción	Suma de las calificaciones
5	Susceptibilidad muy alta	Más de 10
4	Susceptibilidad alta	8.5 a 10
3	Susceptibilidad moderada	7 a 8.5
2	Susceptibilidad baja	5 a 7
1	Susceptibilidad muy baja	Menos de 5

Tabla 8. Estimación de grado de susceptibilidad de deslizamiento.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

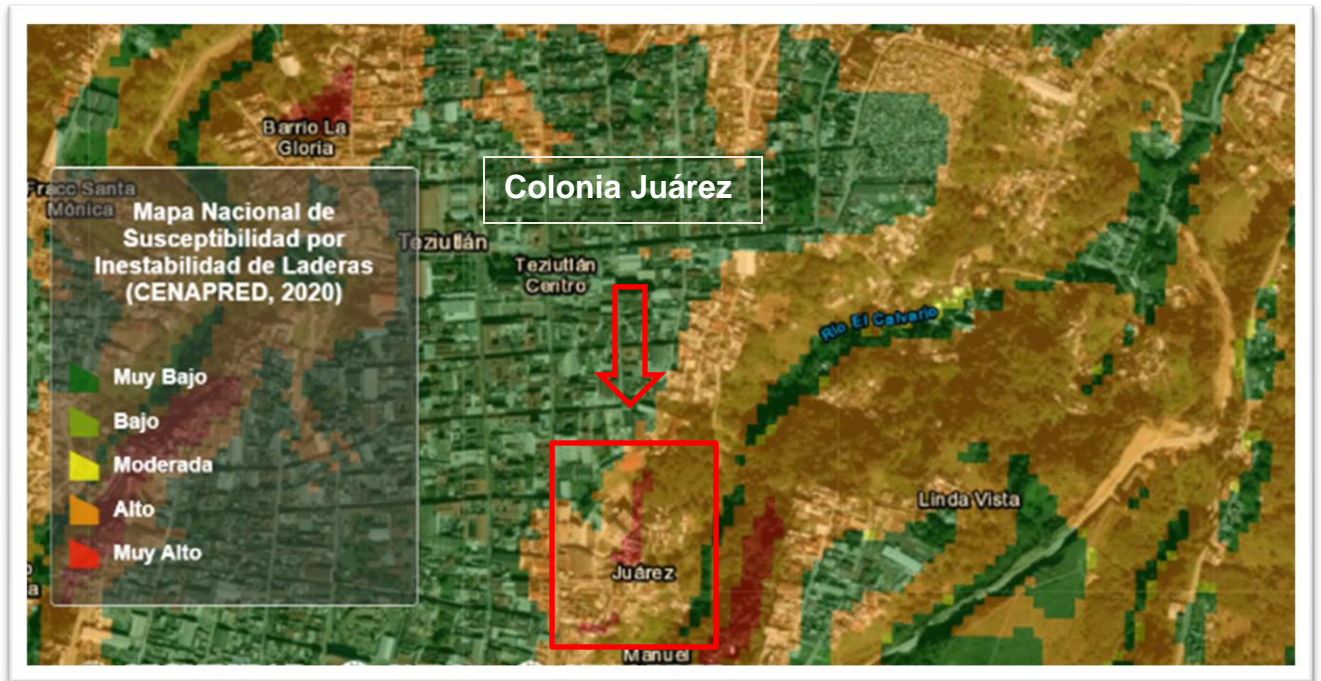
Los valores que se indican anteriormente en la tabla 8 se aplicaron para las secciones transversales donde sus calificaciones fueron: **alta, y muy alta** respectivamente, siendo relacionable con el resultado obtenido por el método cuantitativo, Factor de Seguridad el cual también fue alta sección transversal 2 y 3 y muy alta para la sección transversal 1. Es decir, en la sección 1 es donde existe una mayor cantidad de probabilidad de suscitarse un deslizamiento de ladera y es donde se recomienda realizar trabajos de mitigación correspondientes, siendo de ayuda este trabajo para localización de prioridades en el caso de las autoridades correspondientes.

3.7 Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas

A continuación, se implementa la correlación de la zona de estudio con el Mapa Nacional de Susceptibilidad a la Inestabilidad de Laderas ya que fue precisamente desarrollado por la subdirección de dinámica de Suelos y Procesos Gravitacionales en colaboración con la entonces subdirección de Riesgos Geológicos, ahora Riesgos Volcánicos del CENAPRED cuya finalidad es identificar las zonas o regiones de México más susceptibles a la ocurrencia de este tipo de fenómenos, para facilitar la implementación de medidas preventivas y planes de evacuación por parte de las autoridades.

El Mapa Nacional de Susceptibilidad a la Inestabilidad de Laderas fue integrado con base en el criterio de “multivariables”, en el cual se considera como principales factores condicionantes a las capas de geología (litología), topografía (pendientes) y el uso de suelo y vegetación. A dichas capas se les asignó pesos específicos con base en casos documentados de deslizamientos, principalmente aquellos ocurridos en el estado de Puebla. (CENAPRED, 2020). Con esta información y con la herramienta de álgebra de mapas se obtuvo el mapa que se muestra a continuación en el mapa 8.

Mapa con resolución de 15 m, considerando zonas libres de inestabilidad, regiones con pendientes entre 0° y 6° : comparando los resultados del formato de susceptibilidad, contra el mapa nacional los resultados corresponden a una alta susceptibilidad de ladera, se muestra en círculo rojo la zona de estudio, la cual la exactitud del formato es mucho mayor que la del mapa nacional, ya que este último está diseñado para analizar el peligro regionalmente.



Mapa 8 . Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas.

Fuente: (CENAPRED, 2020).

La zona de la ladera analizada hace correlación a la susceptibilidad arrojada por los demás métodos, disminuyendo la incertidumbre de los métodos empleados en el trabajo, característica sumamente importante para la validación de los datos. Hay que recordar que este mapa se trata de un mapa de peligro, ya que se maneja regionalmente y no de forma local, es más general su extensión.

Con el uso de la información del trabajo de investigación se logra comprobar y corroborar el alto riesgo de suscitarse un deslizamiento de ladera, ahorrando así tiempo valioso, trabajo e inversión para los habitantes de la zona, así como para las autoridades locales correspondientes.

4- Procesamiento e interpretación:

En el siguiente capítulo se expone de manera detallada el cálculo, análisis e interpretación de los resultados obtenidos por los métodos anteriormente mencionados, se muestra para el cálculo de Factor de Seguridad, para ello se generó un modelo de la ladera en el software *Slide*, para los casos no saturado y saturado por agua.

Con las profundidades de los sondeos PANDA se consideraron dos diferentes capas de material, el superficial o residual, y la capa profunda compacta, posteriormente se ingresan todos los parámetros al software *Slide* (cohesión, peso y ángulo de fricción), y se definen los materiales o composición que considera el modelo. Dentro de los métodos empleados se usó el de Mohr-Coulomb para representar los dos casos: saturado y para el no saturado. El programa incluye en el cálculo un coeficiente sísmico el cual, calcula el efecto de un sismo sobre una edificación, el cual fue consultado en cartas de la CFE. También se incluyó una carga extra en el hombro de la ladera de 29.42 kN/m² equivalente a 4 ton y a media ladera, la cual simula el peso de las viviendas existentes, el software simula el efecto del peso extra y su factor de seguridad.

A continuación, se muestran los perfiles generados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de CENAPRED, los cuales describen el posible plano de falla mediante líneas modeladas y calculadas en el software *Slide* y su Factor de Seguridad para cada perfil, es decir la susceptibilidad según la relación Mohr-Coulomb a presentar un deslizamiento, para los dos casos, saturado de agua y no saturado.

4.1 Factor de seguridad con saturación de agua

Los siguientes valores mencionados para el caso saturado y no saturado: **Índice de plasticidad, Peso volumétrico y el ángulo de fricción** fueron obtenidos en laboratorio de mecánica de suelos del CENAPRED y con los resultados de los sondeos PANDA.

Ecuación 2: Sol-Solución (cohesión)

$$C_u = qd/Nkt$$

Ecuación 4: Nkt

$$Nkt = 0.285 * I_p + 7.64$$

$$Nkt = 0.285 * 37.9 + 7.64 = \mathbf{18.4415 \text{ (MPa)}}$$

Con estos datos y la fórmula propuesta por Sol Solutions se procedió a calcular en Excel los valores de cohesión (C_u), los cuales se determinaron a partir de los resultados en los sondeos PANDA, en las 3 secciones transversales, para lo cual el valor de (qd) (resistencia) se dividió entre Nkt (coeficiente de regresión), multiplicado por 1000 para obtener el resultado en kilo pascales, es decir: kPa

Ecuación 5: Resistencia no drenada (KPa)

$$C_u = \text{resistencia} / Nkt \times 1000$$

Sustituyendo la ecuación Cohesión para cada PANDA, se obtiene:

Sondeo 1	$C_u = 1.6973/18.4415 \times 1000 = \mathbf{92.0369 \text{ kPa}}$
Sondeo 2	$C_u = 2.0893/18.4415 \times 1000 = \mathbf{113.2933 \text{ kPa}}$
Sondeo 3	$C_u = 2.3944/ 18.4415 \times 1000 = \mathbf{129.8375 \text{ kPa}}$
Sondeo 4	$C_u = 2.5060/18.4415 \times 1000 = \mathbf{135.7807 \text{ kPa}}$
Sondeo 5	$C_u = 2.0779/18.4415 \times 1000 = \mathbf{112.6752 \text{ kPa}}$
Sondeo 6	$C_u = 2.2512/18.4415 \times 1000 = \mathbf{122.0724 \text{ kPa}}$

Tabla 9. Valores de cohesión para cada sondeo.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2022.

Dado que 1 KPa es igual a 1 KN/m^2 , todos los valores representados anteriormente son la cohesión para cada muestreo de PANDA.

Peso Volumétrico:

El valor representado es de= 7.1 g/cm^3

para ello se tuvo que pasar a KN/m^3

$7.1 g/cm^3 \times 1000 = 7,100 Kg/m^3$

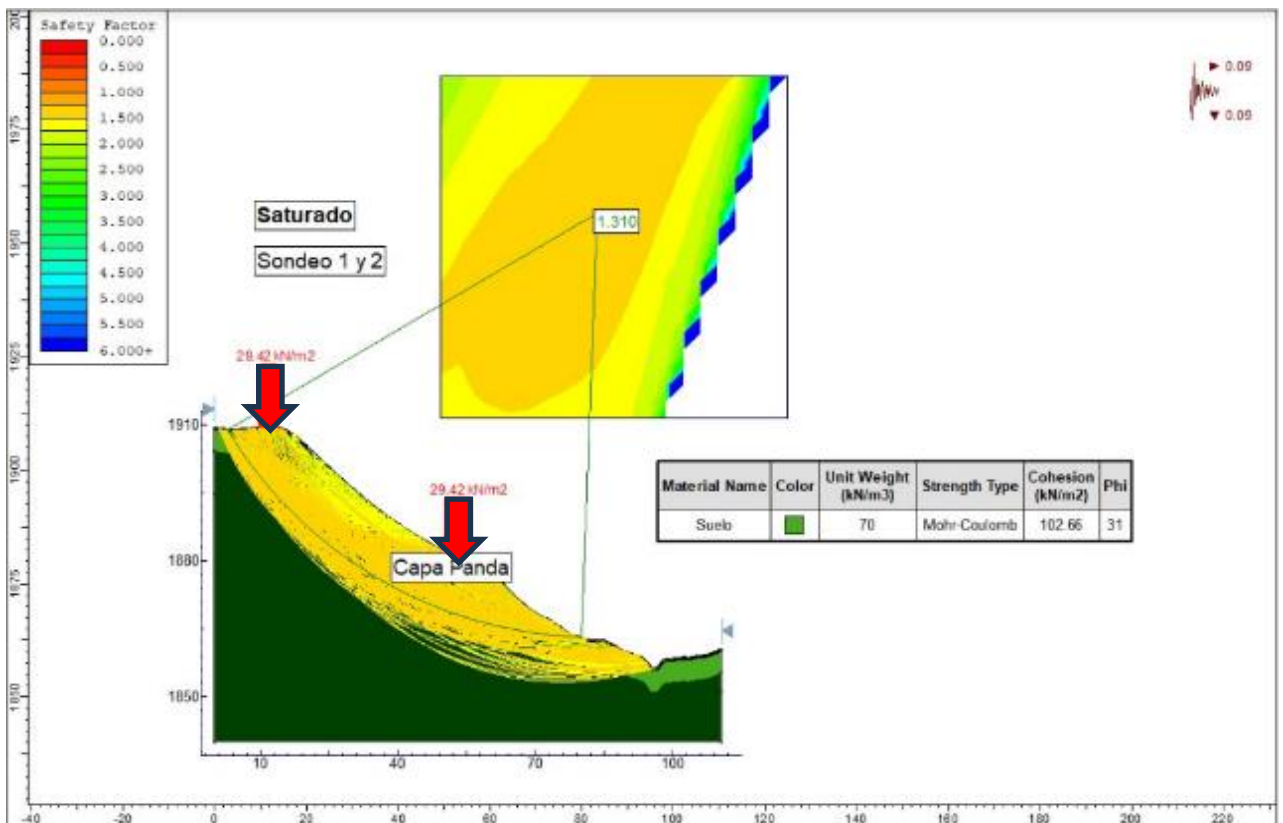
1 kg es igual a 0.00980665 KN

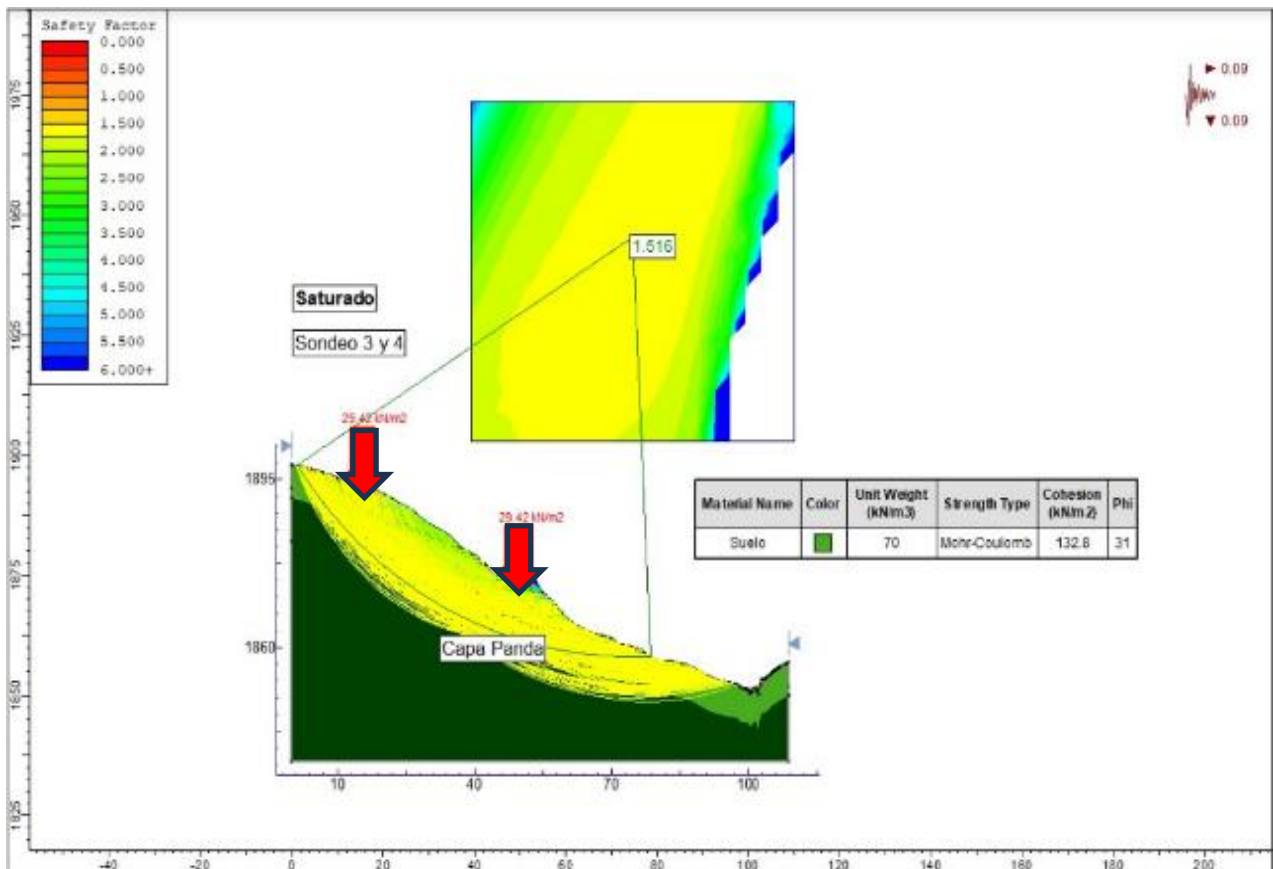
$7.1 \times 0.00980665 = 69.62 KN/m^3$

Ángulo de fricción

se tienen los valores que van de 24.2° y 33° siendo 31° como punto de partida en todos los perfiles.

A continuación, se ingresan todos los parámetros al software y se corre el proceso, arrojándonos los perfiles que se muestran a continuación como resultado.

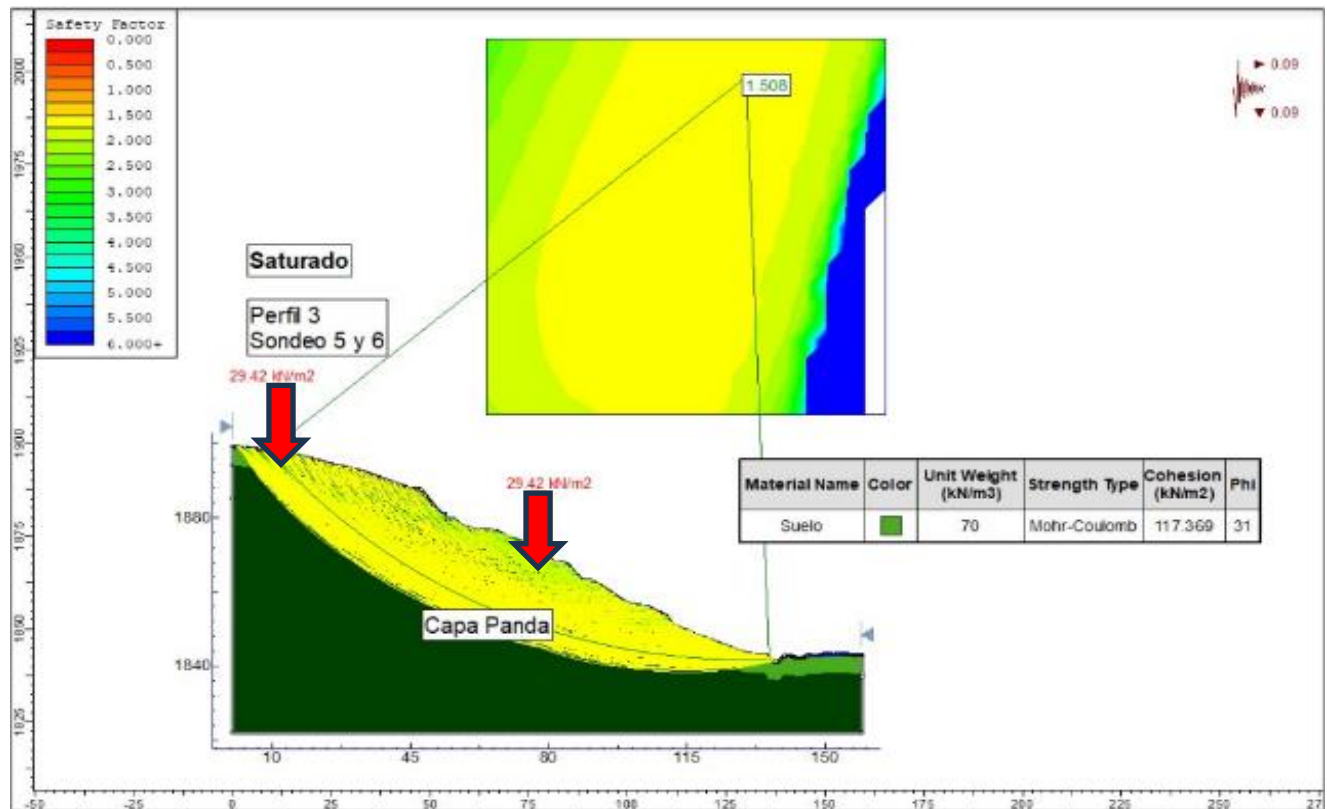




Perfil 2. Sondeo 3 y 4 caso saturado.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2022.

Estos perfiles obtenidos, arrojan resultados numéricos en parte central del perfil (1.516 para el caso perfil 2 saturado) los cuales corresponden al valor de FS, las flechas rojas colocadas en la representación del modelo de la ladera corresponden a las cargas extras contenidas en la ladera, las cuales fueron incluidas en el proceso numérico, en la esquina superior derecha se muestra el coeficiente sísmico utilizado. La tabla que se muestra en los perfiles contiene información de: Peso volumétrico del material analizado, el tipo de calculo a realizar, la cohesión del material, y el ángulo de fricción de las partículas de la composición de la ladera.



Perfil 3. Sondeo 5 y 6 caso saturado.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2022.

En los perfiles se obtiene el factor de seguridad para cada sección tomada de la ladera, las cuales para el caso saturado son del orden 1.3- 1.5, esto significa que, aunque la ladera se encuentre en equilibrio, los valores de susceptibilidad son elevados, es decir la resistencia media al esfuerzo cortante (τ_f) es menor, tomando en cuenta que cualquier factor externo podría disminuirla aún más (fuga de agua ,cargas extras en la ladera o algún fenómeno meteorológico como lluvias torrenciales). El suelo superficial es un suelo residual, de relleno, tratándose de suelo areno arcilloso tiene un alto porcentaje de porosidad, aunque poca permeabilidad causa una mayor saturación del agua debido también a la poca vegetación en la zona estudiada.

4.2 Factor de seguridad sin saturación de agua

Ecuación 2: Sol-Solución (cohesión).

$$C_u = q_d / N_{kt}$$

Ecuación 4: $N_{kt} \quad N_{kt} = 0.285 * I_p + 7.64$

$$N_{kt} = 0.285 * 11.8 + 7.64 = \mathbf{11.003 \text{ (MPa)}}$$

Ecuación: Cohesión en Kilo pascales (KPa)

$$C_u = \text{resistencia} / N_{kt} \times 1000$$

Sustituyendo la ecuación Cohesión para cada PANDA:

Sondeo 1	$C_u = 1.6973 / 11.003 \times 1000 = \mathbf{154.2579 \text{ kPa}}$
Sondeo 2	$C_u = 2.0893 / 11.003 \times 1000 = \mathbf{189.8845 \text{ kPa}}$
Sondeo 3	$C_u = 2.3944 / 11.003 \times 1000 = \mathbf{217.6133 \text{ kPa}}$
Sondeo 4	$C_u = 2.5060 / 11.003 \times 1000 = \mathbf{227.7560 \text{ kPa}}$
Sondeo 5	$C_u = 2.0779 / 11.003 \times 1000 = \mathbf{188.8484 \text{ kPa}}$
Sondeo 6	$C_u = 2.2512 / 11.003 \times 1000 = \mathbf{204.5987 \text{ kPa}}$

Tabla 10. Valores de cohesión para cada sondeo.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2022.

Dado que 1 Kpa es igual a 1 KN/m^2 , todos los valores representados anteriormente son la cohesión para cada muestreo de PANDA.

Peso Volumétrico:

El valor representado es $\gamma = 7.1 \text{ g/cm}^3$, para ello se tuvo que pasar a KN/m^3

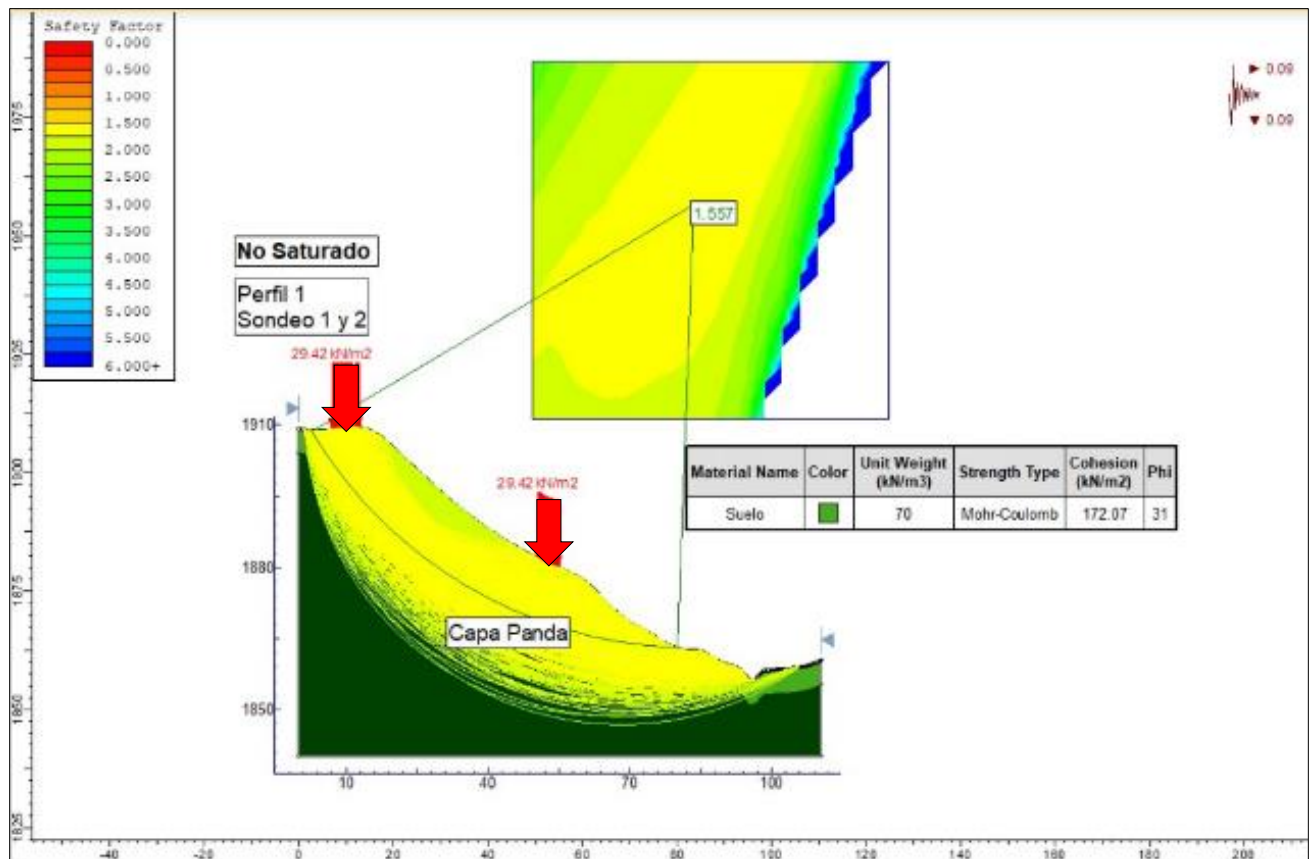
$7.1 \text{ g/cm}^3 \times 1000 = 7,100 \text{ Kg/m}^3$ 1 kg es igual a 0.00980665 KN

$7.1 \times 0.00980665 = 69.62 \text{ KN/m}^3$

Angulo de fricción:

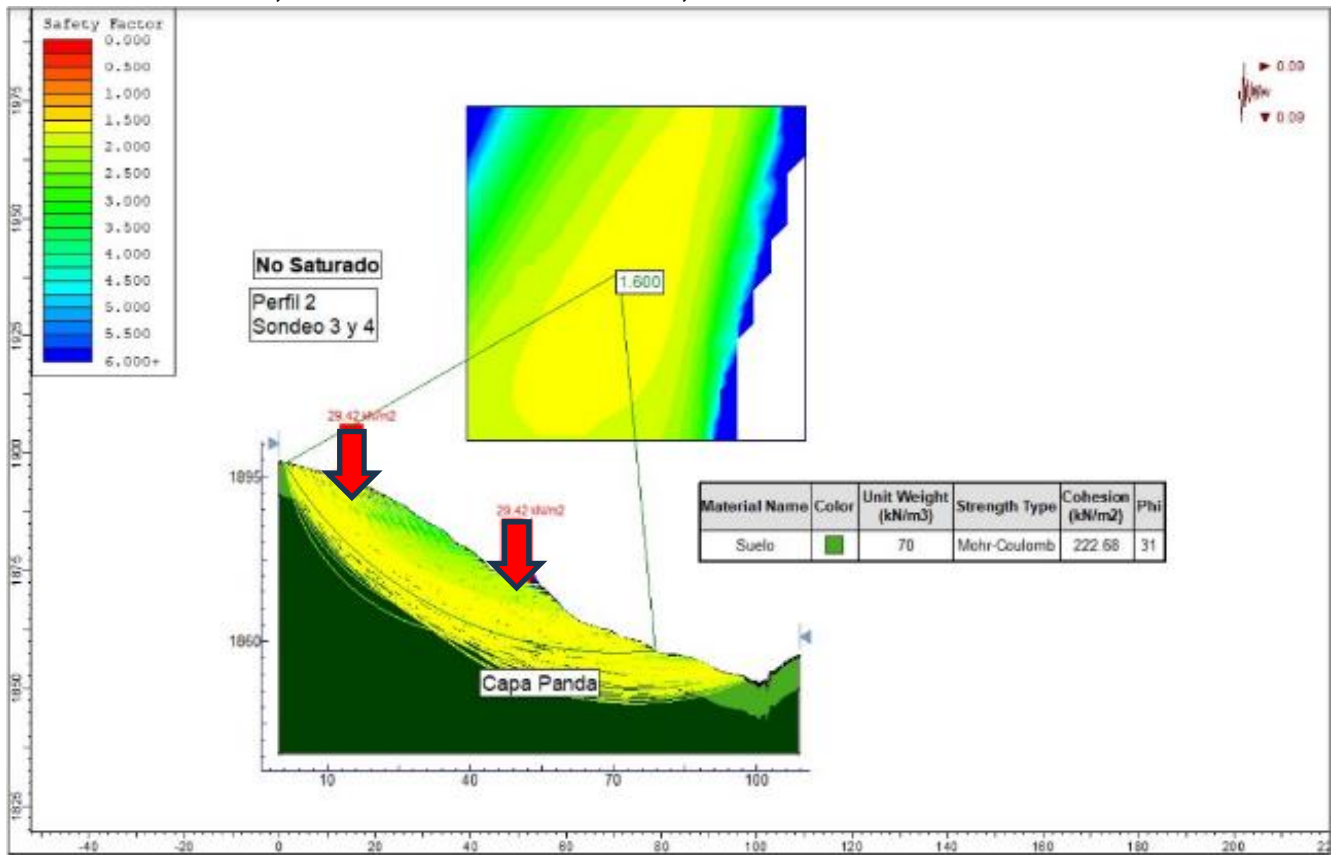
Se tienen los valores que van de 24.2° y 33° siendo 31° como punto de partida en todos los perfiles.

Teniendo esto en cuenta, se procede al calculo del FS tomando todos estos datos en cuenta, para el caso no saturado respectivamente para cada perfil.



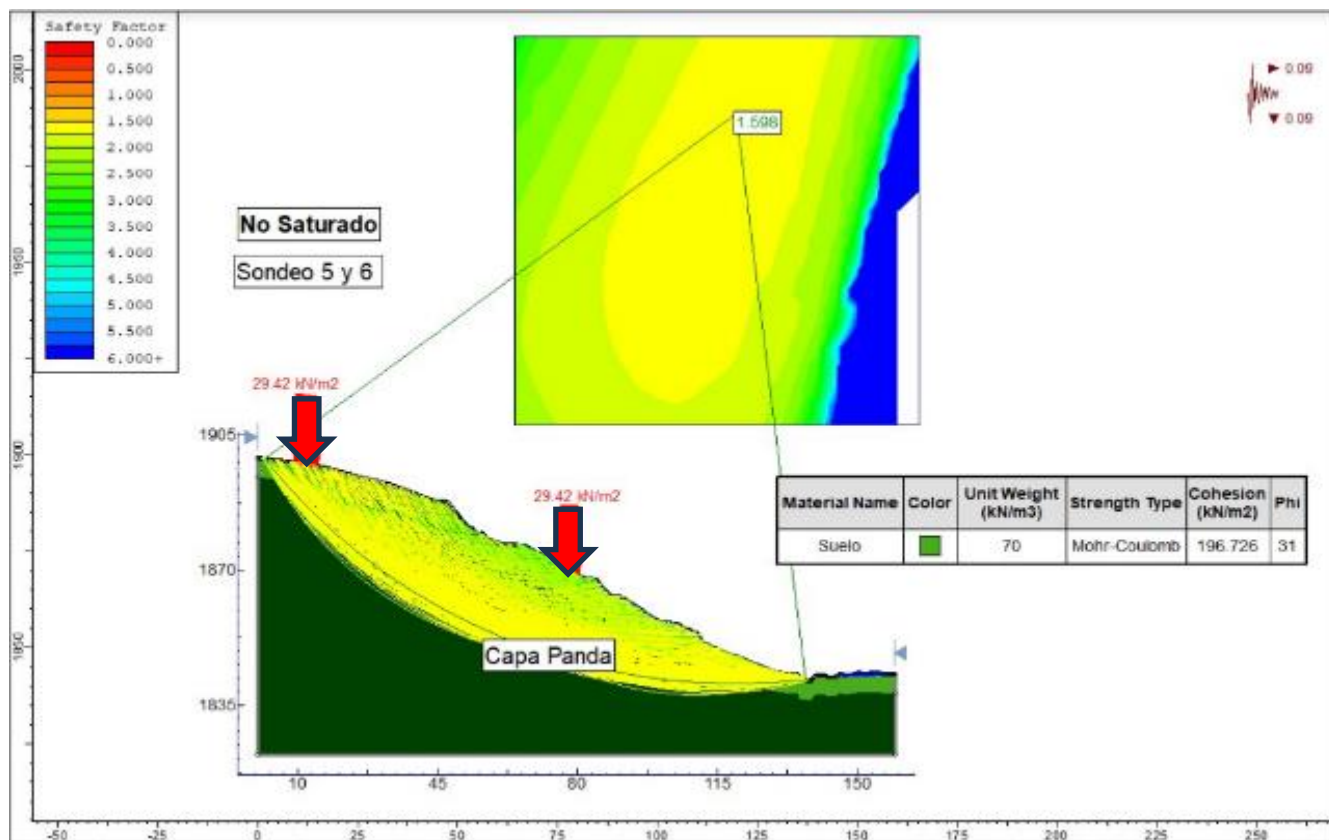
Perfil 4 Sondeo 1 y 2 caso no saturado.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2022.



Perfil 5. Sondeos 3 y 4 caso no saturado

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2022.



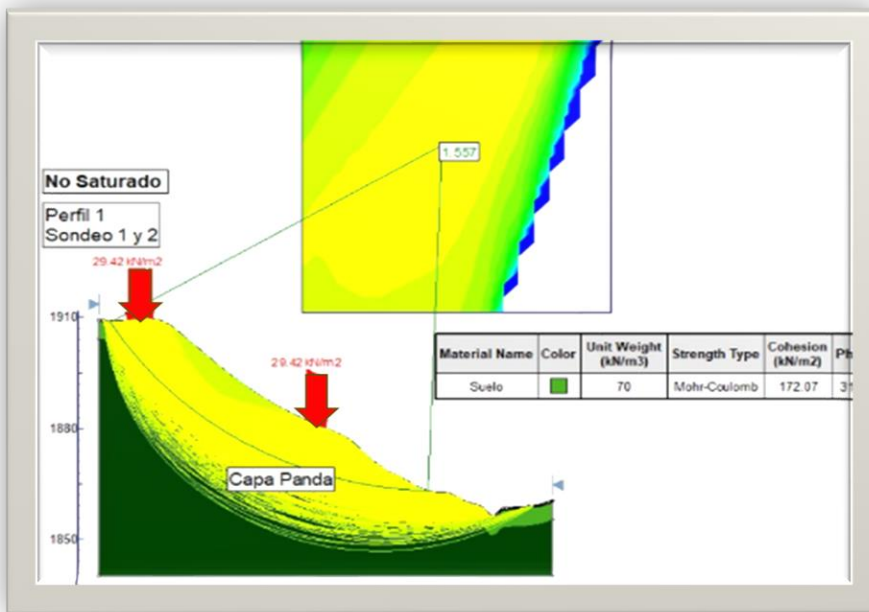
Perfil 6. Sondeo 5 y 6 caso no saturado.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2022.

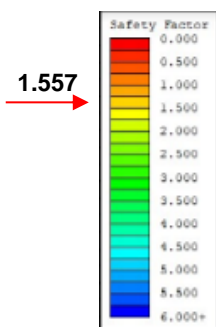
Para el caso sin saturación de agua, el cálculo del Factor de Seguridad arroja un valor mayor del orden 1.5 – 1.6, corresponde a una menor susceptibilidad de la ladera, es decir menor riesgo de que se suscite un deslizamiento, o mayor resistencia media al esfuerzo cortante (τ_f) esto debido en su mayor parte a que en la simulación el suelo no está saturado con agua y no existe presión de poro.

Resultados obtenidos con metodología cualitativa y cuantitativa

En cuanto al análisis de susceptibilidad en la ladera de la colonia Benito Juárez para su zona central y media correspondientes a la sección transversal 1, con ángulos de inclinación que van de 35° a 45° y una altura media de 100 – 150 m aproximadamente, se concluye que existe un factor de seguridad con riesgo medio a alto (1.5-1.3) siendo la segunda zona más susceptible.



Perfil 7. Conclusiones FS

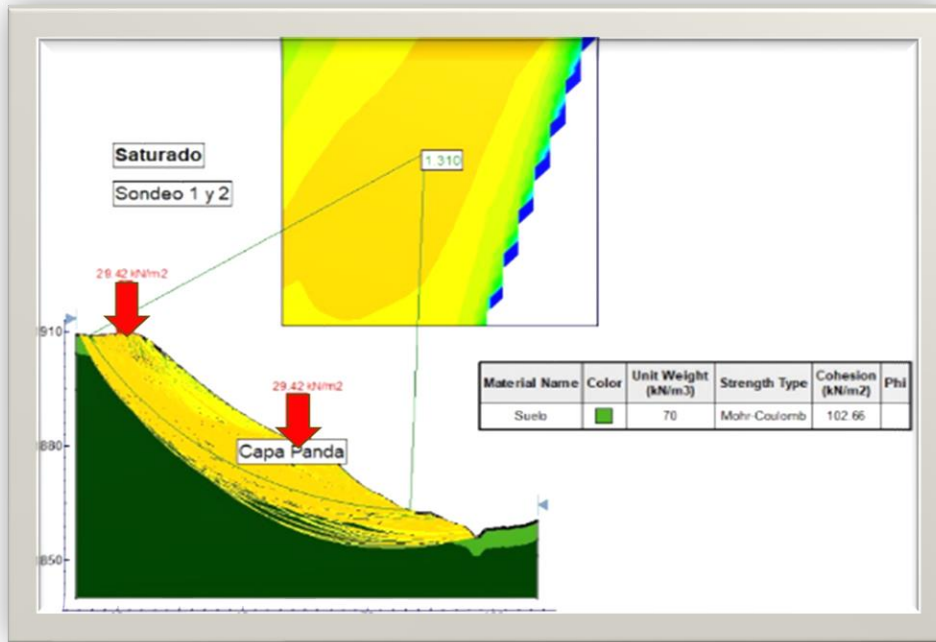


Perfil	FS no saturado	FS saturado	Cohesión no saturada	Cohesión saturada
• 1	1.557	1.310	172.07 KN/m ³	102.66 KN/m ³
• 2	1.6	1.516	222.68 KN/m ³	132.8 KN/m ³
• 3	1.598	1.508	196.72 KN/m ³	117.36 KN/m ³

Tabla 11. Conclusiones FS

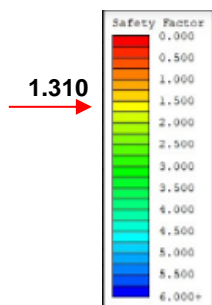
- Para el caso del perfil 1 con suelo con saturación de agua el valor de Factor de Seguridad es menor, incrementando la posibilidad de que se suscite el fenómeno, esto debido a la presión de poro ejercida entre las partículas del suelo en

saturación. Siendo este sitio el más susceptible a un deslizamiento de la ladera analizada.



Perfil 8. Conclusiones FS

Resultado de Factor de Seguridad para caso saturado.

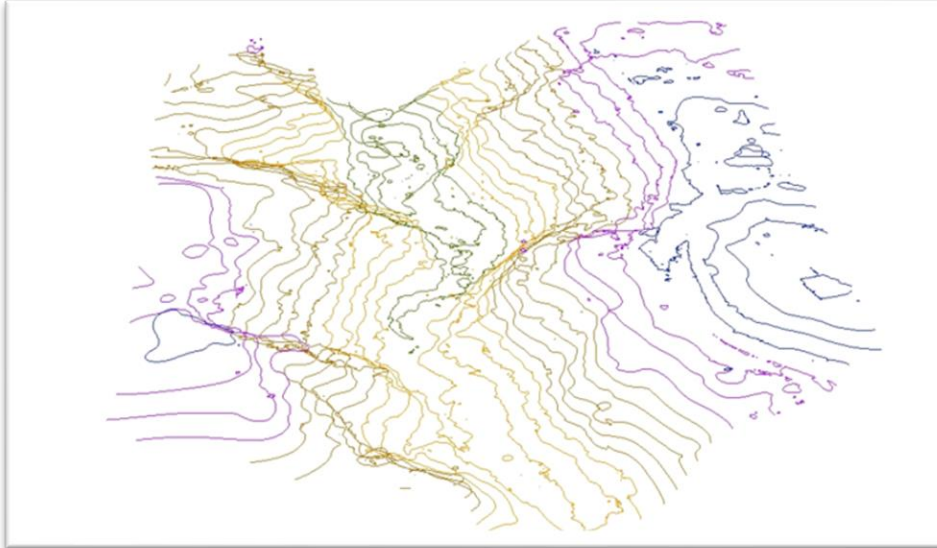


Perfil	FS no saturado	FS saturado	Cohesión no saturada	Cohesión saturada
• 1	1.557	1.310	172.07 KN/m ³	102.66 KN/m ³
• 2	1.6	1.516	222.68 KN/m ³	132.8 KN/m ³
• 3	1.598	1.508	196.72 KN/m ³	117.36 KN/m ³

Tabla 12. Conclusiones FS

Modelo Digital de Elevación MDE

Curvas de nivel representados con la toma de nube de puntos.



Fuente: (Laboratorio de Mecánica de Suelos).

En cuanto al formato de susceptibilidad realizado anteriormente que considera aspectos históricos topográficos, geotécnicos, geomorfológicos y ambientales arrojan resultados que corresponden a los métodos cuantitativos, concluyendo que en la ladera central de la colonia Benito Juárez para y zona alta y media de la ladera los resultados son de alta y muy alta susceptibilidad a un deslizamiento, correspondientes a grado 4 y 5 respectivamente.

Estimación del grado de susceptibilidad de deslizamiento		
Grado	Descripción	Suma de las calificaciones
5	Susceptibilidad muy alta	Más de 10
4	Susceptibilidad alta	8.5 a 10
3	Susceptibilidad moderada	7 a 8.5
2	Susceptibilidad baja	5 a 7
1	Susceptibilidad muy baja	Menos de 5

10.6	10.1	9.8
Sección 1	Sección 2	Sección 3

- Los resultados obtenidos en este trabajo indican que las causas de los deslizamientos en la ladera de la colonia Juárez son causados principalmente por las características del suelo, sumado a causas humanas, como construcciones y cargas extras o modificaciones a la fisionomía de la ladera.
- El suelo residual de la ladera tiene un comportamiento muy diferente cuando se encuentra en saturación, al tratarse de un suelo erosionado con alta porosidad, almacena liquido hasta generar un posible plano de falla donde la presión de poro sea haga presente, aproximadamente a una profundidad de 5-8m de profundidad aproximadamente, mediciones realizadas alcanzadas por el penetrómetro.
- Analizando el comportamiento de las muestras de suelo, se concluye que, a menor fuerza de cohesión entre sus partículas, el Factor de Seguridad decrece e incrementa la susceptibilidad de deslizamiento de la ladera.
- La zona permanece en estabilidad relativa, ya que está en equilibrio de las fuerzas que la componen, el riesgo existe y la probabilidad es media a alta, aunque con los

métodos de mitigación podría disminuir notablemente y nunca desencadenar un deslizamiento que ponga en riesgo la vida de los habitantes.

- La intensidad de lluvia de aproximadamente 70mm/hr. puede ser el detonante para que ocurran los deslizamientos al influir directamente la cohesión del suelo. Esto aunado a los planos de estratificación al depositarse los materiales de formación de la ladera que corresponden a material volcánico (suelo residual) del cuaternario siendo este material más reciente, se suma a elevar su susceptibilidad a un deslizamiento.

Conclusión general:

Para poder concluir de manera general en este trabajo, se realizó un análisis el cual engloba experiencias ganadas, interpretación de resultados y algunas recomendaciones generales. En cuando a los resultados de datos obtenidos por los métodos aquí empleados, se concluye, que existe un riesgo medio a alto de susceptibilidad de deslizamiento de ladera, ya que es el objetivo general de este trabajo, esto debido a que la zona cada vez se encuentra más poblada y cuenta con algunos factores desencadenantes como lo son: desagües de agua y peso extra en la ladera, por lo cual este trabajo adquiere suma importancia y sería conveniente realizar más estudios en el futuro de dicha zona para tener un monitoreo más preciso ya que, en ocasiones para que se desencadene un deslizamiento se necesitan dos o más factores externos como: sismos, o componentes estructurales ocultos a nuestro alcance de penetración con el estudio realizado.

Por otro lado, en la ciudad de Teziutlán ocurre un aspecto demográfico importante, la invasión de predios para vivienda sin éxito en su control conocido coloquialmente como “paracaidismo” siendo este uno de los principales orígenes de la problemática en la zona. Teniendo en cuenta que son las autoridades las que designan dichas ubicaciones, se propone trabajar de manera conjunta entre autoridades y habitantes para la designación de

predios seguros para ser habitados y para construcción de viviendas; o en su caso, reubicación de las viviendas en caso de existir un muy alto peligro de desastre. Para dicha designación se recomienda, en base a lo expuesto en este trabajo, realizar estudios previos con instancias gubernamentales correspondientes o universidades las cuales lleven a cabo la metodología más conveniente en cada caso en particular, ya que cada lugar tiene características propias y diferentes maneras de atacar el problema.

Este trabajo deja como experiencia la agradable sensación de trabajar en algo útil para la población en una zona de riesgo ya que la relativa facilidad de transporte del equipo permitió tomar datos de manera rápida y efectiva ya que el equipo utilizado PANDA II, es ergonómico y práctico, así como también la coordinación del personal de protección civil asignado a la tarea. Conforme se analizó la ladera se localizaron cuerpos sepultados ajenos a ella que corresponden a antiguas viviendas afectadas por movimientos de tierra en el pasado, esto quiere decir que han ocurrido deslizamientos de menor tamaño con consecuencias desfavorables para las construcciones.

En cuanto a los habitantes de la colonia Benito Juárez, causo el interés de conocer los resultados del trabajo aquí presentado, ya que sus patrimonios e integridad están en juego, pudiendo conversar brevemente con algunos de ellos, comentan que en el pasado habían hecho algunos trabajos de remediación, pero no había un estudio como tal con resultados y conclusiones, mismo que aumenta la importancia de realización de este trabajo. Ya que, por el desconocimiento del estado de la zona, genera que la población se establezca en zonas no aptas para establecer viviendas.

Este trabajo funciona como prevención a aquellas personas que tienen la intención de habitar dichas zonas designadas de alto riesgo, no hay que olvidar que la naturaleza en ocasiones es impredecible y si se cuenta con herramientas e información valiosa, se debe aprovechar y tomar en cuenta para la toma de decisiones en el momento de elegir un predio para ser habitado.

Como una posible solución a la problemática de deslizamientos en zonas habitadas de Teziutlán, se propone realizar campañas de difusión, en las cuales se proporcione toda la información existente o que se está llevando a cabo en ese momento para que la población disponga de más elementos a la hora de tomar decisiones importantes para sus viviendas, y según sea el caso, la obra de remediación o prevención para ser atendida.

Por último se debe pensar en la ciencia como una herramienta que esta de nuestro lado, es una manera de dar solución a los problemas que acontecen día a día, es por eso que se debe tener en cuenta siempre el pensamiento analítico y científico, la naturaleza es hermosa y cuenta con energía casi infinita, el ser humano tiene que encontrar su lugar en el universo y saber hacerse presente en el planeta de manera que pueda subsistir de la manera más digna posible, viviendo siempre en armonía con los fenómenos de la naturaleza.

Recomendaciones:

- Se exhorta a la población que no se ubique en zonas de riesgo, se acerque a dependencias del gobierno o realice una investigación de la zona que planea habitar, ya que, en caso de ya existir un estudio, los resultados son clave para la toma de decisiones.
- Mediante campañas de concientización y difusión, que la información adquirida en este trabajo llegue a los habitantes de la región para estar informados de la situación actual de la ladera y su continuo monitoreo.
- En las zonas donde existen viviendas y mayor número de factores desencadenantes, se recomienda instalar métodos de mitigación y remediación necesarios en tiempos adecuados. Entre estos métodos se mencionan algunos: **Plan de forestación, excavación de zanjas y monitoreo de cargas en la ladera, así como revisiones periódicas del sistema de tuberías de agua.**

Anexo 1

Procesado de mapas de curvas de nivel, y visualización en 3D del MDE

A continuación, se muestra el procedimiento continuación del capítulo 3.5 el cual describe la generación de mapas, con las imágenes obtenidas del VANT. En el programa “ArcMap”, paquetería de “Arc Gis” en el cual se puede visualizar el modelo digital de la ladera en 3D, partiendo de la nube de puntos capturada por el VANT convirtiéndola a formato ráster.

Curvas de nivel:

El resultado obtenido “MDE” se exporta al programa ArcMap 10.4 nuevamente en el cual se puede trabajar con ello para obtener las curvas de nivel y los perfiles topográficos.

Donde:

se utiliza la herramienta “tool box” >3D Analyst tools >Raster Surface >Contour.

en la ventana “Contour”, seleccionar en la opción “input ráster” el archivo del MDE ya que es el que se debe incluir, y posteriormente en la opción “Output polylines features” seleccionar el archivo de salida, “curvas de nivel Teziutlán” y en la tercera opción se ingresan los valores de los intervalos, los cuales son: 1,5,10m (cada 5m). (Imagen 7, 8).

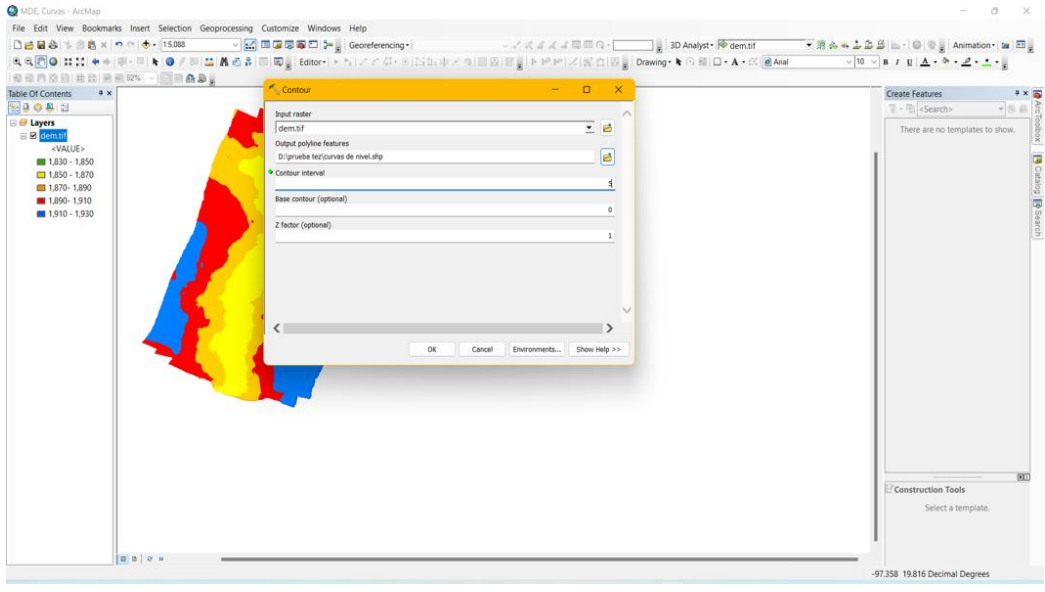


Imagen 7. Proceso de representación de curvas de nivel

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Al aceptar el recuadro “contour”. Se despliegan las líneas de contorno o de nivel resultantes

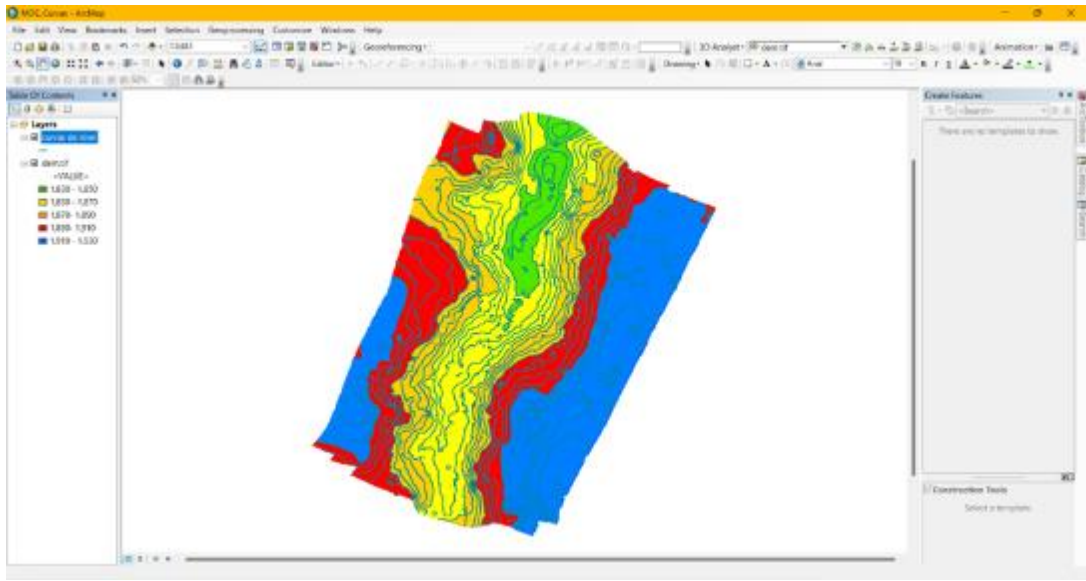


Imagen 8. Curvas de Nivel sobre MDE.

CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

A continuación, en la imagen 9 se muestra una representación en 3ra dimensión del mapa de contornos generado anteriormente, proceso que se muestra más adelante en la (p. 84 y 85) útil para la generación de modelos o visualización de la ladera analizada la cual ahorra mucho tiempo en dibujo y construcción de modelos estructurales.

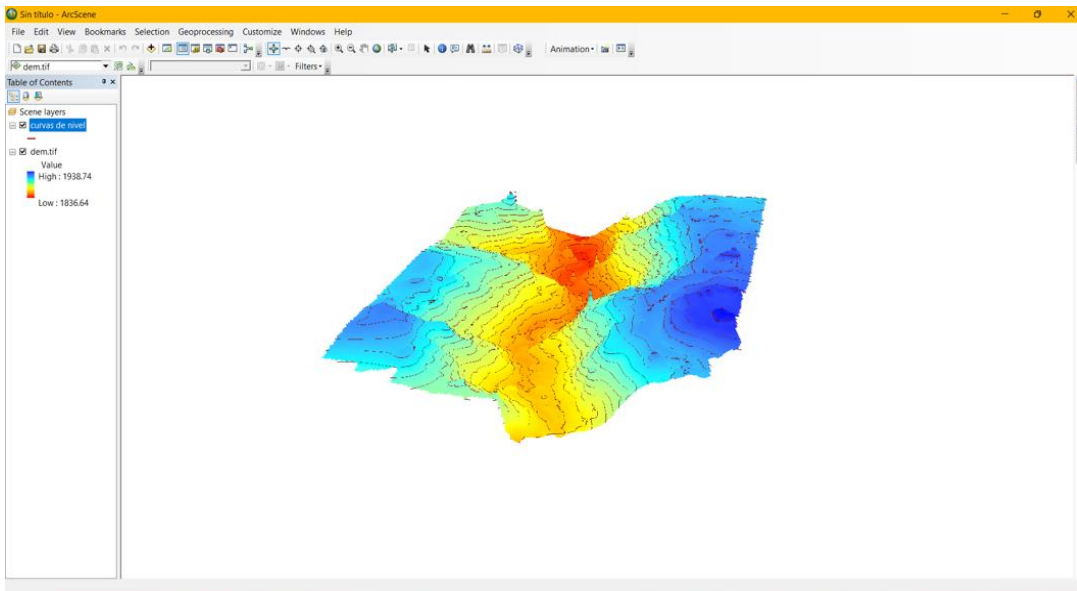


Imagen 9. Curvas de nivel, visualización en ArcScene.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Visualización en 3D del MDE.

De igual manera con la extensión del “ArcMAP” denominado “ArcScene”, el MDE se puede visualizar en un formato en 3D. Primero se precargan las curvas de nivel y el MDE.

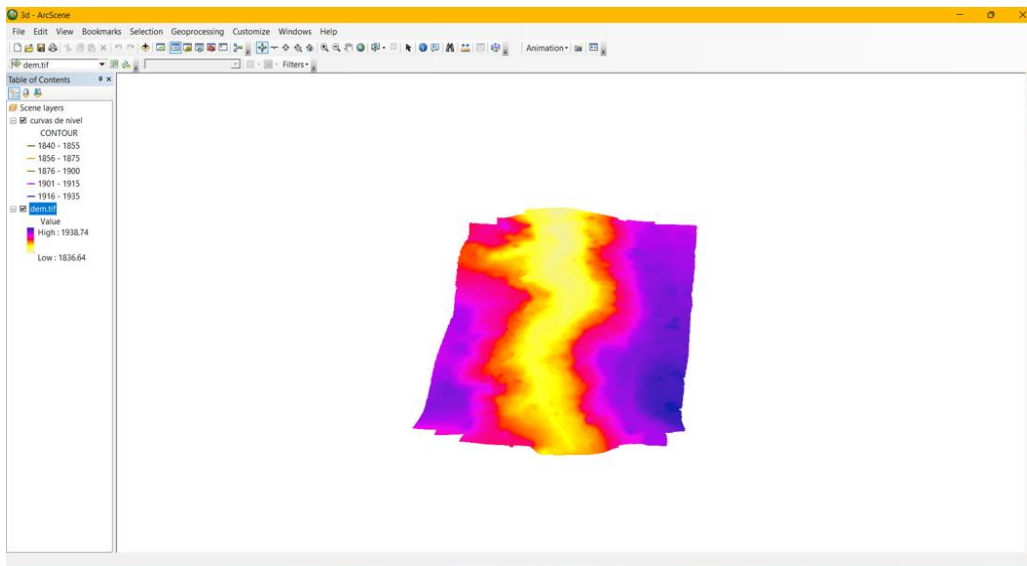


Imagen 10. Visualización el 3D en ArcScene

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Sobre el MDE se abre el panel de propiedades >layer properties” >Base heights” >Elevation from Surface” > Floating on Custom Surface.

Este proceso ocasiona que las curvas de nivel se superpongan al MDE adoptando su profundidad del modelo. (Imagen 11).

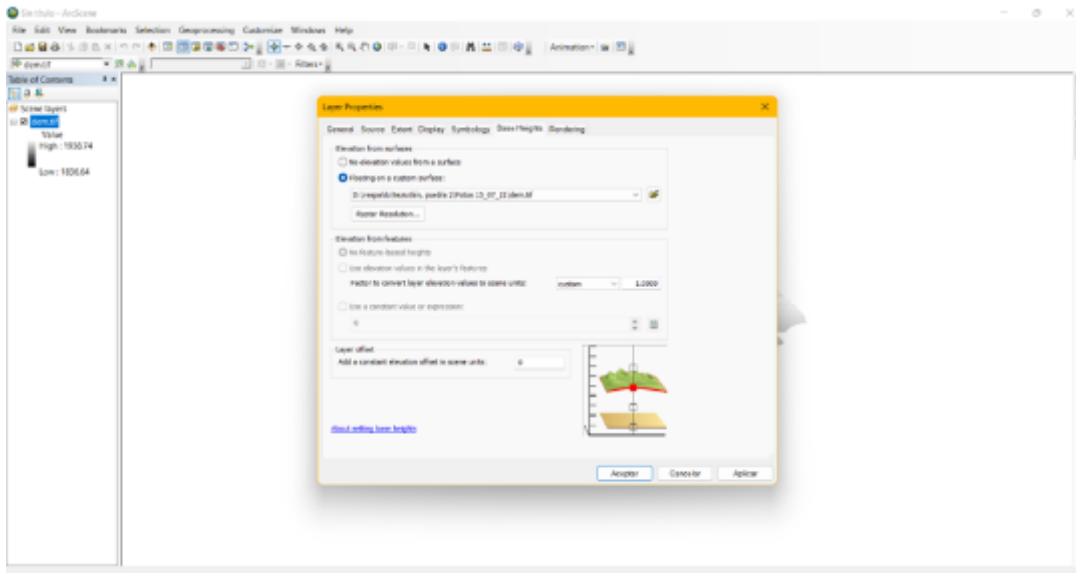


Imagen 11. Procesado para visualización en 3D.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Al aceptar el recuadro se obtiene el formato deseado en 3D, al ajustar la paleta de colores, se obtiene el modelo de la ladera, listo para presentación o para seguir trabajándolo.

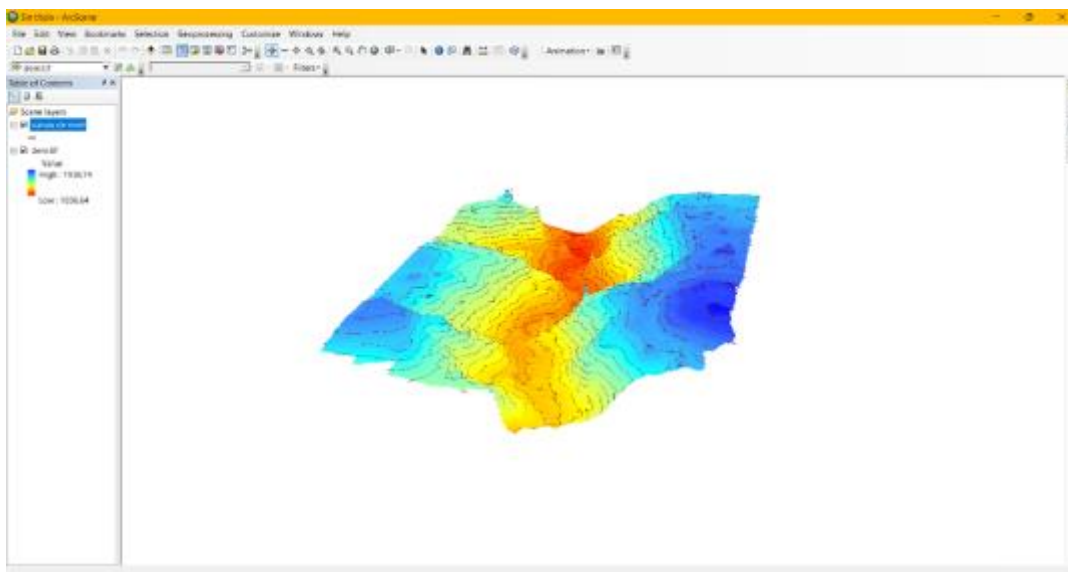


Imagen 12. Resultado en 3D del MDE.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Conversión de Shp a KML para poder visualizarlo en Google Earth

SHP y KML son los formatos de datos geospaciales que más se utilizan. Shapefile (Shp) es un formato vectorial utilizado en los SIGS, Keyhole Markup Language (Kml) es un formato que usa Google Earth entre otros.

En la barra de herramientas “ArcToolbox” mostrado a continuación en la Imagen 13.

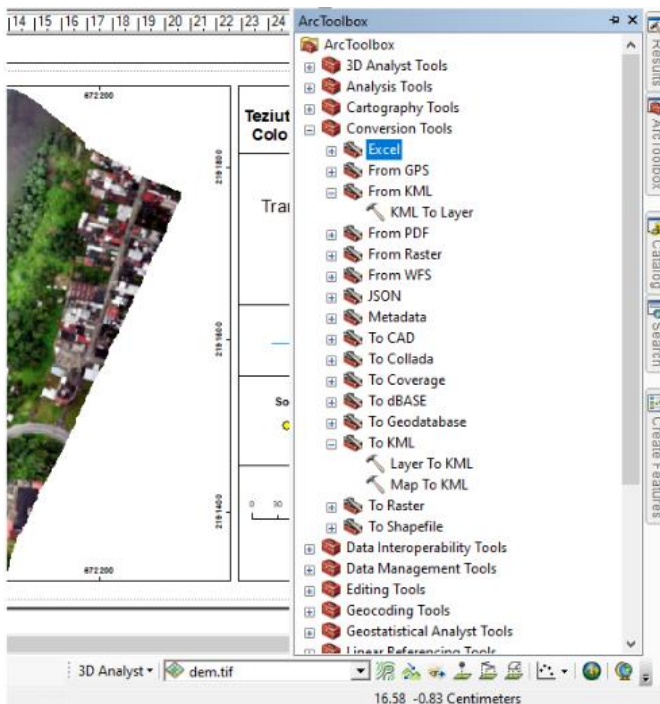


Imagen 13. Arc tool box.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Seleccionar Layer to KML y en el primer apartado se coloca la capa a transformar y en la siguiente la ruta de salida (imagen 14).

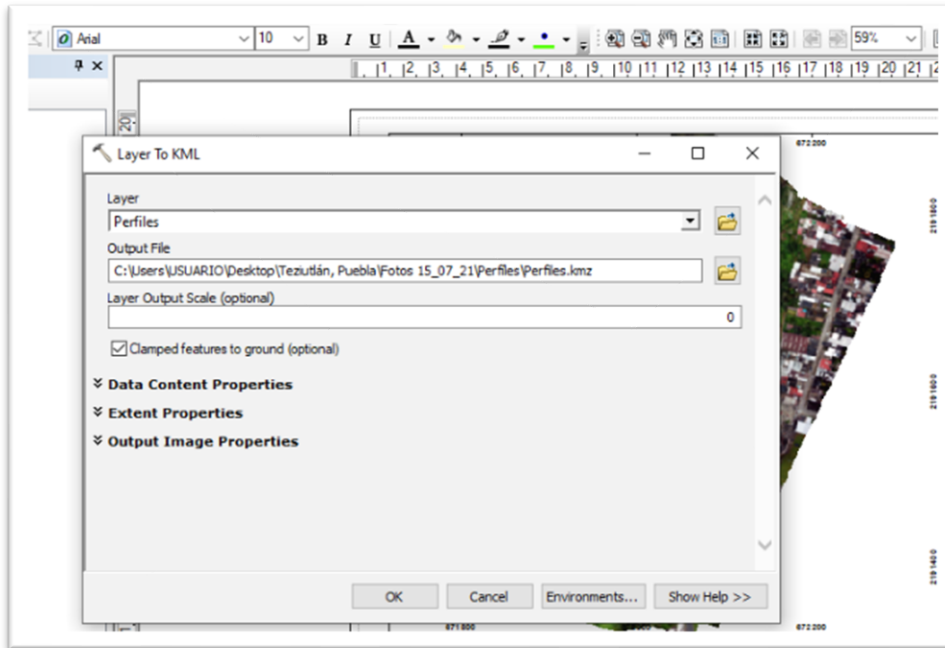


Imagen 14. Layer to KML

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

De esta manera se obtiene la conversión de formato utilizado para el proceso de las imágenes que se mostradas anteriormente y su posterior visualización en Google Earth.

Se muestra a continuación el resultado final Modelo Digital de Ladera en 3D (imagen 15). Con escala de colores ajustada, donde amarillo muestra la zona de menor altitud y morado de mayor altitud, colores elegidos únicamente para su diferenciación y líneas de relieve activadas.

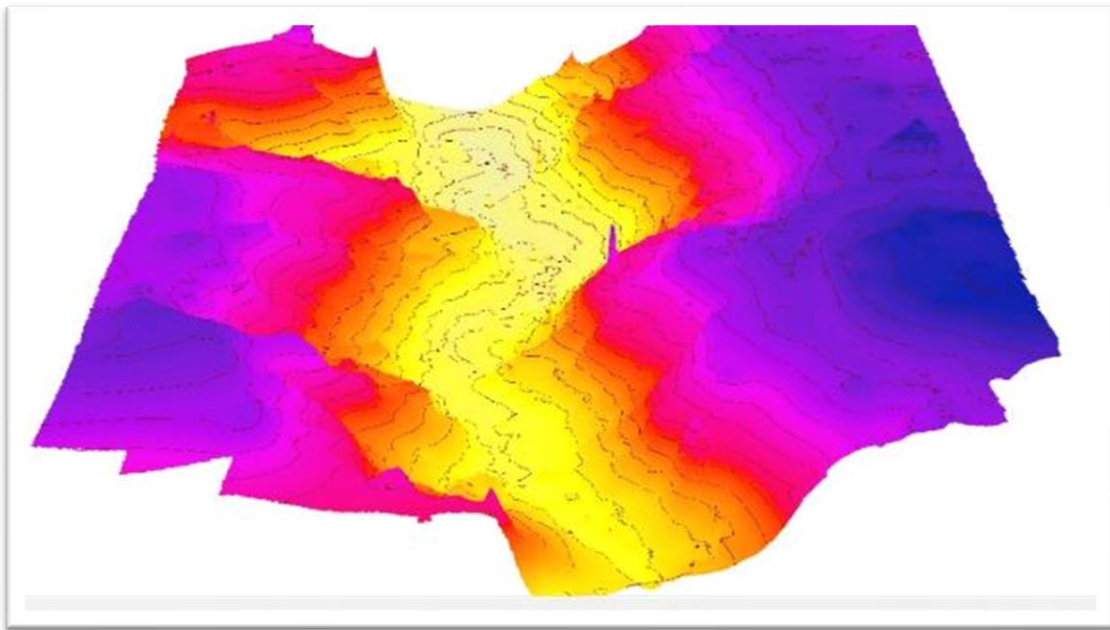


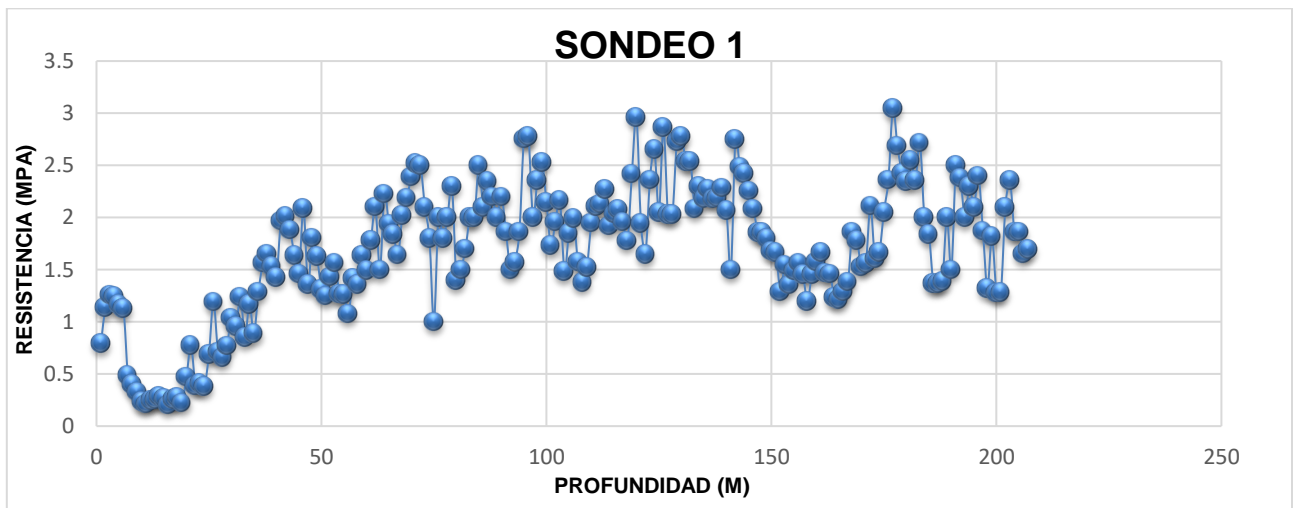
Imagen 15. Modelo Digital generado por sobrevuelo de VANT.

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Anexo 2.

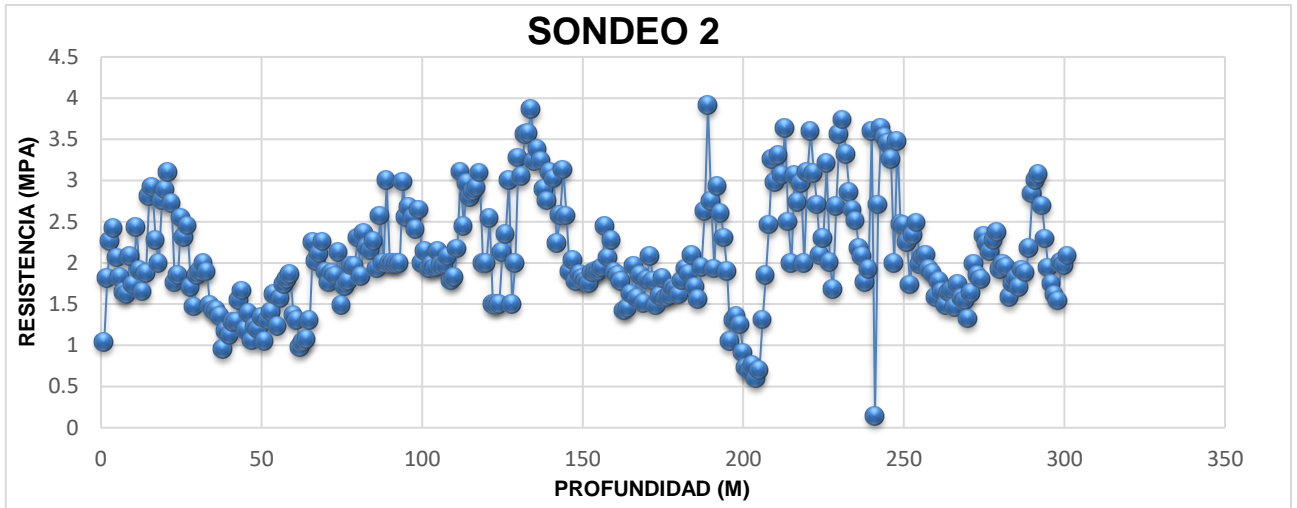
Penetrogramas obtenidos en campo

Estas gráficas obtenidas, son características de los sondeos realizados con el Panda y muestran la relación entre profundidad y resistencia de suelo, con unidades en Mega Pascales. Cap. 3.3.2 Pruebas con Penetrómetro Dinámico PANDA II.



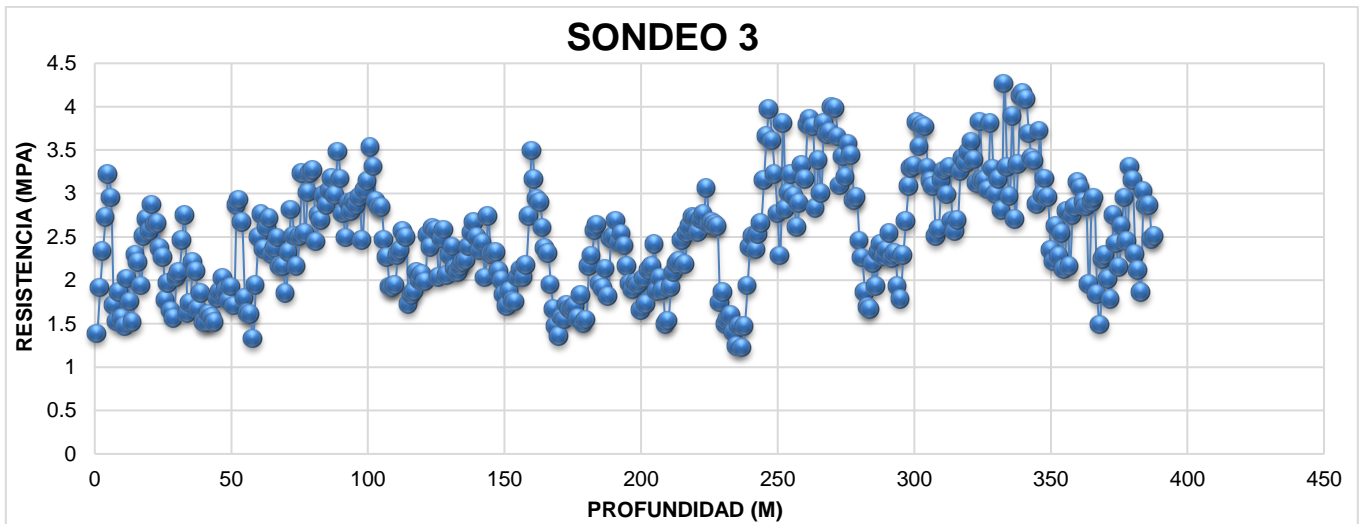
Gráfica 3. Sondeo 1 PANDA

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.



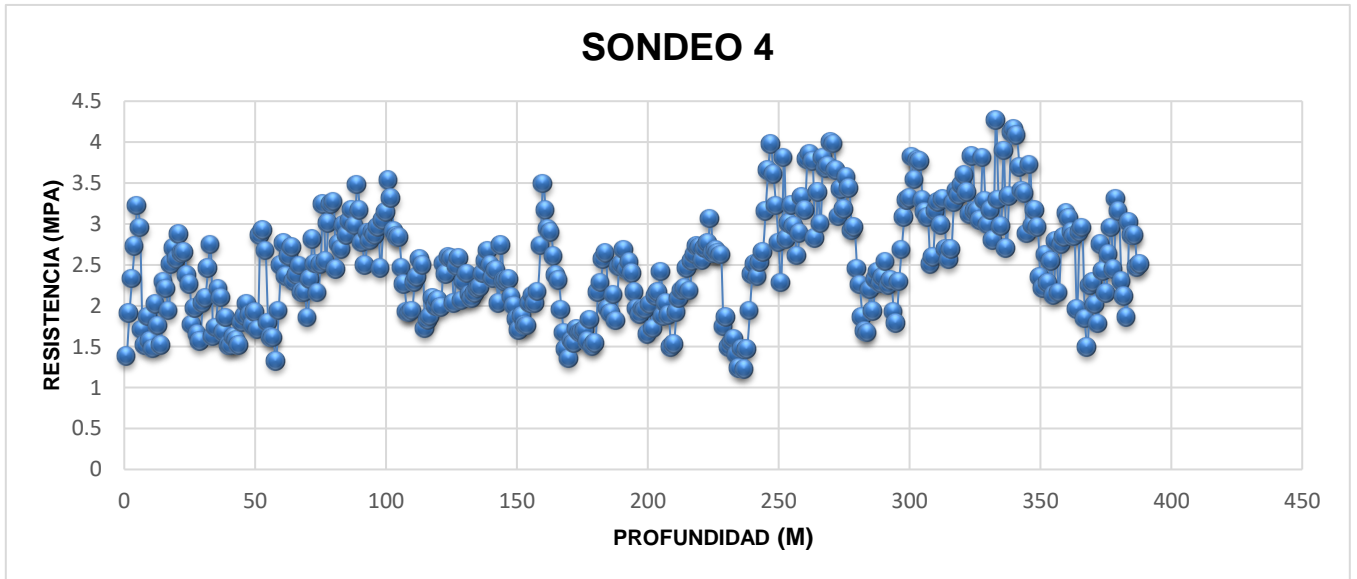
Gráfica 4. Sondeo 2 PANDA

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.



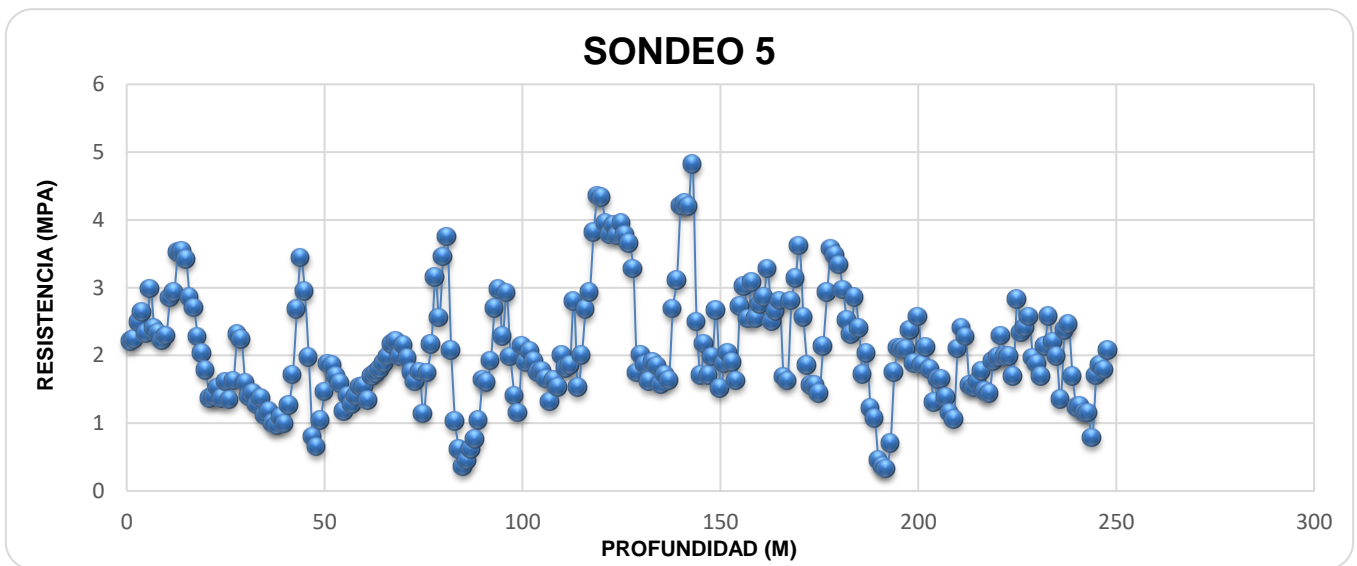
Gráfica 5. Sondeo 3 PANDA

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.



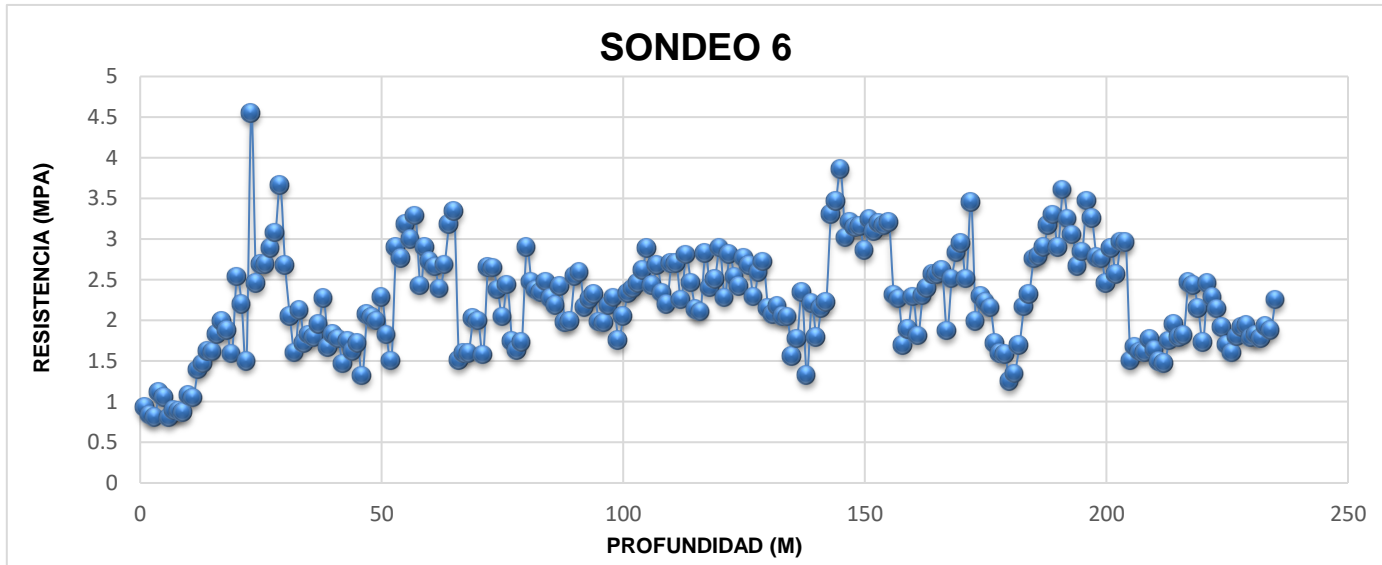
Gráfica 6. Sondeo 4 PANDA

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.



Gráfica 7. Sondeo 5 PANDA

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.



Gráfica 8. Sondeo 6 PANDA

Fuente: CENAPRED, laboratorio de mecánica de suelos, 2021.

Con los datos de los penetrogramas obtenidos en campo se procedió a generar perfiles, para posteriormente calcular el Factor de Seguridad, así como también la generación de los mapas de relieve, mencionados en capítulos anteriores. (Cap. 3 y 4).

Bibliografía:

- Carvajal, 2005, Análisis de susceptibilidad, CENAPRED, UNAM.
- Centro Nacional de Prevención de Desastre., 2017. Comparación de métodos cualitativos y cuantitativos de la determinación del grado de estabilidad de ladera adyacente a la comunidad la pintada, municipio de Atoyac de Álvarez, Guerrero, CENAPRED, ciudad de México.
- Domínguez L. M. Martínez A. C. y González A. H. (febrero de 2016). Análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en un sistema de alerta temprana por inestabilidad de laderas.
- L Domínguez, Alberto Enrique, Gretel Nava, 2018, "Análisis cuantitativo la pintada", subdirección de Dinámica de suelos y Procesos Gravitacionales, CENAPRED, México, DF.
- Manuel J. Mendoza L. y Leobardo Domínguez M, 2006, Guía básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, V. Estimación del peligro y el riesgo de deslizamientos en laderas, SEGOB, CENAPRED, México, DF.
- Mendoza, M. J. y Noriega, 1999 I., Deslizamientos de suelos y rocas en Teziutlán, Puebla, provocados por las intensas lluvias de inicios de octubre de 1999, Informe del CENAPRED a la Coordinación General de Protección Civil, SEGOB.
- Mendoza, M. J. y Noriega, I., "Deslizamientos de laderas en Teziutlán, Puebla, provocados por las lluvias intensas de octubre de 1999", 2000, *Memorias de la XX Reunión Nal. de Mec. de Suelos*, Puebla, Pue., SMMS, Vol. 1, pp. 49-58, México.

- Mendoza, M. J., Domínguez, L., Noriega, I. y Guevara, E., 2002, Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento, Informe Técnico del CENAPRED, SEGOB, CENAPRED, México, DF.
- Mendoza, M. J., Noriega, I., y Domínguez, L. "Deslizamientos de laderas en Teziutlán, Puebla, provocados por las lluvias intensas de octubre de 1999", 2002 Informe Interno del CENAPRED, preparado para la Subdirección de Estructuras y Geotecnia, CENAPRED, México, DF.
- Padilla y Sánchez, R.J., Domínguez Trejo, I., López Azcárraga, A.G., Mota Nieto, J., Fuentes Menes, A.O., Rosique Naranjo, F., Germán Castelán, E.A., Campos Arriola, S.E., 2013, Nacional Autonomous University of Mexico Tectonic Map of México GIS Project, American Association of Petroleum Geologists GIS Open Files series.
- SEGOB, 2001, Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México-Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana, CENAPRED.
- SEDATU, 2014, Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Teziutlán, Puebla, Xalapa, Veracruz.