



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

**DIAGNÓSTICO DEL RIESGO DE DESASTRE POR DESLIZAMIENTOS:  
LA AURORA, OCTUBRE 1999, TEZIUTLÁN PUEBLA**

**T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
LICENCIADA EN GEOGRAFÍA**

**P R E S E N T A:  
NOEMI SHARON RUIZ CORTÉS**

**ASESORA:**

**DRA. IRASEMA ALCÁNTARA AYALA**

**CIUDAD DE MÉXICO, CIUDAD UNIVERSITARIA, 2016.**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## DEDICATORIAS

*A mis padres por infundir en mí el amor a la escuela y por enseñarme siempre que la realización personal y la felicidad provienen de hacer lo que más te gusta en la vida.*

A mi madre Sara Cortés Flores por su amor, sabiduría y por buscar lo mejor para mi porvenir siempre. Por ser un ejemplo a seguir y brindarme herramientas para enfrentarme con los retos que se presenten en mi vida, por inculcarme siempre respeto, honradez y gratitud. Gracias por apoyarme siempre en la realización de mis metas y por tu frase de aliento que la he comprobado infinidad de veces: ***“De tu esfuerzo vienen las mieles del éxito”***. Muchas gracias.

A mi padre Pedro Ruiz Barrera por tu herencia intelectual, por seguir en la lucha para la transformación de este gran país mediante la educación, por enseñarme a no ser un robot del sistema y tener mi propia opinión, por tu amor, cuidado y por alimentarme. Muchas gracias.

A mi hermano Isaac Ruiz Cortés por ser mi guía en el camino de la vida, por estar siempre presente cuando lo necesito, por tu amor y cuidado. A Erika Hernández por sus consejos, apoyo y cariño. Muchas gracias.

A mi hermana Aline Ruiz Cortés por ser mi maestra y segunda madre, mi gurú de vida y por enseñarme a romper las reglas cuando es necesario, por su amor, cariño y apoyo incondicional. Muchas gracias.

A mi abuela Enriqueta Torres Flores ☆ por transmitirme su sabiduría de la vida, por su cariño y apoyo, su cariño y sobre todo por enseñarme a nunca rendirme. Muchas gracias.

A mi abuelo Sergio Cortés Guzmán ☆ por compartir conmigo sus anécdotas y por heredarme su espíritu viajero y explorador, por su cariño y apoyo en todo momento. Muchas gracias.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a la Universidad Nacional Autónoma de México por recibirme y formar parte de la comunidad universitaria. Por ser un claro ejemplo del potencial que tiene México para convertirse en un lugar con mejor calidad de vida mediante la ciencia, la investigación, la cultura y el arte. Orgullosamente UNAM.

Agradezco infinitamente a la Dra. Irasema Alcántara por todas las oportunidades que me ha brindado, por permitirme trabajar en las instalaciones del Instituto de Geografía y por ser una excelente investigadora que me ha inspirado para adentrarme en el interesante mundo de la “*desastrología*”. Por su atención, orientación, tiempo, apoyo y ayuda en todo momento. Por motivarme a dar lo mejor de mí y esforzarme para crecer día a día profesionalmente “I can no other ANSWER make but thanks, and thanks, and ever thanks...” – William Shakespeare.

A Ricardo Garnica por ser uno de los mejores profesores que he tenido durante toda mi trayectoria escolar, que comparte sus conocimientos por gusto propio. Por su paciencia, su ayuda en todo momento, su disposición y sobre todo por sus consejos de vida motivacionales y buenos momentos en el IGg, porque sin su apoyo no hubiera sido posible este trabajo. Muchas gracias.

Al Dr. Víctor Guerrero, la Dra. Lucy Serrano y la Dra. Yazmin Zurita porque la salud integral es primero y sin su ayuda no hubiera sido posible el desarrollo de este trabajo. Muchas gracias.

A los miembros del sínodo, Dra. Atlántida Coll Hurtado, Dr. José Ramón Hernández Santana, Dra. Elda Luyando López y Mtra. María Asunción Avendaño García por su tiempo y por sus acertadas correcciones y revisiones que enriquecieron mi tesis. Gracias.

Al Dr. Álvaro Sánchez Crispin y al Dr. José Juan Zamorano Orozco por ser excelentes profesores y contribuir a mi formación profesional mediante la disciplina, la constancia y el trabajo. Gracias.

Al Proyecto CONACyT 156242 “MISTLI: Monitoreo, Instrumentación y Sistematización Temprana de Laderas Inestables” el cual se desarrolla en el municipio de Teziutlán, Puebla, por su apoyo económico para la realización de este trabajo. Gracias.

A Octavio Salazar y Arturo Méndez Director de Protección Civil de Teziutlán por todo el apoyo brindado durante las visitas realizadas. Gracias.

A los habitantes de Teziutlán en especial a Doña Esther y Don David por su colaboración, mi gratitud y respeto hacia ellos.

Al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y al Dr. Carlos Valdés por abrirme las puertas a sus instalaciones y permitirme desarrollar el trabajo en el laboratorio de mecánica de suelos. Quiero agradecer en especial al Ing. Leobardo Domínguez por su apoyo y tiempo durante todo el desarrollo de este trabajo y a todo el equipo del Departamento de Análisis de Fenómenos Gravitacionales: Alberto, Cristóbal, Aldo, Jorge y Víctor. Gracias.

Al Instituto de Geotecnia de la Universidad de BOKU (*Universität für Bodenkultur Wien*) en especial al Dr. Wei Wu por su hospitalidad, a Martin Grogger, al Dr. Deshan Cui, la profesora Sandra Patricia Álvarez y Nabarun Dey por su apoyo incondicional en la realización de los ensayos y por transmitirme sus conocimientos en el laboratorio. Gracias.

A Barbara Świtała y Bartosz Bałka por su ayuda, atención, hospitalidad, apoyo en todo momento durante mi estadía en Viena y sobre todo por los buenos momentos que pasamos juntos en el Danubio “Because you can always find friends beyond the boundaries and the distance” Dziękuję bardzo!

A todos los compañeros y amigos que conocí en el Instituto de Geotecnia: Jenny, Rick, Greggor, Guo Ping, Shun, Miguel y Camila. Gracias.

A Caro Reséndiz Garzón por ser mi hermana y confidente, estar en todo momento presente, por su apoyo y sobre todo por impulsarme a seguir mis sueños y decidirme a estudiar Geografía, sin ti nada de esto hubiera sido posible. Gracias.

A mi amiga Ailed Cahum por tu apoyo incondicional y por estar presente en cada momento importante de mi vida, por estar al pendiente y por tus sabios consejos a pesar de tu corta edad. Gracias.

A Natalia Oliveros Plata por estos años de apoyo y amistad, porque siempre estás ahí cuando lo necesito. Gracias.

A Itzy Bravo, por ser mi hermana mayor de la Geografía, por compartir toda su experiencia académica conmigo y sobre todo por ser una gran amiga y un ejemplo a seguir. Gracias.

A mis compañeros y amigos del cubículo, por sus aportaciones a mi tesis, sus consejos de vida, su APOYO, por los buenos momentos y sobre todo por ser mis guías en el camino de la titulación, yo no sé qué hubiera hecho sin ustedes: Yordan, Tona, Victor, Juan Luis, Rafa, Lore, Alma, Diana, Irlanda y Erik. Gracias.

A mi amigo futuro geoclimatólogo Arturo Ortega por su apoyo y por todos los buenos momentos que pasamos juntos, quiero expresar mi eterna gratitud por llevarme de CU a las tierras lejanas de Ecatepec durante el desarrollo de mi tesis y evitarme fatiga crónica y estrés innecesario del terrible sistema transporte colectivo metro, y en lugar de eso pasar un buen momento con buenas pláticas y canciones ¡muchas gracias!

A mis amigos y futuros geocolegas que me apoyaron y brindaron buenos momentos en aquellos días de clases nutriéndolos con buenas anécdotas: Santiago Izeta, Emilio Romero, Diana Martínez, Gerardo Vera, mi profesor de alemán Noel Gandarilla, Oscar Briseño y Bastien Van Inghelandt. Muchas gracias.

Y por último pero no menos importante, le quiero agradecer a Noemi Sharon Ruiz Cortés de 15 años por haber estudiado durante 3 meses en su habitación para poder entrar a la UNAM, porque al final todo valió la pena. GRACIAS.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>i. Conceptualizaciones teóricas: la construcción del riesgo de desastre</b>	2
<i>a) Amenaza</i>	2
<i>b) Vulnerabilidad</i>	4
<i>c) Riesgo</i>	6
<i>d) Desastre</i>	6
<b>ii. Justificación</b>	8
<b>iii. Objetivos</b>	8
<b>iv. Estructura de Tesis</b>	8
<b>CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LADERAS INESTABLES: ASPECTOS TEÓRICOS</b>	
<b>1.1 Introducción y conceptos básicos</b>	10
<b>1.2 Métodos <i>in situ</i></b>	13
<i>Ensayo de penetración estándar</i>	13
<i>Ensayo de penetración con cono dinámico</i>	14
<i>Ensayo de penetración con cono estático</i>	14
<i>Conductividad hidráulica</i>	16
<i>Métodos geofísicos</i>	17
<b>1.3 Métodos en laboratorio</b>	17
<i>Contenido de humedad</i>	17
<i>Granulometría</i>	18
<i>Límites de Atterberg</i>	21
<i>Prueba de compresión triaxial</i>	25
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA: CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EN LA AURORA</b>	
<b>2.1 Identificación de los sitios muestreados en campo</b>	28
<i>a) Obtención de muestras</i>	29
<b>2.2 Realización de ensayos <i>in situ</i></b>	33
<i>Prueba de conductividad hidráulica con el Permeámetro de Guelph</i>	33
<b>2.3 Realización de pruebas en laboratorio</b>	37
<i>a) Contenido de humedad</i>	37
<i>b) Granulometría por mallas</i>	39
<i>c) Límites de Atterberg (Copa de Casagrande y Cono de caída)</i>	42
<i>d) Determinación del índice de plasticidad</i>	47
<i>e) Prueba triaxial</i>	49

## **CAPÍTULO III. LUNES 4 OCTUBRE DE 1999, TEZIUTLÁN PUEBLA**

<b>3.1 Características físico-geográficas de Teziutlán, Puebla</b>	54
<i>a) Localización</i>	54
<i>b) Clima</i>	55
<i>c) Contexto geológico-geomorfológico</i>	56
<i>d) Hidrología</i>	61
<i>e) Edafología</i>	63
<i>f) Uso de suelo y vegetación</i>	65
<i>g) Características socio-demográficas de Teziutlán</i>	67
<i>h) Vivienda</i>	68
<i>i) Principales actividades económicas</i>	69
<b>3.2 Lunes 4 de octubre de 1999</b>	70
<b>3.3 Inestabilidad de laderas en la Sierra Norte de Puebla</b>	72
<i>a) Factores determinantes</i>	72
<i>b) Factores desencadenante</i>	72

## **CAPÍTULO IV. EL DESASTRE EN LA COLONIA LA AURORA, 1999**

<b>4.1 Lluve sobre mojado: el desastre de 1999</b>	75
<b>4.2 La construcción del riesgo de desastre en La Aurora</b>	80
<i>Localización</i>	80
<i>Antecedentes</i>	80
<b>4.3 Martes 5 de Octubre de 1999: el desastre en la Colonia La Aurora</b>	82

## **CAPÍTULO V. RESULTADOS**

<b>5.1 Resultados de los ensayos <i>in situ</i></b>	86
<i>Prueba de conductividad hidráulica</i>	86
<b>5.2 Resultados de los ensayos en laboratorio</b>	87
<i>Granulometría</i>	87
<i>Límites de Atterberg</i>	91
<i>Prueba Triaxial</i>	107

<b>DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b>	110
---------------------------------	-----

<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS</b>	117
-----------------------------------	-----

## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

### TABLAS

Tabla 1. Tipos de amenazas (Fuente: UNISDR, 2009)	3
Tabla 2. Tipos de vulnerabilidades que conforman la vulnerabilidad global (Fuente: Wilches-Chaux, 1993).	5
Tabla 1.1. Símbolos de grupos SUCS (Fuente: Bañón y Beviá, 2008).	11
Tabla 1.2. Clasificación SUCS (Bañón y Beviá, 2000).	12
Tabla 1.3. Métodos geotécnicos.	15
Tabla 1.4. Comparación entre abertura de malla (cuadrada) y el número mesh de los sistemas ASTM, Tyler y British Standard (Fuente: Núñez, 2008).	19
Tabla 1.5. Tipos de desplazamiento de una muestra de suelo sometida a un esfuerzo cortante (Fuente: Villalaz, 2004).	27
Tabla 2.1. Total de muestras obtenidas en la primera salida al campo del 11 al 15 de mayo del 2015.	29
Tabla 2.2. Total de muestras obtenidas en la segunda salida al campo del 12 al 14 de septiembre del 2015,	31
Tabla 2.3. Total de muestras obtenidas en la tercera salida al campo el 22 de junio del 2016.	32
Tabla 2.4. Valores típicos de la conductividad hidráulica (Coduto, 1999).	36
Tabla 2.5. Grado de permeabilidad del suelo (Whitlow, 1994).	36
Tabla 3.1. Características litológicas de la Sierra Norte de Puebla que dieron lugar a la inestabilidad de laderas (Fuente: Lugo-Hubp et al., 2005).	60
Tabla 3.2. Factores determinantes y desencadenantes de la inestabilidad de laderas (Fuente: Campos et al., 2001).	74
Tabla 4.1. Daños totales en Teziutlán del 4 al 7 de octubre de 1999 (Fuente: Domínguez, 2000).	77
Tabla 4.2. Resumen de daños totales (millones de pesos) (Fuente: Bitrán, 2001).	78
Tabla 4.3. Recursos FONDEN para daños generados por las lluvias e inundaciones de Septiembre-Octubre, 1999 (Fuente: Secretaria de Gobernación adaptado por Bitrán, 2001).	79
Tabla 5.1 Resultados de Conductividad hidráulica.	87
Tabla 5.2. Parámetros de las muestras analizadas.	107

### FIGURAS

Figura 1. De la construcción social del riesgo a la producción social del desastre (Fuente: Oliver-Smith et al., 2016).	7
Figura 1.1. Evolución de la concepción de los suelos (Fuente: Santamarina y Narsilio, 2008).	11
Figura 1.2. Penetrómetro estándar (Fuente: ASTM D 1586/84).	13

Figura 1.3. Penetrómetro estático y dinámico	14
(Fuente: <a href="http://www.lb.auf.org/kourdey/Reconnaissance.htm">http://www.lb.auf.org/kourdey/Reconnaissance.htm</a> ).	
Figura 1.4. Esquema del permeámetro de Guelph	16
(Fuente: <a href="https://soilmoisture.files.wordpress.com/2013/05/guelph-h1.jpg">https://soilmoisture.files.wordpress.com/2013/05/guelph-h1.jpg</a> , adaptado de Valdés y Cox, 2006).	
Figura 1.5. Ejemplos de curvas granulométricas mediante sedimentación y tamizado	20
(Fuente: ASTM, 1991 adaptado por Caballero, 2001).	
Figura 1.6. Copa de Casagrande para definir el límite líquido	22
(Fuente: <a href="http://www.utest.com.tr">www.utest.com.tr</a> adaptado de ASTM D 423 y Osorio, 2010b).	
Figura 1.7. Deslizamiento de un suelo en el límite líquido	22
(Fuente: Osorio, 2010b).	
Figura 1.8. Gráfica de plasticidad de Casagrande	23
(Fuente: Terzaghi, et al., 1996; Bañón y Beviá, 2000; Clasificación SUCS).	
Figura 1.9. Diagrama del cono de caída	24
(Fuente: <a href="http://www.testinglabequipments.com/product-details/cone-penetrometer-228.html">http://www.testinglabequipments.com/product-details/cone-penetrometer-228.html</a> , adaptado de Osorio, 2010b).	
Figura 1.10. Ejemplo de diagrama para el registro de los resultados del cono de caída	25
(Fuente: adaptado de Smith y Mullins (1991); Osorio, 2010b).	
Figura 1.11. Aplicación de tensiones paralelas a la sección transversal de una muestra de suelo	25
(Fuente: Villalaz, 2004).	
Figura 2.1. Sitios muestreados en las salidas de campo	28
Figura 2.2. Obtención de muestras inalteradas para el ensayo triaxial.	30
Figura 2.3. Perfil de suelo utilizado para el muestreo y sus horizontes (Fotografía proporcionadas por M. Ramírez Beltrán).	32
Figura 2.4. Sitios en donde se realizaron las pruebas de conductividad hidráulica.	33
Figura 2.5. Permeámetro de Guelph utilizado (Fotografía proporcionada por R.Garnica).	34
Figura 2.6. Formato de registro para la prueba de conductividad hidráulica.	35
Figura 2.7. Formato de registro para el cálculo del contenido de humedad.	38
Figura 2.8. Procedimiento para calcular el contenido de humedad.	39
Figura 2.9. Orden de los tamices para la prueba de granulometría por mallas.	40
Figura 2.10. Formato de registro para la prueba de granulometría.	41
Figura 2.11. Procedimiento de la prueba de granulometría por mallas.	42
Figura 2.12. Procedimiento para la determinación de los límites de Atterberg con la Copa de Casagrande.	43
Figura 2.13. Formato de registro límites de Atterberg con la copa de Casagrande	44
Figura 2.14. Procedimiento para la determinación de los límites de Atterberg con el Cono de Caída.	46
Figura 2.14. Procedimiento para la determinación de los límites de Atterberg con el Cono de Caída.	47
Figura 2.16. Procedimiento para determinar el límite de plasticidad	48
Figura 2.17. Cámara triaxial utilizada.	49

Figura 2.18. Preparación de la muestra de suelo para la cámara triaxial.	50
Figura 2.19. Ejemplo de medidas del diámetro de la muestra.	51
Figura 2.20. Colocación de la muestra en la cámara interior e instalación de la cámara triaxial.	52
Figura 2.21. Formato de registro para la prueba triaxial (Proporcionado por D.Cui, 2015).	53
Figura 3.1. Localización del municipio de Teziutlán (Fuente: INEGI, 2010).	54
Figura 3.2. Tipos de climas en Teziutlán (Fuente: E.García Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO, 1998).	55
Figura 3.3. Provincias y Subprovincias fisiográficas de México, localización de la Sierra Norte de Puebla (Fuente: Adaptado de Lugo-Hubp et al., 2005).	56
Figura 3.4. Columna estratigráfica de Teziutlán (Fuente: SGM, 2011).	57
Figura 3.5. Unidades geológicas de Teziutlán (Fuente: Adaptado de SGM, 2011).	59
Figura 3.6. Subcuencas hidrológicas del municipio de Teziutlán (Fuente: INEGI, 2010).	62
Figura 3.7. Edafología de Teziutlán (Fuente: INEGI, 2009).	64
Figura 3.8. Mapa de uso de suelo (Fuente: INEGI, 2009).	66
Figura 3.9. Pirámide de población, Teziutlán 1990 (Fuente: Censo de población y vivienda INEGI, 1990).	67
Figura 3.10. Pirámide de población, Teziutlán 2000 (Fuente: Censo de población y vivienda INEGI, 2000).	67
Figura 3.11. Pirámide de población, Teziutlán 2010 (Fuente: Censo de población y vivienda, INEGI, 2010).	68
Figura 3.12. Gráfica del total de viviendas ocupadas en Teziutlán (1990-2010) (Fuente: INEGI 1990, 2000 y 2010).	69
Figura 3.13. Principales áreas afectadas por la lluvia intensa durante Octubre 4-5, 1999 (Fuente: Capra et al., 2003).	70
Figura 3.14. Precipitación diaria del 30 de septiembre de 1999 al 10 de octubre de 1999 (Fuente: Alcántara- Ayala, 2004).	72
Figura 4.1. Principales municipios afectados en el desastre de 1999 (Fuente: Domínguez, 2000).	75
Figura 4.2. Afectaciones en Teziutlán, Octubre de 1999 (Fuente: El Sol de Puebla, 2013).	76
Figura 4.3. Delimitación del área de estudio.	80
Figura 4.4. La Aurora 1978 y 1991 (Fotografías aéreas proporcionadas por el INEGI, 1978 y 1991).	81

Figura 4.5. El deslizamiento de La Aurora (Fuente: CENAPRED, 2008; INEGI Fotografía aérea Octubre 1999).	82
Figura 4.6. Rutas de salida durante el desastre del martes 5 de Octubre (Fuente: M. Rodríguez, comunicación personal, 22 de junio de 2016).	83
Figura 4.7. Soldados auxiliando en La Aurora, 1999 (Fuente: <a href="http://noticiastlapacoyan.blogspot.mx/2015/10/16-anos-de-la-tragedia-en-teziutlan.html">http://noticiastlapacoyan.blogspot.mx/2015/10/16-anos-de-la-tragedia-en-teziutlan.html</a> ).	84
Figura 5.1. Puntos de muestreo utilizados.	86
Figura 5.2. Curva granulométrica de las muestras correspondientes al punto A.	87
Figura 5.3. Curva granulométrica de las muestras correspondientes al punto B.	88
Figura 5.4. Curva granulométrica de las muestras correspondientes al punto C.	89
Figura 5.5. Curva granulométrica de las muestras correspondientes al punto D.	90
Figura 5.6. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M1Aa.	91
Figura 5.7. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M2Aa.	92
Figura 5.8. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M3Aa.	92
Figura 5.9. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M1Ba.	93
Figura 5.10. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M2Ba.	94
Figura 5.11. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M3Ba.	94
Figura 5.12. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M1Ca.	95
Figura 5.13. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M2Ca.	96
Figura 5.14. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M3Ca.	96
Figura 5.15. Gráfica de límites de consistencia y clasificación SUCS para los puntos A, B y C.	97
Figura 5.16. Gráfica de límites de consistencia del horizonte A (Copa de Casagrande).	98
Figura 5.17. Gráfica de límites de consistencia del horizonte A (Cono de Penetración).	98
Figura 5.18. Gráfica de límites de consistencia del horizonte AB (Copa de Casagrande).	99
Figura 5.19. Gráfica de límites de consistencia del horizonte AB (Cono de Penetración).	99
Figura 5.20. Gráfica de límites de consistencia del horizonte BA (Copa de Casagrande).	100
Figura 5.21. Gráfica de límites de consistencia del horizonte BA (Cono de Penetración).	100
Figura 5.22. Gráfica de límites de consistencia del horizonte B1 (Copa de Casagrande).	101
Figura 5.23. Gráfica de límites de consistencia del horizonte B1 (Cono de Penetración).	101
Figura 5.24. Gráfica de límites de consistencia del horizonte B2 (Copa de Casagrande).	102

Figura 5.25. Gráfica de límites de consistencia del horizonte B2 (Cono de Penetración).	102
Figura 5.26. Gráfica de límites de consistencia del horizonte B3 (Copa de Casagrande).	103
Figura 5.27. Gráfica de límites de consistencia del horizonte B3 (Cono de Penetración).	103
Figura 5.28. Gráfica de límites de consistencia del horizonte BCx (Copa de Casagrande).	104
Figura 5.29. Gráfica de límites de consistencia del horizonte BCx (Cono de penetración).	105
Figura 5.30. Gráfica de límites de consistencia y clasificación SUCS para el punto D, comparación de ambos métodos realizados (Copa de Casagrande y Cono de Caída).	106
Figura 5.31. Gráfica de la relación entre la desviación y la tensión vertical de las muestras.	108
Figura 5.32. Círculos de Mohr de las muestras M1A, M2A y M3A.	108
Figura 5.33. Estado de las muestras al finalizar el ensayo triaxial M1A, M2A y M3A.	109
Figura 6.1. La construcción social del riesgo (Oliver-Smith et al., 2016).	110
Figura 6.2. Esquematización de los principales factores de riesgo de desastre en La Aurora, Teziutlán; (A) Causas de fondo, (B) Impulsores del riesgo, (C) condiciones inseguras (Modificado de Oliver-Smith et al., 2016).	112
Figura 6.3. La producción social del desastre en La Aurora (Modificado de Oliver-Smith et al., 2016).	113
Figura 6.4. Representación de las relaciones espaciales entre la amenaza y la exposición (k sat: conductividad hidráulica).	115

## INTRODUCCIÓN

El proceso histórico de los asentamientos humanos sobre la superficie terrestre ha estado influenciado por una serie de factores que han modificado en diferente espacio y tiempo su configuración. Entre ellos cabe destacar el sistema político-económico, la adaptación y aprovechamiento del medio físico, el almacenamiento de los bienes de información y el desarrollo de las formas de comunicación. Las estructuras de las sociedades reflejan las lógicas espaciales que son el producto de sus formas de interacción con la naturaleza, su producción económica y sus herencias culturales, estos elementos constituyen el núcleo principal de la relación entre la dinámica de la Tierra y los seres humanos (Tewdwr-Jones y Allmendinger, 2006).

El crecimiento demográfico a nivel mundial y la falta de planificación han generado la ocupación de áreas propensas a diversas amenazas naturales, principalmente aquellas relacionadas con la inestabilidad de laderas. Por otra parte, el contexto económico, político y social establece las condiciones bajo las cuales se van desarrollando estos asentamientos humanos, bajo el supuesto de que aquellos sectores con carencias económicas, por lo regular, se establezcan en asentamientos donde la posibilidad de afectación es mayor (Alcántara-Ayala, 2003).

La inestabilidad de laderas reflejada en procesos de remoción en masa, involucra el desplazamiento de distintos tipos de material ladera abajo, por lo que existen diferentes movimientos. Entre ellos cabe destacar los flujos, caídas, deslizamientos, vuelcos, expansiones laterales y movimientos complejos (Alcántara-Ayala, 2000). Cabe mencionar que la ocurrencia de estos fenómenos no es reciente, tiempo atrás se presentaban principalmente en lugares inhabitados, y en la actualidad, con la creciente expansión urbana el incremento de asentamientos irregulares en laderas inestables se ha intensificado (Flores y Alcántara-Ayala, 2002).

En México los desastres asociados a la inestabilidad de laderas han producido pérdidas humanas, así como notables impactos negativos en el ámbito social, económico y ambiental. El Estado de Puebla y en particular la Sierra Norte, han sufrido consecuencias asociadas a estos fenómenos desencadenados principalmente por lluvias intensas en comunidades vulnerables expuestas en esta región (Galindo y Alcántara-Ayala, 2014). Ejemplo de ello, son los deslizamientos que ocurrieron en Zacapoaxtla y Tlahuitoltepec, que se detonaron por la ocurrencia de precipitaciones extraordinarias en el año de 1954 (Alcántara-Ayala, 2004).

En octubre de 1999 se presentaron lluvias extraordinarias que actuaron como factor detonante para que ocurrieran una serie de procesos de remoción en masa en el municipio de Teziutlán, donde hubo cuantiosas pérdidas humanas y económicas. Entre los diferentes

eventos ocurridos destacó el deslizamiento de La Aurora, el cual se ha considerado como el más significativo por la magnitud de los daños ocasionados (CENAPRED, 2006).

Con el fin de contribuir al entendimiento preliminar de los diferentes factores tanto físicos como sociales que condicionan la construcción del riesgo de desastre por deslizamientos en la colonia La Aurora, en el municipio de Teziutlán Puebla, es esencial desarrollar un diagnóstico de los elementos que lo configuran, por ello se ha desarrollado la presente tesis de licenciatura que forma parte del proyecto CONACYT 156242 “MISTLI”: Monitoreo, Instrumentación y Sistematización Temprana de Laderas Inestables.

## **i. Conceptualizaciones teóricas: la construcción del riesgo de desastre**

De acuerdo con Maskrey (1993), la evaluación de riesgos y la prevención de desastres se han abordado desde diferentes perspectivas que abarcan aspectos antropológicos, sociales, económicos y ambientales. Sin embargo, su conceptualización y análisis sistemático lo iniciaron los especialistas de las ciencias naturales con estudios relacionados a fenómenos naturales propios del funcionamiento interno de la Tierra como terremotos y erupciones volcánicas.

La definición del riesgo de desastre hace alusión a las posibles pérdidas que ocasionaría un desastre en términos de pérdidas humanas, condiciones de salud, bienes y servicios, que podrían ocurrir en una sociedad en un período específico de tiempo (UNISDR, 2009). Se basa en la presencia de eventos potencialmente perjudiciales que están condicionados por percepciones sociales prioridades, necesidades, peticiones y decisiones (Oliver-Smith *et al.*, 2016).

El análisis integral hoy en día es una herramienta fundamental para poder llevar a cabo una buena planificación y reflexionar acerca de las políticas públicas que se están aplicando en un determinado lugar, con el fin de proponer soluciones complejas a diferentes escenarios en riesgo, esto puede contribuir al estudio de los diferentes procesos y dinámicas que existen entre los seres humanos con su medio físico en un contexto local y global (Tewdwr-Jones y Allmendinger, 2006; Oliver-Smith *et al.*, 2016).

### *a) Amenaza*

El concepto de amenaza ha sido modificado a lo largo del tiempo, en 1979 la UNDRR en conjunto con la UNESCO promovió una reunión de expertos con el fin de crear una unificación de definiciones que ha sido ampliamente aceptada en los últimos años, en la cual se incluyó la siguiente definición (Maskrey, 1993):

- “Amenaza o peligro (*hazard*): Se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en determinado sitio” (UNDRO, 1979).

Posteriormente en el año 2009, la terminología de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR) definió el término de amenaza asociándolo a un fenómeno físico peligroso, sustancia o actividad humana, con cuya ocurrencia se generan pérdidas humanas, impactos negativos a la salud, daños de infraestructura, pérdida de medios de sustento y de servicios, así como trastornos sociales. De igual forma, desarrollaron una clasificación en donde se agrupan a la amenazas por su tipo de origen, estas se dividen en: biológicas, geológicas, hidrometeorológicas y tecnológicas (Tabla 1).

<b>Tipos de amenazas</b>	<b>Origen</b>	<b>Ejemplos</b>
Biológicas	Microorganismos patógenos, toxinas y sustancias bioactivas que se transportan por vectores biológicos.	Brotos de enfermedades Epidemias Plagas
Geológicas	Procesos internos y externos terrestres.	Terremotos Actividades y emisiones volcánicas Procesos de remoción en masa
Hidrometeorológicas	Procesos o fenómenos de orden atmosférico, hidrológico u oceanográfico.	Ciclones tropicales Granizadas Tornados Tormentas de nieve Inundaciones Sequías Olas de calor y de frío Tsunamis
Tecnológicas	Condiciones tecnológicas o industriales como: accidentes, procedimientos peligrosos, fallas en la infraestructura. Actividades humanas de extracción y transformación de recursos naturales.	Contaminación industrial Radiación nuclear Desechos tóxicos Ruptura de represas Accidentes de transporte Explosiones de fábricas

Tabla 1. Tipos de amenazas (Fuente: UNISDR, 2009).

Desde tiempos históricos los seres humanos se han enfrentado a diversas amenazas naturales como sismos de alta intensidad, lluvias torrenciales, huracanes, tornados, procesos de remoción en masa, por mencionar algunas. La concepción del planeta Tierra como un sistema activo que se rige bajo sus propias leyes ha sido difícil de asimilar para la humanidad; como consecuencia se han generado ideas erróneas acerca de estos fenómenos. A pesar de

los esfuerzos de la ciencia para disipar la falsa noción de los "desastres naturales", difundida principalmente por los medios de comunicación, en donde se entiende que la única razón de ocurrencia de los desastres son los eventos naturales extremos, desde un punto de vista general deja una falsa impresión de la población y tiende a propiciar un discurso político, cuando esto no es así, ya que intervienen múltiples factores sociales, políticos, económicos y culturales (Oliver-Smith *et al.*, 2016).

#### *b) Vulnerabilidad*

De acuerdo con Blaikie *et al.* (1996), la vulnerabilidad hace alusión a las características que establecen el grado de exposición en el cual la vida y la subsistencia de alguien queda en riesgo por una amenaza. Es consecuencia directa del empobrecimiento, del incremento demográfico descontrolado y de la urbanización acelerada sin planeación, se encuentra en una constante vinculación con la ocurrencia de desastres y de igual manera, se han generado múltiples definiciones que han sido modificadas con base en diversas perspectivas y objetivos de las disciplinas que la estudian (Katzman, 2000).

De acuerdo con la UNISDR (2009) el término vulnerabilidad se define como "las características y las circunstancias de un sistema que lo hacen susceptible a los efectos dañinos de una amenaza". Otra de las definiciones más utilizadas para delimitar el concepto se centra en la postura de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2003), la cual plantea que:

*"Vulnerabilidad = Exposición a riesgos + Incapacidad para enfrentarlos + Inhabilidad para adaptarse activamente"*.

Por otro lado, Wilches-Chaux (1993) define el concepto de vulnerabilidad como "la incapacidad de una comunidad para asimilar los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente", es decir, la inflexibilidad de la sociedad para adaptarse a su nuevo entorno que es producto de un impacto negativo. De igual manera, constituye un sistema dinámico que surge como consecuencia de la interacción de una serie de factores y características que confluyen en una comunidad particular, a esta relación se le denomina "vulnerabilidad global".

De lo anterior surgen diversas "vulnerabilidades" (Tabla 2), que son elementos estrechamente interconectados entre sí, y no pueden estudiarse de manera individual, ya que para entender el fenómeno de manera global se tienen que analizar en conjunto, por ejemplo difícilmente se podría entender la vulnerabilidad física, sin considerar la función de la vulnerabilidad económica y política (Wilches-Chaux, 1993).

<b>Tipo de vulnerabilidad</b>	<b>Definición</b>	<b>Ejemplos</b>
<b>Natural</b>	Se determina por los límites ambientales dentro de los cuales es posible la vida y por las exigencias internas del propio organismo de los seres vivos.	Alteraciones extremas de la composición atmosférica por contaminación artificial.
<b>Física</b>	Se refiere especialmente a la localización de los asentamientos humanos en zonas de riesgo.	Asentamientos en zonas no aptas para la vida humana por sus condiciones inestables del terreno, condiciones atmosféricas extremas, zonas de alta actividad volcánica.
<b>Económica</b>	Se manifiesta a través de las condiciones resultantes de la pobreza y la desigualdad, del sistema económico actual.	Desempleo, insuficiencia de ingresos, dificultad o imposibilidad total de acceso a los servicios formales de educación, de recreación y de salud, dependencia económica.
<b>Social</b>	La vulnerabilidad social se refiere al nivel de cohesión interna que posee una comunidad.	Falta de organizaciones sociales, desvinculación con los miembros de una comunidad, sentido de no pertenencia dentro del grupo social.
<b>Política</b>	Constituye el valor recíproco del nivel de autonomía que posee una comunidad para la toma de las decisiones que la afectan.	Incapacidad de una comunidad para resolver sus problemas locales y se conviertan en situaciones que exijan la atención los niveles decisorios externos.
<b>Técnica</b>	Establece el nivel de infraestructura y equipamiento con el que cuenta una sociedad.	La ausencia de diseños y estructuras sismo-resistentes en zonas propensas a terremotos.
<b>Ideológica</b>	Alude a la forma y concepción del mundo y el medio ambiente donde se habita y con el cual se relaciona y la posibilidad de enfrentar los problemas.	Creencias religiosas arraigadas, pasividad, fatalismo, presencia de mitos.
<b>Cultural</b>	Se refiere a la forma en que los individuos y la sociedad conforman la identidad nacional y el papel que juegan los medios de comunicación en la consolidación de estereotipos o en la transmisión de información relacionada con el medio ambiente.	Influencia de la personalidad de los habitantes que se identifican con un modelo de sociedad, influencias de los medios masivos de comunicación frente a los riesgos.
<b>Educativa</b>	Hace referencia al nivel de conocimiento de las realidades locales y regionales para hacer frente a los problemas.	Falta de programas educativos que proporcionen información sobre el medio ambiente, sobre el entorno, los desequilibrios y las formas adecuadas de comportamiento individual o colectivo en caso de amenaza o de situación de desastre
<b>Ecológica</b>	Se vincula a la convivencia con el medio ambiente.	Destrucción de ecosistemas, explotación no controlada de recursos.
<b>Institucional</b>	Se refiere al nivel de desarrollo en la estructura burocrática de una sociedad.	Falta de credibilidad en las instituciones, corrupción en instancias gubernamentales.

Tabla 2. Tipos de vulnerabilidades que conforman la vulnerabilidad global (Fuente: Wilches-Chaux, 1993).

Si bien es importante conocer su significado y los diferentes enfoques que se desarrollan, es sustancial conocer las causas que la generan. De acuerdo con Maskrey (1993) la vulnerabilidad en las sociedades se da por las siguientes razones:

- 1) Asentamientos humanos en terrenos que no son aptos para la vivienda, como el tipo de suelo y su ubicación inconveniente.
- 2) Construcción de viviendas muy precarias, sin buenas bases o cimientos, de material inapropiado para la zona, que no tienen la resistencia adecuada.
- 3) Carencia de fuentes monetarias que permiten satisfacer las necesidades humanas.

Sin embargo, a diferencia de otros indicadores sociales, la construcción de métodos cuantitativos para medir la vulnerabilidad ha sido difícil de precisar, ya que no se cuenta con suficiente acumulación de conocimientos básicos acerca de instrumentos e indicadores ya probados y discutidos previamente por diversos expertos en el tema (Katzman, 2000).

#### *c) Riesgo*

De acuerdo con Maskrey (1993), el riesgo, se produce del vínculo de la probabilidad de ocurrencia de un evento de una intensidad específica, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos. En otras palabras, es una condición latente o potencial, y su grado depende de la intensidad probable de la amenaza y los niveles de exposición existente (Lavell, 1996).

El riesgo es uno de los conceptos más discutidos y utilizados por diferentes disciplinas, sin importar cuál sea la perspectiva en la que se analice, siempre aparece ligado a una inseguridad conceptual, por la incertidumbre de conocer el futuro y la probabilidad de sufrir afectaciones (López y Toscana, 2013).

#### *d) Desastre*

La UNISDR (2009) define el término desastre como “la interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos”. De acuerdo con Maskrey (1993), el desastre se puede entender como un evento que ocurre, en la mayoría de los casos, de forma repentina que conlleva graves consecuencias sobre elementos sometidos a alteraciones intensas, representadas en las pérdidas humanas y en la salud de la población, lo cual produce desorden en los estándares cotidianos de la vida.

De acuerdo con Alcántara-Ayala (2002) múltiples definiciones de desastre han enfatizado el carácter de este término y por supuesto, han evolucionado en el tiempo. Por ejemplo, durante la década de 1960 los desastres se concebían como un “evento incontrolable”, en el cual una sociedad corre gran peligro, y se interrumpen todos o algunos de los elementos que componen las funciones esenciales de una sociedad (Fritz, 1961 *citado en* Alcántara-Ayala, 2002).

Hoy en día, hay que entender la construcción social del riesgo y la producción social del desastre. Analizarlo como un evento que se compone de varios factores políticos, económicos y poblacionales que cuenta con diferentes etapas para su entendimiento (Figura 1).

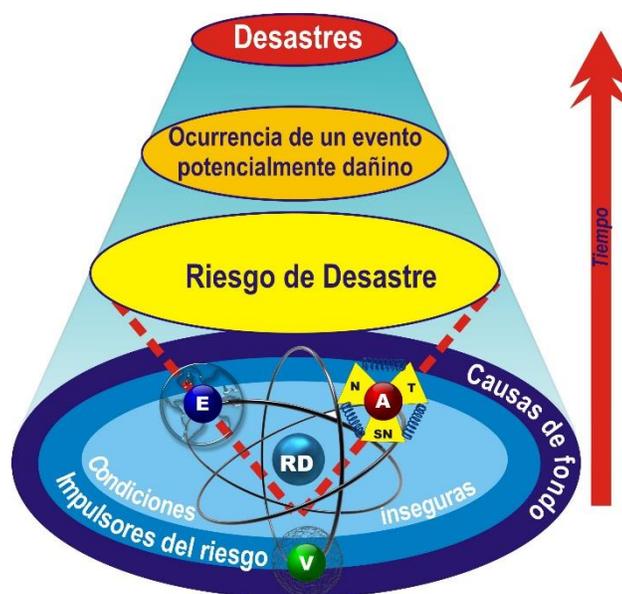


Figura 1. De la construcción social del riesgo a la producción social del desastre (Fuente: Oliver-Smith *et al.*, 2016).

Los desastres asociados a amenazas naturales ocurren alrededor del mundo. Entre ellos, cabe destacar el terremoto de Bam al sureste de Irán que ocurrió el 26 de diciembre del 2003; el huracán Katrina en Estados Unidos el 23 de agosto del 2005; el terremoto y tsunami en Japón en el año 2011; el deslizamiento en la ciudad de Shenzhen en China en el año 2015, entre muchos otros.

El impacto de los desastres es mayor en países en vía de desarrollo, debido a dos principales razones. La primera se relaciona con su localización geográfica y geológica, la segunda está relacionada con su desarrollo histórico donde las condiciones sociales, económicas y culturales no están en buenas condiciones, y subsecuentemente actúan como factores de una vulnerabilidad alta (Alcántara-Ayala, 2002). Sin embargo, a pesar de que los desastres pueden tener un mayor impacto en los países más pobres, no se limitan a estos, por

lo que las repercusiones se generan a nivel mundial de manera desproporcional (Lavell y Maskrey, 2014).

## **ii. Justificación**

A lo largo de la historia en la Sierra Norte de Puebla han ocurrido precipitaciones extraordinarias que han desencadenado procesos de remoción en masa. Uno de los municipios con mayor grado de afectación por estos eventos es Teziutlán, en primer lugar por sus condiciones litológicas y en segundo por su crecimiento demográfico, la expansión urbana y el incremento de la renta del suelo en el centro. Estos factores han generado un aumento de asentamientos irregulares en zonas inestables, como es el caso de la colonia La Aurora, en donde un fraccionamiento habitacional ubicado en la ladera posterior al Panteón Municipal fue afectado a causa de un deslizamiento. Por lo tanto, es de gran importancia estudiar las condiciones físicas y sociales que condicionan el riesgo de desastre en esta zona, con el fin de difundir la información con la población residente y de ésta forma fomentar una cultura de prevención.

## **iii. Objetivos**

### **a) Objetivo general**

Contribuir al entendimiento de los factores físicos y sociales que condicionan la construcción del riesgo de desastre por deslizamientos en la colonia La Aurora ubicada en el municipio de Teziutlán.

### **b) Objetivos particulares**

- Identificar las condiciones físicas, sociales y económicas antes, durante y después del desastre de 1999 en el municipio de Teziutlán y en la colonia La Aurora.
- Caracterizar los tipos de materiales presentes en la ladera posterior al Panteón Municipal de Teziutlán mediante ensayos *in situ* y pruebas en laboratorio.

## **iv. Estructura de Tesis**

La estructura de la tesis comprende cinco capítulos. En el primer capítulo se abordan desde una perspectiva teórica los métodos *in situ* y en laboratorio para la caracterización de laderas inestables.

El segundo capítulo describe la metodología empleada para la caracterización de las muestras tomadas en campo de la ladera posterior al Panteón Municipal de Teziutlán. Esta incluye el trabajo en campo y la realización de pruebas en laboratorio.

En el tercer capítulo se explica de manera general las condiciones físico-geográficas en Teziutlán, de igual manera, se hace énfasis en el contexto hidrometeorológico y en el contexto geológico-geomorfológico, y en particular en los factores determinantes y desencadenantes que dieron lugar a los procesos de remoción en masa ocurridos en octubre de 1999 en la Sierra Norte de Puebla.

En el capítulo cuarto se mencionan las repercusiones económicas y sociales en el municipio de Teziutlán tras el evento ocurrido en octubre de 1999. De igual forma, se desarrollan las condiciones que configuran el espacio en la colonia Aurora antes, durante y después del desastre.

En el capítulo quinto, se exponen los resultados obtenidos en campo y en el laboratorio. Finalmente, se presenta un apartado con la discusión y las conclusiones.

## **CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN BÁSICA DE LADERAS INESTABLES: ASPECTOS TEÓRICOS**

A lo largo de la historia el tema de la inestabilidad de laderas ha sido abordado por científicos de diversos campos del conocimiento como la mecánica de suelos, la ingeniería geológica y la geomorfología, cada uno de ellos ha desarrollado diferentes métodos de análisis de acuerdo con sus perspectivas de investigación (Chowdhury, 1978).

Se pueden realizar pruebas tanto en campo como en laboratorio. Con el fin de analizar las propiedades físico-mecánicas y características del comportamiento de los materiales de la superficie terrestre (como el suelo, las rocas y el agua subterránea) que son relevantes para el tema de inestabilidad de laderas (Wieczorek y Snyder, 2009). Existen diversas organizaciones a nivel internacional, a través de las cuales se establecen parámetros para la realización de estos ensayos, algunas de las más importantes son: La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (*ASTM American Society for Testing and Materials*) y La Institución de Estándares Británicos (*BSI British Standards Institution*).

Si bien el muestreo en campo y los ensayos en el laboratorio pueden determinar un gran número de parámetros para medir la inestabilidad de una ladera, además de identificar las propiedades de sus materiales, es fundamental la caracterización de la zona de estudio, es decir, realizar la evaluación de los aspectos geológicos, topográficos, geomorfológicos, hidrológicos, climatológicos y de vegetación (Berry y Reid, 1993).

En este capítulo de forma particular se hace referencia a diferentes métodos *in situ* y en laboratorio que se han aplicado para la identificación de laderas inestables. Entre ellos se destacan aquellos que fueron realizados en este trabajo para la caracterización de los materiales de la ladera situada en la sección posterior al Panteón Municipal de Teziutlán ubicado en la colonia La Aurora.

### **1.1 Introducción y conceptos básicos**

El suelo es un elemento clave en el tema de inestabilidad de laderas, por lo que existen un gran número de ensayos que estudian su comportamiento bajo diferentes condiciones que lo alteran. En consecuencia, para entender con mayor amplitud estos métodos es de gran importancia conocer sus propiedades físicas y mecánicas.

La definición de los suelos ha ido cambiando a lo largo del tiempo. En 1920 el ingeniero geólogo Karl von Terzaghi consideraba solo partículas sólidas y líquidas en su composición y es hasta comienzos del siglo XXI cuando se concibe al suelo compuesto por sólidos, líquidos, gases y microorganismos (Santamarina y Narsilio 2008).

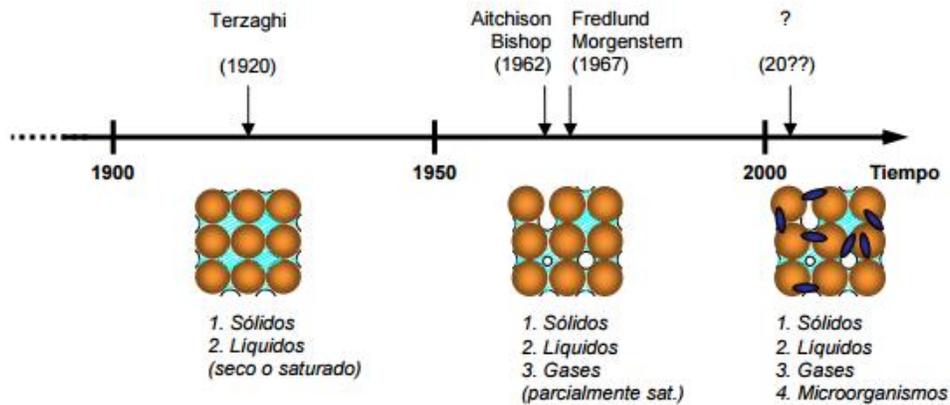


Figura 1.1. Evolución de la concepción de los suelos (Fuente: Santamarina y Narsilio, 2008).

Debido a lo anterior existen distintas clasificaciones cuyo objetivo principal consiste en agrupar diferentes tipos de suelo similares en sus propiedades químicas, físicas y biológicas, con el fin de establecer unidades que puedan ser geo-referenciadas, en función del campo de estudio y su fines prácticos (FAO, 2016). En la actualidad, algunas de las principales clasificaciones más reconocidas a nivel mundial son el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, la clasificación de la FAO WRB (*World Reference Base for Soil Resources*) y el sistema propuesto por la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Transporte ASSHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) (Santamarina y Narsilio, 2008).

En el presente trabajo se utilizó como referencia el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, que fue propuesto inicialmente por el ingeniero civil austriaco Arthur Casagrande en 1932 y posteriormente se adoptó por diferentes organizaciones como la ASTM para la realización de los ensayos de granulometría y límites de Atterberg (Santamarina y Narsilio, 2008). Esta clasificación cuenta con una serie de símbolos que consisten en un prefijo que determina la composición del suelo y un sufijo que representa sus propiedades (Tabla 1.1) (Bañón y Beviá, 2000).

Tipo de Suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien graduado	W
Arena	S	Pobrementemente graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcillos	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Límite líquido bajo (<50)	M

Tabla 1.1. Símbolos de grupos SUCS (Fuente: Bañón y Beviá, 2008).

Aunque pueden existir diferentes combinaciones de prefijos y sufijos que agrupan diferentes tipos de suelos (Tabla 1.2), se distinguen tres principales grupos (Bañón y Beviá, 2000):

- a) Suelos de grano grueso (G y S): Formados por gravas y arenas.
- b) Suelos de grano fino (M y C): Formados por suelos con al menos un 50% de contenido en limos y arcillas.
- c) Suelos orgánicos (O, Pt): Constituidos fundamentalmente por materia orgánica.

Símbolo	Características Generales		
GW		Limpias	Bien graduadas
GP	GRAVAS	(Finos <5%)	Pobremente graduadas
GM	(<50% EN TAMIZ 0.4 ASTM)	Con finos	Componente limoso
GC		(Finos >12%)	Componente arcilloso
SW		Limpias	Bien graduadas
SP	ARENAS	(Finos <5%)	Pobremente graduadas
SM	(<50% EN TAMIZ 0.4 ASTM)	Con finos	Componente limoso
SC		(Finos >12%)	Componente arcilloso
ML		Baja plasticidad	(LL <50)
MH	LIMOS	Alta plasticidad	(LL >50)
CL		Baja plasticidad	(LL <50)
CH	ARCILLAS	Alta plasticidad	(LL >50)
OL		Baja plasticidad	(LL < 50)
OH	SUELOS ORGÁNICOS	Alta plasticidad	(LL >50)
Pt	TURBA	Suelos altamente	orgánicos

Tabla 1.2. Clasificación SUCS (Bañón y Beviá, 2000).

Además de analizar las características físicas de los suelos para el estudio de inestabilidad de laderas, es de gran importancia conocer sus propiedades mecánicas, las cuales están tradicionalmente condicionadas por dos parámetros: la cohesión y el ángulo de fricción interna (Cassan, 1982):

1) Cohesión: Se define como la adherencia existente entre las partículas del suelo producida por la atracción entre ellas, en virtud de las fuerzas moleculares y las películas de agua, se mide en  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (Cassan, 1982).

2) Ángulo de fricción interna: es un parámetro de los suelos que está relacionado con el ángulo de reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de un conjunto material granular, influye en la resistencia y el nivel de deformación de los suelos cuando se les aplica una carga (Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez, 1996).

## 1.2 Métodos *in situ*

Estos métodos se utilizan principalmente en las primeras fases de un proyecto (Juárez y Rico, 1974), se definen como un conjunto de mediciones controladas por las condiciones naturales del terreno que desarrollan y formalizan algunos principios generales sobre la evolución de los materiales que conforman la superficie terrestre (Slaymaker, 1982). Cada uno de estos ensayos, se realiza con el objetivo de estudiar el comportamiento de diferentes propiedades físicas y mecánicas.

### *Ensayo de penetración estándar*

El penetrómetro estándar (Figura 1.2) es uno de los instrumentos más convencionales utilizado principalmente en la ingeniería geotécnica debido a su practicidad y antigüedad, sus inicios se remontan al año 1929 en Estados Unidos, sin embargo, fue en los Países Bajos en 1932 en donde se desarrolló (Cassan, 1982).

El ensayo consiste en medir la resistencia del suelo con la introducción de un tubo que se divide en dos partes para extraer la muestra, este se hunde mediante una fuerza vertical aplicada por un martillo y se registra el número de golpes realizados, al mismo tiempo que se extrae una muestra del suelo (Juárez y Rico, 1974).

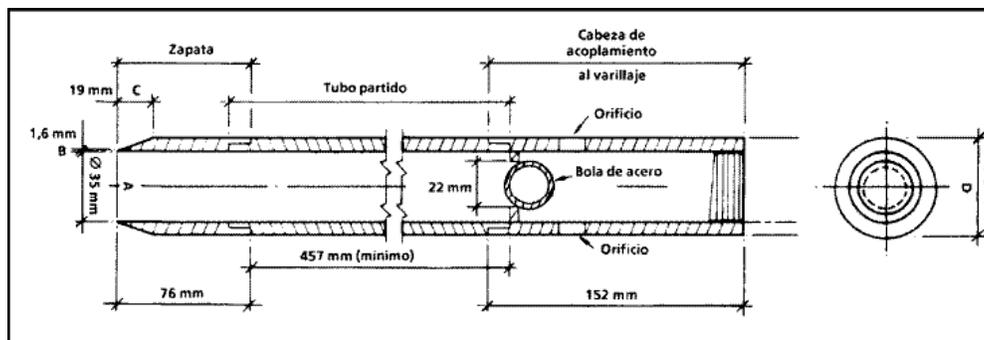


Figura 1.2. Penetrómetro estándar (Fuente: ASTM D 1586/84).

Esta prueba tiene diferentes métodos de acuerdo al tipo de penetrómetro utilizado, entre los más empleados están los siguientes:

- *Ensayo de penetración con cono dinámico*

Se utiliza para medir la resistencia de los materiales en función de la profundidad y velocidad de introducción de una varilla con ayuda de un martillo. Mediante un número de golpes necesario para perforar el terreno, se propaga una onda que registra la penetración alcanzada y la resistencia de la punta de la varilla (Caballero, 2001).

- *Ensayo de penetración con cono estático*

De acuerdo con Juárez y Rico (1974) estos penetrómetros constan de una varilla que se introduce a presión a través de un equipo de empuje formado por cilindros y gatos hidráulicos que proporcionan suficiente fuerza para perforar el terreno.

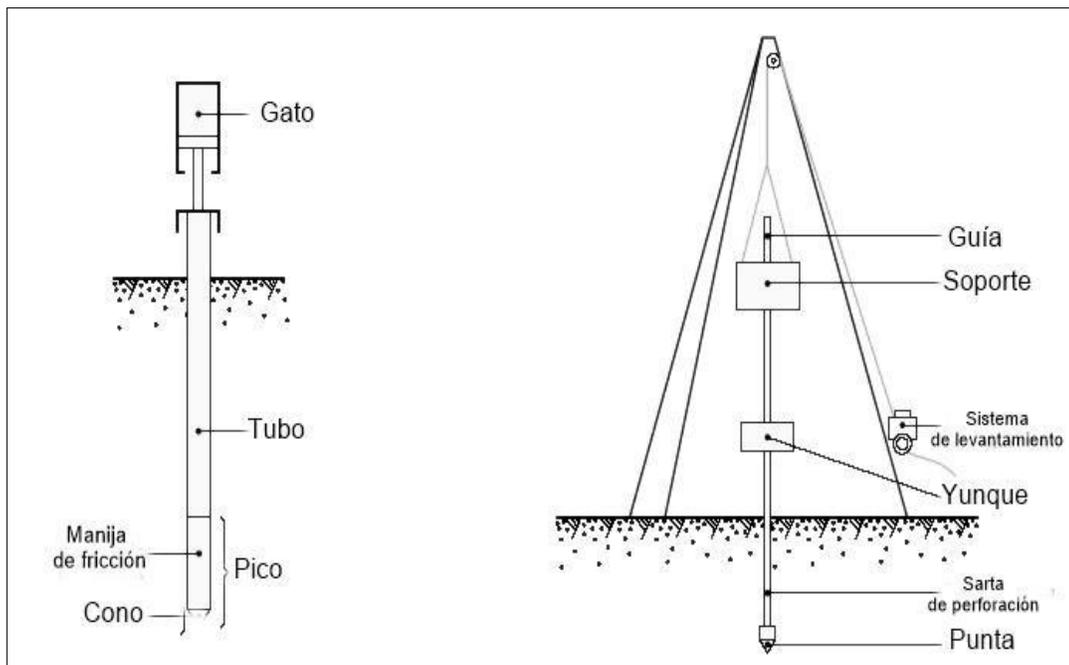


Figura 1.3. Penetrómetro estático y dinámico (Fuente: <http://www.lb.auf.org/kourdey/Reconnaissance.htm>).

Además de los penetrómetros que miden la resistencia del terreno, existen otras pruebas, a partir de las cuales (Tabla 1.3) se puede calcular y predecir el comportamiento del suelo ante diferentes condiciones, mediante prospecciones manuales o mecánicas (Cassan, 1982). Cada uno de estos ensayos tiene virtudes y desventajas que están determinadas por las condiciones naturales del terreno (Hauser, 1993).

Nombre	Descripción
Ensayo de Placa	Los ensayos de placa de carga permiten determinar las características de la resistencia y deformación del terreno. Consisten en colocar una placa sobre el suelo, y después se aplica una serie de cargas que miden las deformaciones. El resultado del ensayo se representa en un diagrama tensión deformación.
Veleta de campo	El ensayo de la veleta proporciona una medida directa <i>in situ</i> , de la resistencia al corte. El ensayo normalizado ASTM D2573 consiste en introducir el extremo de la varilla que se compone de un sistema de aspas, de dimensiones establecidas el cual, al girar en el suelo con una velocidad regular de 0.1°/seg corta el suelo; es útil para determinar la resistencia sin drenaje al esfuerzo cortante y la sensibilidad de suelos cohesivos.
Densidad del suelo (real y aparente)	Este método mide la densidad de partículas ( $pp$ ), también conocida como densidad real y densidad mineral, que es la relación entre la masa de suelo y el volumen de sólidos del suelo ( $pp = ms /vs$ ) y la densidad aparente ( $pa$ ) definida como la relación de la masa de suelo y el volumen total o sea el volumen de partículas más el espacio entre ellas (Alvarado, 2005).
Ensayo de Molinete	El ensayo de molinete, permite determinar la resistencia al corte mediante la torsión que se necesita para quebrantar el terreno a través de las aristas de la veleta sin drenaje particularmente en arcillas y limos blandos (IGME, 2006).
Inclinómetro de cuerda vibrante	Se emplea para identificar la potencial superficie de falla o de deslizamiento. Se trata de instrumentos electrónicos de alta sensibilidad que permiten conocer las deformaciones a profundidad de una ladera instrumentada (CENAPRED, 2012).

Tabla 1.3. Métodos geotécnicos.

## Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica ( $k$ ) se define como la velocidad del agua infiltrada en el suelo (Gómez *et al.*, 2008). Uno de los instrumentos más utilizados para medir esta propiedad *in situ*, es el permeámetro Guelph que alcanza hasta una profundidad de 2 m. El método consiste en excavar un agujero cilíndrico de radio y profundidad constante, en el cual se realizan ensayos de infiltración manteniendo la altura del agua dentro del mismo, lo que permite obtener el valor de  $k$  a partir de la relación entre el caudal infiltrado y el nivel de agua en el agujero. El equipo consta de dos tubos, uno que actúa como depósito de agua y otro de menores dimensiones que se pone en contacto con el suelo el cual permite mantener la carga hidráulica constante (Valdés y Cox, 2006).

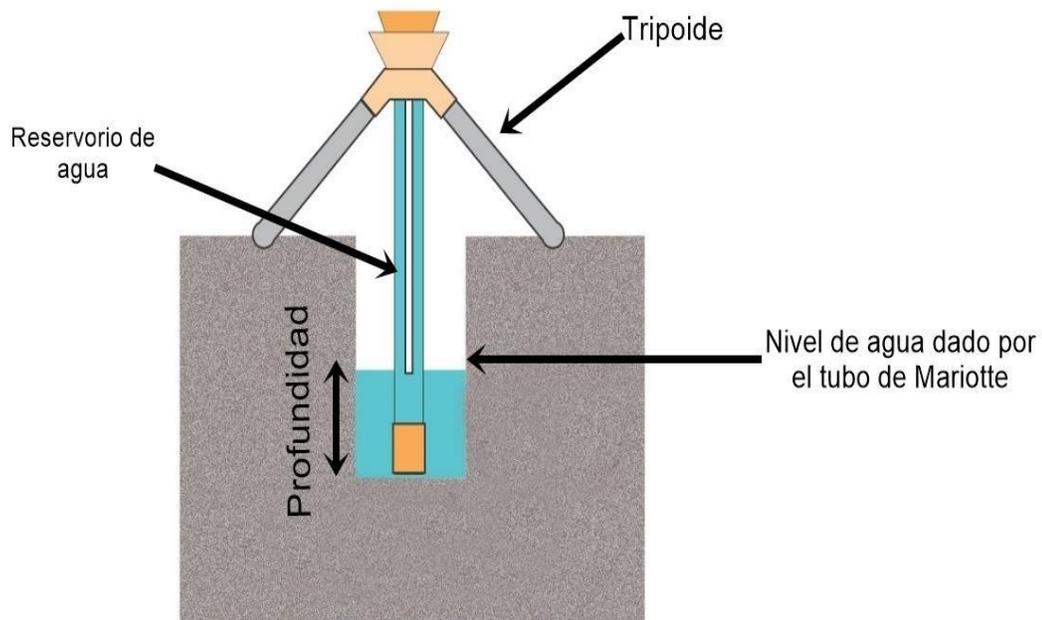


Figura 1.4. Esquema del permeámetro de Guelph (Fuente: <https://soilmoisture.files.wordpress.com/2013/05/guelph-h1.jpg>, adaptado de Valdés y Cox, 2006).

Cuando el permeámetro se encuentra instalado, el nivel del agua dentro de los tubos comienza a descender como producto de la infiltración, lo que permite determinar su velocidad mediante la escala en centímetros que mide el nivel de agua dentro del reservorio. Estos cálculos dependerán de la porosidad y permeabilidad del suelo, por lo que el ensayo puede variar en duración que va de una a dos horas (Valdés y Cox, 2006).

### *Métodos geofísicos*

Son utilizados para llevar a cabo ensayos en grandes extensiones de terreno y obtener datos de su estructura subterránea, son complemento de los métodos geotécnicos que se caracterizan por analizar los fenómenos en la superficie (Rico y Del Castillo, 1977). De acuerdo con Slaymaker (1982), los métodos geofísicos se dividen en 3 grupos:

- a) Métodos sísmicos: Estudian la propagación de ondas sísmicas en el terreno producidas artificialmente.
- b) Métodos eléctricos: Estudian la respuesta del suelo cuando se propagan corrientes eléctricas continuas.
- c) Métodos gravimétricos: Se basan en el estudio de la diferencia entre valores medidos del campo gravitatorio terrestre de un lugar y el valor de la anomalía gravimétrica.

### **1.3 Métodos de laboratorio**

Estos métodos sirven para cuantificar y establecer una división sistemática del suelo, en función a la similitud de sus características físicas y mecánicas (Bañón y Beviá, 2000). Para identificar las propiedades de un suelo en el laboratorio es fundamental contar con muestras representativas, por lo que realizar un muestreo adecuado en campo es de gran importancia, ya que tiene el mismo valor que el de los ensayos mismos (Villalaz, 2004).

Las muestras pueden ser de dos tipos: alteradas o inalteradas. Una muestra alterada es aquella que no cuenta con las mismas características *in situ*. Cuando se califica una muestra como inalterada, generalmente se asume que el grado estructural de deformación es mínimo, así que sus propiedades son considerablemente representativas de las características del terreno (ASTM, 1971). El muestreo siempre elimina la sobrecarga de las muestras tomadas, causando que se expandan, el disturbio ocasionado por este factor no se puede remediar al realizar un muestreo en campo, por lo tanto no se puede obtener una muestra totalmente inalterada (Villalaz, 2004).

#### *Contenido de humedad*

El contenido natural de agua de muestras de suelo recolectadas y llevadas al laboratorio, puede afectar profundamente los resultados de los análisis subsecuentes, ya que si se almacenan por un largo periodo de tiempo los especímenes perderán paulatinamente esta propiedad y los ensayos se basarán en aproximaciones (Carter y Gregorich, 2007).

Para el conocimiento del contenido de humedad del suelo ( $w$ ) existen métodos gravimétricos, densimétricos y eléctricos. Un método gravimétrico ampliamente utilizado es el de desecación en la horno, que consiste en pesar e introducir en el horno durante 24 horas

alrededor de 100°-110°C muestras representativas de suelo para calcular el nivel de agua perdido por evaporación, dando un nuevo peso en seco (Rascón, 2005). Sin embargo, este método altera las propiedades biológicas del suelo eliminando algunos constituyentes orgánicos, modificando la parte sólida del material granular (Carter y Gregorich, 2007).

### *Granulometría*

El análisis granulométrico de un suelo tiene por finalidad determinar la proporción de sus diferentes elementos constituyentes, y clasificarlos en función de su tamaño (Editores Técnicos y Asociados, 1975). Existen diversos métodos para determinar ésta propiedad, sin embargo, los más utilizados son los siguientes:

1) *Granulometría por tamizado*. Este ensayo consiste en pasar el suelo a través de tamices que son una serie de recipientes cilíndricos con bases de enrejado de alambre de distinto tupido (Tabla 1.4), sirven para seleccionar los tamaños, por medio del entramado o rejilla de aberturas distintas y normalizadas (Caballero, 2001), en cada tamiz se retienen aquellas partículas cuyo tamaño es superior a la luz de la malla, es decir la distancia del lado de cada cuadrado libre que forma el tejido de una malla cuadrada, o el diámetro de los orificios de una plancha cribada con agujeros circulares (Núñez, 2008). El peso del suelo retenido se relaciona al peso total del suelo tamizado (Editores Técnicos y Asociados, 1975).

Abertura en mm	USA standard ASTM E 11-61	Número mesh de Tyler (mesh/ in.)	British standard (mesh/ in.)
0.037	400	400	-
0.044	325	325	-
0.045	-	-	350
0.053	270	270	300
0.063	230	250	240
0.074	200	200	-
0.075	-	-	200
0.088	170	170	-
0.090	-	-	170
0.105	140	150	150
0.125	120	115	120
0.149	100	100	-
0.150	-	-	100
0.177	80	80	-
0.180	-	-	85
0.210	70	65	72
0.250	60	60	60
0.297	50	48	-
0.300	-	-	52
0.354	45	42	-
0.355	-	-	44
0.420	40	35	35
0.500	35	32	30
0.595	30	28	-
0.600	-	-	25
0.707	25	24	-
0.710	-	-	22
0.841	20	20	-
1.00	18	16	16
1.19	16	14	-
1.20	-	-	14
1.41	14	12	-
1.68	12	10	10
2.00	10	9	8

Tabla 1.4. Comparación entre abertura de malla (cuadrada) y el número mesh de los sistemas ASTM, Tyler y British Standard (Fuente: Núñez, 2008).

2) *Hidrómetro*. Este procedimiento define la distribución del tamaño de las partículas del suelo mediante sedimentación, la cual se mide a diferentes niveles de concentración del material granular en suspensión con ayuda del hidrómetro. Este instrumento fue graduado para indicar los gramos sólidos suspendidos por litro de agua a una temperatura dada (20°C) suponiendo una densidad de partículas de 2,65 g/ml (Forsythe, 1985).

La densidad de la fase líquida se ve afectada con las variaciones de temperatura y con la presencia de los agentes reactivos agregados para dispersar el suelo. Estos factores se pueden corregir determinando la lectura del hidrómetro (*RL*) y la temperatura de la solución de los agentes de dispersión. Si la temperatura varía durante la sedimentación se debe aplicar una corrección para el cambio en la densidad del agua (Forsythe, 1985).

Los resultados de ambas pruebas se llevan a una gráfica llamada curva granulométrica (Figura 1.5) sobre la cual se representa en el eje de las abscisas las dimensiones de las luces del tamiz según una escala logarítmica, y en las ordenadas los porcentajes del suelo que pasan por dicho tamiz (Editores Técnicos y Asociados, 1975).

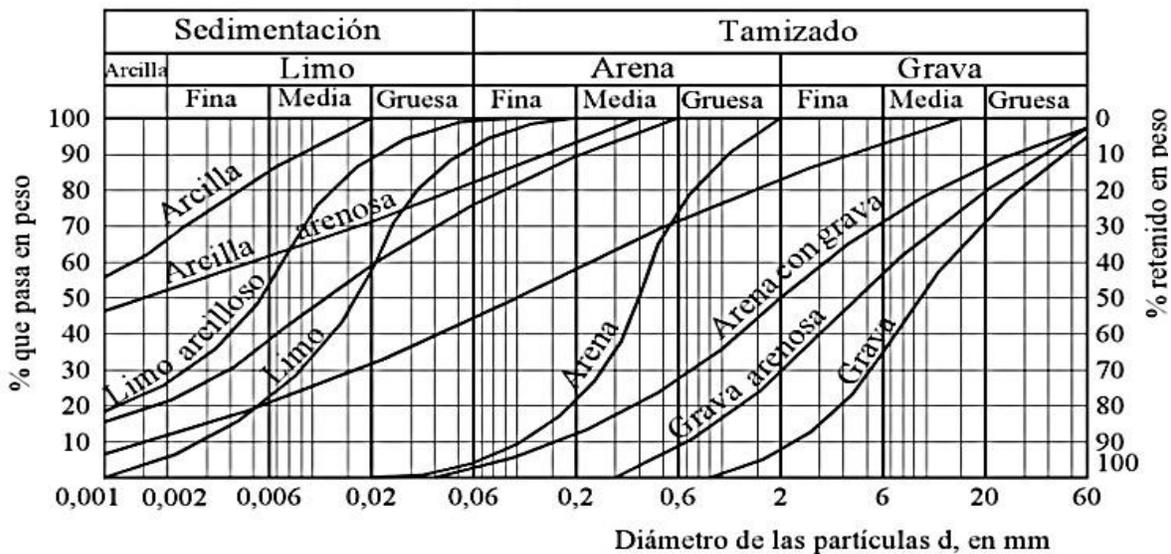


Figura 1.5. Ejemplos de curvas granulométricas mediante sedimentación y tamizado (Fuente: ASTM, 1991 adaptado por Caballero, 2001).

### *Límites de Atterberg*

Los límites de Atterberg o límites de consistencia de suelos de grano fino fueron desarrollados alrededor del año 1900 por el químico sueco Albert Mauritz Atterberg (Osorio, 2010a). Este método consiste en definir los límites de los tres estados físicos de un suelo: líquido, plástico y sólido. Estos se describen de la siguiente manera (Caballero, 2001):

- Límite líquido (WL) (LL): Se define como el contenido de humedad, en porcentaje respecto del peso de suelo seco según el cual, se considera que pasa de la consistencia plástica a la líquida.
- Límite plástico (WP) (LP): Contenido de humedad, expresado en porcentaje respecto al peso del suelo seco, por el cual el suelo deja de tener consistencia plástica.
- Límite de retracción (WG) (LR): Contenido de humedad del suelo en donde su color se torna más claro por perder agua, pero no se contrae.

Los valores resultantes, se relacionan con otros parámetros para distinguir diferentes comportamientos de los suelos de grano de fino (Caballero, 2001), los más utilizados son los siguientes:

- Índice de plasticidad:  $I_p = WL - WP$
- Índice de consistencia:  $B = IC = WL - W/I_p$
- Índice de fluidez:  $I_f = I_i = W - WP/I_p$

Existen dos principales métodos para determinar estos límites. El primero es el ensayo diseñado por Casagrande en 1932, quien estandarizó la versión de los límites de Atterberg con el fin de que operarios de diferentes países obtuvieran valores similares diseñó un dispositivo conocido actualmente como Copa de Casagrande. Por otro lado, la segunda técnica que se utiliza para calcular estos parámetros es la del llamado Cono de Caída, del cual se hablará más adelante. Ambas pruebas se realizan con suelo fino, es decir material granular que pase por el tamiz No.40 (Osorio, 2010a).

*Copa de Casagrande.* Este dispositivo es el más utilizado para la determinación de los límites de Atterberg (Figura 1.6), por su relativa practicidad lo utilizan en sus estandarizaciones numerosas organizaciones entre ellas la ASTM, la cual ha establecido algunas dimensiones y normas para el adecuado manejo del dispositivo (ASTM, 1991).

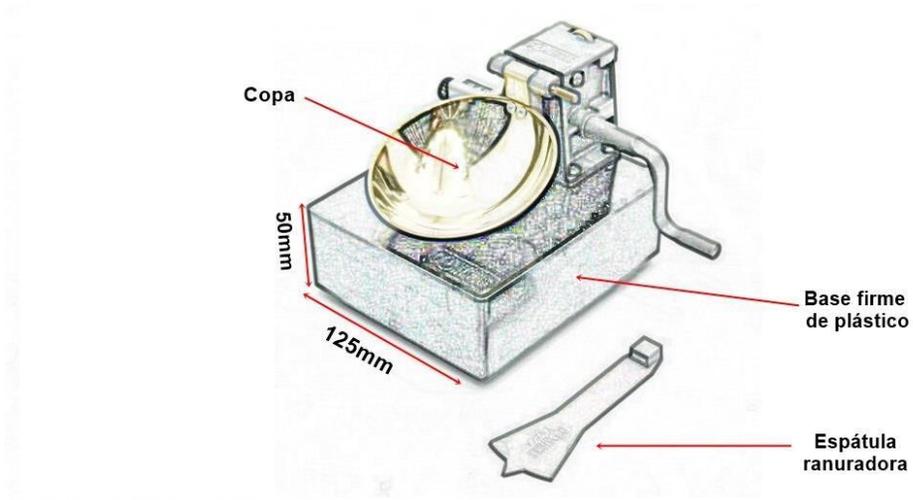


Figura 1.6. Copa de Casagrande para definir el límite líquido (Fuente: [www.utest.com.tr](http://www.utest.com.tr) adaptado de ASTM D 423 y Osorio, 2010b).

En el ensayo realizado con la copa de Casagrande, la muestra de suelo se mezcla con agua formando una pasta homogénea, se coloca un poco en la copa y se dibuja una línea vertical que divide la muestra en dos partes iguales con ayuda de una espátula ranuradora, posteriormente el operador gira la manivela del dispositivo que levanta 10 mm la copa, y empieza a dar 2 golpes por segundo hasta que la ranura se cierre (Figura 1.7); ésta acción se repite con diferente contenido de agua en la muestra en un rango de 40 a 4 golpes. El límite líquido se define con el cierre de la ranura después de haberlo dejado caer 25 veces la copa. Si los resultados de cada prueba son consistentes, se obtiene una muestra de suelo del material utilizado y se mete al horno para determinar su contenido de agua (Smith y Mullins, 1991).

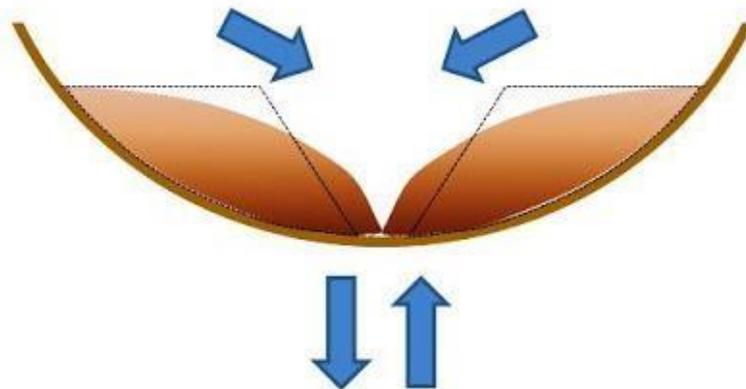


Figura 1.7. Deslizamiento de un suelo en el límite líquido (Fuente: Osorio, 2010b).

*Determinación del límite plástico.* Para determinar el límite plástico, la fracción de suelo que pasa por el tamiz No. 40 (# 0.42 ASTM), se amasa para formar cilindros de 10 mm de

largo y 5 mm de diámetro, cuando el material empieza a fracturarse se rueda entre la palma de la mano en una superficie lisa que no absorba humedad, se realizan mínimo dos cilindros y posteriormente se colocan en el horno a 100°C para determinar su contenido de humedad (Caballero, 2001).

Casagrande desarrolló un diagrama para registrar los resultados obtenidos en donde se clasifica al suelo analizado, relacionando el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP) (Caballero, 2001). En este diagrama, conocido actualmente como la “Carta de Casagrande”, destacan dos líneas principales que actúan a modo de límites, la línea A separa a los limos de las arcillas, mientras que la línea B separa a los suelos de alta y baja plasticidad (Figura 1.8).

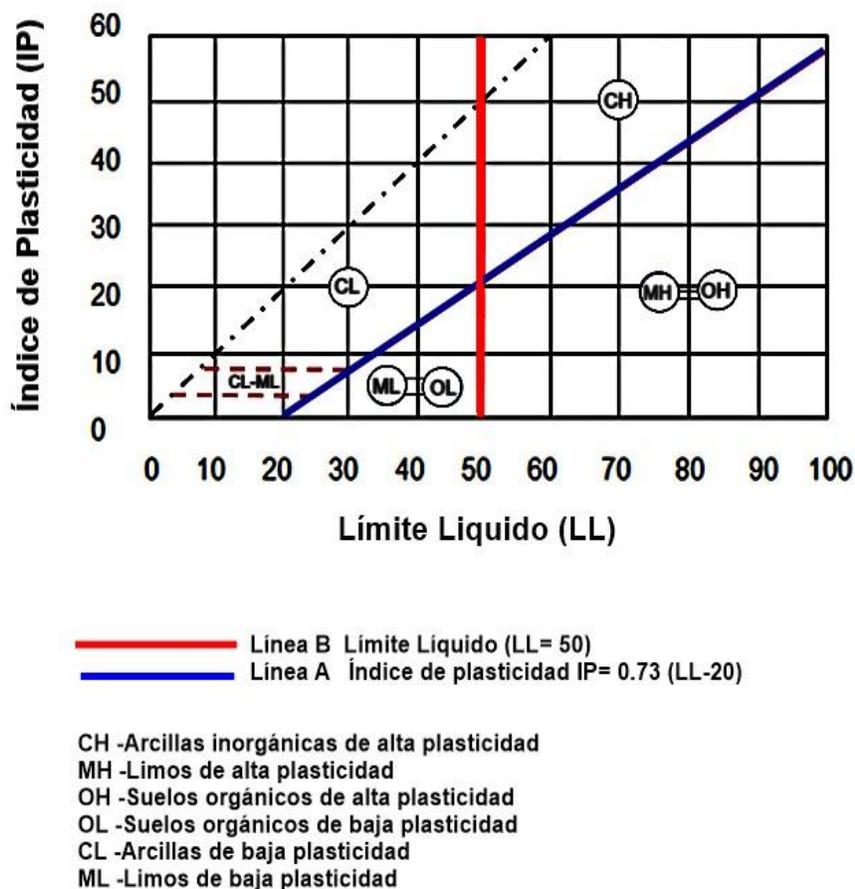


Figura 1.8. Gráfica de plasticidad de Casagrande (Fuente: Terzaghi, *et al.*, 1996; Bañón y Beviá, 2000; Clasificación SUCS).

Casagrande no estaba satisfecho con el instrumento que había creado para determinar el límite líquido, ya que los resultados variaban mucho en función del operador, por lo que

consideró que un ensayo de penetración podría resultar más exacto. Tras probar con varios métodos, los científicos Sherwood y Ryley concluyeron que un método desarrollado por un laboratorio en Francia, ofrecía la posibilidad de determinar el límite líquido (Smith y Mullins, 1991).

El desarrollo de este método se considera más fácil de realizar que el método de Casagrande, además se aplica en una amplia gama de suelos, es menos dependiente del diseño del aparato y menos susceptible a los errores del operador. Después de que fue probado por Sherwood y Ryley, el nuevo método denominado Cono de Caída (Figura 1.9), fue adaptado por la BSI en el Reino Unido, sin embargo, no ha sido ampliamente aprobado por la ASTM (Smith y Mullins, 1991).

En esta prueba la muestra de suelo se prepara de la misma forma que en el método de Casagrande, solo que se coloca en un contenedor de 50 mm de profundidad por 55 mm de diámetro. El suelo se coloca en su interior con una espátula para asegurar que no quede aire dentro, posteriormente el cono se baja hasta que toca la superficie de la muestra, y después se deja caer por 5 segundos en el centro del contenedor y se mide en milímetros el nivel de penetración (Smith y Mullins, 1991).

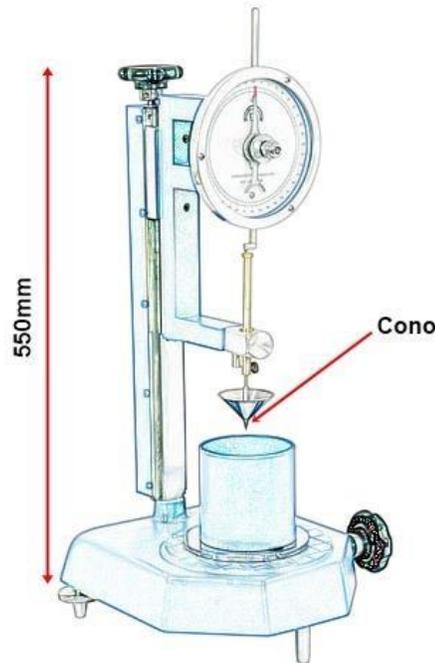


Figura 1.9. Diagrama del cono de caída

(Fuente: [http://www.testinglabequipments.com/product- details/cone-penetrometer-228.html](http://www.testinglabequipments.com/product-details/cone-penetrometer-228.html), adaptado de Osorio, 2010b).

Se realiza este procedimiento varias veces con diferente contenido de agua en la mezcla, finalmente los resultados del límite líquido, se gráficán para obtener una línea horizontal que indica los resultados (Figura 1.10).

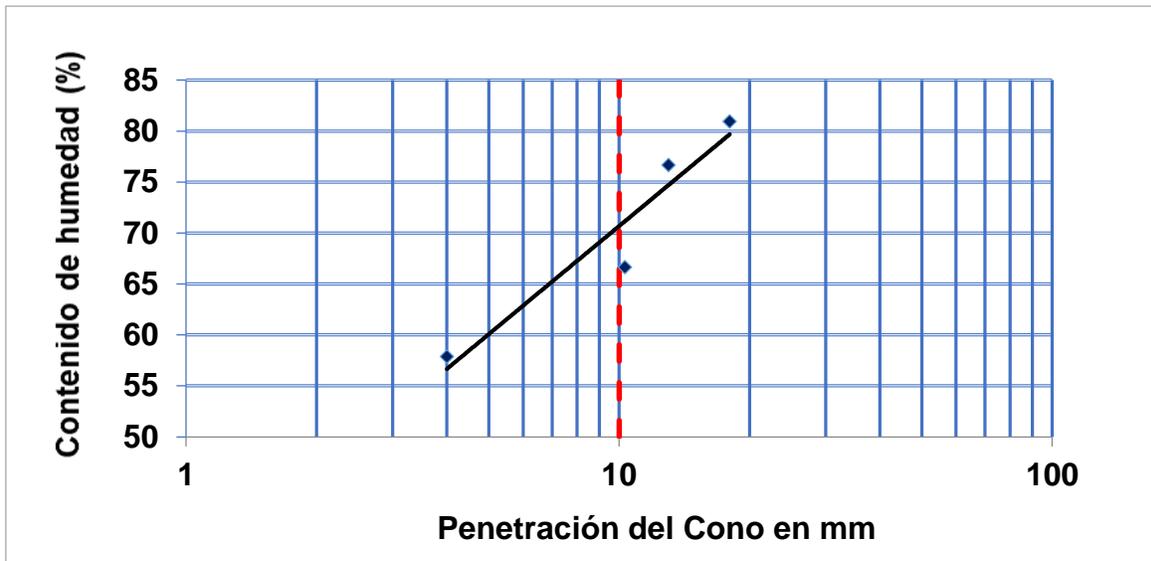


Figura 1.10. Ejemplo de diagrama para el registro de los resultados del cono de caída (Fuente: adaptado de Smith y Mullins (1991); Osorio, 2010b).

### *Prueba de compresión triaxial*

Este método determina la relación de la fuerza y la deformación por tensión de una muestra cilíndrica de suelo mediante la teoría del esfuerzo cortante, la cual estudia el comportamiento de materiales granulares bajo la acción de ciertas cargas, explica su resistencia interna sujeta a tensiones paralelas a su sección transversal (Figura 1.11) por medio del cálculo de la cohesión  $c$  y el ángulo de fricción interna  $\phi$  (Villalaz, 2004).

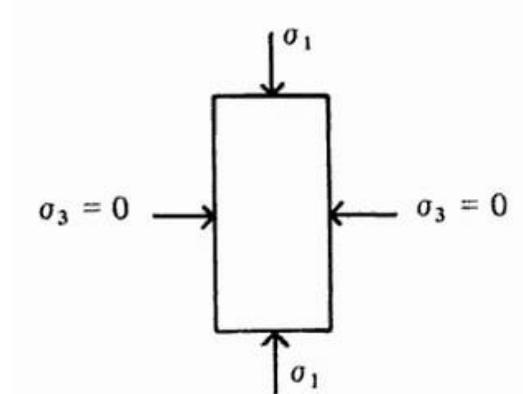


Figura 1.11. Aplicación de tensiones paralelas a la sección transversal de una muestra de suelo (Fuente: Villalaz, 2004).

Para realizar este ensayo, se utilizan muestras cilíndricas de suelo que van de los 38 mm a 100 mm de diámetro. Pueden ser inalteradas o reconstruidas, es decir, cuando se utiliza una muestra alterada disgregada pero se compacta en forma cilíndrica, para este caso se tiene que tomar en cuenta el contenido de humedad de agua perdido. Las dimensiones del espécimen dependerán de la base de la cámara triaxial en donde se vaya a realizar el test (M. Grogger, comunicación personal, julio 2015).

Las ventajas que tiene sobre otros métodos incluyen la habilidad de controlar el drenado de la muestra, tomar mediciones de las presiones del poro de agua y calcular otros parámetros como el índice de compresibilidad  $C_c$ , y la permeabilidad  $k$  (Juárez y Rico, 1974).

En esta prueba la muestra cilíndrica se cubre con una membrana de látex dentro de una cámara a presión, la parte superior e inferior de la muestra tiene discos porosos, los cuales se conectan al sistema de drenaje para saturar o drenar el espécimen, generalmente varían las presiones actuantes en tres direcciones ortogonales sobre la muestra de suelo, efectuando mediciones sobre sus características mecánicas en forma completa (Salas, 2011). Existen tres tipos de pruebas triaxial (ASTM):

*Ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU, Unconsolidated Undrained test):* Este ensayo es el más simple y rápido de los tres. En el mientras la muestra de suelo está en la éfase de carga, se puede registrar y controlar el estrés total. Esto permite que se pueda determinar la resistencia al corte sin drenaje, lo cual permite conocer la estabilidad del suelo a corto plazo.

*Ensayo triaxial consolidado no drenado (CU, Consolidated Undrained test):* Esta prueba es la más común de realizar. A partir de ella se calculan los parámetros de resistencia basados en el estrés efectivo, lo que permite una velocidad más rápida en la falla de cizallamiento comparado con los otros métodos. Esto se logra mediante el registro del cambio de la presión del poro dentro de la muestra.

*Ensayo triaxial consolidado drenado (CD, Consolidated Drained test):* El ensayo triaxial consolidado drenado permite describir el proceso de carga a largo plazo, provee parámetros de resistencia determinados bajo un control efectivo del estrés aplicado. Es el más tardado de los tres y puede involucrar un tiempo considerable si se realiza con suelos cohesivos puesto que la falla de cizallamiento debe ser a menor velocidad para que se realicen cambios en la presión del poro.

La muestra de suelo sometida al esfuerzo cortante produce un desplazamiento de sus partículas entre sí o de una parte de la masa del suelo con respecto al resto del mismo (Villalaz, 2004). Al final de la prueba se pueden apreciar diferentes comportamientos del espécimen de acuerdo con su estructura granular (Tabla 1.5).

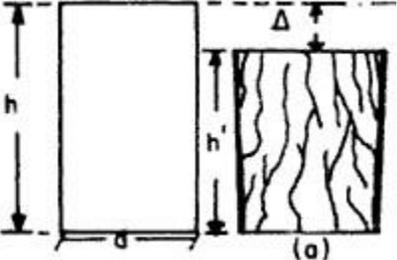
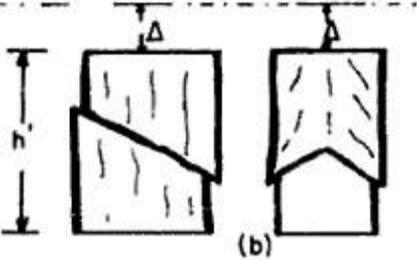
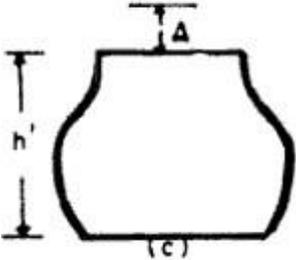
Tipos de desplazamiento	Características
	<p>Separación de las partículas del suelo, generada por la falta de cohesión o la perturbación por la influencia de algún fluido.</p>
	<p>La masa de suelo se desliza a lo largo de líneas de rotura.</p>
	<p>Cuando el material granular es plástico se produce una fluencia plástica, es decir, una deformación producida por el debilitamiento del suelo superior al límite elástico del material.</p>

Tabla 1.5. Tipos de desplazamiento de una muestra de suelo sometida a un esfuerzo cortante (Fuente: Villalaz, 2004).

El análisis se ilustra con el círculo de Mohr, el cual representa gráficamente el estado de tensiones en la muestra y permite calcular su nivel de deformación. De igual manera, se determinan con un bajo índice de error las propiedades principales de resistencia que son la cohesión y el ángulo de fricción interna del material (Caballero, 2001).

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA: CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EN LA AURORA

### 2.1 Identificación de los sitios muestreados en campo

Como se planteó en la introducción de la presente tesis, con el objetivo de caracterizar los materiales de zonas potencialmente inestables en La Aurora, se llevaron a cabo pruebas *in situ* y en laboratorio. En los siguientes apartados se explica a detalle el procedimiento realizado.

Para llevar a cabo los ensayos en laboratorio, se realizaron previamente tres salidas al campo para la recolección de muestras de seis diferentes puntos en La Aurora durante los siguientes periodos: 11-16 de mayo del 2015, 12-14 de septiembre del 2015 y del 21-24 de junio del 2016 (Figura 2.1).

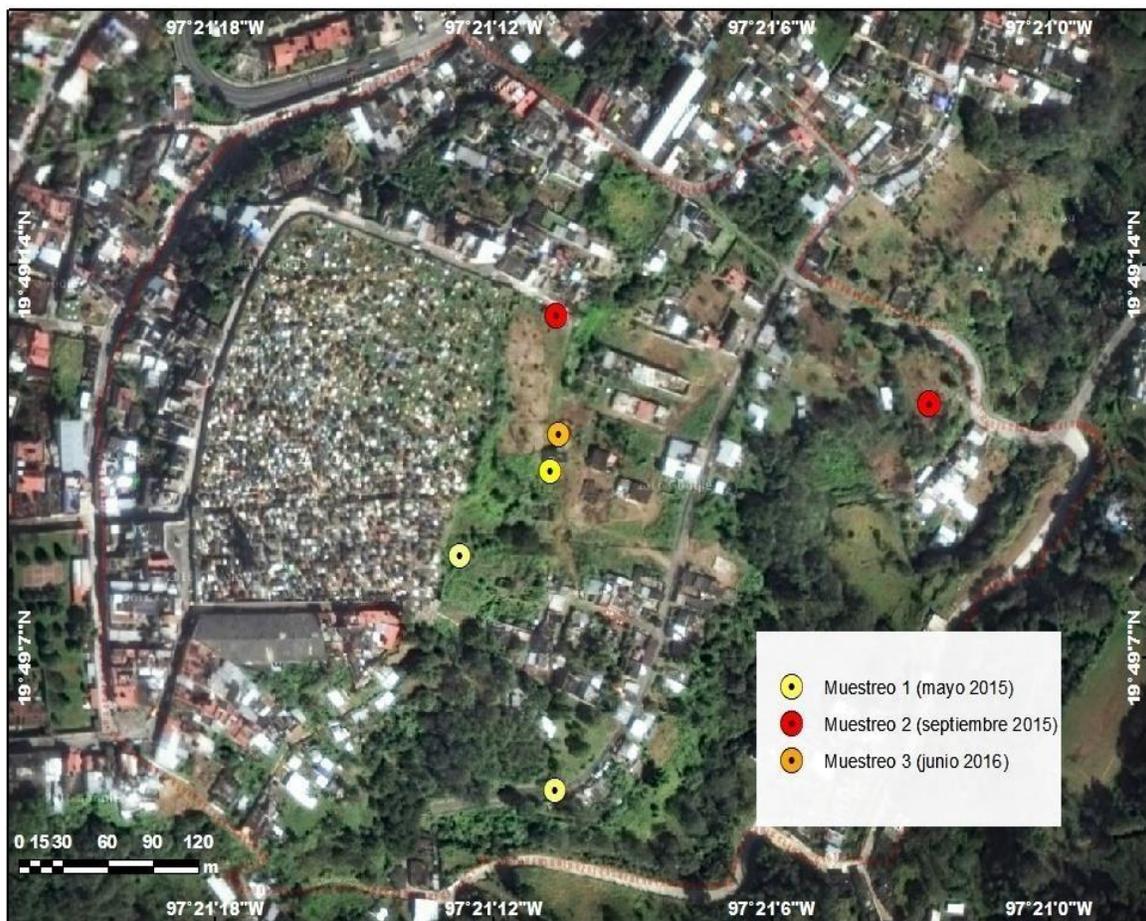


Figura 2.1. Sitios muestreados en la salidas de campo.

a) *Obtención de muestras*

En el mes de mayo del año 2015 se recolectaron 20 muestras de suelo alteradas y 20 inalteradas de tres lugares clave cercanos al deslizamiento de La Aurora (Tabla 2.1); éstas muestras fueron extraídas y empaquetadas en cilindros de acero de 10 cm de altura por 8.8 cm de diámetro, se sellaron con una mezcla de cera y parafina (Figura 2.2). Posteriormente se envolvieron en plástico y cinta con la finalidad de mantener las condiciones originales del suelo y su contenido de humedad. Durante todo el proceso se mantuvieron los especímenes cilíndricos en posición vertical para no alterar su estructura *in situ*.

Clave	Profundidad (cm)	Tipo	Tipo
M1	60-80	inalterada	alterada
M3	110-112	inalterada	alterada
M5	190-200	inalterada	alterada
M7	130-140	inalterada	alterada
M9	160-170	inalterada	alterada
M11	250-260	inalterada	alterada
M13	120-130	inalterada	alterada
M15	210-220	inalterada	alterada
M17	270-280	inalterada	alterada
M19	340-350	inalterada	alterada
M2	60-80	inalterada	alterada
M4	110-112	inalterada	alterada
M6	190-200	inalterada	alterada
M8	130-140	inalterada	alterada
M10	160-170	inalterada	alterada
M12	270-280	inalterada	alterada
M14	120-130	inalterada	alterada
M16	210-220	inalterada	alterada
M18	270-280	inalterada	alterada
M20	340-350	inalterada	alterada

Tabla 2.1. Total de muestras obtenidas en la primera salida al campo del 11 al 15 de mayo del 2015.



Figura 2.2. Obtención de muestras inalteradas para el ensayo triaxial.

De manera adicional se recolectaron diez muestras alteradas de suelo y fueron empaquetadas en plástico adhesivo y bolsas. En total, las 20 muestras se envolvieron en plástico burbuja y se pusieron en cajas de cartón para ser enviadas al Instituto de Geotecnia de la Universidad BOKU en Viena, Austria (*Universität für Bodenkultur Wien*) para ser analizadas.

Posteriormente en el mes de septiembre de 2015 se recolectaron 15 muestras de tres lugares cercanos a la Aurora (Tabla 2.2). En esta ocasión, las muestras se obtuvieron con cilindros de plástico de 300 mm de altura por 10 mm de diámetro. De ésta forma, ocho cilindros de plástico fueron enviados al Instituto de Geotecnia de la Universidad de BOKU para ser ensayados en la cámara triaxial, mientras que las muestras alteradas fueron analizadas en el laboratorio de mecánica de suelos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), en donde se llevaron a cabo los ensayos de granulometría por mallas y límites de Atterberg.

Clave	Profundidad (cm)	Tipo
M1Aa	300	alterada
M2Aa	300	alterada
M3Aa	300	alterada
M4Aa	300	alterada
M5Aa	300	alterada
M1Ba	250	alterada
M2Ba	250	alterada
M3Ba	250	alterada
M4Ba	250	alterada
M5Ba	250	alterada
M1Ca	236	alterada
M2Ca	236	alterada
M3Ca	236	alterada
M4Ca	236	alterada
M5Ca	236	alterada
M1A	300	inalterada
M2A	300	inalterada
M3A	300	inalterada
M4A	300	inalterada
M5A	300	inalterada
M1B	250	inalterada
M2B	250	inalterada
M3B	250	inalterada
M4B	250	inalterada
M5B	250	inalterada
M1C	236	inalterada
M2C	236	inalterada
M3C	236	inalterada
M4C	236	inalterada
M5C	236	inalterada

Tabla 2.2. Total de muestras obtenidas en la segunda salida al campo del 12 al 14 de septiembre del 2015.

Posteriormente en junio del 2016 se recolectaron siete muestras alteradas (Tabla 2.3) de un perfil de suelo ubicado en la ladera posterior al Panteón Municipal, junto a la caseta de monitoreo del CENAPRED (Figura 2.3) para ser ensayadas en el laboratorio de mecánica de suelos de dicha institución.

Clave	Profundidad (cm)	Tipo
A	0-40	alterada
AB	40-60	alterada
BA	60-94	alterada
B1	94-121	alterada
B2	121-160	alterada
B3	164-203	alterada
BCx	203-213	alterada

Tabla 2.3. Total de muestras obtenidas en la tercera salida al campo el 22 de junio del 2016.

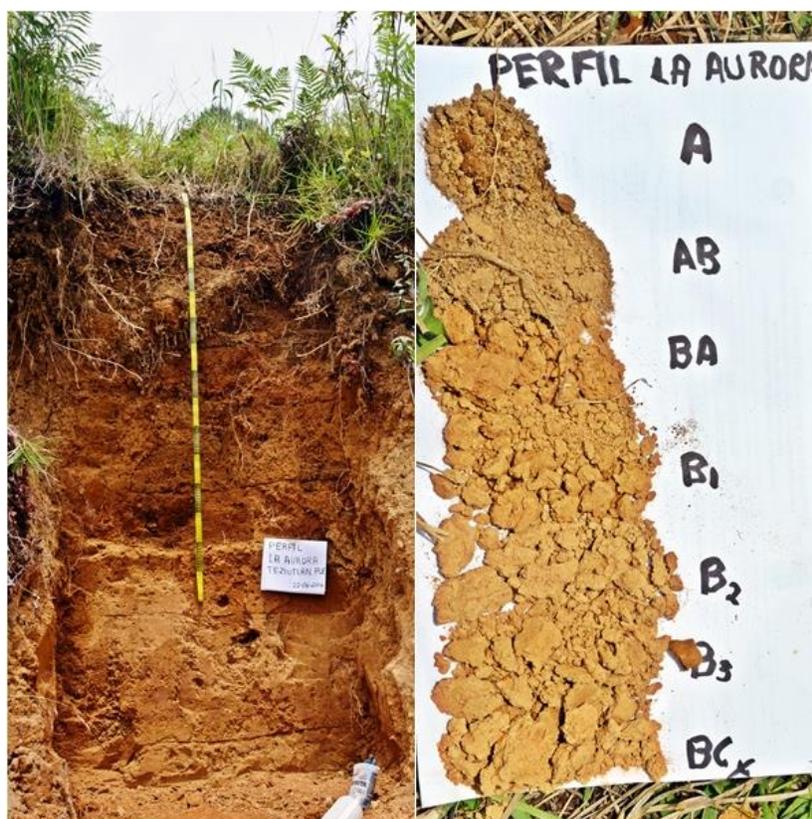


Figura 2.3. Perfil de suelo utilizado para el muestreo y sus horizontes (Fotografías proporcionadas por M. Ramírez Beltrán).

## 2.2 Realización de ensayos *in situ*

### *Prueba de conductividad hidráulica con el Permeámetro de Guelph*

Se realizaron tres pruebas *in situ* de conductividad hidráulica en los puntos A, B y C (Figura 2.4) con el permeámetro de Guelph.



Figura 2.4. Sitios en donde se realizaron las pruebas de conductividad hidráulica.

### Materiales

- 1.- Equipo: Permeámetro de Guelph  
Marca: Royal Eijkelkamp Company  
Modelo: 2800 (Figura 2.5)
- 2.- Agua
- 3.- Barrena
- 4.- Formato de registro



Figura 2.5. Permeámetro de Guelph utilizado (Fotografía proporcionada por R.Garnica).

Se utilizaron los dos reservorios de agua para realizar ésta prueba por lo que el descenso del nivel del agua en el permeámetro fue mayor.

#### Método

1.- Se excava un agujero cilíndrico con ayuda de una barrena de 12 cm de profundidad y 6 cm de diámetro, con el fin de que la altura del nivel de agua tenga una medida constante.

2.- Se instala el permeámetro en el agujero apoyándose en el tripoide, procurando que no dañe las paredes del mismo.

3.- Se llenan los dos reservorios con agua a través del tapón de goma superior, en donde el nivel del agua de los reservorios tiene que superar más de la mitad de estos.

4.- Con el tapón de goma se tapa el reservorio exterior y se levanta el tubo de Mariotte hasta el número cero y se cubre con el tapón de goma la entrada del agua del reservorio exterior.



7.- Se determinan los valores R1 (*first reading*) que fueron los registros con el intervalo de tiempo de dos minutos y R2 (*second reading*) los de un minuto:

$$R1 = (\text{tasa de infiltración}) / 60 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm/sec}$$

$$R2 = (\text{tasa de infiltración}) / 60 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm/sec}$$

8.- Se calcula la conductividad hidráulica saturada *in situ* ( $K_{fs}$ ) es decir, la velocidad del agua que pasa por el suelo, con la siguiente fórmula:

$$K_{fs} = [(0.0041) (x) (R2) - (0.0054) (y) (R1)]$$

En donde “y” es nivel constante del cambio de agua en el reservorio de la primera lectura, mientras que “x” corresponde al de segunda lectura.

9.- Se clasifican los resultados con base en las siguientes tablas:

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Conductividad</b>
<b>Grava limpia</b>	1 a 100
<b>Arena y grava mezclada</b>	10 <sup>-2</sup> a 10
<b>Arena gruesa limpia</b>	10 <sup>-2</sup> a 1
<b>Arena fina</b>	10 <sup>-2</sup> a 10 <sup>-1</sup>
<b>Arena limosa</b>	10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-2</sup>
<b>Arena arcillosa</b>	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-2</sup>
<b>Limo</b>	10 <sup>-8</sup> a 10 <sup>-2</sup>
<b>Arcilla</b>	10 <sup>-10</sup> a 10 <sup>-6</sup>

Tabla 2.4. Valores típicos de la conductividad hidráulica (Coduto, 1999).

<b>Grado de permeabilidad</b>	<b>Conductividad hidráulica cm/seg</b>
<b>Elevada</b>	Superior a 10 <sup>-1</sup>
<b>Media</b>	10 <sup>-1</sup> a 10 <sup>-3</sup>
<b>Baja</b>	10 <sup>-3</sup> a 10 <sup>-5</sup>
<b>Muy baja</b>	10 <sup>-5</sup> a 10 <sup>-7</sup>
<b>Prácticamente impermeable</b>	Menor de 10 <sup>-7</sup>

Tabla 2.5. Grado de permeabilidad del suelo (Whitlow, 1994).

## 2.3 Realización de pruebas en laboratorio

Con el propósito de identificar los materiales que conforman la ladera posterior del Panteón Municipal en la colonia la Aurora y analizar sus propiedades físicas, se realizaron los siguientes ensayos en laboratorio: contenido de humedad, granulometría por mallas y límites de Atterberg. Estas pruebas fueron realizadas en el Instituto de Geotecnia de la Universidad de BOKU y en el laboratorio de mecánica de suelos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

### *a) Contenido de humedad*

La prueba para determinar el contenido de humedad es la primera que se debe realizar en el laboratorio antes de que las muestras pierdan su contenido natural de agua con el tiempo. El método que se utilizó se basa en la pérdida de peso de la muestra por secado en horno. A continuación se describe el método empleado:

#### Materiales

- 1.- 100gr de suelo
- 2.- Horno a 100°C
- 3.- Balanza analítica
- 4.- Contenedores de vidrio
- 5.- Marcador indeleble
- 6.- Cinta adhesiva
- 7.- Formato de registro

#### Método

1.-Con cinta y plumón indeleble, se anota la clave correspondiente del número de muestra a ensayar en el contenedor de vidrio, se pesa en la balanza y se registra su peso en el formato de registro (Figura 2.7).

**CENAPRED**  
 Área de Ing. Estructural y Geotecnia  
 Laboratorio de Dinámica de Suelos

**FORMATO DE REGISTRO**  
**PRUEBA DE CONTENIDO DE HUMEDAD**

CÉFA: \_\_\_\_\_  
 LOCALIZACIÓN: \_\_\_\_\_  
 SONDEO No.: \_\_\_\_\_ ENSAYE No.: \_\_\_\_\_  
 MUESTRA No.: \_\_\_\_\_ PROF. (ms. ): \_\_\_\_\_  
 DESCRIPCIÓN: \_\_\_\_\_  
 FECHA: \_\_\_\_\_  
 OPERADOR: \_\_\_\_\_  
 CÁLCULO: \_\_\_\_\_

CLAVE DE LA MUESTRA	PESO DEL CONTENEDOR ( MC)	PESO DEL SUELO HÚMEDO (M1)	PESO DEL SUELO SECO (M2)	CONTENIDO DE HUMEDAD (W%)

FÓRMULA:  

$$W\% = \frac{MW}{MS} (100) = \frac{m1 - m2}{m2 - mc} (100)$$

Figura 2.7. Formato de registro para el cálculo del contenido de humedad.

2.- Se colocan 100 gr de una muestra representativa de suelo y después se registra su peso en el formato, cuando se trabaja con una muestra menor a 200 gr como fue el caso de este ensayo no es apropiado incluir las gravas de gran tamaño, por lo que se excluyen de la muestra.

3.- Después de pesar la muestra, se coloca en el horno durante 24 hrs a 100°C, y finalmente se pesa de nuevo tras haber perdido su contenido de agua natural por evaporación, y se anota el peso del suelo seco en el formato de registro.

4.- Una vez que se tiene el formato de registro con todos los datos, se calcula el contenido de humedad con la siguiente fórmula:

$$W \% = MW/MS (100)$$

En donde MW (*Mass of water*) es la diferencia del peso del suelo húmedo ( $m_1$ ) y el peso del suelo seco ( $m_2$ ), mientras que MS (*Mass of soil*) es la diferencia del peso del suelo seco ( $m_2$ ) menos el peso del contenedor ( $m_c$ ). De tal forma que la fórmula despejada queda:

$$W\% = MW / MS (100) = m_1 - m_2 / m_2 - m_c (100)$$



Figura 2.8. Procedimiento para calcular el contenido de humedad.

### *b) Granulometría por mallas*

Después de haber obtenido el contenido de humedad de las muestras de suelo, para realizar este ensayo es necesario contar con muestras de suelo seco para facilitar su paso por los tamices y que no se obstruyan las mallas de luz, con el fin de que el suelo retenido en cada tamiz represente la composición granulométrica y no se pierda material en el proceso, alterando el resultado final.

#### Materiales

- 1.- Brocha
- 2.- Cepillo

- 3.- Tamices (No. 20, 40, 60, 100 y 200 de acuerdo a la norma ASTM)
- 4.- Mortero
- 5.- Recipiente de Vidrio
- 6.- Formato de registro
- 7.- 100gr de suelo

#### Método

1.- Con el cepillo se limpian los tamices para que no queden residuos en los orificios de las mallas e intervengan con el porcentaje del peso retenido en la malla. Posteriormente se ordenan los tamices de menor a mayor tamaño de abertura (No. 20 al No.100) (Figura 2.9).



Figura 2.9. Orden de los tamices para la prueba de granulometría por mallas.

2.- Se pesan 100 gr de suelo seco contemplando el peso del recipiente y se anota el peso total en la hoja de registro (Figura 2.10).

Sitio: _____	<b>CENAPRED</b>
Muestra: _____	Área de Ing. Estructural y Geotecnia
Localización: _____	Laboratorio de Dinámica de Suelos
Ensayo: _____	<b>GRANULOMETRÍA</b>
Descripción: _____	<b>POR MALLAS</b>
Profundidad: _____	Fecha: _____
Peso de la Muestra: _____	Operador: _____
	Calculó: _____
	Revisó: _____

Malla No	Abertura mm	Peso suelo retenido g	Por ciento re- tenido parcia %	Por ciento re- tenido Acum %	Por ciento que pasa %
2"	50.8				
1 1/2"	36.1				
1"	25.4				
3/4"	19.05				
1/2"	12.7				
3/8"	9.53				
4	4.75				
10	2.00				
20	0.84				
40	0.42				
60	0.25				
100	0.149				
200	0.074				
Pasa 200					
Suma					

Figura 2.10. Formato de registro para la prueba de granulometría.

3.- Una vez que el suelo se pesó, se vacían los 100 gramos de suelo en los tamices y se dispersan con ayuda de la brocha para que descendan hasta el último nivel (si hay grumos de material granular fino durante este proceso, se disgregan con el mortero hasta que quede uniforme el suelo con el fin de no confundirlos con gravas y altere la curva granulométrica).



Figura 2.11. Procedimiento de la prueba de granulometría por mallas.

4.- Se pesa el suelo retenido en cada malla y se anota el dato en la hoja de registro. La prueba es correcta cuando la sumatoria total del peso del suelo en las mallas retenidas es superior a 95 gr, es decir durante la prueba solo se pueden perder 5 gr de suelo durante el tamizado, de otra forma la prueba se tendrá que repetir.

*c) Límites de Atterberg (Copa de Casagrande y Cono de caída)*

Para realizar ambas pruebas, las muestras utilizadas fueron secadas 24 hrs a 100 °C y posteriormente tamizadas a través de la malla No. 40, para evitar gravas o ramas que obstruyeran la preparación de la mezcla del suelo durante el ensayo, como lo indica la normalización de la ASTM.

**Materiales**

- 1.- Espátula plana y espátula ranudadora
- 2.- Formato de registro
- 3.- Copa de casa grande
- 4.- Dispensador de agua
- 5.- Muestra de suelo (aproximadamente 200 gr)
- 6.- Contenedores de muestra
- 7.- Plumón indeleble

## 8.- Horno

### Método

1.- Con el plumón indeleble se anota en cada contenedor la clave de la muestra a ensayar, se pesa y posteriormente se anota en el formato de registro.

2.- Una vez que se tamizó el suelo y solo se tienen granos finos, se realiza una mezcla con agua, de tal manera que tenga la consistencia de una pasta firme, para esto hay que agregarla paulatinamente con el dispensador en la muestra de suelo se mezcla con ayuda de una espátula.

3.- Cuando la mezcla del suelo tiene una consistencia uniforme, se coloca un poco en la copa de Casagrande y con la espátula ranudadora se marca una línea a la mitad en dirección de arriba hacia abajo (Figura 2.12).

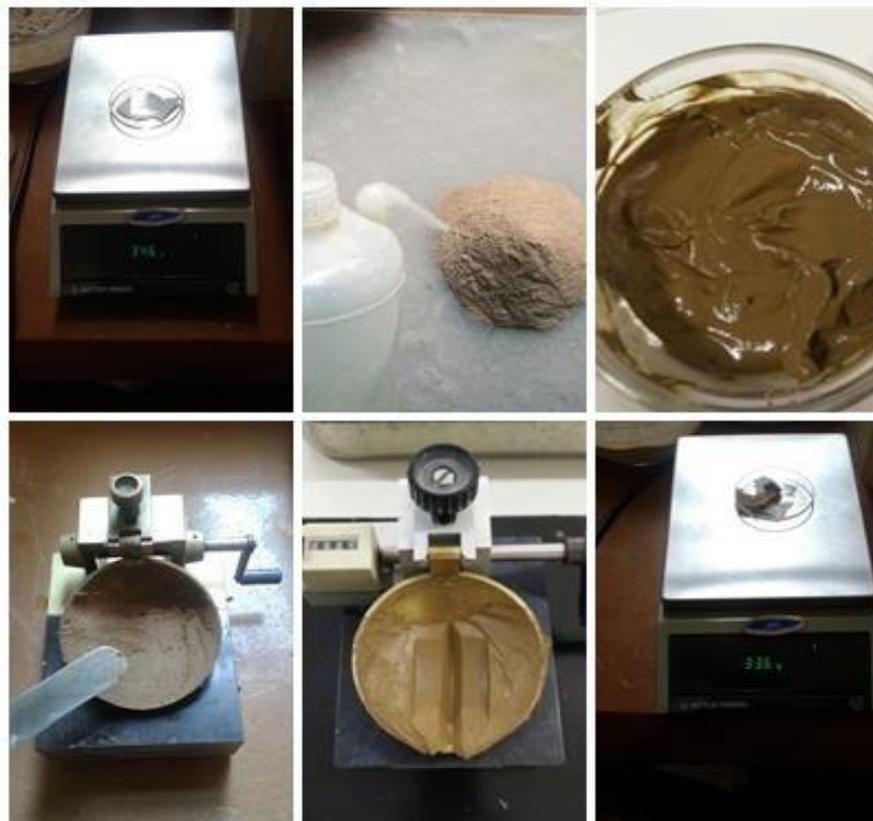


Figura 2.12. Procedimiento para la determinación de los límites de Atterberg con la Copa de Casagrande.

4.- Una vez que se tiene la copa de Casagrande con el material preparado se comienzan a dar los golpes (dos por segundo), girando la manija hacia adelante, hasta que la ranura se cierre. Este paso se repite de cuatro a cinco veces, con diferente contenido de agua en la mezcla del suelo, por lo regular se comienza del estado más sólido al más líquido; por lo tanto, se deben de establecer parámetros mayores al límite líquido que son 25 golpes, es decir, se deben tener por lo menos dos medidas > 25 (máximo 36 golpes) y dos medidas < 25 (mínimo cuatro golpes) para tener mayor información del material y conseguir datos más exactos.

5.- Con ayuda de la espátula, se recolecta una porción de suelo de la parte del centro de la copa de Casagrande después de que se cierra la ranura y se coloca en un contenedor, se pesa, se registra su peso en la tabla y posteriormente se mete en el horno. Después de 24 horas se vuelve a pesar y se anota el dato en la hoja de registro (Figura 2.13).

CENAPRED

Área de Ing. Estructural y Geotecnia  
 Laboratorio de Dinámica de Suelos  
**LIMITES DE PLASTICIDAD Y  
 CONTENIDO NATURAL DE AGUA**

Obra: \_\_\_\_\_

Localización: \_\_\_\_\_

Sondeo No.: \_\_\_\_\_ Ensayo No. \_\_\_\_\_

Muestra No.: \_\_\_\_\_ Profundidad. (mts.): \_\_\_\_\_

Descripción: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Operador: \_\_\_\_\_



**Límite líquido**

Prueba No.	Cápsula No.	No. de golpes	Peso cápsula + suelo húmedo	Peso cápsula + suelo seco	Peso del agua	Peso de la cápsula	Peso del suelo seco	Contenido de agua
—	—	—	g.	g.	g.	g.	g.	%
1								
2								
3								
4								
5								

**Límite plástico**

1		—						
2		—						
		—						

Figura 2.13. Formato de registro para la determinación de los límites de Atterberg con la copa de Casagrande.

## *Determinación de los límites de Atterberg utilizando el Cono de Caída*

### Materiales

- 1.- Espátula plana y ranudadora
- 2.- Formato de registro
- 3.- Cono de caída
- 4.- Dispensador de agua
- 5.- Muestra de suelo (aproximadamente 200 gr)
- 6.- Contenedores de muestra
- 7.- Plumón indeleble
- 8.- Horno

### Método

- 1.- Con el plumón indeleble se anota en cada contenedor la clave de la muestra a ensayar, se pesa y posteriormente se anota en el formato de registro.
- 2.- Se realiza una mezcla con suelo y agua como en el procedimiento con la Copa de Casagrande o bien se puede utilizar la que se manipuló en el ensayo anterior.
- 3.- Una vez que la mezcla alcanzó una consistencia óptima, se vacía un poco en el contenedor del cono de caída, de tal manera que no queden espacios con aire en su interior y que la mezcla quede al límite de su superficie (Figura 2.14).
- 4.- Se verifica que el medidor este en 0, se coloca el contenedor con el suelo de bajo del cono, de tal forma que éste se encuentre en el centro de la muestra.



Figura 2.14. Procedimiento para la determinación de los límites de Atterberg con el Cono de Caída.

5.- Se deja caer el cono hasta el límite del contenedor y se registran los milímetros que penetró el cono en la muestra de suelo, y se anota el dato en el formato de registro. Éste paso se tiene que repetir máximo 4 veces con diferente contenido de agua en la mezcla del suelo. Por lo regular se comienza del estado más sólido al más líquido, es por tanto que se deben de establecer parámetros mayores al límite líquido que son 10 mm, es decir, se deben tener por lo menos dos medidas  $> 10$  mm y dos medidas  $< 10$  mm.

6. Con ayuda de la espátula se recolecta una porción de suelo de la parte del centro del contenedor del cono, se coloca en un contenedor, se pesa, se registra su peso en la tabla y posteriormente se mete en el horno, con el fin de conocer su contenido de agua. Después de 24 horas se vuelve a pesar y se anota el dato en la hoja de registro (Figura 2.15).

**CENAPRED**

Area de Ing. Estructural y Geotecnia  
 Laboratorio de Dinámica de Suelos

**LÍMITES DE PLASTICIDAD Y  
 CONTENIDO NATURAL DE AGUA**

Obra: \_\_\_\_\_

Localización: \_\_\_\_\_

Sondeo No.: \_\_\_\_\_ Ensayo No. \_\_\_\_\_

Muestra No.: \_\_\_\_\_ Profundidad. (mts.): \_\_\_\_\_

Descripción: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Operador: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



**Límite líquido**

Prueba No.	Cápsula No.	Penetración del cono (mm)	Peso cápsula + suelo húmedo	Peso cápsula + suelo seco	Peso del agua	Peso de la cápsula	Peso del suelo seco	Contenido de agua
			g.	g.	g.	g.	g.	%
1								
2								
3								
4								
5								

**Límite plástico**

1								
2								

Figura 2.15. Formato del Cono de Caída.

*d) Determinación del índice de plasticidad*

**Materiales**

- 1.- 20 gr de suelo
- 2.- Horno
- 3.- Contenedores
- 4.- Formato de registro
- 5.- Dispensador de agua
- 6.- Balanza analítica

## Método

1.- Con el mismo material que se utilizó para la prueba de la Copa de Casagrande y del Cono de Caída, inmediatamente después de concluir estos ensayos, se pesan 20 gr de suelo.

2.- Se amasa en forma esférica y después se forma un cilindro de 10 mm de largo por 5 mm de diámetro (Figura 2.16).

3.- Se coloca en la balanza analítica y se registra su peso en los formatos de registro de la Copa de Casagrande y del Cono de Caída.

4.- Se deja en el horno 24 hrs, se vuelve a pesar y se registra el dato en los formatos de registro.



Figura 2.16. Procedimiento para determinar el límite de plasticidad.

### e) Prueba triaxial

#### Materiales

1. - Cámara triaxial
- 2.- Discos porosos
- 3.- Membrana de látex
- 4.- Muestra cilíndrica de suelo
- 5.- Agua

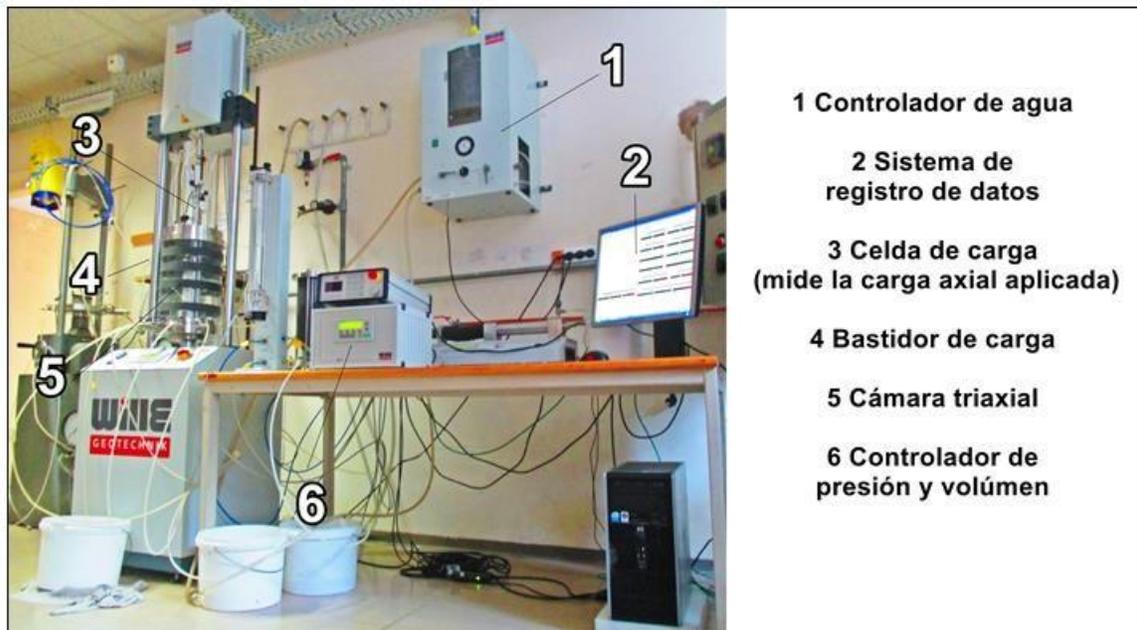


Figura 2.17. Cámara triaxial utilizada.

#### Método

Por las condiciones del materiales de las muestras obtenidas, se optó por realizar un ensayo triaxial consolidado no drenado (CD). El procedimiento llevado a cabo es el siguiente:

## 1.- Preparación de la muestra de suelo

Antes de colocar la muestra de suelo dentro de la cámara triaxial hay que prepararla. En primer lugar hay que tomar en cuenta las medidas del cilindro, la relación correcta entre el diámetro de la base y la altura debe ser 1:2, es decir, si la base mide 5 cm de diámetro, la altura deberá ser de 10 cm; si varía esta relación en milímetros es aceptable.

Para las muestras realizadas, la base de la cámara triaxial fue de 6 cm. Dado que las muestras recolectadas median 8.8 cm de diámetro, estas fueron moldeadas con el fin de alcanzar la medida correcta de la base. Para llevar a cabo este procedimiento se coloca la muestra sobre un molde de metal, se toma siempre de los extremos y con un cuchillo afilado se rebaja el volumen en sentido de arriba hacia abajo; hay que tener cautela al momento de realizar estos cortes para no perturbar la muestra (Figura 2.18).



Figura 2.18. Preparación de la muestra de suelo para la cámara triaxial.

Una vez que se tiene la muestra cilíndrica con las proporciones optimas, se toman los datos de su altura, diámetro (de la parte superior, media y baja de la muestra (Figura 2.19) ya que puede variar en milímetros, posteriormente se calcula la media de los tres) y peso para anotarlos en el sistema de registro de datos (GEOsys 8.7.8.10) que se encarga de procesar toda la prueba triaxial.

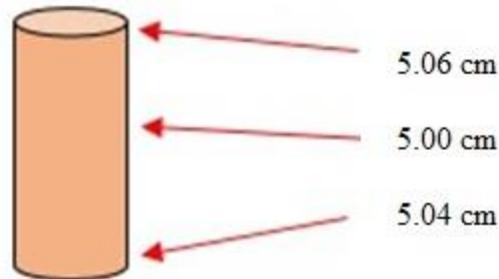


Figura 2.19. Ejemplo de medidas del diámetro de la muestra.

## 2.- Colocación de la muestra en la cámara triaxial

Una vez que se obtuvieron las medidas y el peso de la muestra, el siguiente paso es colocarla dentro de la cámara triaxial. Se toma la muestra por los extremos, se coloca sobre un disco poroso y con ayuda de un contenedor se coloca la membrana de látex.

## 3.- Instalación de la cámara triaxial

Después del establecimiento de la muestra en la base de la cámara triaxial, se comienza a instalar la cámara interior y exterior, posteriormente se conectan los moduladores de presión y volumen mediante tubos a la cámara triaxial (Figura 2.20).



Figura 2.20. Colocación de la muestra en la cámara interior e instalación de la cámara triaxial.

#### 4.- Procesamiento del sistema

La prueba consta de 4 etapas: saturación, consolidación, carga y descarga. Para cada una hay que colocar los parámetros iniciales del ensayo en el GEOsys 8.7.8, el cual se encarga de registrar el comportamiento de la muestra durante el ensayo, o bien se pueden escribir en el formato de registro a mano para tener un respaldo (Figura 2.21).



中國地質大學  
CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES

### Triaxial test procedure



Universität für Bodenkultur Wien

Operator:

Diameter:

Diameter2:

Sample ID:

Start date:

Height:

Height2:

End date:

Weight:

Sig<sub>i</sub> dev:

Equipment: wille-geotechnik

Vacuum:

Time interval:

Offset:

Stages	Velocity	Cell pressure /Out pressure (kPa)	Pore water pressure bottom/top (kPa)	Effective Stress (kPa)	Vertical Strain (%)	Time (s)	Remarks
Initial							→
↓							
Saturate							
↓							
B-check		+100 until B>95%, and then return					
↓							
Consolidation							
↓							
Loading							
↓							
Unloading							

Descriptions:

Photo No.:

Figura 2.21. Formato de registro para la prueba triaxial (Proporcionado por D.Cui, 2015).

## CAPÍTULO III. LUNES 4 OCTUBRE DE 1999, TEZIUTLÁN PUEBLA

### 3.1 Características físico-geográficas de Teziutlán, Puebla

#### a) Localización

El municipio de Teziutlán se localiza al noreste del estado de Puebla y colinda al norte con los municipios de Hueyapan y Hueytamalco, al este con Xiutetelco y Jalacingo en Veracruz y al suroeste con Atempan y Chignautla (INAFED, 2011) (Figura 3.1).

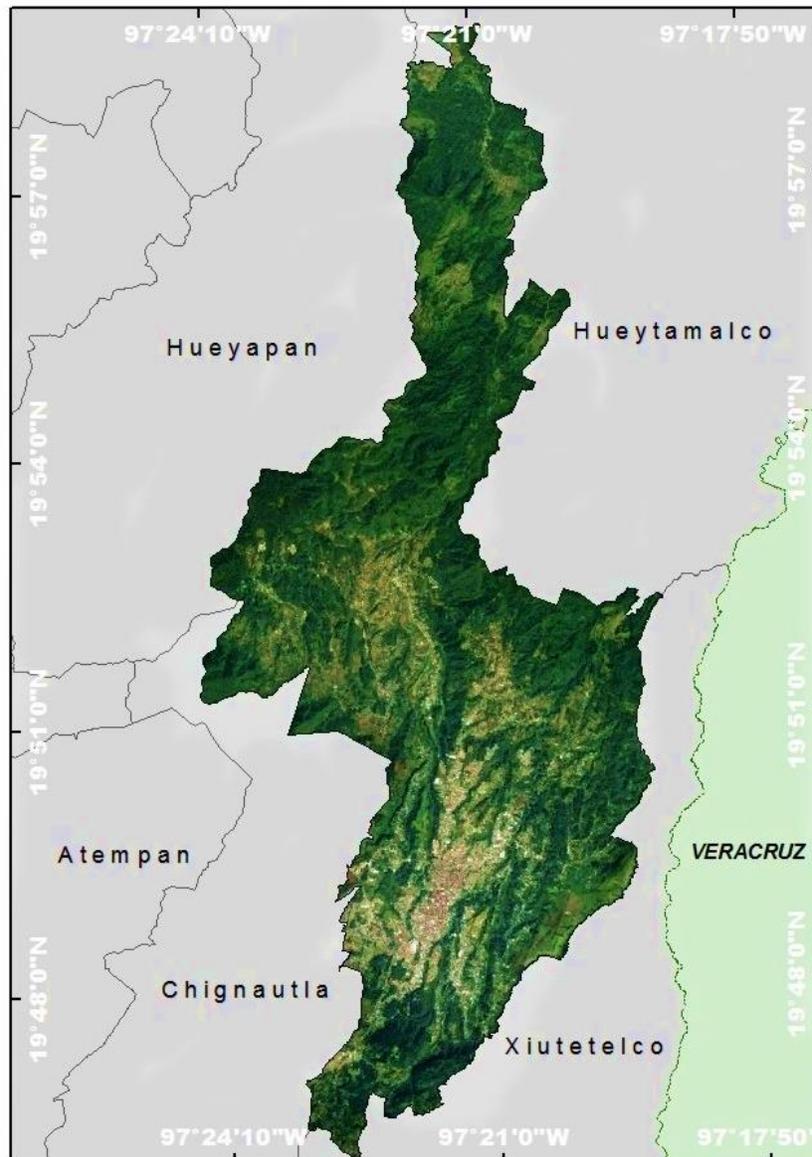


Figura 3.1. Localización del municipio de Teziutlán (Fuente: INEGI, 2010).

b) *Clima*

Teziutlán, se encuentra en una zona de transición de los climas templados de la Sierra Norte a los cálidos de la llanura del Golfo de México, por lo que existen tres tipos a lo largo de todo el municipio (Figura 3.2) (CONABIO, 1998):

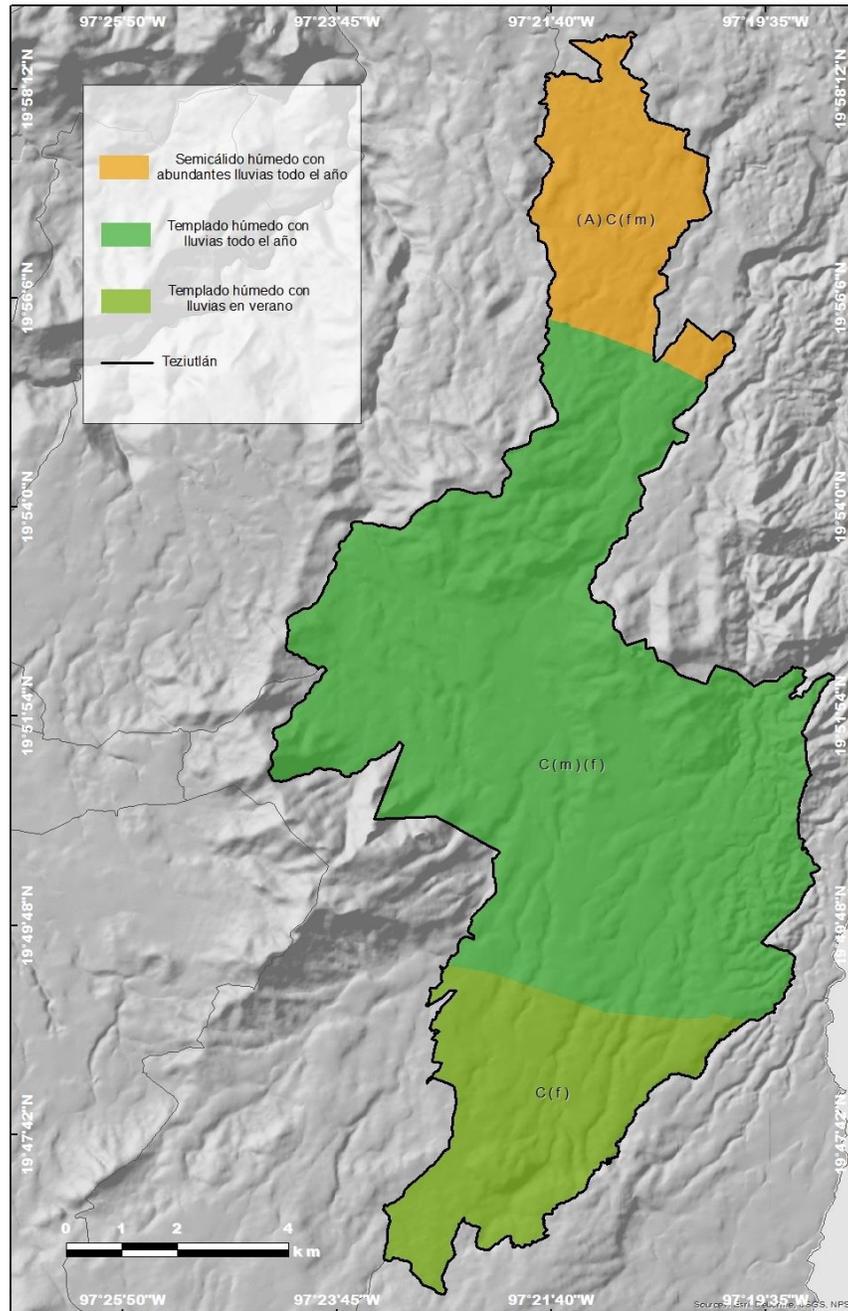


Figura 3.2. Tipos de climas en Teziutlán (Fuente: E.García Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO, 1998).

La temperatura media anual es de 15.5 °C, la temperatura máxima es de 18.6°C y se registra en el mes de mayo, mientras que la temperatura mínima tiene lugar en enero y alcanza 13.1 °C. La precipitación media anual es de 1593 mm al año (CONAGUA, 1998). Las perturbaciones ciclónicas que se producen en el Mar de las Antillas y el Golfo de México introducen una gran cantidad de humedad en la troposfera media, manifestándose con el aumento de la cantidad de lluvia en los meses de septiembre y octubre (Vidal, 2005).

*c) Contexto geológico-geomorfológico*

Teziutlán forma parte de la Sierra Norte de Puebla, la cual se localiza en la transición de las provincias fisiográficas Sierra Madre Oriental y el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) (Figura 3.3) (Alcántara-Ayala, 2004). El relieve de la Sierra Madre Oriental se debe a la deformación de rocas mesozoicas y de su complejo basal que formaron pliegues y cabalgaduras durante la Orogenia Laramide (Antuñano *et al.*, 2000). Por otro lado, el CVTM es un arco volcánico que se extiende sobre el margen suroccidental de la placa Norteamericana como resultado de la subducción de las placas Rivera y Cocos a lo largo de la Trinchera de Guerrero (Ferrari, 2000). Por lo tanto, en Teziutlán se encuentran diversas formaciones geológicas (Figura 3.4), que corresponden a diferentes periodos de estas dos unidades fisiográficas (Flores y Alcántara-Ayala, 2002).

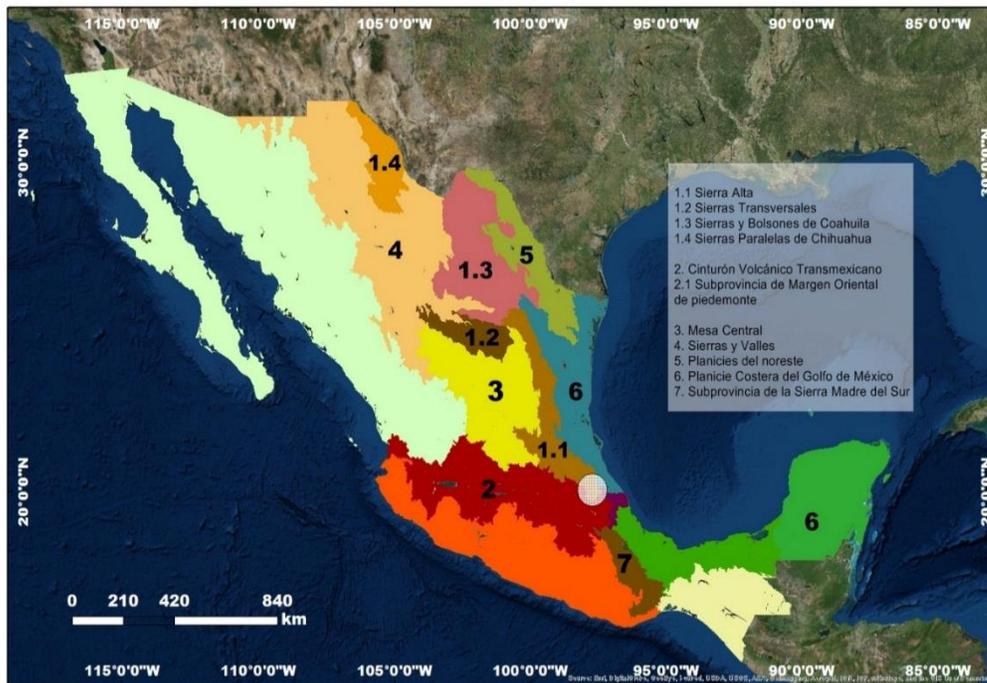


Figura 3.3. Provincias y Subprovincias fisiográficas de México, localización de la Sierra Norte de Puebla (Fuente: Adaptado de Lugo-Hubp *et al.*, 2005).

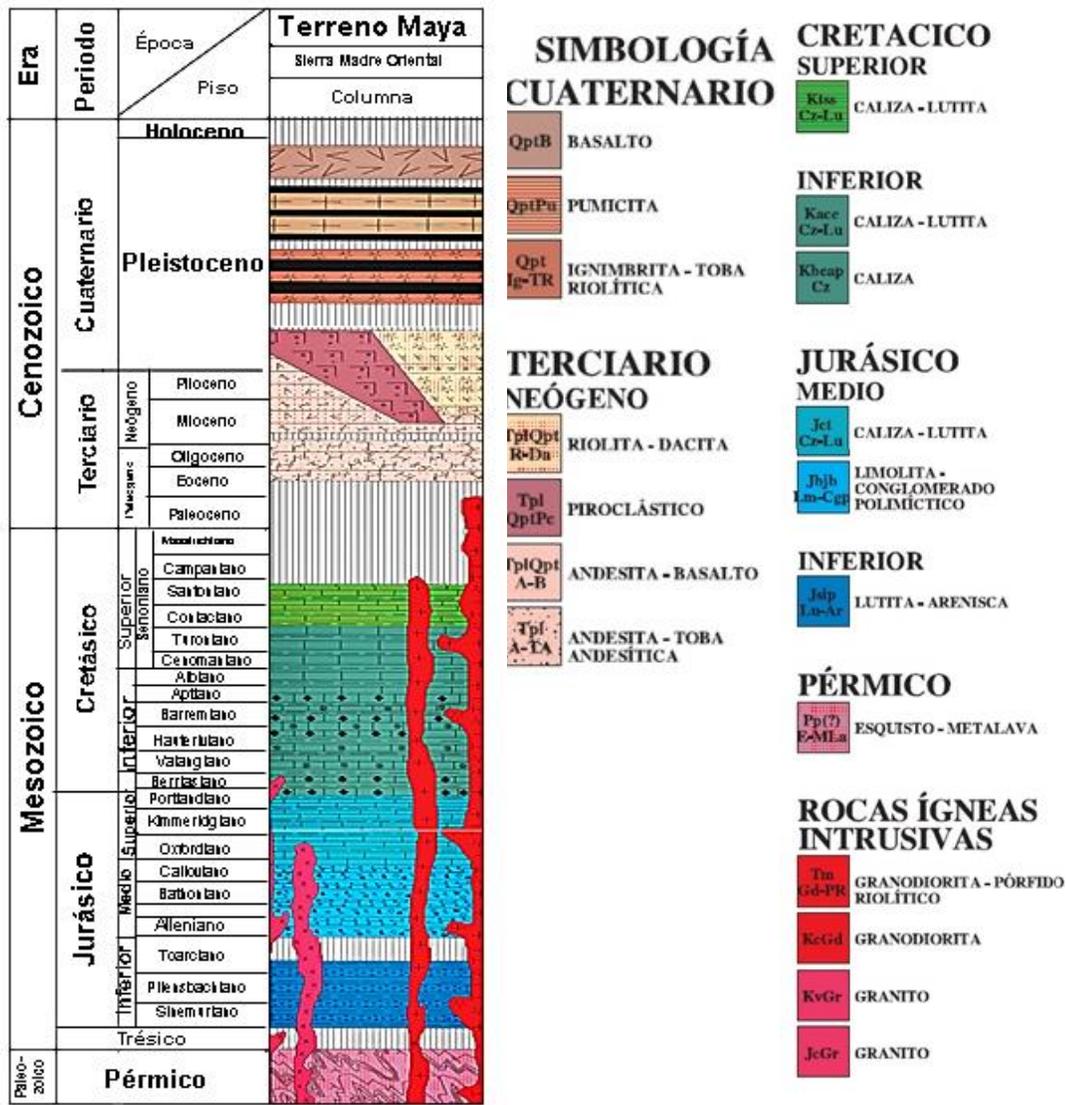


Figura 3.4. Columna estratigráfica de Teziutlán (Fuente: SGM, 2011).

De acuerdo con la columna estratigráfica del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2011), el basamento de Teziutlán se compone por rocas metamórficas conformadas por esquistos de muscovita y metalava de composición andesítica del Pérmico y constituye la base del Terreno Maya, misma que está cubierta por rocas volcánicas terciarias y por la *Formación Cahuassas* que se compone por una alternancia de limolita y conglomerado polimíctico que se encuentra al oeste del municipio y al norte de la zona urbana.

Posteriormente se encuentran las formaciones *Tepexic*, *Santiago*, *Tamán* y *Pimienta* del Jurásico Medio-Superior, las cuales tienen una litología similar de lutitas y calizas de espesor delgado, se localizan al oeste de la zona urbana de Teziutlán. En la parte norte del

municipio se encuentra la *Formación Tamaulipas* del Cretácico Inferior, constituida por caliza, pedernal negro y algunos horizontes de lutita (SGM, 2011).

Por otro lado, los depósitos volcánicos del CVTM sobreyacen sobre la secuencia sedimentaria de la Sierra Madre Oriental a lo largo de todo Teziutlán, en donde se expone andesita, andesita-basáltica, basalto y toba andesítica de la formación *Andesita Teziutlán* de edad pliocénica. En la sección sur se encuentra la Ignimbrita Xaltipan, mientras que en la parte este y oeste afloran depósitos de pumicita del Pleistoceno (SGM, 2011).

La presencia de materiales de caída se encuentran a lo largo de todo el municipio (Figura 5), como ignimbrita, pumicita, pómez, toba, ceniza, lapilli, mismas que cubren al sustrato rocoso de andesita basalto (Ferriz, 1984), provenientes de la caldera de Los Humeros (Lugo-Hubp *et al.*, 2005). Esta última se localiza en el extremo oriental del CVTM y está constituida principalmente por un complejo paleozoico metamórfico e intrusivo, una secuencia sedimentaria mesozoica plegada, intrusiones sieníticas del terciario inferior y andesitas pliocénicas (Castillo *et al.*, 1991).

En el norte del municipio se presentan rocas sedimentarias del Mesozoico plegadas en el Eoceno, mientras que la parte sur se caracteriza principalmente por la presencia de flujos piroclásticos de pómez y material de origen volcánico del Cuaternario, entre ellos destacan la presencia de andesitas, andesitas basálticas, tobas andesíticas y basaltos con textura es porfídica o afanítica (Flores y Alcántara-Ayala, 2002).

En el relieve de la Sierra Norte de Puebla, que está constituido por capas sedimentarias deformadas se pueden apreciar horizontes de calizas compactas intercaladas con esquistos, que forman flancos de pliegues que buzanan a favor de la pendiente; esto permite la infiltración de agua y su constante acumulación en los estratos constituidos por esquistos con un alto contenido de arcilla (Capra *et al.*, 2006).

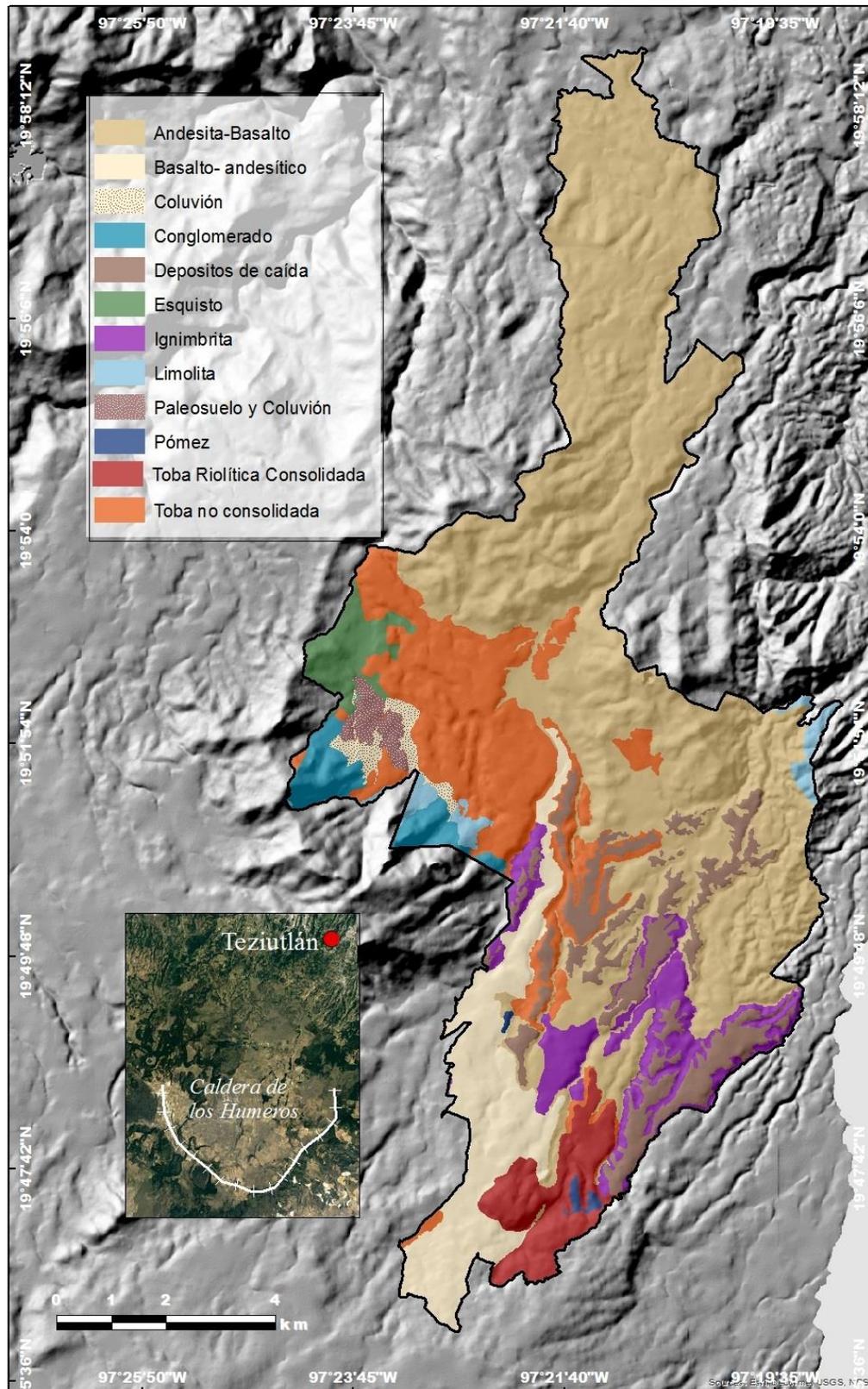


Figura 3.5. Unidades geológicas de Teziutlán (Fuente: Adaptado de SGM, 2011).

Uno de los principales factores internos que causó la inestabilidad de laderas en la Sierra Norte de Puebla está relacionado principalmente con las características litológicas (Tabla 3.1), que involucran secuencias compuestas por paleosuelos con un alto contenido de arcillas intercalados en una secuencia de pómez y escoria, resultado de las erupciones plinianas de la caldera de Los Humeros. Por otro lado, en el caso de los flujos, el material removido fue de una capa superficial, y están constituidos principalmente por depósitos ignimbríticos de poca consolidación y con una gran presencia de arenas (Capra *et al.*, 2002).

<b>Formación geológica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Factores de inestabilidad</b>
<b>Esquistos paleozoicos</b>	Forman elevaciones menores del orden de 100-350 metros y favorecen los procesos de deslizamiento y flujo de corta extensión por la consistencia de la roca plegada.	Deforestación para cultivos o la construcción de carreteras que rompen el equilibrio del talud natural.
<b>Rocas sedimentarias plegadas triásicas y jurásicas</b>	Está constituida por lutitas, limolitas y areniscas, en estratos de grosor delgado a medio, que en su conjunto presentan poca resistencia al intemperismo y a la erosión.	Relieve de vertientes altas y empinadas, en cortes erosivos de cientos de metros en sentido vertical. Alto nivel de permeabilidad.
<b>Calizas, margas y lutitas del Jurásico Superior y Cretácico</b>	Se encuentran en laderas altas de cientos de metros y pendiente superior a los 20°.	Estratos delgados a gruesos y con bajo nivel de resistencia debido a su estructura.
<b>Calizas masivas cretácicas de la Formación Tamaulipas Superior</b>	Se presentan en un relieve de mesas con desarrollo cársico, con numerosas dolinas y fracturas verticales de anchura considerable.	Cortes verticales profundos mayores a 300 metros.
<b>Lutitas del Cretácico Superior</b>	Forman lomeríos de poca altura de decenas a 100-200 metros, resultado de una prolongada erosión.	Condiciones de alta energía del relieve, en laderas montañosas. Poca resistencia a la erosión.
<b>Rocas volcánicas del Neógeno-Cuaternario</b>	Tienen una distribución heterogénea en sentido horizontal y vertical, que al estar presentes constituyen un sello sobre las rocas sedimentarias mesozoicas.	Contacto geológico entre depósitos volcánicos y rocas sedimentarias, la inclinación de las capas y la pendiente.

Tabla 3.1. Características litológicas de la Sierra Norte de Puebla que dieron lugar a la inestabilidad de laderas (Fuente: Lugo-Hubp *et al.*, 2005).

#### *d) Hidrología*

El municipio se localiza en la región hidrológica Tuxpan-Nautla (INEGI, 2009), la cual se extiende desde la Planicie Costera del Golfo Norte hasta la parte este de la Sierra Madre Oriental, su límite sur está constituido por un parteaguas que forma las estribaciones meridionales de la Sierra Norte de Puebla y se extiende al noroeste de Teziutlán (CONABIO, 2011).

Teziutlán forma parte de la vertiente hidrográfica septentrional del estado de Puebla, y se conforma por dos cuencas hidrográficas: la Cuenca del Río Tecolutla y la Cuenca del Río Nautla. En la primera, el municipio se encuentra en la parte alta que corresponde al relieve de la Sierra Madre Oriental y se caracteriza por fuertes pendientes, mientras que, la segunda está distribuida en una porción del estado de Puebla y la mayor parte se encuentra en el estado de Veracruz.

El río Nautla que es su río principal nace en la Sierra Madre Oriental, en el Cofre de Perote, a una altitud de 4,150 m. Uno de sus principales afluentes es el río María de la Torre, que nace en el estado de Puebla, en el poblado de San Sebastián, a 1,750 m de altitud con el nombre de río Xoloco (INEGI, 2009).

A partir de la unión del arroyo Colorado y el río Chapalapa con el río Bobos, éste cambia su nombre por el de río Nautla, que discurre a través de una zona de meandros, pasa cerca del poblado de Nautla y se desvía hacia el norte. Las subcuencas que se encuentran a lo largo de todo el territorio son: Apulco, Joloapan y Tecolutla (Figura 3.6), los cuales corresponden a la Cuenca del Río Tecolutla. Por otro lado se encuentran María de la Torre y Río Bobos que pertenecen a la subcuenca del Río Nautla (CONABIO, 2011).

Entre los principales ríos que cruzan Teziutlán destaca el río Xolóatl; éste recorre el municipio por más de 15 km, y se comunica con el río Las Margaritas, afluente del río Viejo, que a su vez es tributario del Tecolutla (INAFED, 2011).

Se encuentran otros ríos de menor extensión como el río Chorrorrito, que nace al sur de San Sebastián; con los afluentes que recibe de la sierra ubicada en el poniente forma el río Calapan, afluente del río Apulco, el cual es uno de los principales tributarios del río Tecolutla. Finalmente, los ríos Ixticpac e Ixtlahuaca recorren el Oriente de Teziutlán y forman el río María de la Torre que desemboca en la Laguna ubicada cerca de la costa, al norte de Nautla (INAFED, 2011).

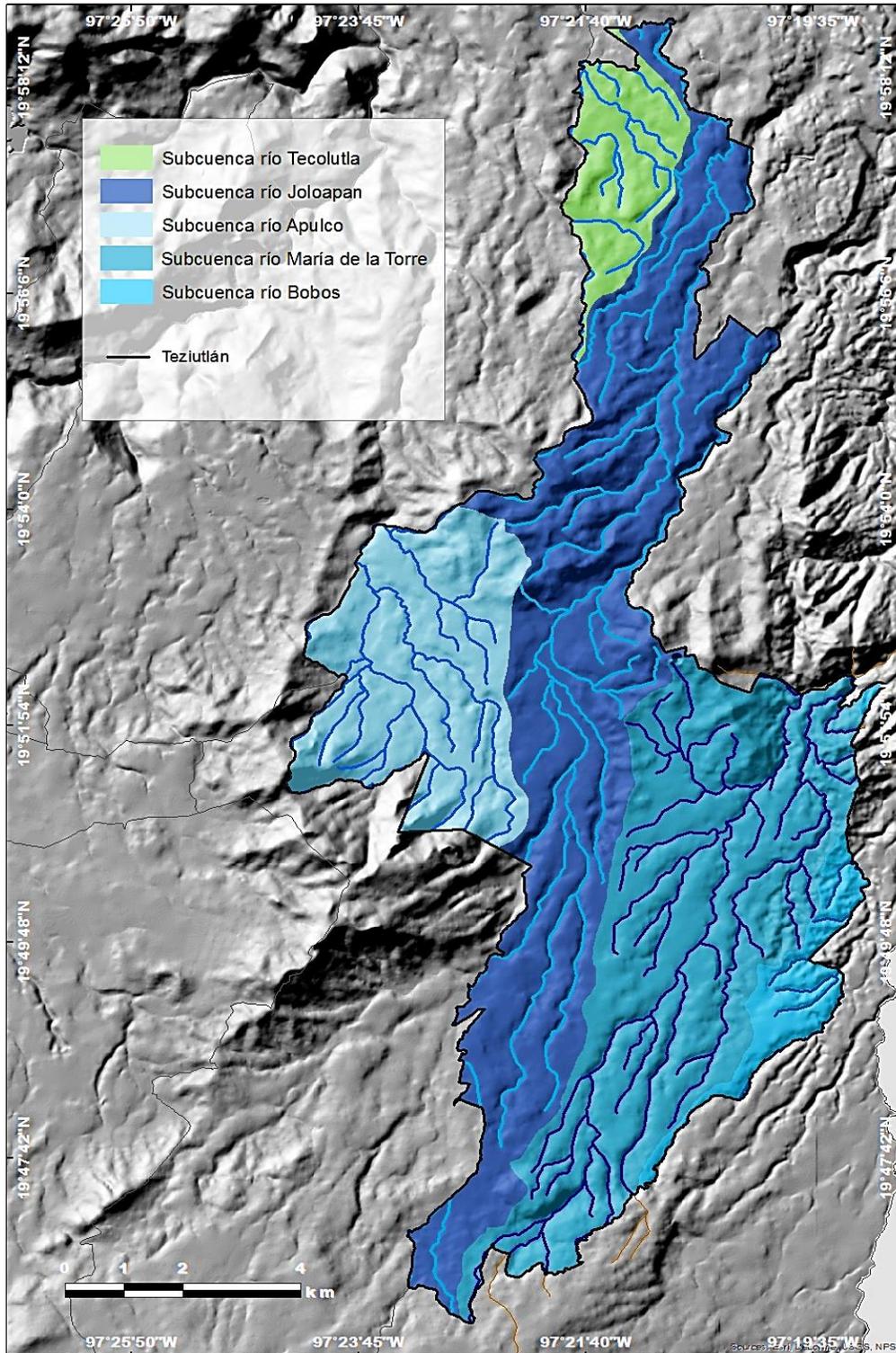


Figura 3.6. Subcuencas hidrológicas del municipio de Teziutlán (Fuente: INEGI, 2010).

### *e) Edafología*

A lo largo de todo el municipio se encuentran principalmente suelos cohesivos arcillosos y limosos, producto de diversos agentes de intemperismo como la temperatura, la humedad y la vegetación que han sido determinantes en la descomposición de los minerales que integran las rocas subyacentes (Suárez, 2006).

Con base en la carta edafológica del INEGI (2009) escala 1:250,000, y de acuerdo con la clasificación de la FAO, los suelos que se encuentran a lo largo de todo el municipio son (Figura 3.7):

- Andosol: Este tipo de suelos predomina a lo largo de todo el municipio. Se caracterizan por su formación sobre cenizas volcánicas, y otros materiales piroclásticos, por lo regular son de colores oscuros, y tienen una alta porosidad y permeabilidad con una buena estructura granular (Ibañez y Manríquez, 2011a); INEGI, 2009).
- Luvisol: Se encuentra únicamente en la parte norte del municipio. Cuentan con una gran diferenciación textural vertical, por lo regular, el horizonte superficial cuenta con un alto contenido de arcilla. Se caracterizan por tener arcillas de alta actividad (Ibañez y Manríquez, 2011b; INEGI, 2009).
- Regosol: Se localizan al norte de Teziutlán. Son suelos situados en diversos tipos de clima con un alto contenido de humedad, vegetación y relieve. Se encuentran poco desarrollados y por ello no presentan horizontes heterogéneos. Por lo general, son de colores claros y carecen de materia orgánica. Cabe señalar que, en México constituyen el segundo tipo de suelo más importante por su extensión, ya que se desarrollan con facilidad en climas cálidos. Frecuentemente son superficiales, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada con su profundidad y pedregosidad (Ibañez y Manríquez, 2011c; INEGI, 2009).

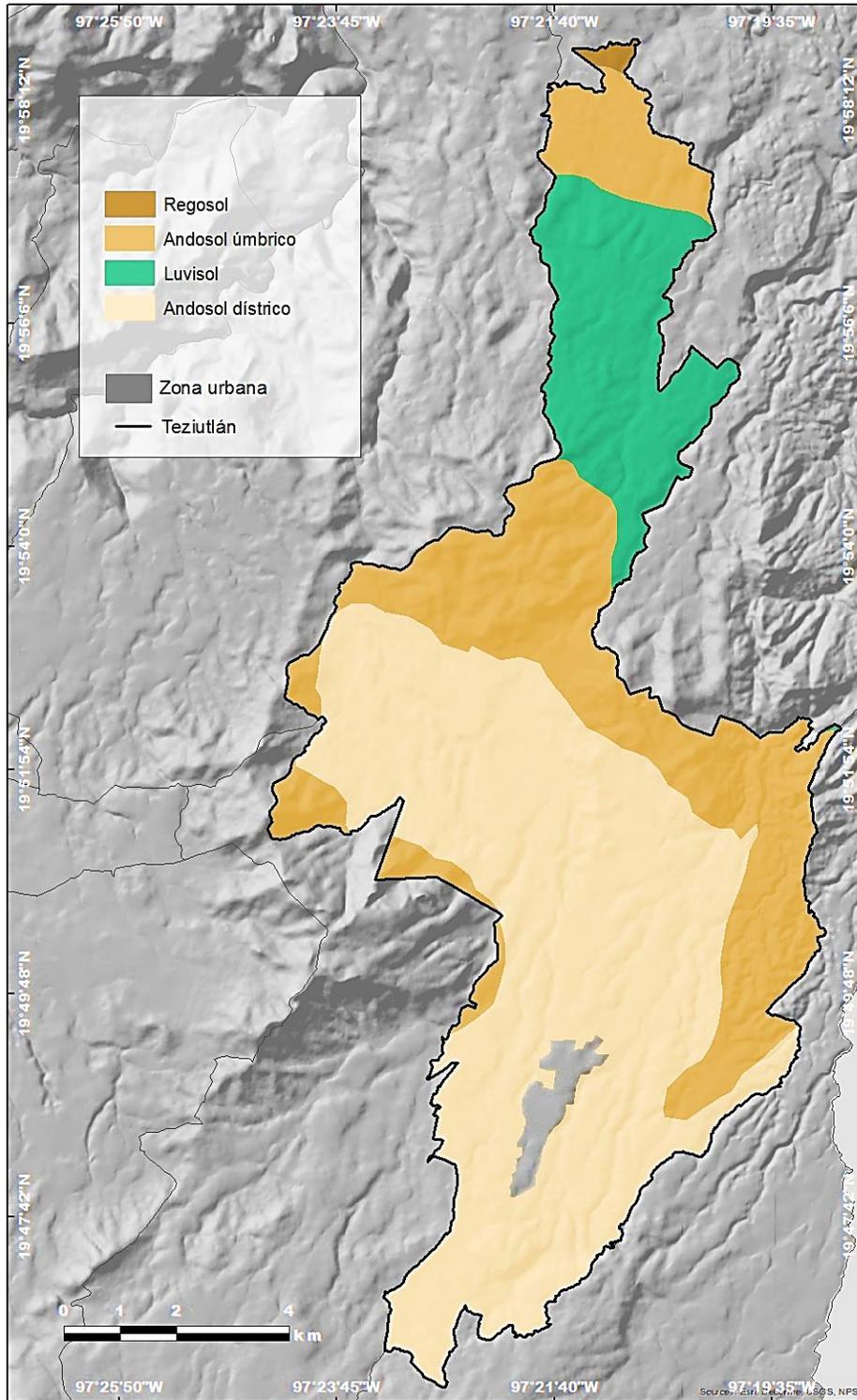


Figura 3.7. Edafología de Teziutlán (Fuente: INEGI, 2009).

*f) Uso de suelo y vegetación*

El uso de suelo en Teziutlán (Figura 3.8) se divide de la siguiente forma (INEGI, 2009):

1) Bosque mesófilo de montaña, de pino-encino y de encino, los cuales se encuentran a lo largo de todo el territorio. Entre las principales variedades que existen en todo el municipio se encuentran principalmente diferentes especies de pinos: *chahuite*, *cembroide*, *tlacocote*, *Pinus devoviana*, *teocote*. Sin embargo, una buena parte de estas especies ya no son tan abundantes debido a la intensa explotación de estos bosques (Muñoz-Hernández *et al.*, 2008).

2) Zona urbana: Se extiende en la parte suroccidental del territorio en laderas escarpadas, cubre áreas donde originalmente había suelos destinados para la agricultura (INEGI, 2009).

3) Agricultura: Se encuentra dispersa en todo el territorio y se clasifica en (INEGI, 2009):

- Agricultura de temporal anual: el ciclo vegetativo de los cultivos dura 1 año y depende del agua de lluvia, por lo que la frecuencia de la precipitación y la capacidad del suelo para retener el agua son dos elementos clave para su óptimo desarrollo, se localiza en centro y suroeste del municipio.
- Agricultura temporal permanente: Se localiza en la parte norte de Teziutlán y en una porción del sureste, su ciclo vegetativo va hasta los 10 años.

Los principales cultivos que se pueden encontrar son maíz, frijón, legumbres y forrajes. También se cultivan árboles frutales propios del clima, como el ciruelo, peral, manzano, tejocote y capulín; la técnica empleada que comúnmente de recolección es de tipo manual (INEGI, 1993).

4) Pastizales inducidos y cultivados, entre los cuales destaca la especie *pennisetum nervosum*. Abarcan el norte y el este del municipio respectivamente, por lo regular se encuentran entre el área agrícola y el bosque.

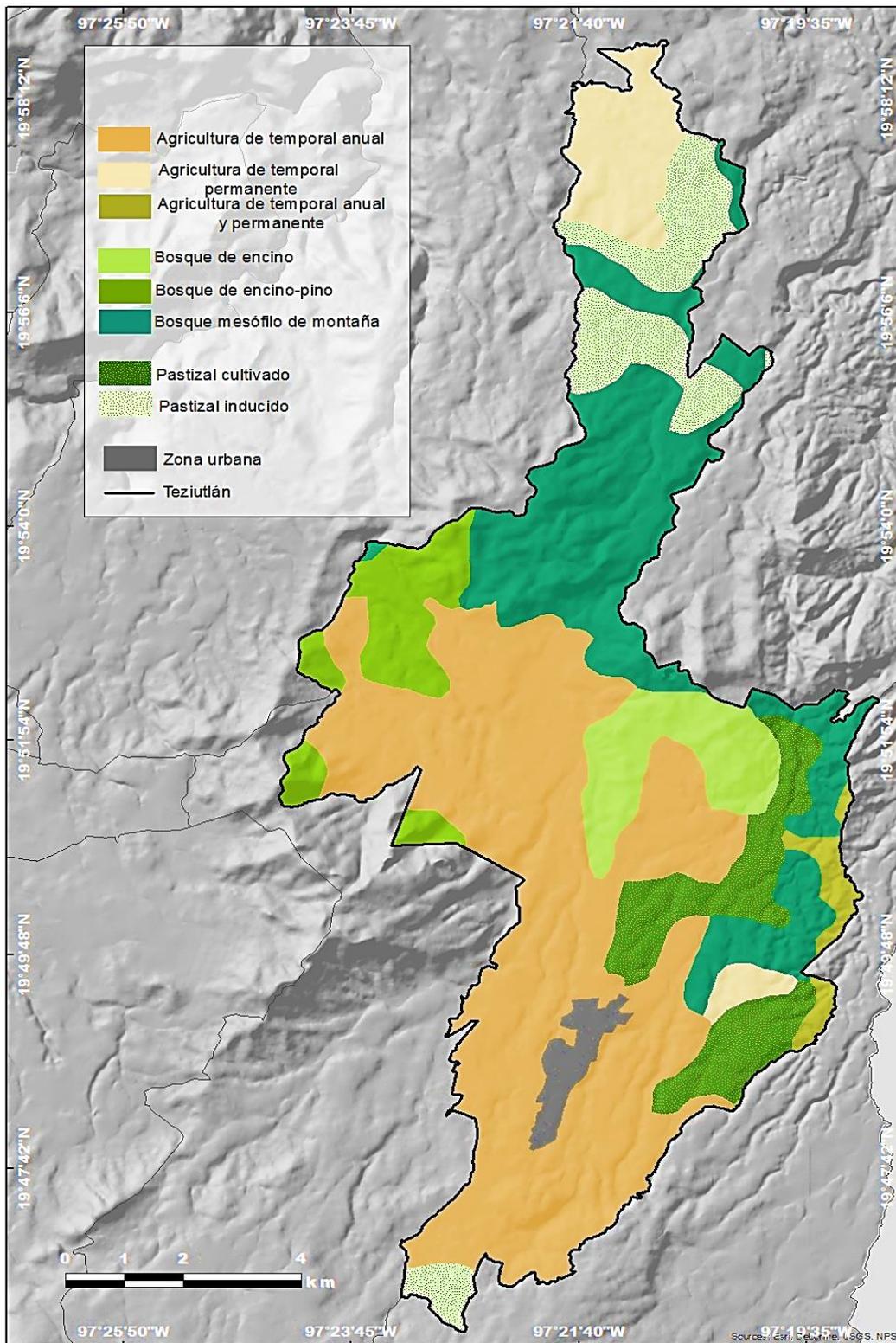


Figura 3.8. Mapa de uso de suelo (Fuente: INEGI, 2009).

*g) Características socio-demográficas de Teziutlán*

La población de Teziutlán ha tenido cambios a través de los años. Con el fin de identificar su evolución demográfica antes y después del desastre de 1999, se han tomado como referencia los Censos de Población y Vivienda que realiza el INEGI cada 10 años, retomando los datos de 1990, 2000, 2010. Las pirámides de población (Figuras 3.9, 3.10 y 3.11), representan la evolución poblacional de Teziutlán, por grupos de edad y sexo.

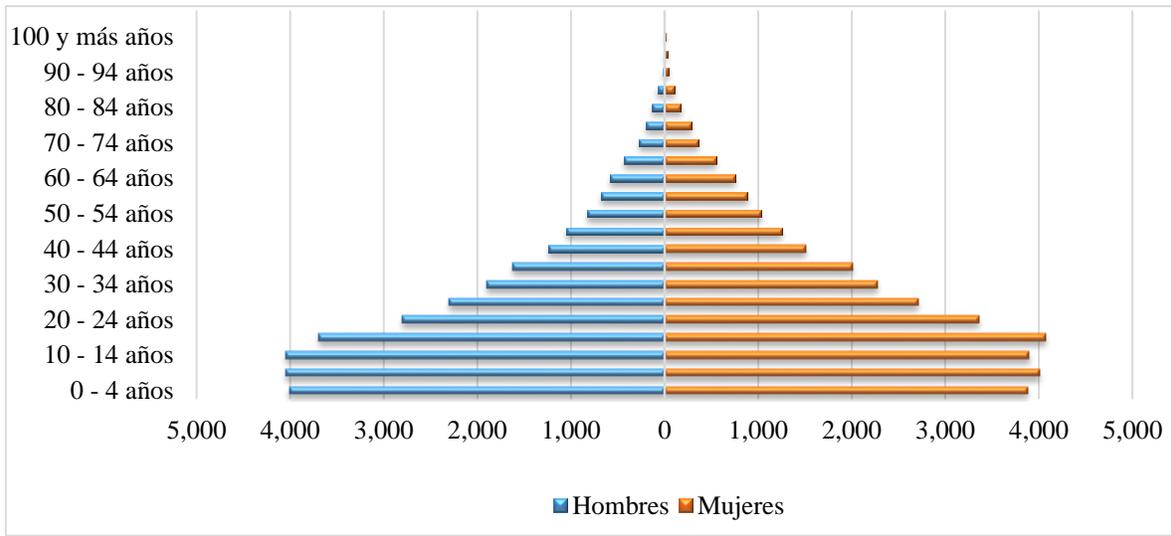


Figura 3.9. Pirámide de población, Teziutlán 1990 (Fuente: Censo de población y vivienda INEGI, 1990).

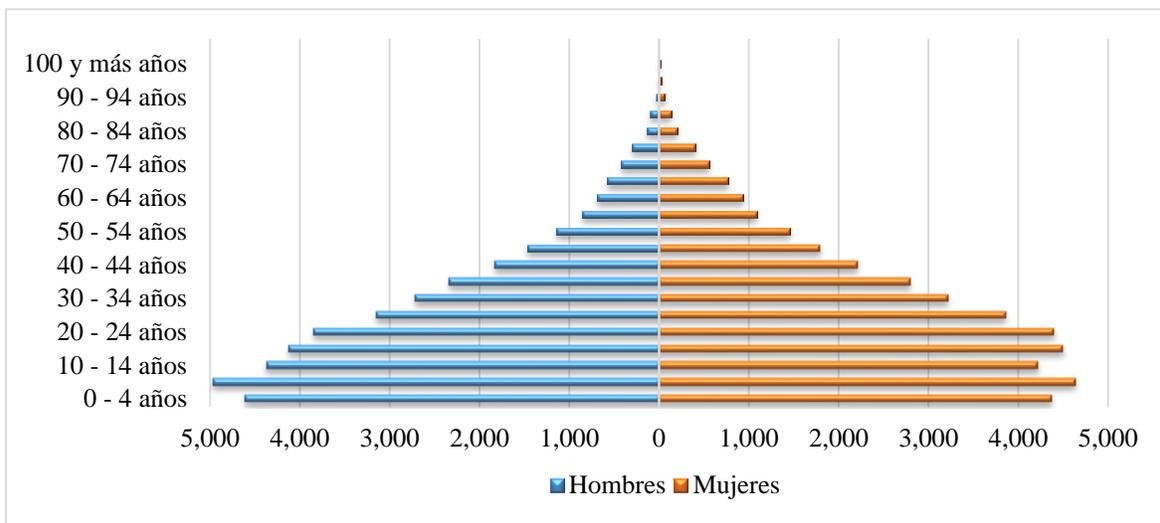


Figura 3.10. Pirámide de población, Teziutlán 2000 (Fuente: Censo de población y vivienda INEGI, 2000).

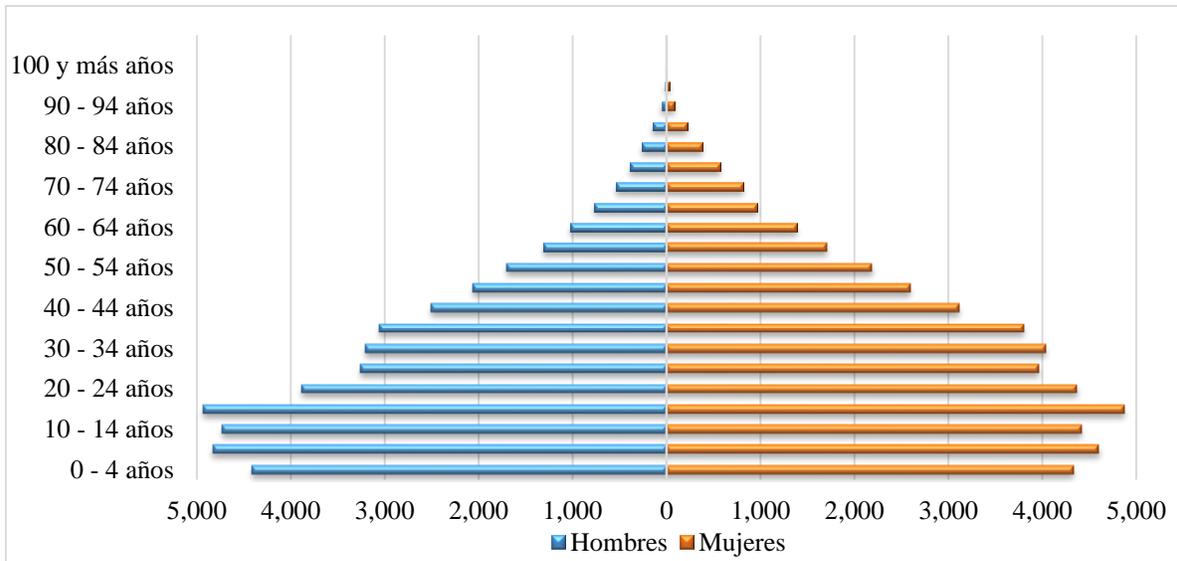


Figura 3.11. Pirámide de población, Teziutlán 2010 (Fuente: Censo de población y vivienda, INEGI, 2010).

Se puede observar en las tres pirámides poblacionales a grandes rasgos que su forma es progresiva, sin embargo en los años 1990 y 2000 se presenta una base ancha frente a los grupos superiores que se van reduciendo, consecuencia de una natalidad alta y de una mortalidad creciente, lo cual indica una estructura de población eminente joven y con perspectivas de crecimiento; éste tipo de pirámides se atribuyen a una natalidad alta y poco controlada.

Por otro lado, para el año 2010 se puede ver una pirámide en transición de progresiva a estacionaria que representa un equilibrio entre todos los grupos de edad, consecuencia de una natalidad y mortalidad que se mantienen sin variaciones significativas durante un periodo largo de tiempo, lo cual indica que se ha empezado a controlar la mortalidad pero la natalidad sigue siendo bastante alta, así como el grupo quinquenal de 15-19 años. De igual manera, la población del municipio ha ido decreciendo, de acuerdo con el INEGI en 1990 se presenta un total 63, 245 para el 2000 se tienen 81,156 mientras que para el 2010 se cuentan 92,246 habitantes.

#### *h) Vivienda*

De acuerdo a los Censos de Población y Vivienda de los años (1990, 2000 y 2010), el total de viviendas ocupadas en Teziutlán (Figura 3.12) era de: 12,588 en el año de 1990; 17,770 en el año 2000 y 23, 159 en el año 2010.

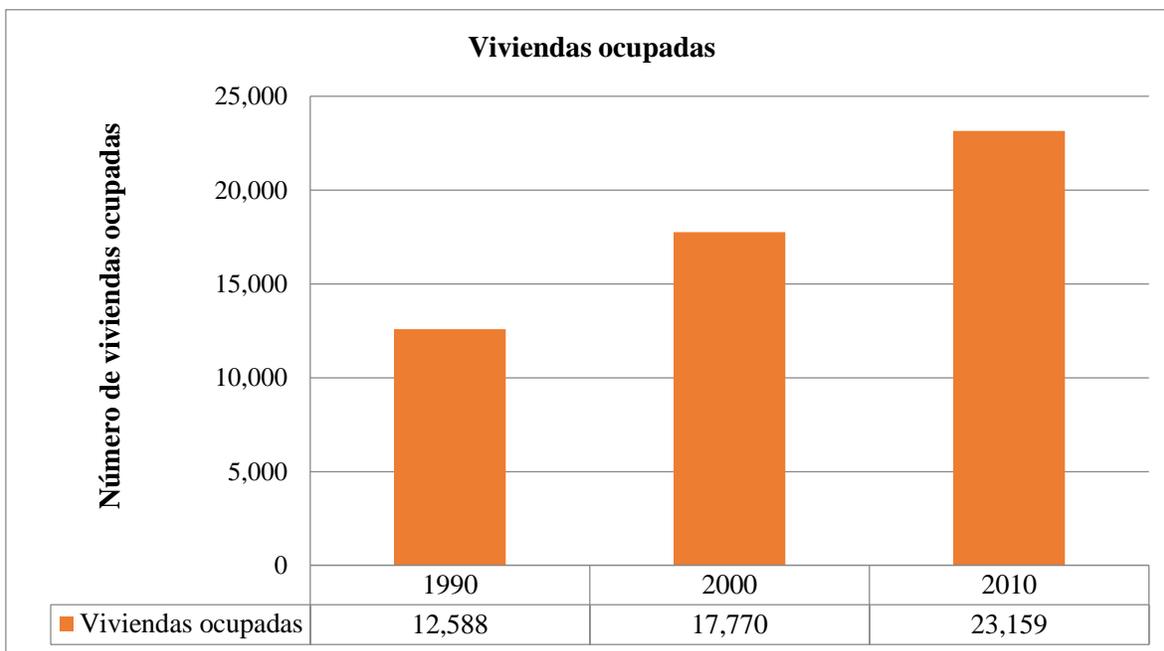


Figura 3.12. Gráfica del total de viviendas ocupadas en Teziutlán (1990-2010)  
(Fuente: INEGI 1990, 2000 y 2010).

La gráfica de barras de la Figura 3.12 representa la evolución del total de viviendas ocupadas en un periodo de 20 años en el municipio de Teziutlán, Puebla, que de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda del INEGI, se entiende por vivienda un espacio delimitado normalmente por paredes y techos de cualquier material, con entrada independiente, que se utiliza para realizar las actividades cotidianas de la vida como dormir, preparar los alimentos, comer y protegerse del ambiente (INEGI, 2010). Cabe mencionar que cualquier espacio delimitado que en el momento del censo se utilizó para alojamiento, aunque haya sido construido para un fin distinto al de una casa habitación (faros, escuelas, cuevas, bodegas, tiendas, fábricas o talleres), se considera como vivienda.

Se puede apreciar un incremento de 5,182 viviendas de 1990 al 2000, y 5,389 del 2000 al 2010, lo cual no es una diferencia considerable, no obstante, demuestra que el crecimiento de viviendas ocupadas ha ido en aumento, duplicándose casi al 50% en un periodo de 20 años.

*i) Principales actividades económicas*

De acuerdo con el Censo de Población y vivienda del INEGI (1990, 2000, 2010), las actividades primarias del municipio de Teziutlán son la agricultura, la producción forestal maderable, producción de carne bovina, porcina y ovina, minería; se extraen oro, cobre, plomo, zinc, fosforita, caliza. Existe en la cabecera una empresa minera denominada Autlán,

que actualmente genera problemas para la población local debido al despojo de tierras que eran propiedad de los campesinos (Petrich, 2015). En cuanto a las actividades secundarias principalmente predomina la industria manufacturera y la construcción.

### **3.2 Lunes 4 de octubre de 1999**

En el mes de octubre del año de 1999, como resultado de la conjunción de un sistema de baja presión que originó la depresión tropical No. 11 en las costas de Veracruz, y del frente frío No.5 (CONAGUA, 2008), ocurrieron precipitaciones extraordinarias en la Sierra Norte de Puebla, la cuales desencadenaron procesos de remoción en masa durante los días 4 y 5 de octubre (Lugo-Hubp *et al.*, 2005).

En el caso de Teziutlán, los procesos de ladera que ocurrieron en todo el municipio fueron principalmente movimientos complejos, los cuales se iniciaron como deslizamientos y, consecutivamente, se transformaron en flujos de lodo en laderas con pendientes mayores a 15°. Asimismo, aunque en menor proporción, se presentaron derrumbes o caídas, en pendientes casi verticales (Flores y Alcántara, 2002).

El lunes 4 de octubre de 1999 por la tarde, a partir de la onda tropical No. 35, se formó en el Golfo de México la depresión tropical No. 11, por cuyos efectos se le considera como el ciclón tropical de mayor afectación en México durante la temporada de 1999, aun cuando su centro no tocó tierra firme directamente, su cercanía, desplazamiento y la interacción ocasionaron lluvias torrenciales (CONAGUA, 2008).

La formación de la onda tropical se inició aproximadamente a 90 km al Noreste de Coatzacoalcos, Veracruz en el sur del golfo de México, donde se mantuvo durante toda su trayectoria, lo cual permitió la entrada de humedad con abundantes precipitaciones hacia las costas y el interior del país, se obtuvo un registro de lluvia máxima puntual en 24 horas de 420 mm en Tenango, Puebla. La duración de este ciclón fue de 48 horas, tiempo en el que recorrió una distancia de 457 km a velocidad promedio de 7 km/h (CONAGUA, 2008).

En el municipio de Teziutlán ocurrieron precipitaciones extraordinarias (Figura 3.13) durante los días 4 (300 mm) y 5 de octubre (360 mm) equivalentes al 110% y al 135% de la media mensual resultantes de la depresión tropical No.11 del Golfo de México (Alcántara-Ayala, 2004).



Figura 3.13. Principales áreas afectadas por la lluvia intensa durante Octubre 4-5, 1999 (Fuente: Capra *et al.*, 2003).

De acuerdo con Alcántara-Ayala (2004), la precipitación acumulada de 4 días en Teziutlán, sumó 743 mm, comparado con la media anual de 1593 mm, es decir, llovió el 50% de lo que normalmente llueve en un año. Esta cantidad fue el equivalente a la mitad del valor de precipitación media anual para dicho municipio y el 245% en relación con la media mensual del mes de octubre. En términos de precipitación acumulada, medida que toma en cuenta los 15 días que precedieron a este evento meteorológico. En Teziutlán hubo una precipitación de 1,041 mm de agua, valor que representó 60 % más del valor de precipitación media anual (Alcántara-Ayala, 2004), esta fue muy superior a la registrada en 1955 (Figura 3.14), la cual alcanzó niveles que corresponden al 40 % de la media anual. Esta comparación muestra que las lluvias de octubre de 1999 alcanzaron niveles extraordinarios en un periodo de días muy corto, por lo que se consideran niveles históricos de precipitación (Flores y Alcántara-Ayala, 2002).

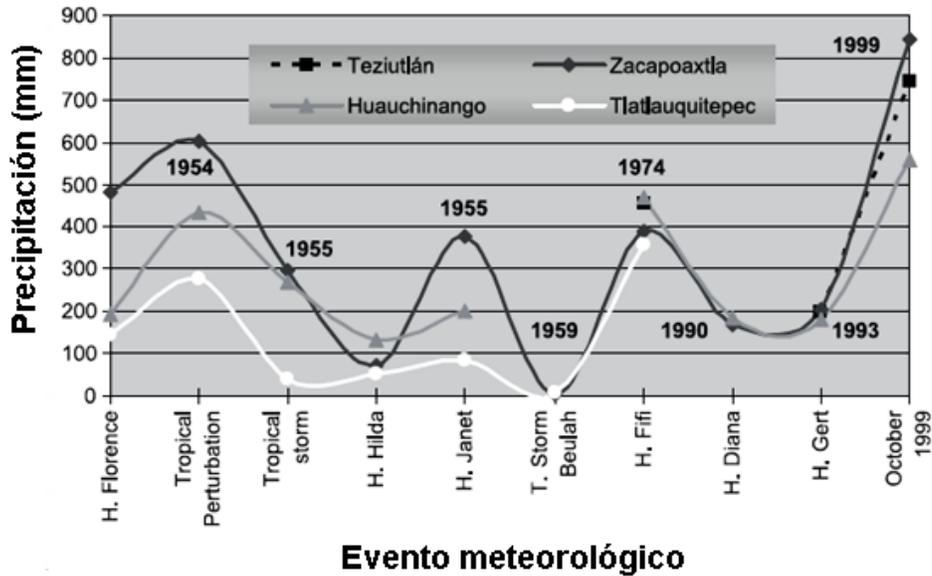


Figura 3.14. Precipitación diaria del 30 de septiembre de 1999 al 10 de octubre de 1999 (Fuente: Alcántara- Ayala, 2004).

### 3.3 Inestabilidad de laderas en la Sierra Norte de Puebla

Para que un proceso de remoción en masa acontezca, existen diversos componentes que intervienen en su incidencia, estos se dividen en factores determinantes y desencadenantes:

#### a) Factores determinantes

Los factores determinantes o condicionantes, son elementos estáticos, los cuales predisponen al terreno para que otros elementos agudicen la inestabilidad, éstos pueden ser de tipo morfológico, geológico, físico (CENAPRED, 2006). De acuerdo con Alcántara-Ayala (2000) estos factores son los agentes que condicionan la estabilidad de una ladera, la estructura y la configuración de los materiales que la conforman.

#### b) Factores desencadenantes

Los mecanismos o factores detonadores, son aquellos que inician el movimiento y ocurren de manera inmediata. Los factores desencadenantes más comunes son las lluvias extraordinarias, periodos prolongados de humedad o deshielo rápido, sismos, erupciones volcánicas y las actividades antrópicas que modifican y desestabilizan las laderas de forma inmediata (Alcántara-Ayala, 2000).

Las actividades antrópicas forman parte de estos factores que contribuyen con diversas alteraciones en el terreno, como la cantidad de agua presente en el subsuelo, cambios en la topografía, modificaciones en la geometría del relieve, creación de terrazas para la agricultura y la extracción de recursos mineros, sobrecarga en las laderas y deforestación (CENAPRED, 2006). En la Tabla 4, se pueden apreciar diferentes ejemplos de ambos factores y se describen las características que dan lugar a la inestabilidad de laderas.

Desde la perspectiva del entorno natural, en la Sierra Norte de Puebla, se identifican diversos factores determinantes, tales como las condiciones litológicas y morfológicas de las laderas, así como las condiciones hidrogeológicas; todas ellas influyeron como elementos generadores de inestabilidad de laderas (Lugo-Hubp *et al.*, 2005).

Por otro lado se pueden identificar dos factores principales desencadenantes: las lluvias frecuentes y las lluvias extraordinarias. De acuerdo con el CENAPRED (2006), las lluvias frecuentes son uno de los factores que más contribuyen a la inestabilidad, ya que el agua de la lluvia satura y aumenta el peso volumétrico del suelo al irse acumulando con la precipitación antecedente. Las lluvias extraordinarias, debido a su larga duración y gran intensidad, favorecen el proceso de saturación en el suelo de forma más rápida, influenciando la ocurrencia de procesos de remoción en masa (Alcántara-Ayala, 2004).

<b>Factores</b>	<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
<b>Determinantes</b>	Morfología y Topografía	El relieve influye en la estabilidad, a mayor pendiente y altura aumenta el efecto gravitacional
	Geología y características de los suelos superficiales	El tipo de roca, grado de alteración y meteorización, presencia de discontinuidades (grietas, fracturas, fallas), planos estratigráficos, porosidad, permeabilidad, propiedades físicas y mecánicas (resistencia y deformación), y estado de esfuerzos
	Condiciones hidrogeológicas	El agua en el interior del terreno disminuye la resistencia cortante al aumentar la presión intersticial, además incrementa el peso volumétrico del terreno con el consiguiente aumento en los esfuerzos actuantes.
	Vegetación	Las raíces fijan los suelos superficiales a los estratos de roca más resistentes ubicados a mayor profundidad, absorben el agua contenida en el suelo y atenúan la erosión superficial al mitigar el impacto de las gotas de lluvia y reducir la velocidad de escurrimiento.
<b>Desencadenantes</b>	Lluvias	Su efecto depende de la intensidad, duración y distribución de la lluvia; puede ocasionar disolución de cementantes y rotura de capilaridad, además influye directamente en factores condicionantes como la meteorización y el nivel de agua subterránea.
	Terremotos	Las vibraciones sísmicas originan fluctuaciones en el estado de esfuerzos en el interior del terreno y pueden originar todo tipo de movimientos (caídos, deslizamientos, flujos, avalanchas, etcétera), dependiendo además de la magnitud del sismo y la distancia al epicentro.
	Actividades volcánicas	Las erupciones volcánicas pueden originar deslizamientos o avalanchas de derrubios de gran magnitud y velocidad en las laderas de los conos volcánicos; además que el deshielo de las partes altas puede originar flujos rápidos.
	Erosión y socavación	Incluye la acción erosiva de ríos y oleaje, produciendo los siguientes efectos: socavación del material en el pie de la ladera que modifica el estado tensional y aumenta las fuerzas cortantes actuantes.
	Actividad humana	Influye en la estabilidad al cambiar la geometría de la ladera por excavaciones, construcción de caminos y presas, sobrecargas debido a estructuras, terraplenes o rellenos, voladuras, etc.; además, estas obras en general cambian las condiciones hidrogeológicas al alterar el drenaje superficial afectando el nivel freático y el flujo natural de escurrimiento. También se incluye la deforestación como una de las actividades humanas que más influencia negativa tiene en la estabilidad de una ladera.

Tabla 3.2. Factores determinantes y desencadenantes de la inestabilidad de laderas (Fuente: Campos *et al.*, 2001).

## CAPÍTULO IV. EL DESASTRE EN LA COLONIA LA AURORA, 1999

### 4.1 Lluve sobre mojado: el desastre de 1999

Las precipitaciones extraordinarias generadas por la depresión tropical No.11 entre los días 1 al 7 del mes de octubre de 1999, ocasionaron inundaciones y desencadenaron una serie de procesos de remoción en masa en los estados de Hidalgo, Veracruz, Tabasco, Chiapas y Puebla (Diario Oficial de la Federación, 1999; Noriega, 2005). Debido a la magnitud del evento y principalmente por el gran número de pérdidas humanas, el presidente en turno Ernesto Zedillo Ponce de León, declaró esta situación como “El desastre de la década” (Domínguez, 2000).

Puebla fue la entidad con mayor número de repercusiones y la Sierra Norte la región más afectada (Bitrán, 2000). De acuerdo con la Secretaría de Gobernación en el concentrado general de daños causados por la depresión tropical No. 11, el desastre afectó en total a 80 municipios del estado (Figura 4.1), de los cuales 41 fueron catalogados con daños graves, 27 con daños menores y 12 con daños agrícolas (Domínguez, 2000; Bitrán, 2000).

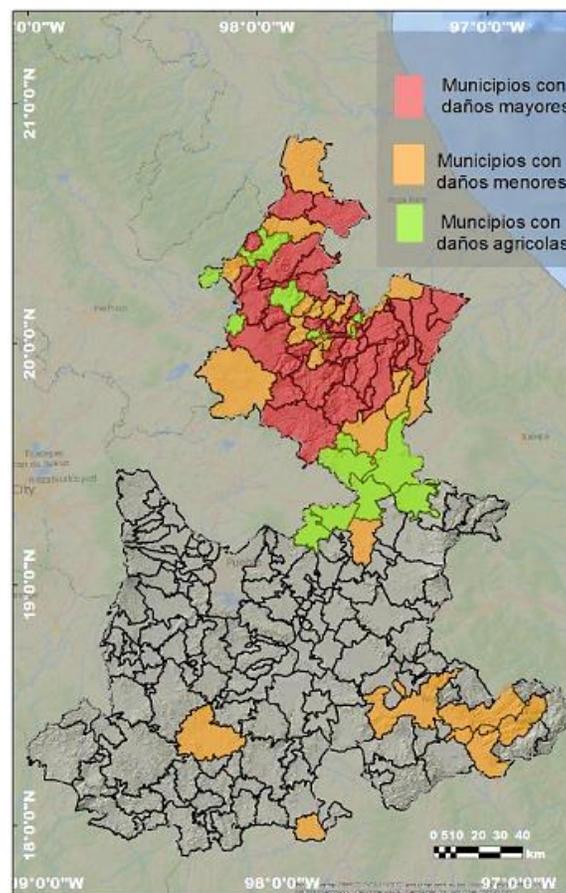


Figura 4.1. Principales municipios afectados en el desastre de 1999 (Fuente: Domínguez, 2000).

El lunes 4 de octubre comenzó la interrupción de las actividades cotidianas para los habitantes de la Sierra Norte de Puebla, muchas escuelas y fábricas suspendieron sus actividades debido al mal tiempo, en la radio local se advertía acerca de las vialidades obstruidas por deslizamientos y caídos de roca en tramos carreteros de Teziutlán, Tlatlauquitepec, Zaragoza y San Miguel Capulines (García, 2000).

Mientras tanto, en el municipio de Teziutlán se reportaban las colonias Aire Libre, Ahuata, Colihui, San Diego, San Juan Acateno y San Sebastián como incomunicadas, debido a inundaciones provocadas por desbordamientos de ríos. De igual manera se reportó la falta de electricidad para las colonias aledañas al centro por la caída de las torres de alta tensión en el barrio de Taxcala (García, 2000), mientras que el martes 5 de octubre ocurriría en la colonia La Aurora el peor evento reportado en Teziutlán en función de pérdidas humanas, del cual se hablará más adelante. La policía local y municipal fueron las instancias encargadas de informar al presidente municipal en turno los acontecimientos ocurridos en las colonias relacionados con las inundaciones en Xoloco y un deslizamiento en Huehueymico que cubrió por completo una casa (Juárez, 2015).



Figura 4.2. Afectaciones en Teziutlán, Octubre de 1999 (Fuente: El Sol de Puebla, 2013).

Durante la semana del 4 al 8 de octubre se instalaron 11 albergues en escuelas, salones de fiesta, gimnasios, instalaciones públicas e iglesias (García, 2000). Se mantenía comunicada a la población a través de la radio local, en especial por la emisora XEFJ 680 AM, misma que se encargó de intercomunicar a las autoridades con la población que buscaba ayuda para encontrar a sus familiares desaparecidos y buscar albergues (Juárez, 2015). Muchos centros de salud rebasaban su capacidad, por lo que la asistencia de la Cruz Roja fue elemental para brindar atención médica a las personas, pues ya se contabilizaban 1158

damnificados y éste número seguía ascendiendo (Juárez, 2015 en comunicación personal con José de Jesús Sánchez Tinoco).

En la Tabla 4.1, se puede apreciar el total de infraestructura dañada que se reportó en Teziutlán durante los días 4-7 de octubre, cifras que aumentarían en el reporte general de daños elaborado posteriormente por el gobierno municipal (Domínguez, 2000).

<b>Sector</b>	<b>Total de infraestructura dañada</b>
<b>Escuelas</b>	55
<b>Unidades de salud</b>	2
<b>Carreteras</b>	12
<b>Puentes</b>	8
<b>Casas</b>	623

Tabla 4.1. Daños totales en Teziutlán del 4 al 7 de octubre de 1999 (Fuente: Domínguez ,2000).

Existen diversos datos de las pérdidas totales tras el desastre de acuerdo con la fecha de reporte. El balance inicial del ejecutivo estatal en la primera semana del desastre reportó pérdidas de 180 millones de pesos, mientras que, en el documento definitivo elaborado por la Secretaria de Gobernación para dar a conocer los costos de reconstrucción de los daños en infraestructura ascienden a mil millones de pesos, es decir, 1000% de la cifra inicial (García, 2000).

De acuerdo con las cifras oficiales proporcionadas por Bitrán (2001) se registraron 263 defunciones en toda la zona de desastre, de las cuales casi la mitad ocurrieron en el evento de La Aurora; el total de efectos producidos por las consecuencias de las lluvias extraordinarias se estimó alrededor de 2,325 millones de pesos, mientras que los gastos relacionados con el auxilio a la zona afectada ascendieron a 38.6 millones de pesos.

Los sectores que experimentaron los mayores daños fueron los relacionados con la infraestructura de servicios, estos involucraron alrededor de dos terceras partes de las pérdidas totales, mientras que los daños registrados en el área de comunicaciones y transportes representaron el 41.9% con un monto estimado de mil millones de pesos. Por otra parte, las afectaciones relacionadas con la generación y transmisión de electricidad alcanzaron 20.7% del total de las pérdidas, y por último, el sector de la vivienda registró 486 millones de pesos, es decir, 20.9% del total de las pérdidas (Bitrán, 2001).

En las regiones de Teziutlán, Huachinango, Zacapoaxtla y Chignahuapan, los daños que se registraron en los sectores de vivienda y educación incluyeron 16,511 viviendas y 570 escuelas afectadas, así como el Instituto Tecnológico de Teziutlán, en el que dos módulos fueron desplantados sobre el cauce de un río (Bitrán, 2001).

En cuanto a los sectores agropecuario, forestal y pesquero se experimentaron daños relacionados con la producción y capital fijo equivalentes a casi un 10% de las pérdidas totales (Bitrán, 2001; Domínguez, 2000). En la Tabla 4.2, se puede apreciar el resumen de los daños totales en millones de pesos por sector afectado calculados por Bitrán (2001).

Sector/ Concepto	Daños directos	Daños indirectos	Total	Porcentaje del total
<b>SECTORES SOCIALES</b>	505.0	15.0	520.0	22.4
<b>Vivienda</b>	486.1	-	486.1	20.9
<b>Educación</b>	16.4	15.0	31.4	1.3
<b>Salud</b>	2.5	37	2.5	0.1
<b>INFRAESTRUCTURA Y SERVICIOS</b>	1540.0	1.0	1541.0	66.3
<b>Agua y saneamiento</b>	84.6	1.8	86.4	3.7
<b>Energía</b>	481.1	-	481.1	20.7
<b>Transporte y comunicaciones</b>	974.3	-	974.3	41.9
<b>SECTORES PRODUCTIVOS</b>	190.7	35.0	225.7	9.7
<b>Agropecuario, pesca y forestal</b>	190.7	35.0	225.7	9.7
<b>Agricultura</b>	132.5	35.0	167.0	7.2
<b>Ganadería</b>	15.4	-	15.4	0.7
<b>Forestal</b>	35.0	-	35.0	1.5
<b>Acuicultura</b>	7.8	-	7.8	0.3
<b>ATENCIÓN A LA EMERGENCIA</b>		38.6	38.6	1.6
<b>TOTAL DE EFECTOS</b>	<b>2235.7</b>	<b>89.8</b>	<b>2325.3</b>	<b>100.0</b>

Tabla 4.2. Resumen de daños totales (millones de pesos) (Fuente: Bitrán, 2001).

Finalmente, el martes 12 de octubre de 1999 en el 1er artículo de la primera sección del Diario Oficial de la Federación, se declararon oficialmente a los 80 municipios del estado de Puebla afectados por los efectos de las precipitaciones extraordinarias, como “Zonas de Desastre” (Diario Oficial de la Federación, 1999). Esto permitió poner en práctica las Reglas de Operación del Fondo de Desastres (FONDEN), las cuales tiene por objetivo autorizar y ejecutar acciones para mitigar los efectos producidos por un fenómeno natural perturbador y regulan el acceso a los recursos correspondientes para auxiliar los daños de acuerdo con los principios de conformidad de los parámetros definidos en los Lineamientos de Operación del mismo (SHCP, 2010).

De esta manera se definió la asignación de recursos correspondientes a las afectaciones en el estado de Puebla por parte de distintas dependencias del gobierno federal. Se puede apreciar en la Tabla 4.3 que la aportación federal ascendió a 71.2 % del total aplicado y la mayoría de los recursos provinieron de dependencias que corresponden principalmente a los sectores de infraestructura carretera, servicios públicos y vivienda (Bitrán, 2001).

<b>Dependencia</b>	<b>Federal</b>	<b>Estatal</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
<b>SEDESOL</b>	129.3	189.3	318.5	17.2
<b>SAGAR</b>	34.0	14.6	48.6	2.6
<b>SCT</b>	582.6	286.4	869.0	46.9
<b>SEMARNAT</b>	8.2	8.2	16.3	0.9
<b>SEP</b>	0.9	0.0	0.0	0.0
<b>SS</b>	5.0	0.0	5.0	0.3
<b>SEDENA</b>	1.2	0.0	1.2	0.1
<b>CFE</b>	476.9	0.0	476.9	25.7
<b>CNA</b>	50.3	38.1	88.4	4.8
<b>IMSS</b>	23.8	0.0	23.8	1.2
<b>DICONSA</b>	8.8	0.0	8.8	0.4
<b>Total</b>	<b>1,318</b>	<b>534.4</b>	<b>1,853.4</b>	<b>100.0</b>
<b>Participación</b>	<b>71.2</b>	<b>18.8</b>	<b>100%</b>	

Tabla 4.3. Recursos FONDEN para daños generados por las lluvias e inundaciones de Septiembre-Octubre, 1999 (Fuente: Secretaria de Gobernación adaptado por Bitrán, 2001).

## 4.2 La construcción del riesgo de desastre en La Aurora

### *Localización*

El área de estudio se localiza al noreste de la ciudad de Teziutlán, la cual comprende la colonia La Aurora, el fraccionamiento Los Mirtos y el Panteón Municipal, zona en donde ocurrió el desastre el 5 de octubre de 1999.



Figura 4.3. Delimitación del área de estudio.

### *Antecedentes*

En el mes de junio del año 2016 se realizó una visita a algunos residentes de La Aurora, quienes han sido testigos de la transformación espacial en la colonia desde sus inicios con la llegada de los primeros habitantes, hasta las condiciones actuales tras el desastre de 1999. En el presente apartado se relatan estos acontecimientos.

De acuerdo con la señora Esther Fernández quien es la vecina con mayor antigüedad residiendo en La Aurora (alrededor de 60 años), en el año de 1970 la ladera posterior al Panteón Municipal, se utilizaba para cultivar maíz y árboles frutales principalmente

manzanos, perales, durazneros y aguacatales, mientras que en los alrededores existían únicamente diez casas (comunicación personal, junio de 2016). En el año 1990, el uso del suelo fue cambiando considerablemente con la llegada de más personas a la colonia. El propietario del terreno, el señor Roberto Ruiz, empezó a lotificar con fines inmobiliarios, creando una nueva zona habitacional con 45 casas sobre la ladera, la cual tenía el nombre de “Fraccionamiento Los Mirtos” (M. Rodríguez, comunicación personal, junio de 2016), en donde habitaban principalmente personas dedicadas a la industria textil maquiladora (García, 2000).



Figura 4.4. La Aurora 1978 y 1991 (Fotografías aéreas proporcionadas por el INEGI, 1978 y 1991).

La construcción del Panteón Municipal de Teziutlán remonta a finales del siglo XIX (Vergara-Landeros, 2014). De acuerdo con los vecinos, desde que llegaron a establecerse en la colonia dicho panteón ha sido su principal problema. En primer lugar por su creciente expansión hacia el flanco sureste, y en segundo, ya que la ladera posterior ha sido utilizada como depósito de ataúdes viejos y otros desechos, además de que las fosas y capillas siempre han carecido de mantenimiento y se dejan descubiertas, por lo que en época de lluvias se inundan, y el agua se infiltra en la ladera.

### 4.3 Martes 5 de Octubre de 1999: el desastre en la Colonia La Aurora

En la ladera posterior al Panteón Municipal de Teziutlán, en donde se localizaba el fraccionamiento “Los Mirtos”, alrededor de las 12.30 hrs (García, 2000) del martes 5 de Octubre de 1999 ocurrió un proceso de remoción en masa (Figura 4.5), en donde se removieron aproximadamente 7,500 m<sup>3</sup> de suelo (Mendoza *et al.*, 2002). El movimiento inicial tuvo un mecanismo de deslizamiento y posteriormente se convirtió en un flujo franco-limoso (Mendoza *et al.*, 2002).



Figura 4.5. El deslizamiento de La Aurora (Fuente: CENAPRED, 2008; INEGI Fotografía aérea Octubre 1999).

De acuerdo con Noriega (2005), el elemento principal que generó la inestabilidad de la ladera fue la alta presencia de agua, dadas las condiciones meteorológicas extremas se acumuló en el flanco sur del Panteón cerca del hombro del deslizamiento y se infiltró en la ladera generando una alta presión de poro en el suelo.

Debido a las intensas lluvias, seguían suspendidas las actividades escolares y laborales, por lo que el día que ocurrió el deslizamiento las personas se encontraban en sus hogares (E. Fernández, comunicación personal, de junio 2016). La señora Esther afirma que existieron

tres movimientos ladera abajo y se escuchó “un gran estruendo” previo a que ocurriera el evento. Durante el inicio del deslizamiento muchas personas trataron de rescatar a los vecinos que se encontraban atrapados en el lodo, sin embargo, cuando ocurrió el último movimiento, el cual fue el de mayor fuerza, nadie salió con vida y todas las casas quedaron enterradas o parcialmente destruidas (E. Fernández, comunicación personal, de junio de 2016). Los demás habitantes que presenciaron el evento comenzaron a salir por la Av. Guillermo Prieto y las escaleras en la parte oeste de la ladera posterior del panteón (Figura 4.6), rumbo al centro de la ciudad de Teziutlán (M. Rodríguez, comunicación personal, junio de 2016).



Figura 4.6. Rutas de salida durante el desastre del martes 5 de Octubre (Fuente: M. Rodríguez, comunicación personal, 22 de junio de 2016).

Una hora después del evento, después de escuchar en la radio local lo acontecido en el fraccionamiento los Mirtos, aproximadamente 500 voluntarios comenzaron con las acciones de rescate y apoyo para los damnificados (García, 2000). Cabe destacar que posteriormente este suceso se conocería como “El desastre de La Aurora”, ya que utilizaron como referencia

la avenida del mismo nombre para que acudieran las personas a la zona en donde ocurrió el deslizamiento (M. Rodríguez, comunicación personal, 22 de junio de 2016).

No obstante, debido a las malas condiciones en la zona del desastre era imposible el paso de maquinaria pesada. Aunado a las constantes lluvias y la posibilidad de nuevos deslizamientos, las labores oficiales de búsqueda y rescate fueron suspendidas (Domínguez, 2000). Fue hasta el jueves 7 de octubre dos días después del desastre, que intervino la SEDENA en el rescate (García, 2000). Ese día miembros del ejército, policías, bomberos, voluntarios y perros entrenados comenzaron a remover los escombros (Figura 4.7) con el fin de encontrar a las víctimas desaparecidas (acción que duraría alrededor de un mes). Aproximadamente se encontraban 1400 personas auxiliando en la zona (Rice, 1999 en *Times Daily*); en total se reconocieron y contabilizaron 107 personas fallecidas (Domínguez, 2000).



Figura 4.7. Soldados auxiliando en La Aurora, 1999 (Fuente: <http://noticiastlapacoyan.blogspot.mx/2015/10/16-anos-de-la-tragedia-en-teziutlan.html>).

Aproximadamente 117 personas de La Aurora se instalaron en los albergues (Domínguez, 2000), y el tiempo que estuvieron ahí dependió en gran parte de las circunstancias particulares de cada familia. Otros decidieron quedarse en casas de familiares o amigos como el caso de la señora Esther, quien se quedó alrededor de un mes en la casa de un conocido, mientras que los de mayor poder adquisitivo prefirieron rentar en otro lugar (Salinas, 2015).

Cuando las personas regresaron a sus casas, después de declarar a la colonia como “zona de alto riesgo”, muchos de ellos se encontraron con sus viviendas saqueadas, sin luz ni agua y permanecieron así durante un gran periodo de tiempo (E. Fernández, comunicación personal, junio de 2016). Por otro lado, el presidente Ernesto Zedillo declaró que habría una nueva zona habitacional llamada Lomas de Ayotzingo para reubicar a todos los damnificados del desastre en Teziutlán. Muchos vecinos de La Aurora no aceptaron la oferta por diversas cuestiones, una de ellas es el tamaño de su propiedad, que en comparación con las casas de la nueva colonia, era considerablemente más pequeña (M. Rodríguez, comunicación personal, junio de 2016).

Al quedar La Aurora inscrita como zona de alto riesgo, el gobierno federal envió brigadas que visitaban a las personas que decidieron quedarse en su vivienda con el propósito de que firmaran un documento legal en el cual, el titular de la propiedad se hacía responsable de lo que sucediera con su casa y su familia (Salinas, 2015).

Tras el evento ocurrido, surgieron problemas de carácter social y psicológico en la población de Teziutlán. Por un lado, se encontraban aquellas personas que buscaban culpar a las autoridades municipales y estatales de la incapacidad para resolver el problema y de lo acontecido, por otro, los que quedaron emocionalmente devastados y que no recibían apoyo para un tratamiento por parte del gobierno federal (García, 2000). De igual manera, durante los meses subsecuentes al desastre se reportaron en la PROFECO aumentos excesivos en los costos de víveres, así como escases y saqueos en los lugares de abastecimiento (García, 2000).

Como forma de remembranza al desastre ocurrido el 5 de octubre de 1999, los vecinos realizaron eventos religiosos llamados: “cabo de año”, durante los primero tres años el día 5 de cada mes celebraron una misa por la memoria de los difuntos, además de realizar una procesión en la zona del desaparecido fraccionamiento Los Mirtos. En la actualidad solo se conmemora anualmente (E. Fernández, comunicación personal, junio del 2016).

La mayoría de las personas reubicadas siguen pagando el predio de su antigua casa en La Aurora, y en la práctica tienen permiso de sembrar y hacer el uso que quieran de su lote, salvo construir y vender (E. Fernández, comunicación personal, junio del 2016). En la actualidad, hay dos tipos de habitantes en La Colonia La Aurora: los primeros son personas que llevan viviendo toda su vida ahí y que durante el evento de 1999 sus casas no resultaron afectadas, y los segundos son residentes nuevos que rentan a personas reubicadas que habitan en Ayotzingo, y muchos de ellos desconocen el evento sucedido.

## CAPÍTULO V. RESULTADOS

En los siguientes apartados se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados *in situ* y en laboratorio para la caracterización de los materiales de la ladera ubicada en la sección posterior al panteón de la colonia La Aurora. En la Figura 5.1, se pueden apreciar los puntos de muestreo utilizados (A, B, C, D y E) para la realización de éstas pruebas.



Figura 5.1. Puntos de muestreo utilizados.

### 5.1 Resultados de los ensayos *in situ*

#### *Prueba de conductividad hidráulica*

Esta prueba se llevó a cabo en los puntos B, D y E de la zona de estudio. De acuerdo con los datos obtenidos (Tabla 5.1), se establece que el valor máximo fue de  $7.9 \times 10^{-3}$  cm/seg en el punto D, lo cual indica que la infiltración entre los poros del suelo es mayor en este lugar y es una característica de los suelos con textura areno-limosa. Por otro lado, el valor mínimo de  $3.8 \times 10^{-4}$  se registró en el punto B, el sitio más cercano a la corona del deslizamiento, que por su valor se clasifica como un suelo areno-arcilloso, mientras que el valor del punto E fue de  $5.7 \times 10^{-4}$  con la misma textura. Correlacionando los datos con el grado de permeabilidad, para los puntos B y E es baja, mientras que la del sitio D es media.

Punto	Conductividad hidráulica ( $K_f$ ) cm/seg
B	$3.8 \times 10^{-4}$
D	$7.9 \times 10^{-3}$
E	$5.7 \times 10^{-4}$

Tabla 5.1 Resultados de Conductividad hidráulica.

## 5.2 Resultados de los ensayos en laboratorio

### Granulometría

Para la realización de esta prueba se utilizaron 16 muestras de los puntos A, B, C y D. Para los primeros tres se ensayaron 9 muestras alteradas de la misma profundidad, mientras que para el punto D se utilizó un perfil de suelo con siete horizontes. A continuación, se exponen las curvas granulométricas obtenidas de cada prueba.

### Resultados del punto A

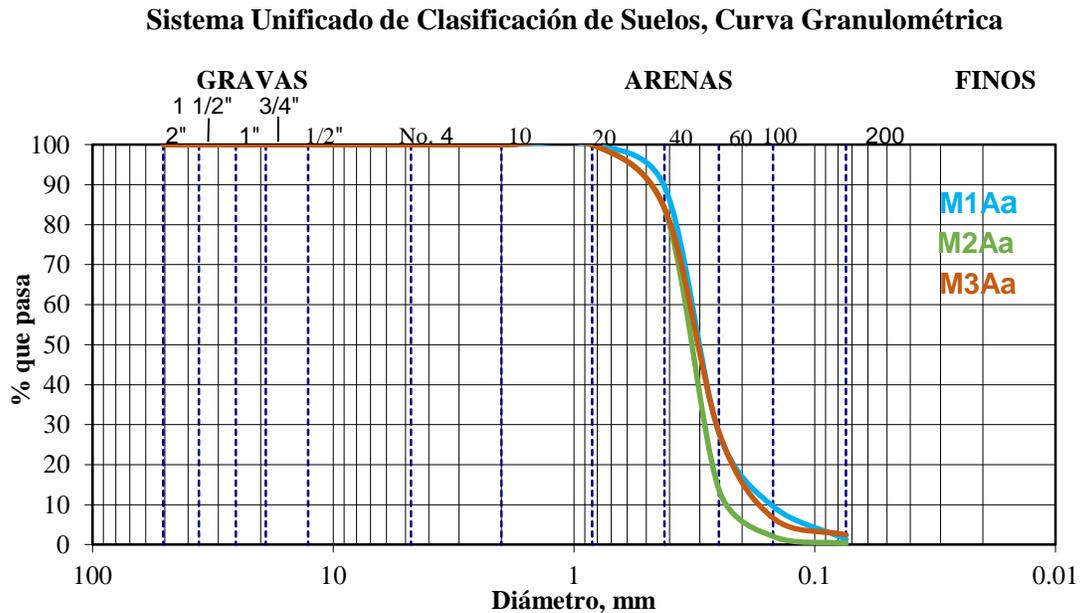


Figura 5.2. Curva granulométrica de las muestras correspondientes al punto A.

La gráfica del punto A (Figura 5.2), ilustra la distribución granulométrica de las tres muestras de suelo ensayadas (M1Aa, M2Aa y M3Aa) que al ser de la misma profundidad, tuvieron un comportamiento similar. En las tres líneas se aprecia una granulometría uniforme, que representa

suelos mal graduados, lo que significa que no la variación de tamaños es mínima. Los porcentajes de granos finos y gruesos para cada muestra son los siguientes:

- M1Aa: 1.33% y 98.67%
- M2Aa: 0.31% y 99.69%
- M3Aa: 2.43% y 97.57%

*Resultados del punto B*

**Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, Curva Granulométrica**

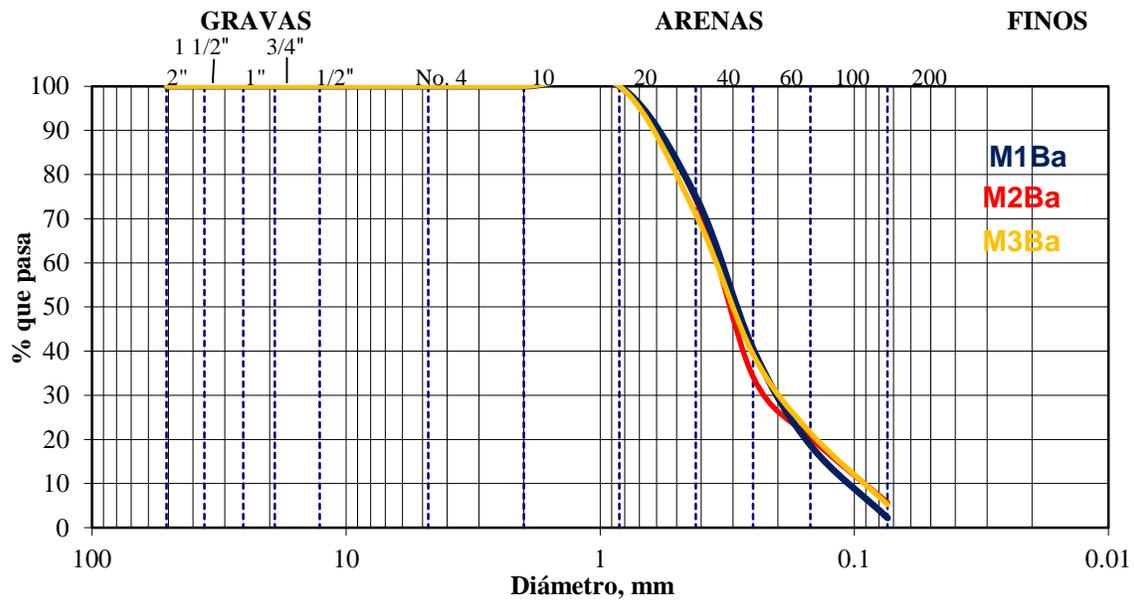


Figura 5.3. Curva granulométrica de las muestras correspondientes al punto B.

La gráfica correspondiente al punto B (Figura 5.3), representa la distribución granulométrica de las tres muestras de suelo ensayadas (M1Ba, M2Ba y M3Ba). En las tres líneas se aprecia una granulometría continua. Los porcentajes de granos finos y gruesos para cada muestra son los siguientes:

- M1Ba: 5.66% y 94.34%
- M2Ba: 2.22% y 97.78%
- M3Ba: 5.23% y 94.77%



Resultados del punto D

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, Curva Granulométrica

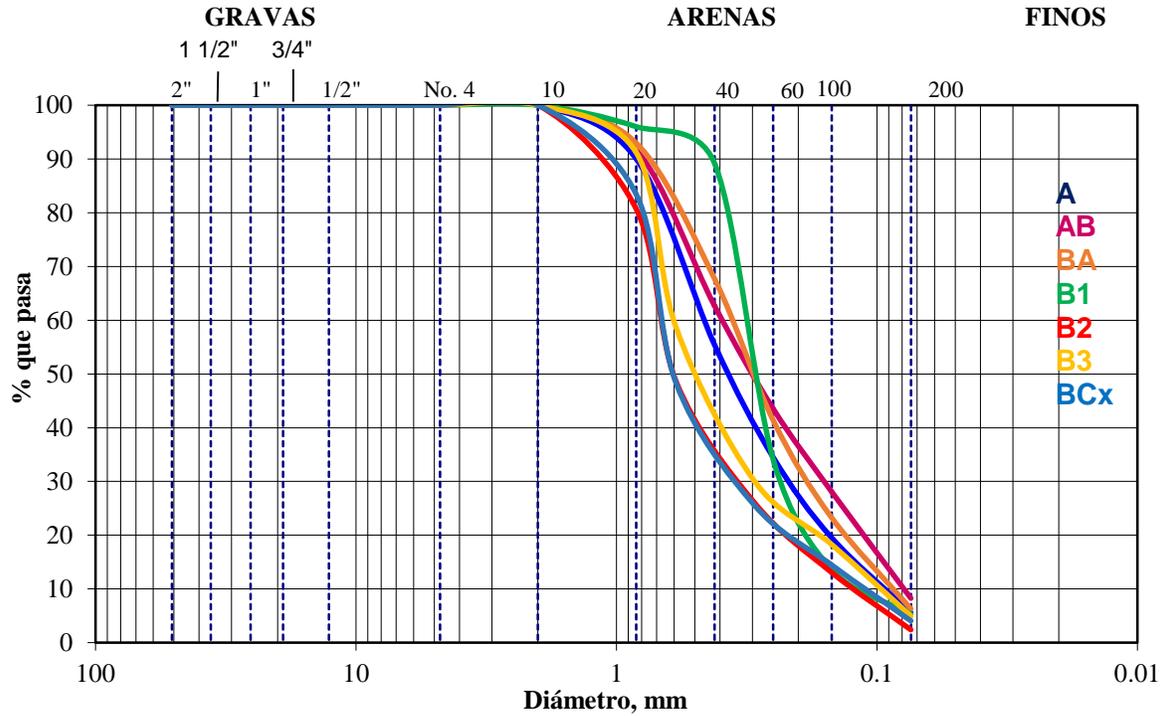


Figura 5.5. Curva granulométrica de las muestras correspondientes al punto D.

La curva granulométrica correspondiente al perfil de suelo en el punto D (Figura 5.5), muestra la distribución granulométrica de los siete horizontes ensayados (A, AB, BA, B1, B2, B3 y BCx). Se puede apreciar en los horizontes B2 y BCx que son suelos bien graduados con una granulometría continua, mientras que los cinco restantes se caracterizan por una granulometría uniforme. Los porcentajes de granos finos y gruesos para cada muestra son los siguientes:

- A: 5.57% y 94.43%
- AB: 8.23% y 91.77%
- BA: 6.31% y 93.69%
- B1: 2.70% y 94.69%
- B2: 2.41% y 97.59%
- B3: 4.94% y 95.06%
- BCx: 3.83% y 95.97%

### Límites de Atterberg

Para llevar a cabo esta prueba se utilizaron 16 muestras alteradas de cuatro sitios diferentes (A, B, C y D). En el caso de los puntos A, B y C se ocuparon muestras de la misma profundidad, ya que se tienen que calcular tres resultados como mínimo con el fin de obtener un índice de error bajo. Por otro lado, para el punto D se ocuparon muestras de diferentes profundidades de un perfil de suelo para comparar los resultados obtenidos por medio de dos métodos para la determinación de los límites de consistencia: la copa de Cassagrande y el Cono de Penetración. A continuación se muestran las gráficas de los resultados obtenidos, en donde  $R^2$  representa el índice de confianza de los datos, WL el límite líquido, Wp límite plástico y por último Ip que simboliza el índice de plasticidad.

#### Resultados del punto A

Se ensayaron tres muestras alteradas (M1Aa, M2Aa y M3Aa), las cuales se encontraban a una profundidad de 2.36 m. Las siguientes gráficas indican los resultados de los límites de Atterberg obtenidos con la Copa de Cassagrande.

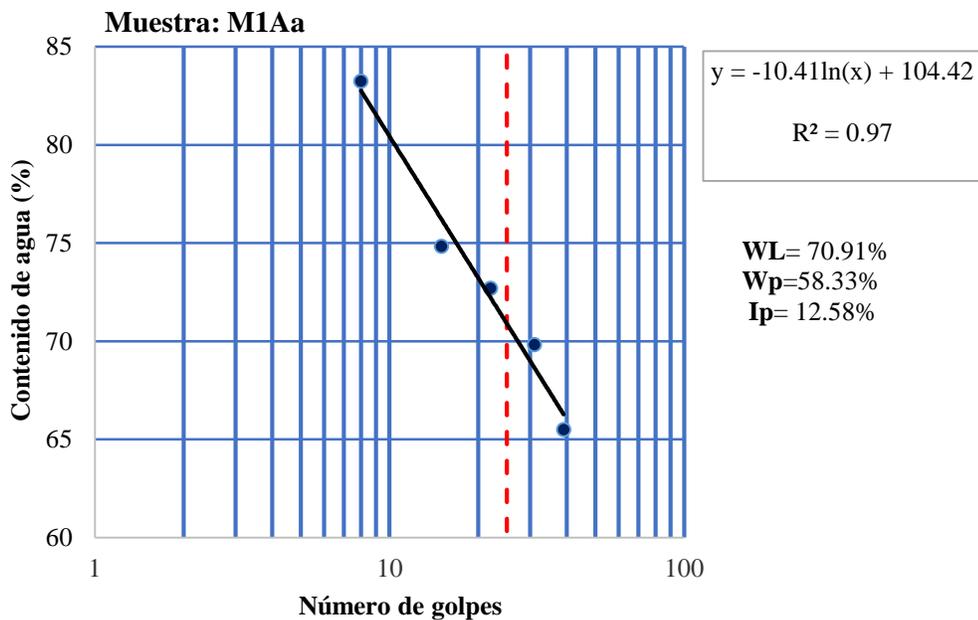


Figura 5.6. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M1Aa.

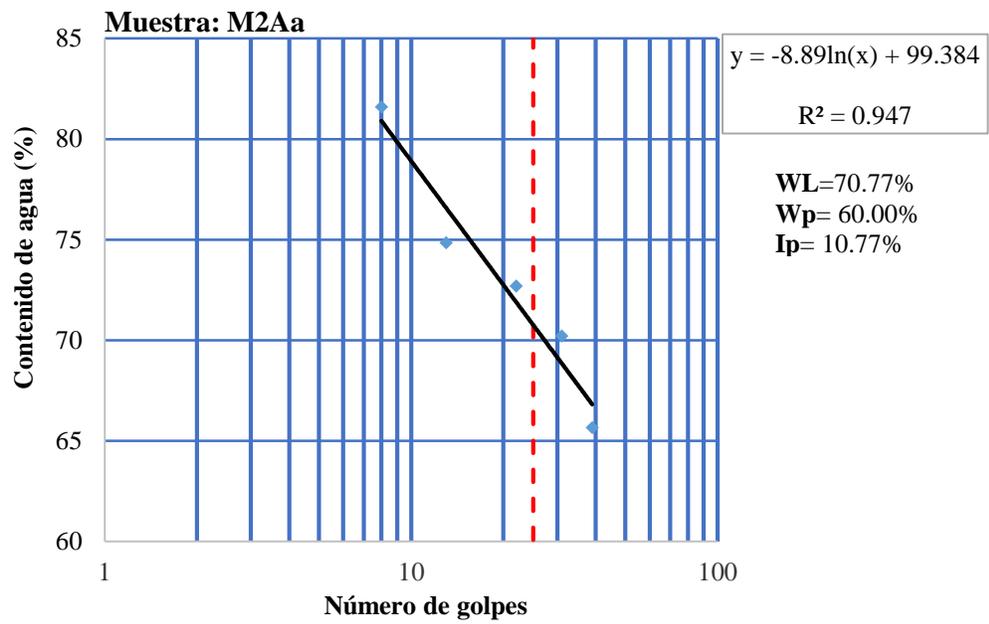


Figura 5.7. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M2Aa.

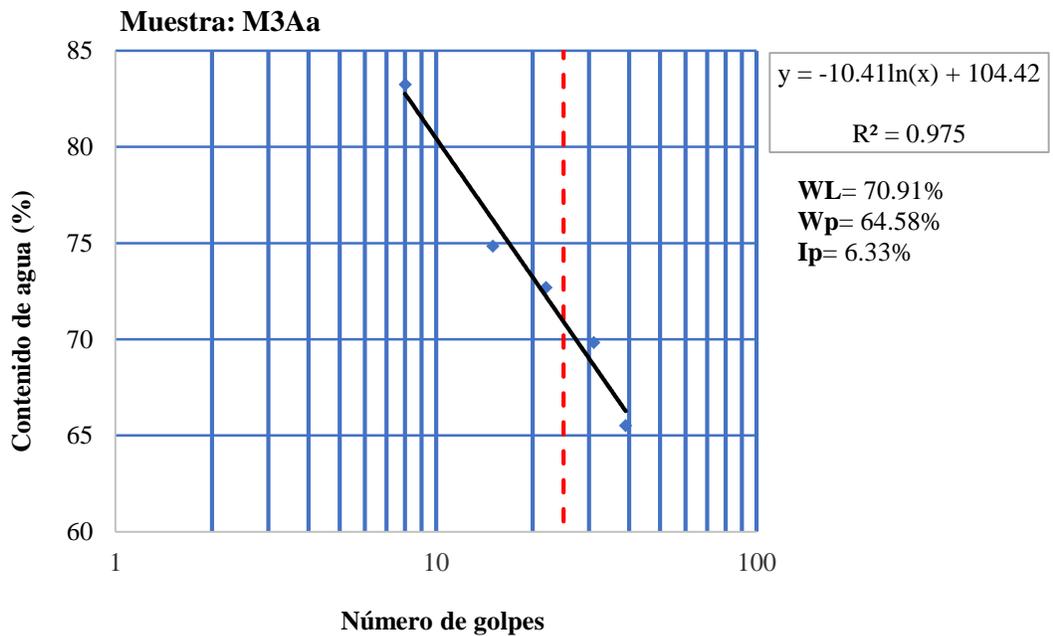


Figura 5.8. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M3Aa.

### Resultados del punto B

Se ensayaron tres muestras alteradas (M1Ba, M2Ba y M3Ba), las cuales se encontraban a una profundidad de 2.50 m. Las siguientes gráficas indican los resultados de los límites de Atterberg realizados con la Copa de Casagrande.

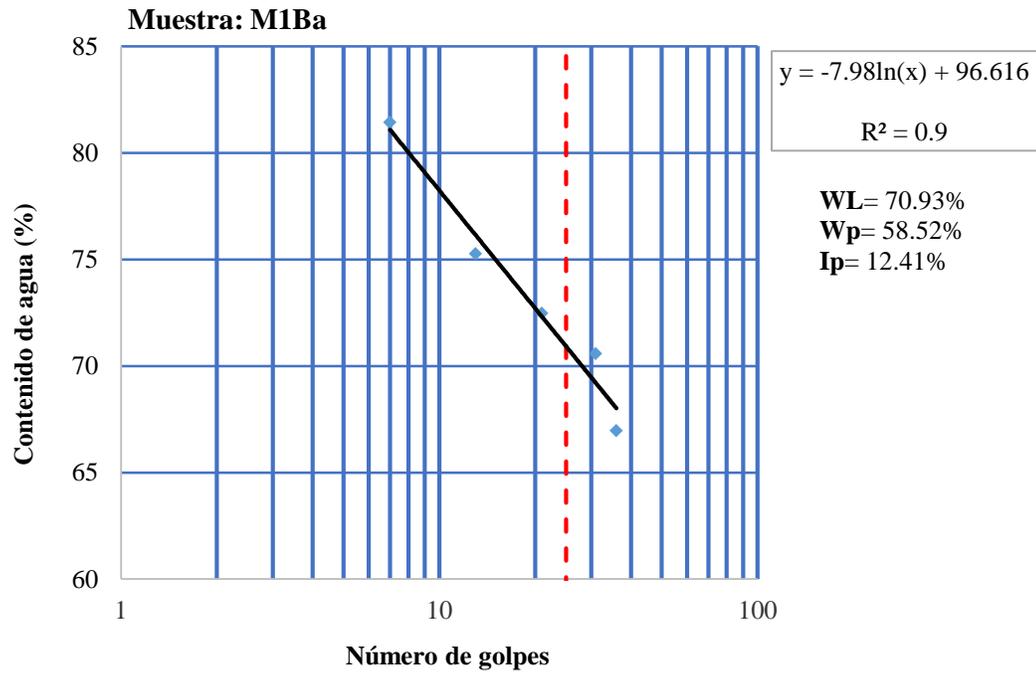


Figura 5.9. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M1Ba.

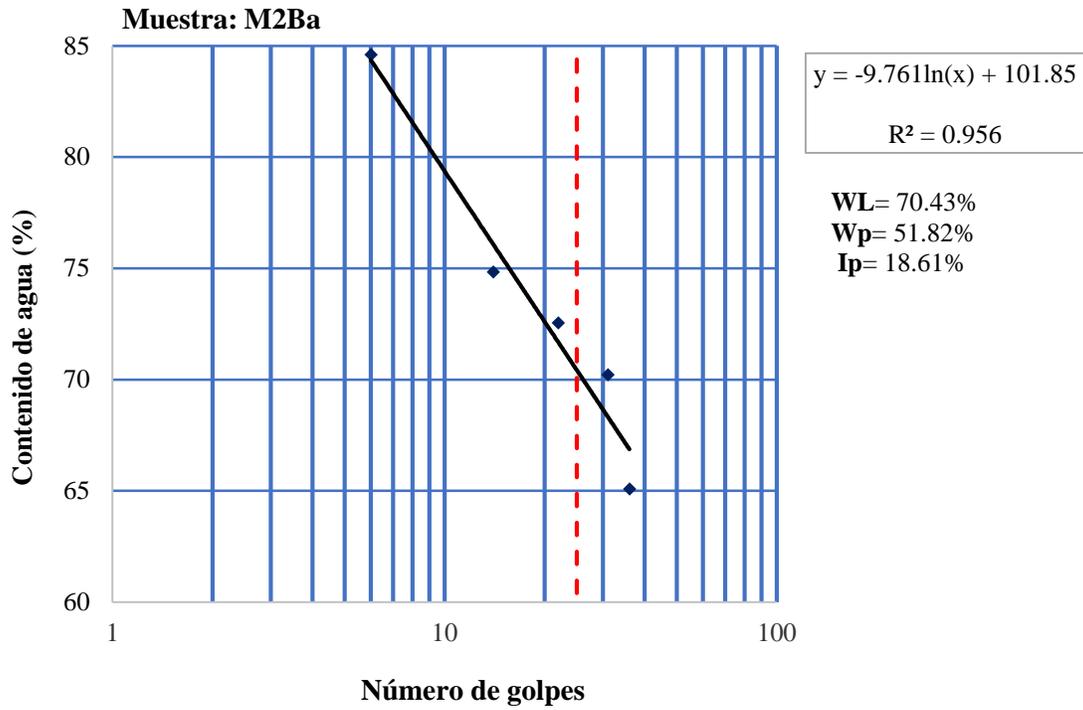


Figura 5.10. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M2Ba.

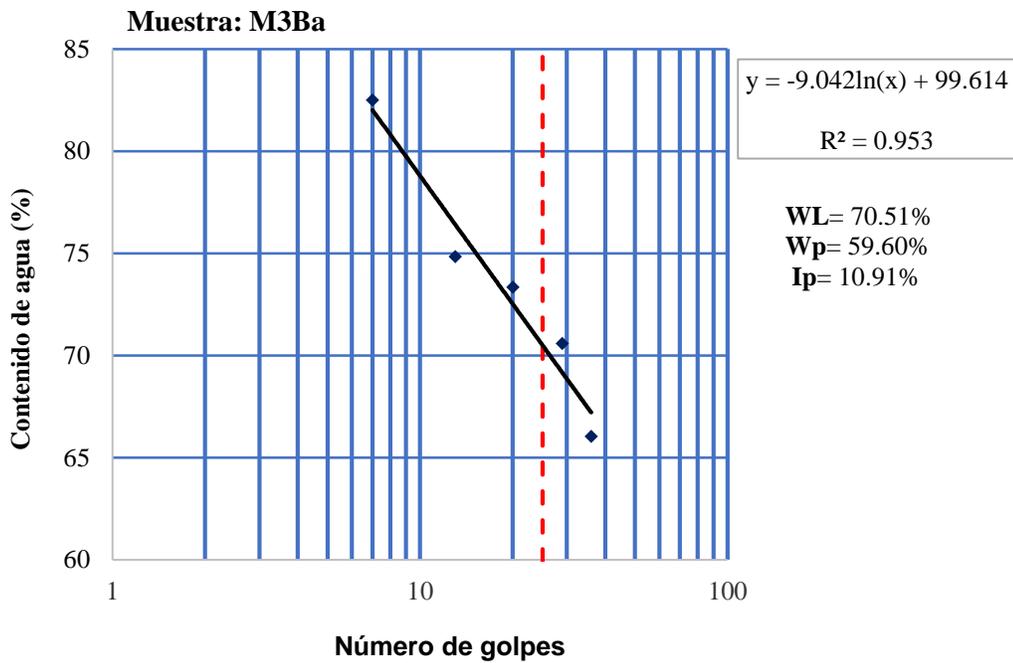


Figura 5.11. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M3Ba.

### Resultados del punto C

Se ensayaron tres muestras alteradas (M1Ca, M2Ca y M3Ca), las cuales se encontraban a una profundidad de 2.36 m. Las siguientes gráficas indican los resultados de los límites de Atterberg realizados con la Copa de Cassagrande.

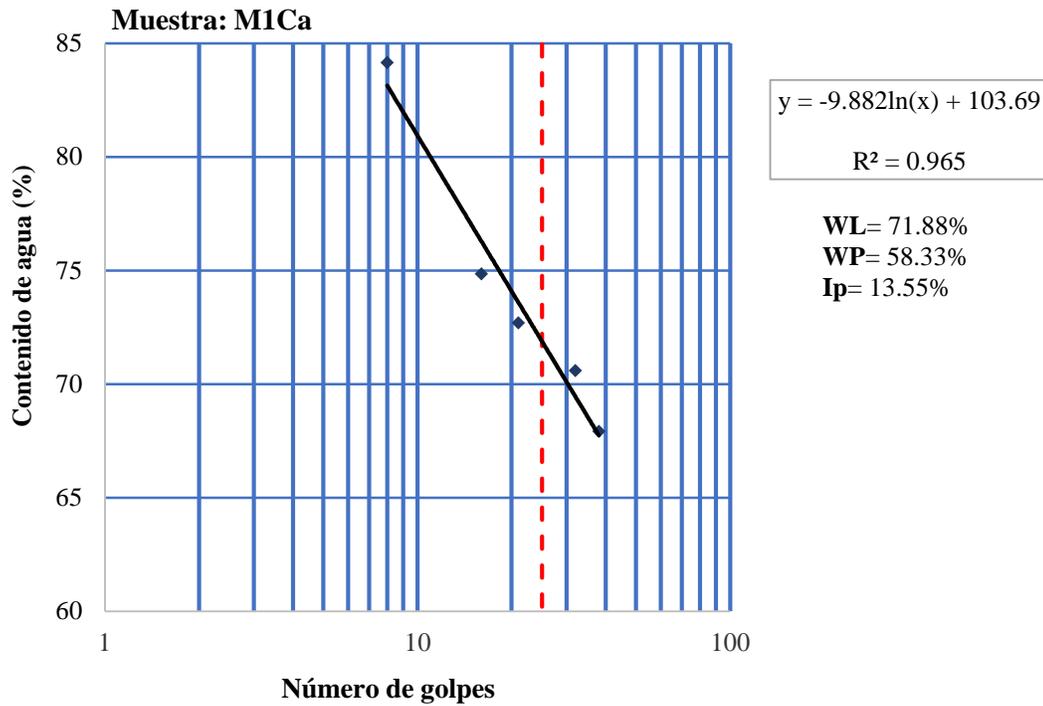


Figura 5.12. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M1Ca.

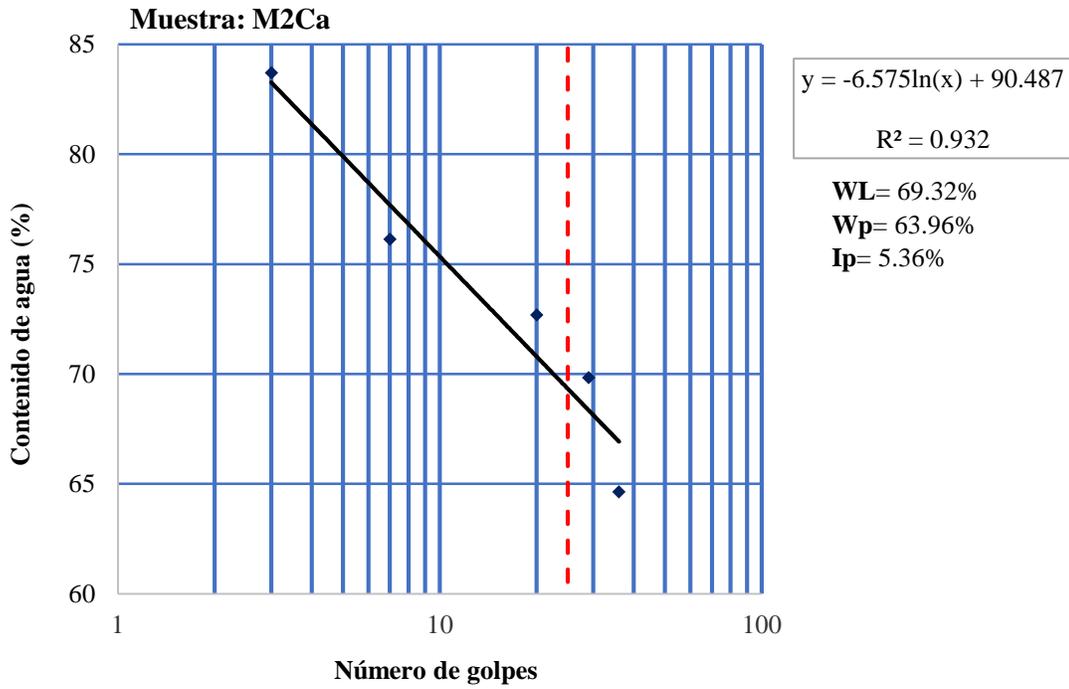


Figura 5.13 Gráfica de límites de consistencia de la muestra M2Ca.

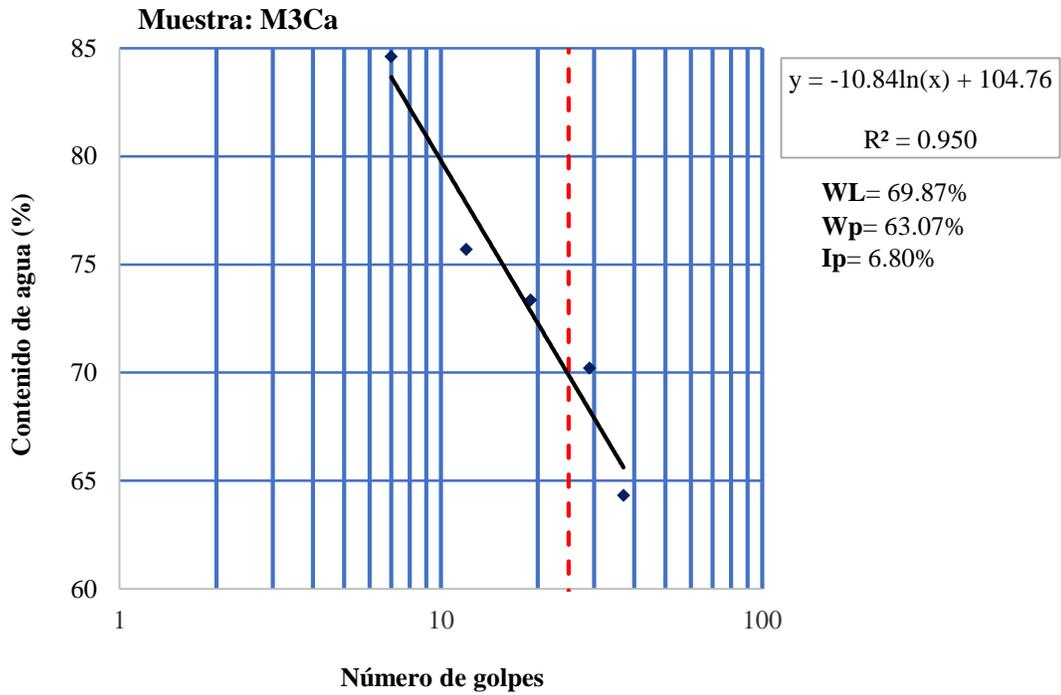


Figura 5.14. Gráfica de límites de consistencia de la muestra M3Ca.

Resultados generales de los límites de consistencia (Clasificación SUCS) puntos A, B y C

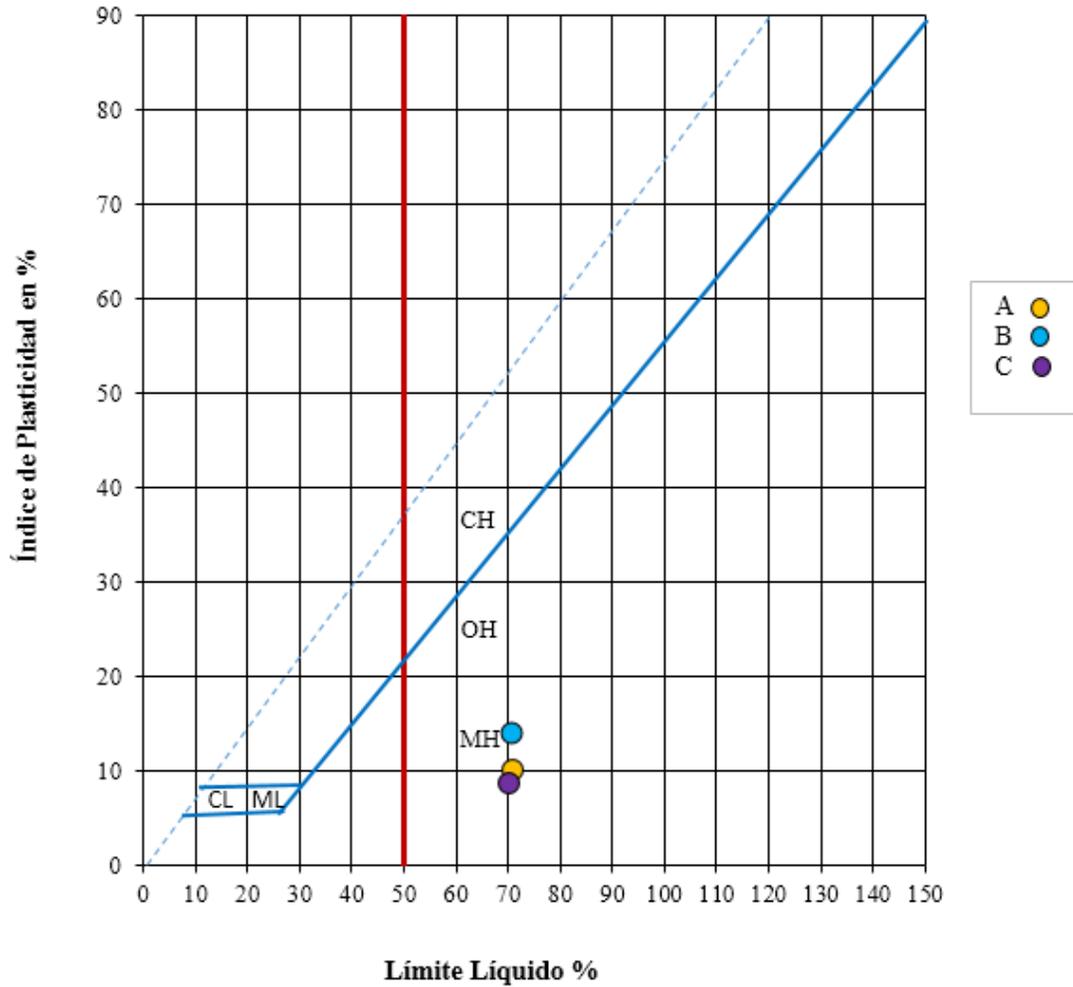


Figura 5.15. Gráfica de límites de consistencia y clasificación SUCS para los puntos A, B y C.

Una vez que se obtuvieron los resultados individuales, se calculó un promedio del límite líquido y el índice de plasticidad de las tres muestras ensayadas de cada punto, para ser representados en la carta de plasticidad de Casagrande y poder establecer su clasificación SUCS. Se clasifican en la categoría MH que corresponde a los limos inorgánicos de alta plasticidad.

### Resultados del punto D

Para determinar los límites de consistencia de este punto se ensayaron siete muestras alteradas (A, AB, BA, B1, B2, B3 y BCx), las cuales corresponden a diferentes horizontes de suelo. Se realizaron dos ensayos diferentes; en el primero se utilizó la Copa de Casagrande y en el segundo el Cono de Penetración. A continuación se muestran las gráficas obtenidas de ambos métodos.

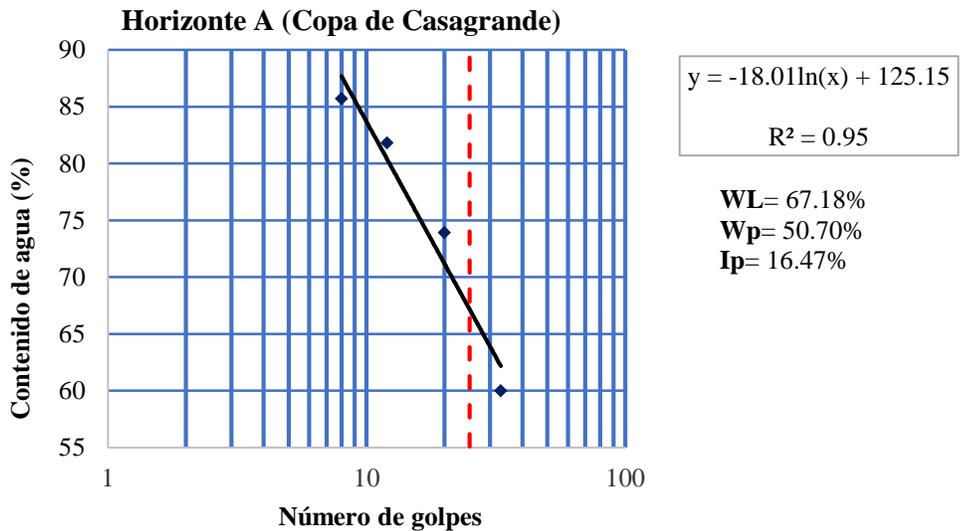


Figura 5.16. Gráfica de límites de consistencia del horizonte A (Copa de Casagrande).

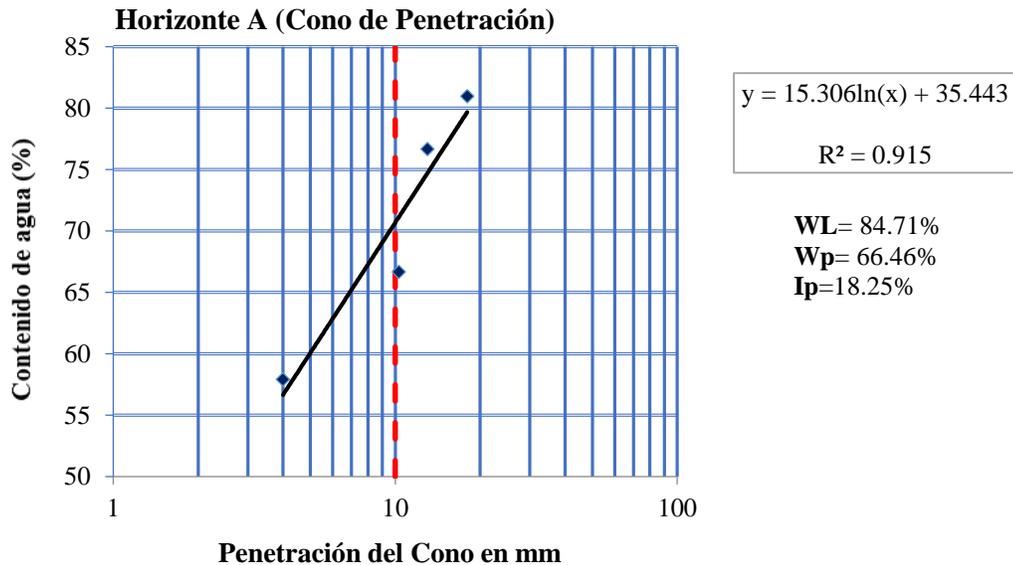


Figura 5.17. Gráfica de límites de consistencia del horizonte A (Cono de Penetración).

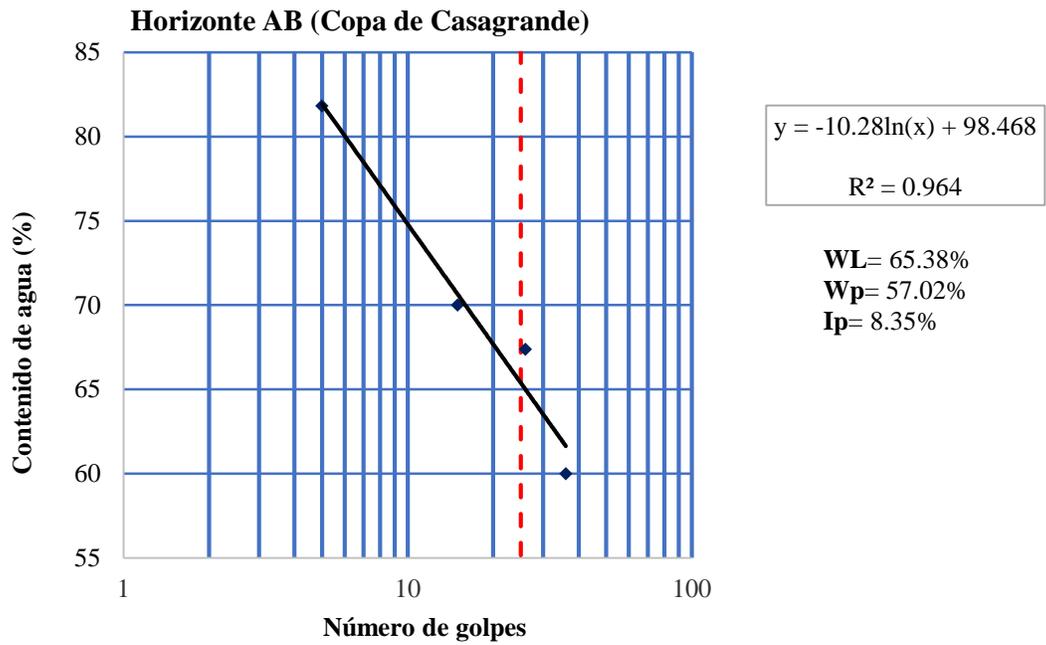


Figura 5.18. Gráfica de límites de consistencia del horizonte AB (Copa de Casagrande).

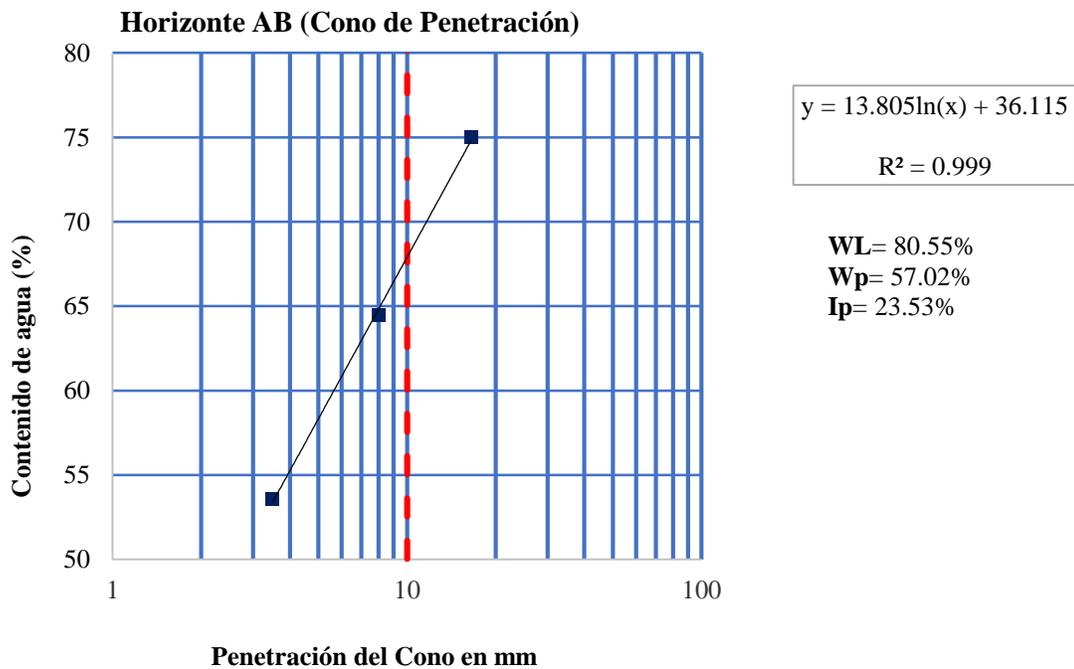


Figura 5.19. Gráfica de límites de consistencia del horizonte AB (Cono de Penetración).

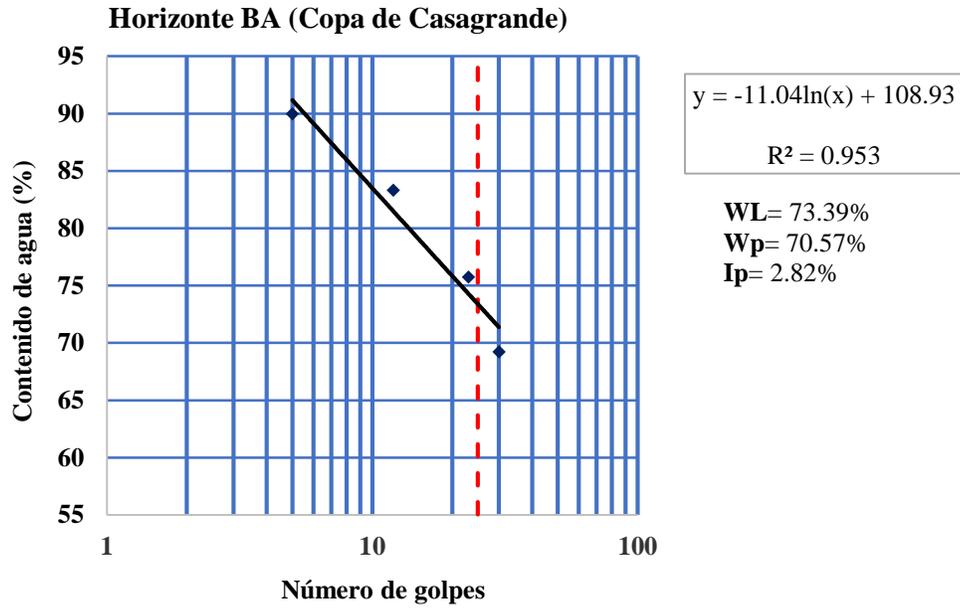


Figura 5.20. Gráfica de límites de consistencia del horizonte BA (Copa de Casagrande).

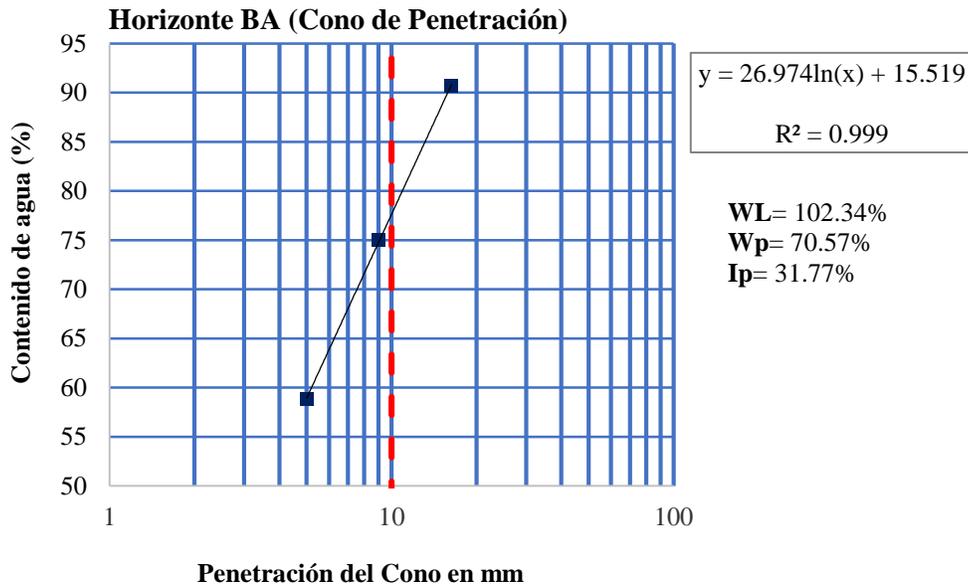


Figura 5.21. Gráfica de límites de consistencia del horizonte BA (Cono de Penetración).

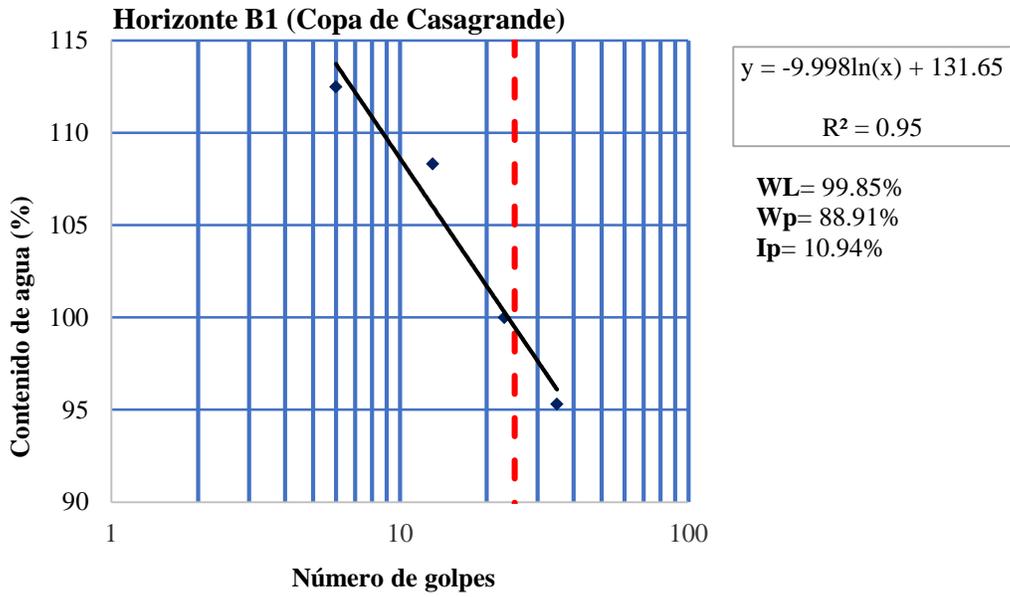


Figura 5.22. Gráfica de límites de consistencia del horizonte B1 (Copa de Casagrande).

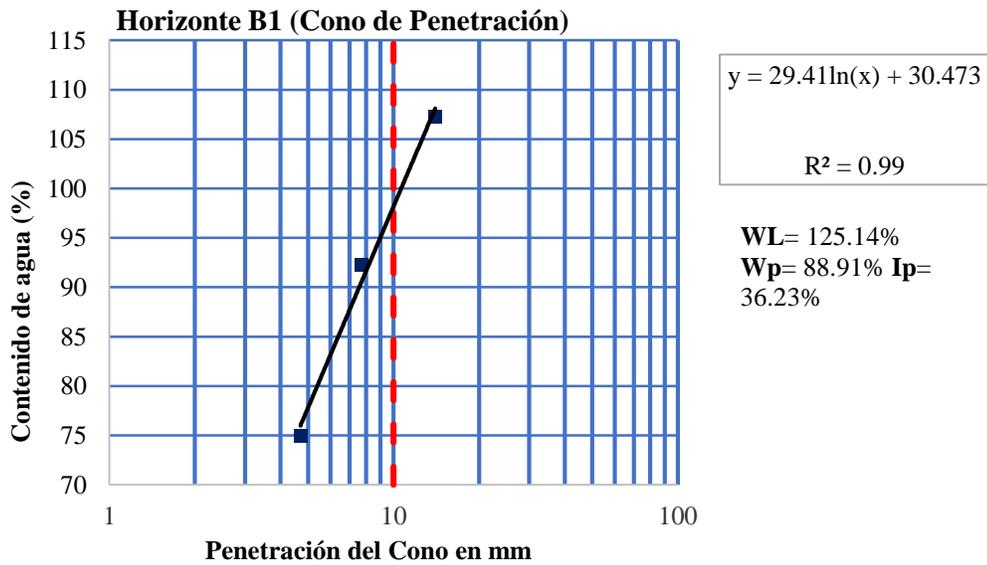


Figura 5.23. Gráfica de límites de consistencia del horizonte B1 (Cono de Penetración).

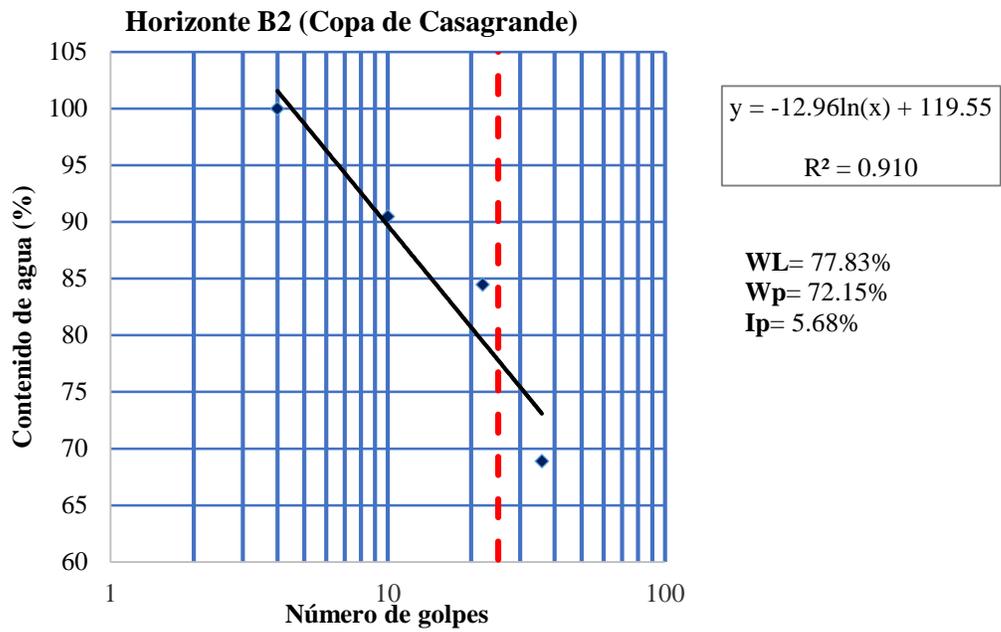


Figura 5.24. Gráfica de límites de consistencia del horizonte B2 (Copa de Casagrande).

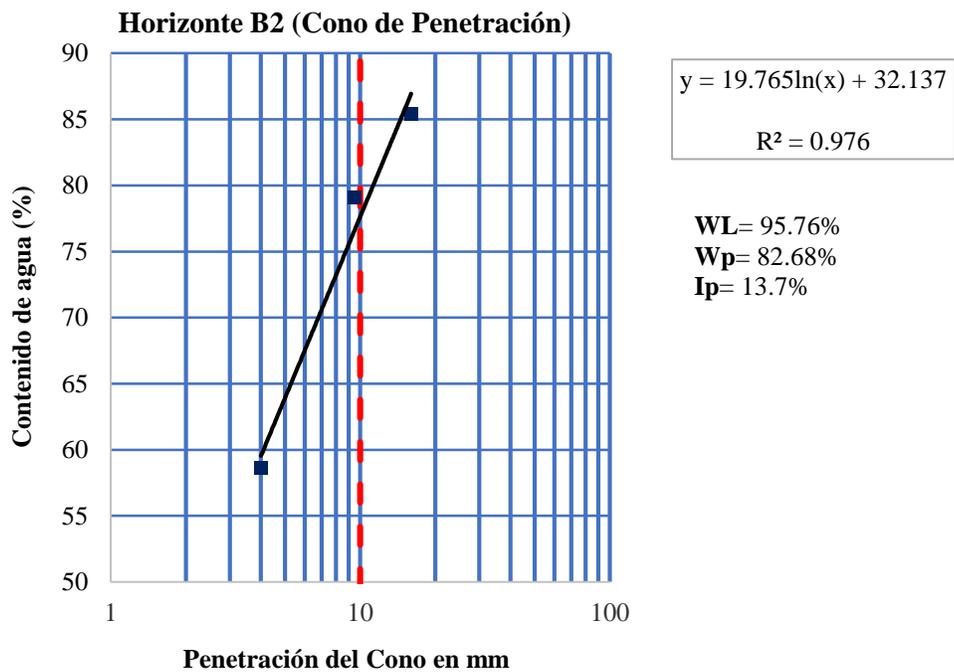


Figura 5.25. Gráfica de límites de consistencia del horizonte B2 (Cono de Penetración).

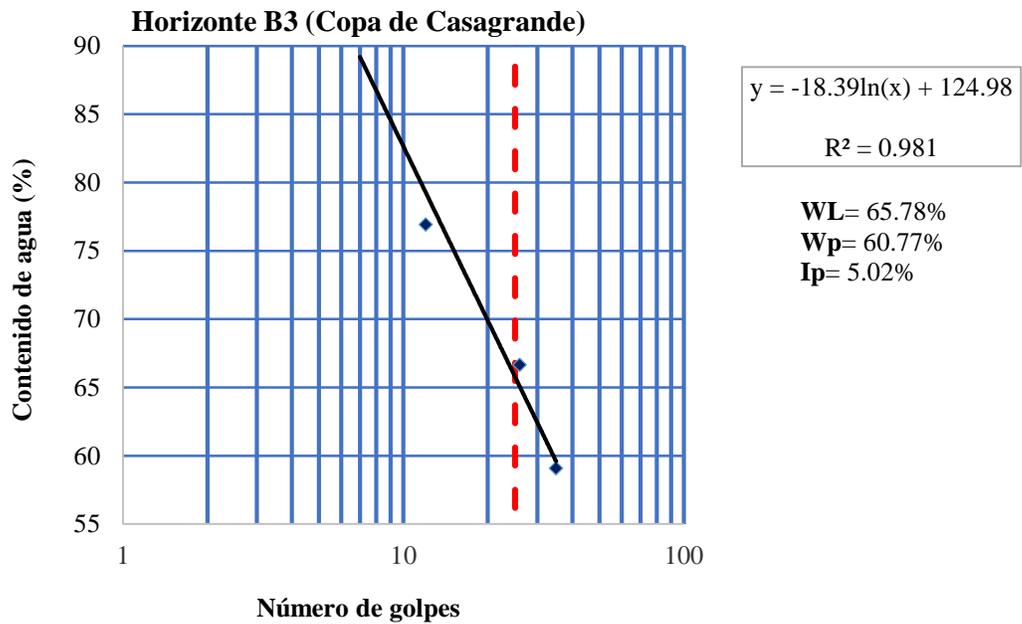


Figura 5.26. Gráfica de límites de consistencia del horizonte B3 (Copa de Casagrande).

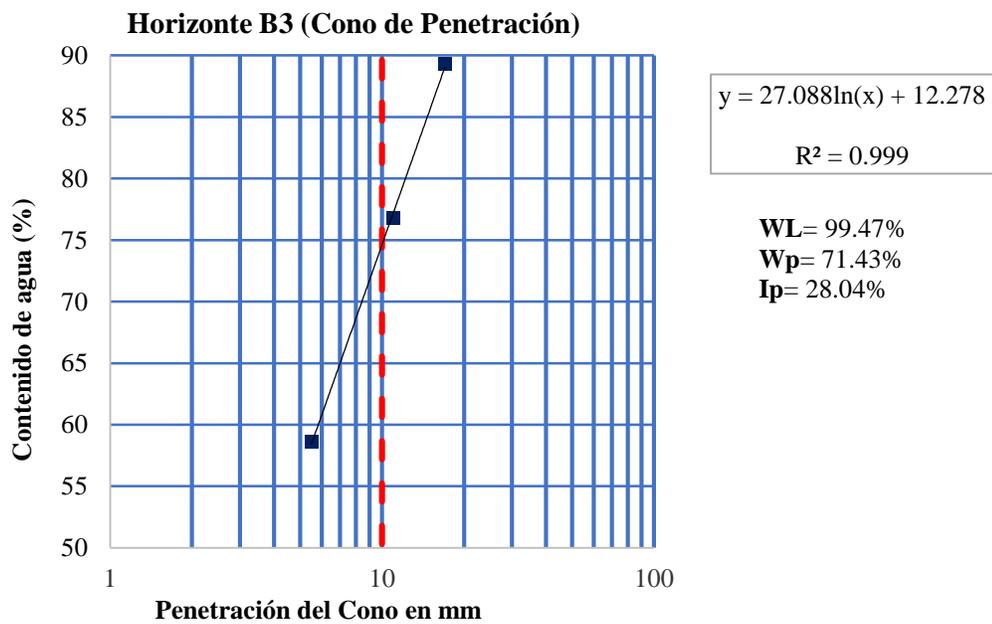


Figura 5.27. Gráfica de límites de consistencia del horizonte B3 (Cono de Penetración).

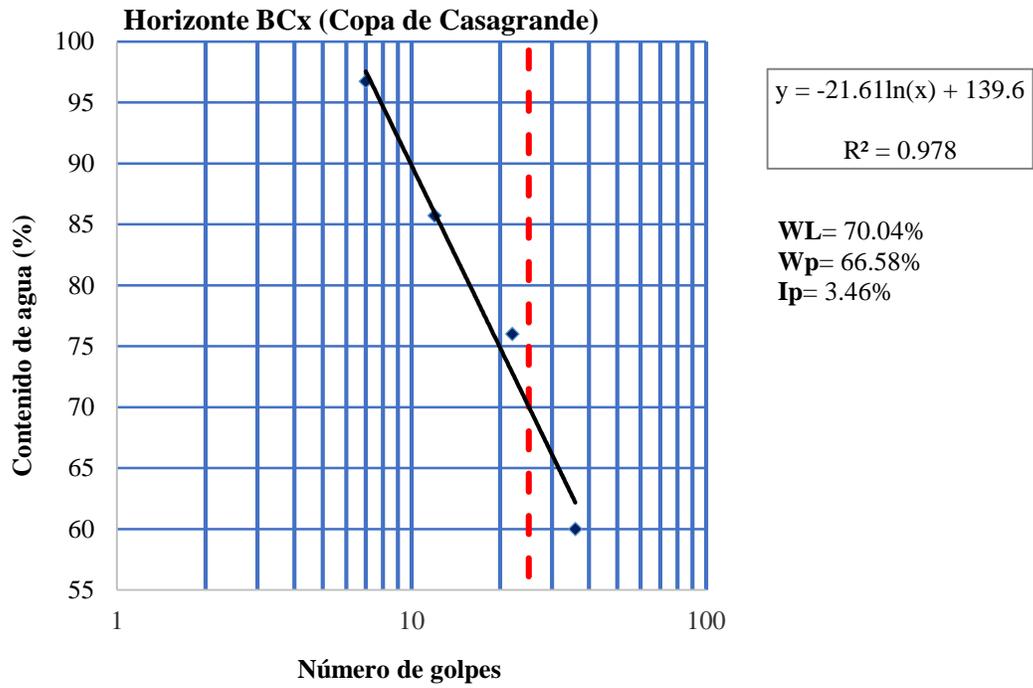


Figura 5.28. Gráfica de límites de consistencia del horizonte BCx (Copa de Casagrande).

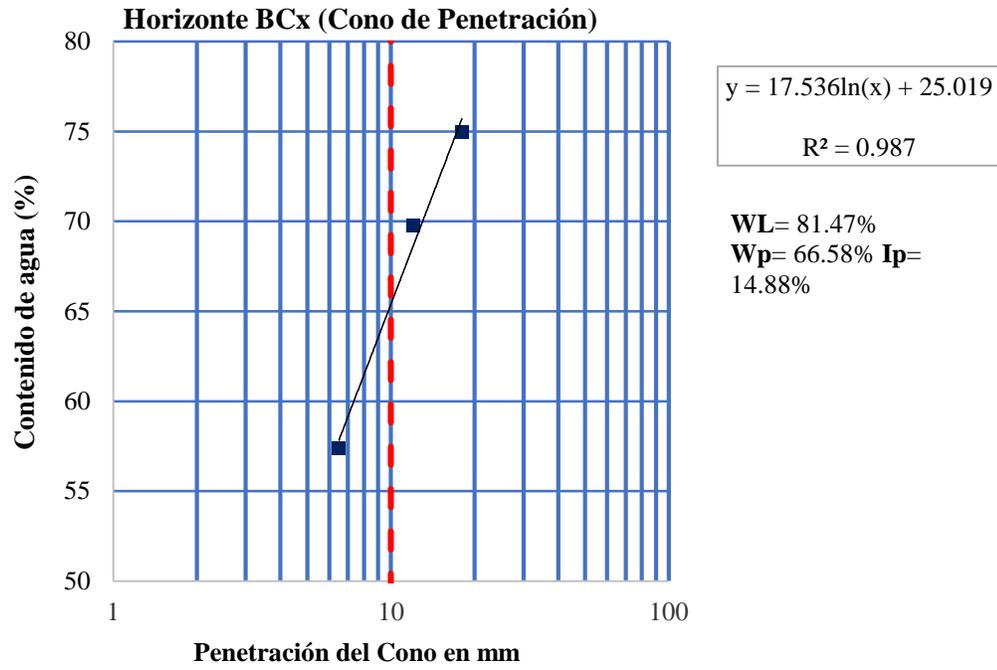


Figura 5.29. Gráfica de límites de consistencia del horizonte BCx (Cono de penetración).

*Resultados generales de los límites de consistencia (Clasificación SUCS)*

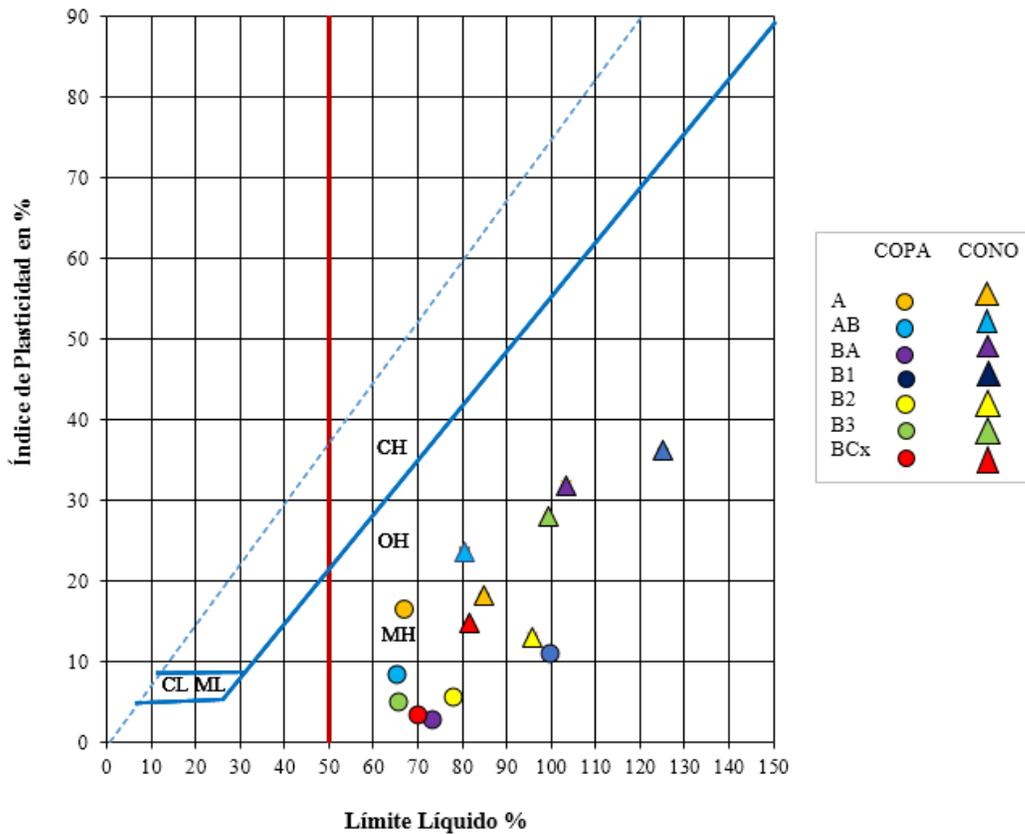


Figura 5.30. Gráfica de límites de consistencia y clasificación SUCS para el punto D, comparación de ambos métodos realizados (Copa de Casagrande y Cono de Caída).

Una vez que se obtuvieron los resultados individuales de ambas pruebas se graficaron los datos en la Carta de plasticidad de Casagrande con el fin de clasificar las muestras y comparar los resultados obtenidos en cada prueba.

Se puede apreciar que los resultados obtenidos del límite líquido con la prueba del Cono de Penetración fueron superiores en comparación con los de la Copa de Casagrande. En la mayoría de los casos, el índice de error en la prueba del cono fue más bajo, por lo que se acerca más a la realidad de la composición de los materiales. Se aprecian tres grupos de clasificación en toda la gráfica: limos inorgánicos y arcillas orgánicas e inorgánicas de alta plasticidad.

### *Prueba Triaxial*

Se ensayaron por completo tres muestras del punto A. Debido a la alta permeabilidad del suelo, cada muestra tardó aproximadamente una semana para completar la prueba, dado que la fase de saturación tardó de dos a tres días por espécimen. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

#### *Punto A*

<b>Parámetros</b>	<b>M1A</b>	<b>M2A</b>	<b>M3A</b>
<b>Altura inicial (mm)</b>	100	100	100
<b>Diámetro inicial (mm)</b>	50	50	50
<b>Área inicial (mm<sup>2</sup>)</b>	1963.5	1963.5	1963.5
<b>Volumen inicial (mm<sup>3</sup>-ml)</b>	196350-196.35	196350-196.35	196350-196.35
<b>Altura después de la consolidación</b>	98.92	97.71	100.68
<b>Diámetro después de la consolidación</b>	48.17	47.63	48.30
<b>Área después de la consolidación</b>	1822.44	1781.87	184531.85
<b>Volumen después de la consolidación</b>	180278.507-180.27	174105.171-174.10	1845.31.85-184.53
<b>Estrés efectivo confinante</b>	50 kPa	100 kPa	200 kPa

Tabla 5.2. Parámetros de las muestras analizadas.

El material fue difícil de ensayar debido a su alta porosidad y el tiempo de saturación. De igual manera, la interferencia de gravas incrustadas dentro del cilindro M3A afectó los resultados al momento del cizallamiento. Sin embargo, es posible establecer la cohesión y el ángulo de fricción interna de este tipo de suelo.

En la Figura 5.30, se puede apreciar la relación del valor de la desviación con la tensión vertical, el valor de la muestra tres tuvo un alcance inesperado que impide la correcta estimación de la cohesión. Si se asume un comportamiento normal del suelo, el máximo valor de desviación para esta muestra será alrededor de 235 obteniendo una cohesión de 3.1 y 31.66° para el ángulo de fricción interna.

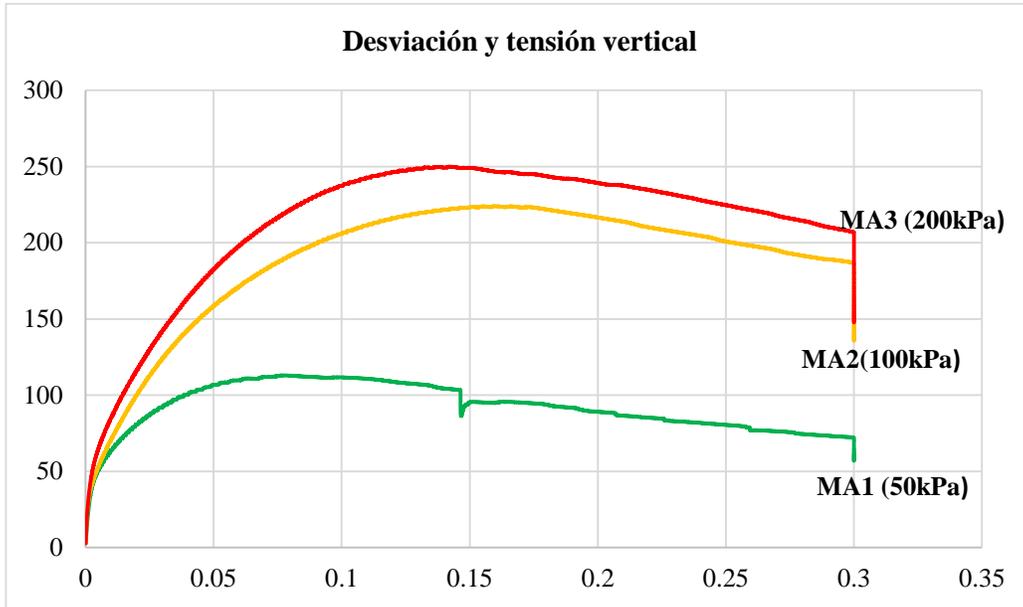


Figura 5.31. Gráfica de la relación entre la desviación y la tensión vertical de las muestras.

En la Figura 5.31, se muestran los círculos de Mohr obtenidos en los ensayos triaxiales de las muestras M1A, M2A y M3A. En el primer gráfico se ilustra el comportamiento real de los especímenes en donde se puede apreciar que la desviación de la muestra M2A afectó la línea diagonal que representa la cohesión. La segunda gráfica, ilustra los resultados ideales de las pruebas, si el valor de la desviación es de 235.

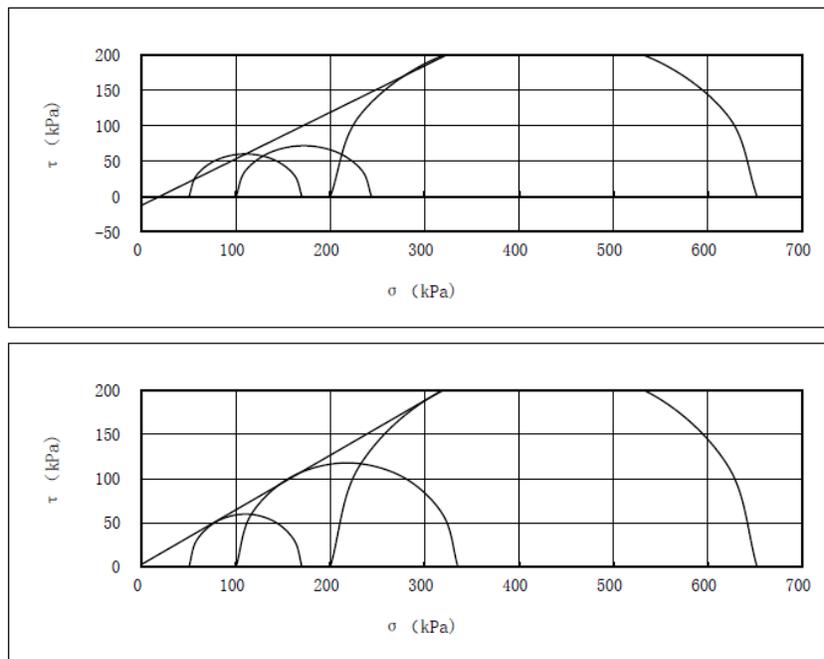


Figura 5.32. Círculos de Mohr de las muestras M1A, M2A y M3A.

En la Figura 5.32, se puede observar el comportamiento de las muestras después de ser sometidas a los estados de tensión que provocaron su ruptura de falla. A grandes rasgos se aprecian dos tipos de desplazamiento, para las muestras M1A y M2A la masa de suelo se deslizó sobre la línea de rotura, mientras que la muestra M3A generó una deformación producida por la debilidad del suelo superior al límite elástico del material, característica de materiales altamente plásticos.



Figura 5.33. Estado de las muestras al finalizar el ensayo triaxial M1A, M2A y M3A.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Para entender la construcción social del riesgo y la producción social del desastre en la colonia La Aurora, se realizó un análisis básico, a partir de la metodología propuesta por Oliver-Smith et al., (2016) (Figura 6.1).

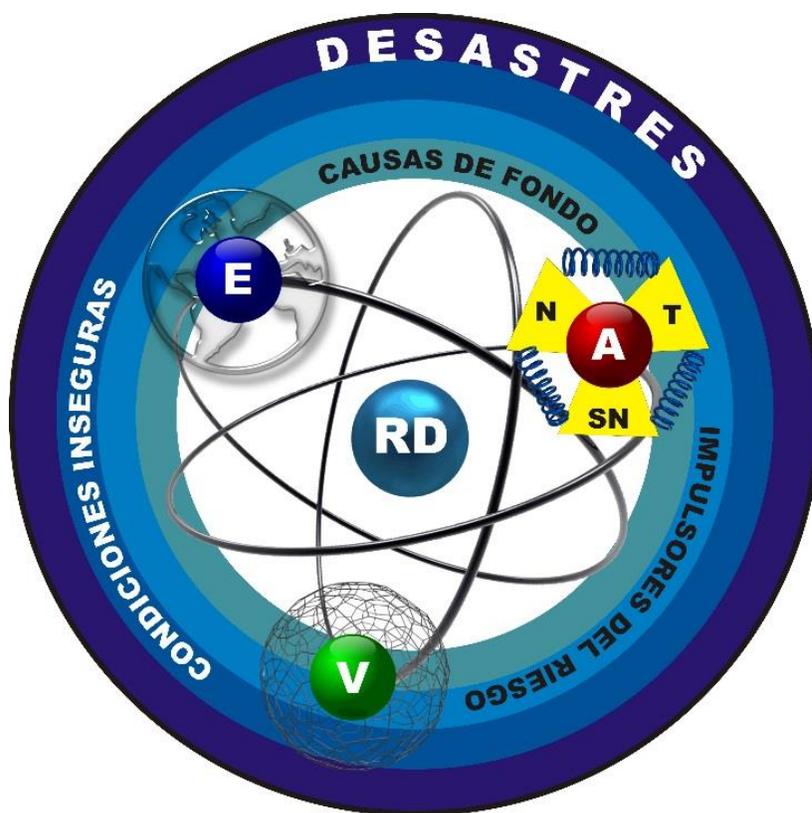


Figura 6.1. La construcción social del riesgo (Oliver-Smith *et al.*, 2016).

El proceso de la construcción del riesgo de desastre por deslizamientos en La Aurora, se desarrolla a partir de las causas de fondo, las cuales involucran el sistema neoliberal y la tendencia a la privatización en el orden económica capitalista, la internacionalización del mercado en la década de los 80 y el impulso al crecimiento industrial, la desvalorización de la administración pública, así como la migración del campo a la ciudad ocasionada por los empleos generados en las fábricas. El contexto anterior posteriormente se manifestó en señales de alerta que establecieron la configuración espacial en la cual se desarrolló Teziutlán como el establecimiento de la industria maquiladora en el centro que conllevó a una rápida urbanización, carencia de seguridad social para los trabajadores, incremento en el costo del uso de suelo en el centro y construcción de asentamientos en laderas susceptibles a procesos de remoción en masa, lo que refleja la carencia de planeación urbana y ordenamiento territorial además de una falta de normatividad en las construcciones, (Figura 6.2).

Lo anterior generó una serie de condiciones inseguras que están inmersas en el desarrollo del desastre en la colonia La Aurora, como el mal manejo del uso del suelo, el establecimiento de asentamientos irregulares en zonas susceptibles a deslizamientos, el crecimiento no planificado del Panteón Municipal hacia la ladera sur, y por supuesto condiciones de infraestructura inadecuadas para el establecimiento y funcionamiento de un sistema de saneamiento y drenaje, (Figura 6.2).

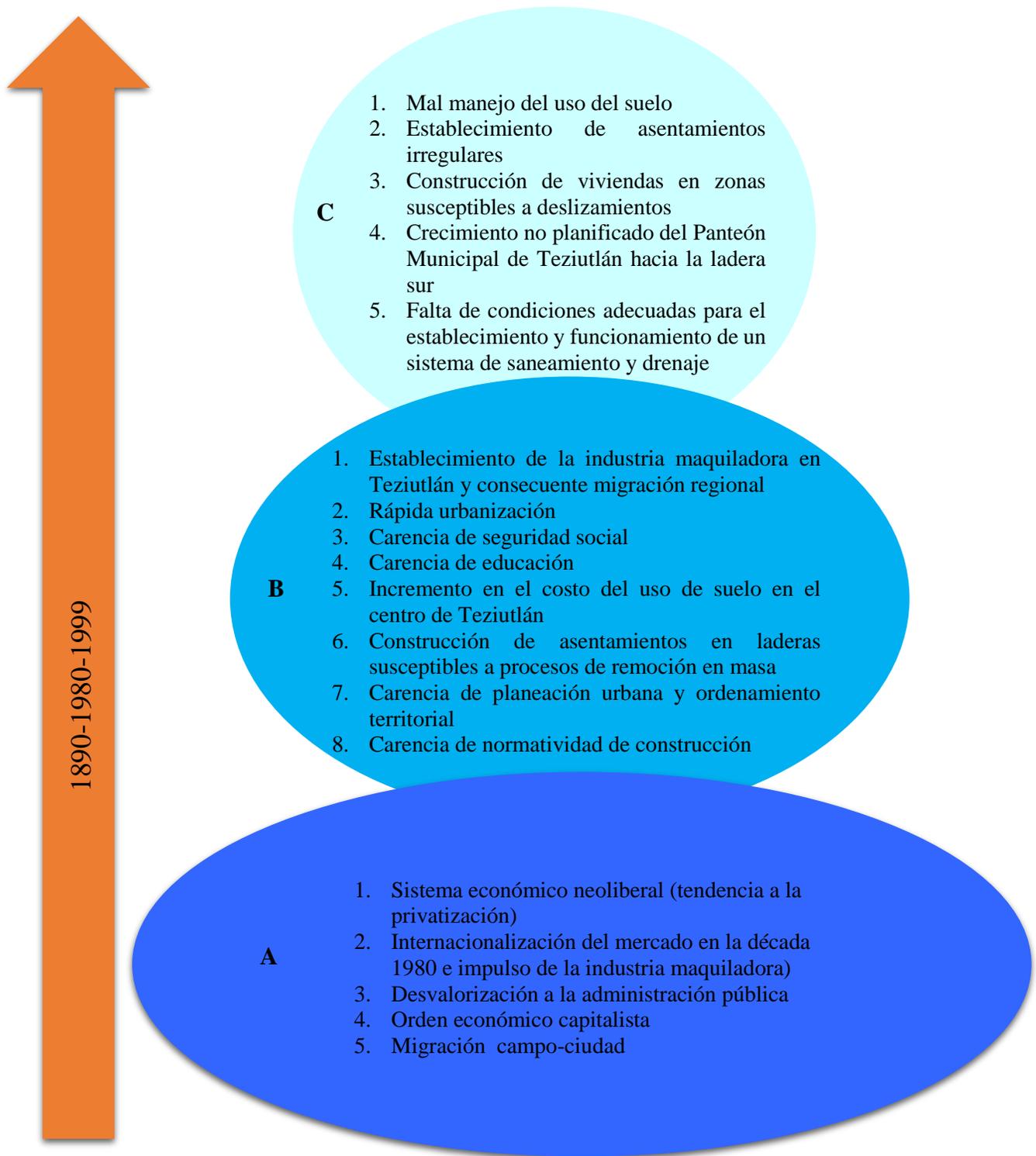


Figura 6.2. Esquemización de los principales factores de riesgo de desastre en La Aurora, Teziutlán; (A) Causas de fondo, (B) Impulsores del riesgo, (C) condiciones inseguras (Modificado de Oliver-Smith *et al.*, 2016).

Para entender el proceso de construcción social del riesgo en La Aurora y la producción social del desastre, se contempló la temporalidad a partir del siglo XIX, época en la cual se construyó el Panteón hasta 1999 año en donde aconteció el deslizamiento. Cabe hacer mención de la década de los ochentas, cuando se consolida la maquila como la actividad económica más importante del municipio.

En la base de la Figura 6.3 se encuentra la dinámica entre la exposición que corresponde al Fraccionamiento los Mirtos ubicado en la ladera posterior al Panteón, las condiciones vulnerables relacionadas con el contextos socio-económico en la colonia y la amenaza que corresponde a la inestabilidad de laderas. Todo lo anterior, en conjunto constituyó el riesgo de desastre por deslizamientos que finalmente se materializó con la ocurrencia del deslizamiento el 5 de octubre de 1999, lo cual dio origen a un evento que desencadenó numerosas pérdidas humanas e importantes daños materiales conocido como el “desastre de La Aurora”.

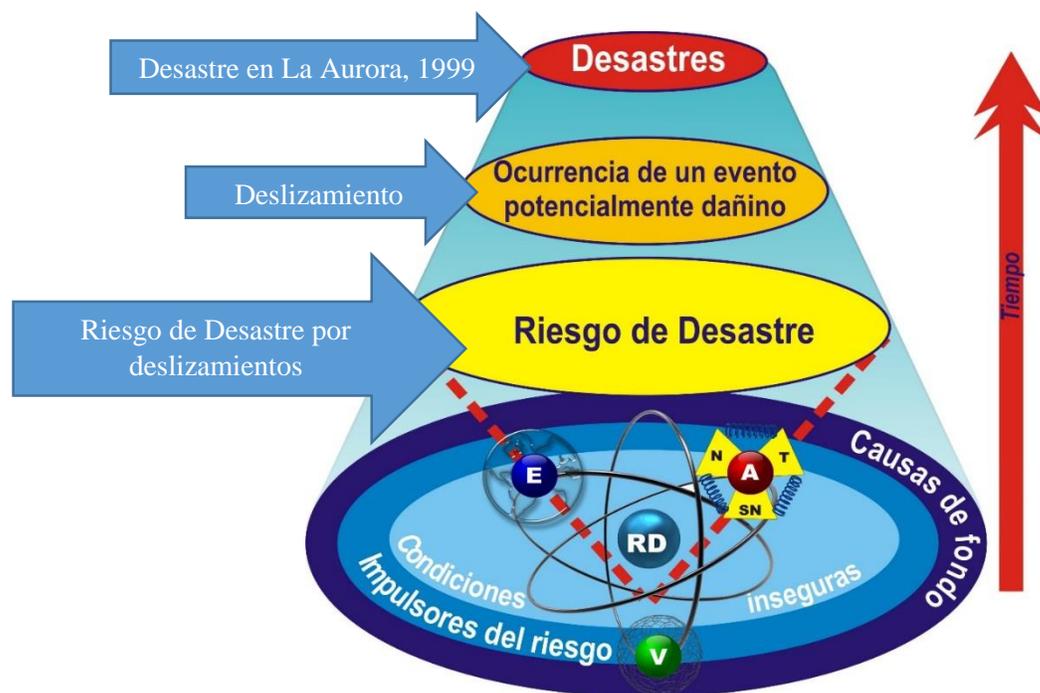


Figura 6.3. La producción social del desastre en La Aurora (Modificado de Oliver-Smith *et al.*, 2016).

La Aurora está propensa a un evento como el sucedido en el año de 1999. En la Figura 6.4, se ilustran algunos elementos que condicionan el riesgo de desastre por deslizamientos en la colonia. Se representan algunas características físicas que conforman la amenaza natural como los tipos de suelos predominantes en la ladera de acuerdo con los resultados de los ensayos elaborados y los lugares con mayor y menor conductividad hidráulica. De igual manera, se simbolizan las condiciones sociales antes y después del desastre como la

ubicación del Fraccionamiento Los Mirtos y las viviendas actuales en donde residen personas que presenciaron el evento del 5 de octubre de 1999.

Como se puede apreciar destacan los suelos MH y OH (limos y arcillas de origen inorgánico), los cuales se caracterizan por un nivel de plasticidad y compresión alto que al estar expuestos a una carga mínima tienden a deformarse con facilidad. Por otro lado, de acuerdo con los datos de conductividad hidráulica, el punto con menor velocidad de infiltración, es decir, en donde se retiene más agua, se localiza cerca de la corona del deslizamiento próximo al límite con el Panteón Municipal, mientras que la zona con mayor conductividad hidráulica ( $k$ ) se encuentra en la parte media de la ladera próxima al deslizamiento.

En cuanto a las características sociales, el antiguo Fraccionamiento los Mirtos se ubicaba en el lugar en donde ocurrió el deslizamiento. Se representa la antigua zona de cultivo antes de los asentamientos humanos sobre la ladera, lo cual es un indicador del constante cambio de uso de suelo en la colonia provocado por el incremento de la población en el municipio, la expansión urbana y el desarrollo inmobiliario irregular que ocasionó el asentamiento de la población en una zona inestable con un bajo costo de rentabilidad. Estas condiciones siguen latentes en la colonia, aunado a la posible expansión del Panteón hacia la sección sureste.

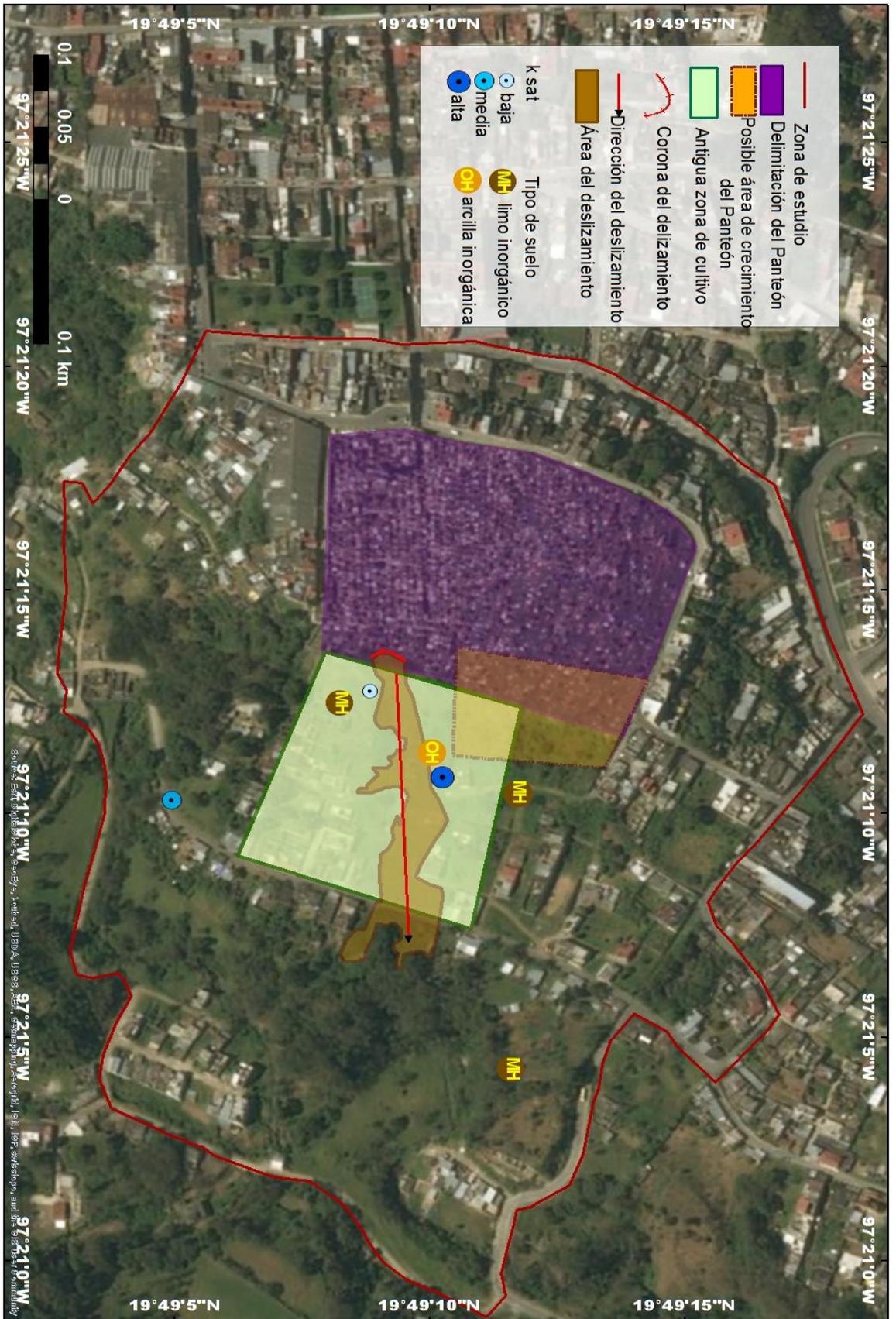


Figura 6.4. Representación de las relaciones espaciales entre la amenaza y la exposición (k sat: conductividad hidráulica).

## CONCLUSIONES

- La comprensión de los conceptos amenaza, vulnerabilidad, riesgo y desastre es el fundamento teórico para estudiar los procesos que construyen el riesgo de desastre por deslizamientos en La Aurora.
- El reconocimiento de los métodos *in situ* y en laboratorio permite identificar diferentes técnicas de análisis que pueden ser empleadas para los estudios de inestabilidad de laderas.
- Los ensayos realizados en campo y en laboratorio durante este trabajo de investigación, de manera general permitieron:
  - 1.- Conocer la composición y el comportamiento de algunos materiales de diferentes puntos en la ladera sur posterior al Panteón Municipal de Teziutlán.
  - 2.- Identificar la importancia que tienen los materiales formadores de suelo como factor determinante de la inestabilidad de laderas.
  - 3.- Proponer una metodología de muestreo en campo para futuros ensayos en laboratorio.
- Los resultados de los ensayos de consistencia indicaron que el límite líquido de las muestras analizadas de la ladera posterior al Panteón Municipal de Teziutlán, se encuentran en un rango entre el 70% y 125%, mientras que su límite de plasticidad va del 60% al 80%. De los horizontes analizados se distinguen tres tipos de suelo: limos inorgánicos y arcillas orgánicas e inorgánicas de alta plasticidad, los cuales se caracterizan por un alto nivel de compresión. En general, estas características son ejemplo de suelos finos con un alto porcentaje de partículas tamaño de arcilla.
- El entendimiento de las características geográficas en Teziutlán permite construir un panorama general de la configuración espacial del municipio. Las condiciones físicas (clima, hidrología, edafología, contexto geológico-geomorfológico) sirven para examinar el ámbito natural y son una herramienta fundamental para comprender los fenómenos físicos que acontecen en el municipio. Por otro lado, las condiciones que representan la ocupación humana del espacio (uso de suelo, demografía, vivienda y actividades económicas), brindan una perspectiva de la dinámica poblacional y la realidad social. El estudio de ambas dimensiones es elemental para el reconocimiento de los procesos que conforman el riesgo de desastre; el estudio de la amenaza y el análisis de la vulnerabilidad.
- La colonia Aurora estuvo inmersa en los procesos físicos y sociales que se desarrollaron en Teziutlán en octubre de 1999. El evento acontecido el 5 de octubre, es un ejemplo de la falta de regulación en los asentamientos humanos y el crecimiento poblacional no controlado, aunado a condiciones físicas de inestabilidad en el terreno.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- ALCÁNTARA-AYALA, I., (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Investigaciones geográficas.
- ALCÁNTARA-AYALA, I., ECHAVERRÍA, A., GUTIÉRREZ, C., DOMÍNGUEZ, L., & NORIEGA, I., (2001). Inestabilidad de laderas: Fascículo inestabilidad de laderas. CENAPRED.
- ALCÁNTARA-AYALA, I., (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. Geomorphology.
- ALCÁNTARA-AYALA, I., (2003). Valoración Económica del Servicio de Ecosistemas (Prevención de Desastres).
- ALCÁNTARA-AYALA, I. (2004). Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. Geomorphology.
- ALVARADO, A., & FORSYTHE, W., (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. Agronomía Costarricense.
- ANTUÑANO, S. E., MARRETT, R., & GARCÍA, M. A. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
- ASCHER, F., & DÍAZ, M. H., (2004). Los nuevos principios del urbanismo: el fin de las ciudades no está a la orden del día. Alianza editorial.
- ASTM, (s/f). Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils (D7181-11).
- ASTM, (1970). Sampling of soil and rock: A symposium presented at the Seventy-third Annual Meeting AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Toronto, Canada: ASTM.
- ASTM, (2016). Geotechnical Engineering Standards. En línea: <https://www.astm.org/Standards/geotechnical-engineering-standards.html>. Fecha de consulta: Julio, 2016.

- ASTM, (s/f). Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils (D7181-11).
- BAHENA, C. R. V., (2004). El Círculo de Mohr. Fundamentos y Aplicaciones. Universidad Santo Tomas.
- BAÑÓN BLÁZQUEZ, L., & BEVIÁ GARCÍA, J. F., (2000). Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento. Caminos II. En línea: [http://sirio.ua.es/proyectos/manual\\_%20carreteras/02010103.pdf](http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf). Fecha de consulta: Julio, 2016.
- BERRY, L Y REID, D., (1993). Mecánica de suelos. Ed. McGraw-Hill Interamericana, S.A., Bogotá.
- BLAIKIE, P., CANNON, T., DAVIS, I., & WISNER, B., (1996). Vulnerabilidad: El entorno social, político y económico de los desastres. Bogotá, LA RED/ITDG.
- BITRÁN, D. B., (2001). Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99 (Vol. 1). Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- BOWLES J., (1989). Physical and geotechnical propieties of soils/ Shear Sttrength of soils. Mac Graw Hill.
- BROOKS, S. M., CROZIER, M. J., GLADE, T. W., & ANDERSON, M. G., (2004). Towards establishing climatic thresholds for slope instability: use of a physically-based combined soil hydrology-slope stability model. Pure and Applied Geophysics.
- BROMS, B. B., & WONG, K. S., (1991) Landslides. In Foundation engineering handbook. Springer US.
- CABALLERO, M. G., (2001). El terreno (Vol. 44). Univ. Politèc. de Catalunya.
- CAMPOS, O. A. C., GONZÁLEZ, A. O. O., & AMAYA, R. G., (2011). Inestabilidad de laderas.
- CAPRA, L., LUGO-HUBP, J., & BORSELLI, L., (2002). Mass movements in tropical volcanic terrains: the case of Teziutlán (México). Engineering Geology.

- CAPRA-PEDOL, L., LUGO-HUBP, J., ZAMORANO-ORÓZCO, J. J., TRITLLA, J., LEVRESSE, G., CORONA-ESQUIVEL, R. & FIGUEROA-SANDOVAL, B., (2006). La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: el caso de Totomoxtla, sierra norte de Puebla, México. García-Palomo, Armando, Carreón-Freyre, Dora C., Camprubí, Antoni.
- CARTER, M. R. Y GREGORICH E.G., (2007). Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science.
- CASSAN, M., (1982). Los Ensayos" in situ" en la mecánica del suelo (Vol. 1). Reverte.
- CASTILLO ROMÁN, J., P VERMA, S., & ANDAVERDE, J., (1991). Modelación de temperaturas bajo la caldera de Los Humeros, Puebla, México, en términos de profundidad de la cámara magmática. Geofísica internacional.
- CENAPRED (2001). Inestabilidad de laderas, serie de fascículos, 2da edición. En línea:<http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/SerieFasciculos/fasciculoladeras2.pdf>. Fecha de consulta: Noviembre 2015.
- CENAPRED (2006). Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Serie: Atlas Nacional de Riesgos, Secretaria de gobernación.
- CENAPRED (2008). Inestabilidad de laderas, segunda edición, Mayo 2008. Fecha de consulta: Junio 2016. Disponible en: <http://www.cenapred.unam.mx>.
- CHOWDHURY, R.N., (1978). Slope Analysis. Department of Civil Engineering, University of Wollongong, New South Wales, Australia.
- COLIENTE, A., (2010). Inestabilidad en laderas y taludes. Tesis de maestría en geotecnia- UNAM.
- CENAPRED (2012). Informe de actividades. Subdirección de Dinámica de Suelos y Procesos Gravitacionales. En línea: <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/227.pdf>. Fecha de consulta: Agosto 2016.

- CEPAL (2003). Vulnerabilidad sociodemográfica: viejos y nuevos riesgos para comunidades, hogares y personas. SEPARATA.
- CODUTO, D. P., (1999). Geotechnical engineering: principles and practices.
- CONABIO (1998). Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONABIO (2011). La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado. México. En línea:<http://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/pdf/BiodiversidadenPuebla.pdf>  
Fecha de consulta: Marzo 2016.
- CONAGUA (2008). Depresión tropical No.11 en 1999. En línea: <http://smn.conagua.gob.mx/ciclones/tempo1999/atlantico/dt11-a99.pdf>
- CONAGUA (2009). Climatología estadística, datos contenidos en la base de datos climatológica. En línea: <http://smn.cna.gob.mx/tools/RESOURCES/Diarios/21091.txt>. Fecha de consulta: Mayo 2016.
- DAFONTE, D. J., VALCÁRSEL, A. M., NEIRA, X. X., PAZ, A., MUÑOZ-CARPENA, R., RITTER, A., & TASCÓN, C., (1999). Análisis de los métodos de cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo medida con permeámetro Guelph. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo (Muñoz-Carpena, R).
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (martes 12 de octubre de 1999). Secretaría de Gobernación. En línea: <http://www.dof.gob.mx/> Fecha de consulta: Julio, 2016.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (lunes 27 de diciembre de 1999).Secretaría de Gobernación. En línea: <http://www.dof.gob.mx/> Fecha de consulta: Julio, 2016.
- DOMÍNGUEZ (2000). Puebla 1999: Lecciones de “La tragedia de la década”. El Colegio de Puebla. México.
- DYSLI, M., & BOMBELI, P. (2001). Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger. Rapport final, Mandat de recherche.

- EDITORES TÉCNICOS ASOCIADOS REUNIÓN, D. I. (1975). Mecánica de suelos. Barcelona.
- FAO (2016). Clasificación de suelos. Portal de Suelos de la FAO en línea: <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/clasificacion-de-suelos/es/>  
Fecha de consulta: Junio, 2016.
- FERRIZ, H., & MAHOOD, G. A. (1984). Eruption rates and compositional trends at Los Humeros volcanic center, Puebla, Mexico. Journal of Geophysical Research: Solid Earth.
- FLORES LORENZO Y ALCÁNTARA AYALA, I. (2002). Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla. Investigaciones geográficas.
- FORSYTHE, W., (1985). Manual de laboratorio: física de suelos. IICA. San José, Costa Rica.
- FRITZ, C.E., (1961). Disasters: Contemporary Social Problems. Harcourt. New York.
- GALINDO SERRANO, J. A., & ALCÁNTARA-AYALA, I (2014). Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México. Investigaciones Geográficas.
- GARCÍA-ARIZAGA, M. T., LUGO-HUBP, J., & PALACIOS, D., (1996). La obturación de valles por procesos de ladera: el origen de la Vega de Metztlán (México). IV Reunión de Geomorfología, O Castro (A Coruña), España: Sociedad Española de Geomorfología.
- GARCÍA ARRÓLIGA, N., CAMBRANIS, R. M., & ESTRADA, K. M., (2006). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: evaluación de la vulnerabilidad física y social. CENAPRED, México.
- GARCÍA, J. L. O., (2000). Teziutlán: Historia y tragedia. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Dirección General de Fomento Editorial.
- GÓMEZ-TAGLE, R., ALBERTO, F., BATLLE-SALES, J., ZEPEDA CASTRO, H., GUEVARA SANTAMARÍA, M. A., MALDONADO, L., & EMMANUEL, J.

(2008). Conductividad hidráulica saturada de campo: uso de un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. Terra Latinoamericana.

- HAUSER, A., (1993). Aspectos geológicos y geotécnicos relacionados con el proyecto y construcción del Camino Longitudinal Austral, Regiones X y XI (No. 43). Servicio Nacional de Geología y Minería.
- HERNÁNDEZ, Z., (2008). Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa con base en análisis multivariado: La región de Zapotitlán de Mendez, Puebla. Tesis de maestría. UNAM- CENTRO DE GEOCIENCIAS.
- HERNÁNDEZ, F., (2013). Pocos recuerdan la tragedia de Teziutlán. El Sol de Puebla. En línea: <http://www.oem.com.mx/elsoldepuebla/notas/n3148622.htm>. Fecha de consulta: Agosto, 2016.
- IBÁÑEZ Y MANRÍQUEZ, (2011<sup>a</sup>). Los Andosoles (WRB 1998): Suelos Volcánicos. Blog en línea: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/11/23/140258>. Fecha de consulta: Julio, 2016.
- IBÁÑEZ Y MANRÍQUEZ, (2011b). Lluisol (WRB 1998): Suelos Volcánicos. Blog en línea: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/11/23/140258>. Fecha de consulta: Julio, 2016.
- IBÁÑEZ Y MANRÍQUEZ, (2011c). Regosoles (WRB 1998): Suelos Volcánicos. Blog en línea: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/11/23/140258>. Fecha de consulta: Julio, 2016.
- IGME (2006). Manual de ingeniería en Taludes. Publicaciones del Instituto tecnológico y minero de España. Madrid.
- INAFED (2011). Enciclopedia de los Municipios de México (E- Local), Estado de Puebla, Municipio de Teziutlán. Secretaría de Gobernación, México. En línea: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21174a.html>. Fecha de consulta: Diciembre 2015.
- INEGI, 1993. Teziutlán, Estado de Puebla. Cuaderno estadístico municipal. Secretaria de Gobernación del Estado de Puebla, H. Ayuntamiento de Teziutlán e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y Geografía (INEGI) (1990). Censo de Población y Vivienda 1990. México. En línea: <http://www.inegi.org.mx/>. Fecha de consulta: Marzo, 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI) (2000). Censo de Población y Vivienda 2000. México. En línea: <http://www.inegi.org.mx/>. Fecha de consulta: Marzo, 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI) (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. En línea: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/21/21174.pdf>. Fecha de consulta: Febrero, 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI) (2010). CENSO DE POBLACIÓN Y VIVIENDA 2010. MÉXICO. EN LÍNEA: <http://www.inegi.org.mx/>. Fecha de consulta: Marzo, 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI) (2014). Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000 : serie V /Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. En línea: [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usuariosuelo/doc/guia\\_interusuariosuelo.pdf](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usuariosuelo/doc/guia_interusuariosuelo.pdf). Fecha de consulta: Mayo, 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA (INEGI) (s/f). Unidades y subunidades de suelo. En línea: <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EdafIII.pdf>.
- JUÁREZ, B.E. Y RICO R.A., (1974). Fundamentos de Mecánica de Suelos. Tomo 1°. Ed. LIMUSA. México. Tercera edición.
- JUÁREZ, B.E. Y RICO R.A. (1993). Mecánica de suelos. Ed. LIMUSA. México. Tercera edición.
- JUÁREZ-BADILLO, E. Y RICO-RODRÍGUEZ, A. (1996). Mecánica de suelos. Tomo I, Edit. Limusa, México.
- JUÁREZ, FELIPE (2015). Riesgo de desastres en el municipio de Teziutlán, Puebla: Un diagnóstico no estructural. Tesis de maestría. Posgrado de Geografía. UNAM.
-

- KAZTMAN, R. (2000). Notas sobre la medición de la vulnerabilidad social. BID-Banco Mundial-CEPALIDEC.
- LAVELL, A. (1996). Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. La Red.
- Lavell, A & Maskrey A., (2014). The future of disaster risk management, Environmental Hazards.
- LÓPEZ, L., & TOSCANA, A. (2013). Riesgos, desastres y procesos electorales. Entre la incertidumbre y el riesgo: reflexiones sobre la modernidad radicalizada en América Latina. Coordinado por Leila Vecslir.
- LUGO HUBP, J., ZAMORANO- OROZCO, J.J., CAPRA, L., INBAR, M., ALCÁNTARA- AYALA, I. (2005). Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, Octubre de 1999: Causa y efecto. Revista Mexicana de ciencias Geológicas.
- MASKREY. A., (1993). Los desastres no son naturales. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- MENDOZA, M. J., NORIEGA, I., & DOMÍNGUEZ, L. (2000). Deslizamientos de laderas en Teziutlán, Pue., provocados por las lluvias intensas de octubre de 1999. SEGOB, CENAPRED.
- MENDOZA, L. M, DOMÍNGUEZ, M.L., NORIEGA. R. I. GUEVARA. O. E, (2002). Informes técnicos. Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento. SEGOB, CENAPRED, México.
- MUÑOZ-HERN, A., MORÓN, M. A., & ARAGÓN, A. (2008). Coleoptera Scarabaeoidea de la región de Teziutlán, Puebla, México. Acta zoológica mexicana.
- NORIEGA, I. (2005). Deslizamiento de laderas ocasionados por lluvias intensas. Tesis de maestría- UNAM.
- NÚÑEZ, C.E., (2008). En relación a los tamices normalizados. Fecha de consulta: Agosto 2016, de Carlos Eduardo Núñez, Disponible en: <http://www.cenunez.com.ar/archivos/55- Enrelacinalostamicesnormalizados.pdf>,

- OLIVER-SMITH A., ALCÁNTARA-AYALA I., BURTON I., LAVELL A. M, (2016). Forensic Investigations of Disasters (FORIN): A conceptual framework and guide to research.
- OMD (2016). Obstáculos técnicos al comercio. En línea: [https://www.wto.org/spanish/tratop\\_s/tbt\\_s/tbt\\_s.htm](https://www.wto.org/spanish/tratop_s/tbt_s/tbt_s.htm). Fecha de consulta: Julio, 2016.
- OSORIO, S. (2010a). Apuntes de Geotecnia con énfasis en laderas. En línea: [http://geotecnia-sor.blogspot.mx/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de\\_19.html](http://geotecnia-sor.blogspot.mx/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_19.html). Fecha de consulta: Agosto, 2016.
- OSORIO, S. (2010b). Consistencia del Suelo - Límites de Atterberg – Historia. En línea: <http://geotecnia-sor.blogspot.mx/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de.html>. Fecha de consulta: Agosto 2016.
- PEDRAGLIO, L. F. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana..
- PETRICH, B (2015). Campeños de Teziutlán aprenden a resistir los cuentos de las mineras. La Jornada UNAM, 30. En línea: <http://www.jornada.unam.mx/2015/03/19/sociedad/038n1soc>. Fecha de consulta: Junio, 2016.
- RASCON, L. E., & ROMAN, J. (2005). Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico. UNAM.
- REES, S. (S/F). What is Triaxial Testing?: Part one introduction to Triaxial Testing. GDS Instruments. Reino Unido. En línea: <http://www.gdsinstruments.com/assets/pagepdf/000037/Part%201%20Introduction%20to%20triaxial%20testing.pdf> . Fecha de consulta: Julio, 2015.
- RICE, J. (1999). For one family, toll in Mexico mudslide is especially grim. Times Daily. En línea: <https://news.google.com/newspapers?nid=1842&dat=19991011&id=vGQpAAAAIBAJ&sjid=Z8kEAAAIBAJ&pg=1452,1550856&hl=es> . Fecha de consulta: Julio, 2015.

- SALAS, O. V. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. Métodos y Materiales. Universidad de Costa Rica. San José.
- SANHUEZA, C., & VILLAVICENCIO, G. (2012). Influencia de la cohesión aparente generada por raíces sobre la estabilidad de un talud natural en las dunas de Reñaca. Revista de la Construcción, 11(1), 16.
- SALINAS, R. (2015). Reubicaciones por desastres asociados a deslizamiento de tierra en Teziutlán, Puebla: Un enfoque desde la Geografía de los Riesgos. Tesis de Licenciatura. UNAM. México.
- SANTAMARINA, C., & NARSILIO, G. (2008). Clasificación de suelos: fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones. Georgia Institute of Technology, 790.
- SENNESET, K., SANDVEN, R., Y JANBU, N. (1989). Evaluation of soil parameters from piezocone test. Transportation Research Record.
- SHCP, (2010). Acuerdo por el que se emiten las Reglas Generales del Fondo de Desastres Naturales. En línea: <http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/32/12/images/REGLAS-GENERALES-DEL-FONDEN-3-DIC-10.pdf> Fecha de consulta: Julio, 2016.
- SLAYMAKER, O., (1982). The nature of field experiments in geomorphology. Studia Geomorphology.
- SMITH, K. A., & MULLINS, C. E. (1991). Soil analysis. SMR.
- STANDARD, A. S. T. M. D7181-11 (2011). Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils.
- SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO (2011). Carta Geológica de Teziutlán, Puebla E14-B15.
- SUÁREZ, O. (2006). Susceptibilidad a deslizamientos de laderas en la Sierra Madre Oriental. Tesis de maestría en ingeniería civil. UNAM-Posgrado de ingeniería.

- Terzaghi, K. (1943). Stability of Slopes. Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- TERZAGHI, K. (1950). Mechanism of landslides. Geol.Soc. America (Berkeley Volume).
- TERZAGHI, K., PECK, R. B., Y MESRI, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons.
- TEWDWR-JONES, M., & ALLMENDINGER, P., (2006). Territory, identity and spatial planning: spatial governance in a fragmented nation. Routledge.
- UNDRO, (1979) "Natural Disasters and Vulnerability Analysis", Report of Experts Group Meeting, Geneva. En línea: <https://archive.org/stream/naturaldisasters00offi#page/n5/mode/2up>. Fecha de consulta: Mayo, 2016.
- UNISDR (2009), Terminología sobre la Reducción del Riesgo de Desastres, Naciones Unidas, Ginebra, Suiza. Disponible en: [http://www.unisdr.org/files/7817\\_UNISDRTerminologySpanish.pdf](http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf). Fecha de consulta: Diciembre, 2015.
- VÁLDES D., Y COX C., (2006) Determinación de la Conductividad Hidráulica en la Zona No Saturada con el Permeámetro de Guelph. Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Civil.
- .VERGARA-LANDEROS, S., (2014). Realizarán recorridos guiados en el panteón municipal de Teziutlán. Puebla Noticias. En línea: <http://www.pueblanoticias.com.mx/noticia/realizaran-recorridos-guiados-en-el-panteon-municipal-de-teziutlan-60447/>. Fecha de consulta: Agosto, 2016.
- VIDAL ZEPEDA, R.,(2005). Las regiones climáticas de México. UNAM.
- VILLALAZ, C. C. (2004). Mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial Limusa.
- WHITE, G. F., (1974). Natural hazards, local, national, global.

- WIECZOREK, G. F., & SNYDER, J. B., (2009). Monitoring slope movements. Young, R., and Norby, L, Geological Monitoring: Boulder, Colorado. Geological Society of America
- WILCHES-CHAUX, G., (1989) Desastres, ecologismo y formación profesional: herramientas para la crisis. Servicio Nacional de Aprendizaje, Popayán.
- WILCHES-CHAUX, G., (1993). La vulnerabilidad global. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- WILCHES-CHAUX, G., (1998). Guía de la Red para la Gestión Local del Riesgo. Perú, La Red.