



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

DETERMINACIÓN DE FACTORES QUE CONDICIONARON EL DESLIZAMIENTO Y
FLUJO DE MATERIALES EN MASA CERCA DE LA COMUNIDAD DE EL CAPULÍN,
MUNICIPIO DE CHICONQUIACO, VERACRUZ Y LA SUSCEPTIBILIDAD REGIONAL

TESIS

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

EDER VILLASEÑOR HUIDOBRO

TUTOR DE TESIS: DR. SERGIO RAÚL RODRÍGUEZ ELIZARRARÁS
INSTITUTO DE GEOLOGÍA



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

DERECHOS RESERVADOS

AGRADECIMIENTOS

Estoy agradecido por fluir y entrar al espacio de todas las posibilidades.

Estoy agradecido con Karla Elena y todas las personas cercanas en mi andar por darme la confianza de crear nuevas cosas.

Agradezco la confianza de los seleccionadores de este programa de posgrado en Ciencias de la Tierra, las personas que lo coordinan y que personalmente escuchan nuestras propuestas.

Para el Doctor Sergio Raúl por encausarme al conocimiento, por compartir su espacio de trabajo y permitirme conocer su campo laboral, desde los aspectos sociales hasta los aspectos técnicos que forman parte de un proyecto de investigación.

Para los representantes de los laboratorios de Física de suelos y Edafología del Instituto de Geología, el laboratorio de Geotecnia del Instituto de Ingeniería, el laboratorio de espectrometría del infrarrojo del Instituto de Geofísica, el laboratorio de difracción de rayos X del Instituto de Física, todos de esta universidad. Estos centros de investigación donde se apoyan las ideas de los estudiantes.

A Valeria y Wendy por su apoyo y compañía en los recorridos de campo. Además de su capacidad de escuchar para resolver en equipo situaciones imprevistas.

Para mis sinodales que con sus comentarios mejoraron este trabajo.

RESUMEN

En esta investigación se estudiaron los factores que condicionaron el deslizamiento y flujo de materiales ocurridos muy cerca de las comunidades de El Escalanar y El Capulín en el estado de Veracruz. Aun cuando las zonas serranas con climas templados húmedos están sujetas a factores desencadenantes similares, en algunos lugares ocurren éstos procesos y en otros no, entonces es de interés investigar los factores intrínsecos de estos lugares para definir zonas susceptibles adicionales. El análisis multitemporal de sensores remotos a escala regional, sólo permite inventariar deslizamientos y flujos de materiales a través de cambios en el relieve de gran magnitud.

Durante el muestreo directo, se aprovecharon las superficies de falla, los asentamientos diferenciales dentro y fuera del deslizamiento. Se observó la presencia de rocas basálticas que estuvieron en contacto con fluidos hidrotermales aunado a las condiciones templadas húmedas. Estas rocas se encuentran inmersas en una matriz de arenas finas, limos y arcillas. Los suelos superficiales en la zona del deslizamiento se han desarrollado a partir del intemperismo de materiales de origen volcánico y tienen presencia de minerales de bajo orden estructural, pH ácidos, reaccionan ante la presencia de aluminio activo, presentan una alta porosidad y muy alta conductividad hidráulica. Los materiales subsuperficiales sobre las superficies de falla del deslizamiento tienen pH neutros y no reaccionan ante la prueba de aluminio activo, tienen una variedad de matices, la conductividad hidráulica disminuye y muestran rasgos de metasomatismo. Algunos de los sitios más susceptibles para formar flujos de materiales ante precipitaciones extraordinarias, son aquellos que tienen presencia de filosilicatos del grupo de las micas y aunque se distingue la presencia de fragmentos basálticos, estos no superan en abundancia, la matriz fina que domina el flujo de materiales.

El cambio de las coberturas del bosque mesófilo de montaña, es un factor que contribuye al libre flujo de agua subsuperficial hacia los sitios con diferente competencia mecánica, tal como el depósito que se exhibe en el flanco derecho del deslizamiento con abundancia de sílice y carbonato de calcio. Lo anterior favorece los deslizamientos, además del flujo de materiales al superar su límite líquido. Estos depósitos sedimentarios no afloran en el flanco izquierdo del deslizamiento, aunque se sugiere su presencia que subyace mayores espesores de depósitos de ladera.

Una vez que se validó la información técnica en los alrededores del deslizamiento, se generó un primer mapa de sitios susceptibles a generar un deslizamiento semejante al ocurrido entre las comunidades de El Escalanar y El Capulín. En dicho mapa se encuentran 11 comunidades incluyendo las vías de comunicación y sus estructuras civiles expuestas como viviendas, escuelas, centros de salud, centros deportivos, sociales y templos. Reportes de movimientos de masas en sitios adicionales dentro de la subcuenca, junto con la información proporcionada por los representantes comunitarios de Protección Civil, motivaron a generar un segundo mapa de susceptibilidad ante este tipo de fenómenos a una escala regional. En dicho mapa se procesaron los principales factores que condicionan estos procesos con información regional y se identificó una segunda zona de alta susceptibilidad ubicada en los alrededores del municipio de Juchique de Ferrer. Las modificaciones a las coberturas naturales han sido obligadas por el crecimiento comercial y tienen la desventaja de localizarse sobre una litología sedimentaria.

La importancia del proceso ya ocurrido, es entender y establecer las propiedades de los materiales y las condiciones en que se pueden reproducir sobre el territorio serrano nacional. En países del continente asiático se han reportado buenas propiedades mecánicas e hidráulicas ante deslizamientos, en suelo similares a los encontrados en la sierra de Veracruz. Aunque los factores antropogénicos y precipitaciones atípicas no aseguran la estabilidad del terreno donde se han establecido comunidades.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos.....	2
1.2	Justificación.....	3
2	ÁREA DE ESTUDIO	3
2.1	Proceso de deslizamiento y flujo de materiales cerca de las comunidades de El Escalamar y El Capulín.....	3
2.2	Localización.....	4
2.3	Características y uso de suelo a nivel municipal.....	4
2.4	Subcuenca RH27Ac a la que pertenece la zona de estudio.....	5
2.5	Clima y vegetación local.....	6
2.6	Geología.....	7
2.6.1	Geología regional.....	7
2.6.2	Geología local.....	8
3	MARCO TEÓRICO	9
3.1	Procesos de remoción en masa.....	9
3.2	Susceptibilidad.....	10
3.2.1	Factores intrínsecos o condicionantes.....	10
3.3	Factores que influyen en la infiltración y el escurrimiento.....	11
3.3.1	Propiedades de los materiales que influyen en la capacidad de infiltración.....	11
3.4	Atributos de las geoformas.....	13
3.4.1	Atributos geomorfológicos.....	13
3.4.2	Atributos geomorfométricos.....	15
3.4.3	Atributos de suelos y materiales expuestos.....	16
3.5	Marco físico, químico y geotécnico.....	16
3.5.1	El color de las muestras.....	16
3.5.2	Textura y plasticidad.....	16
3.5.3	Sistemas de clasificación textural.....	17
3.5.4	Límites de consistencia.....	18
3.5.5	Factores que afectan los límites de consistencia.....	19
3.5.6	Cono penetrante.....	20
3.5.6.1	Índice de plasticidad (IP).....	21
3.5.6.2	Límite de contracción (w_s).....	21
3.5.6.3	Índice de Actividad (A).....	23
3.5.7	Carta de plasticidad.....	23
3.5.8	Permeabilidad.....	25
3.6	Procesos de alteración.....	26
3.6.1	Alteración hidrotermal.....	26
3.6.2	Suelos volcánicos en regiones tropicales.....	27
3.6.2.1	Aluminio activo.....	27
3.6.2.2	pH en suelos con propiedades ándicas.....	27
3.6.3	Comportamiento mecánico de suelos derivados de cenizas volcánicas.....	27
3.6.4	Relación entre propiedades físicas y resistencia residual.....	28
3.6.5	Relación entre el contenido de alofano y propiedades índice.....	28

3.6.6	Relación entre la consistencia de un suelo con alofano y la resistencia residual	29
3.7	Métodos indirectos de exploración	29
3.7.1	Comparación de las diferentes resoluciones de los satélites Landsat y Sentinel	29
3.7.2	Corrección radiométrica y atmosférica	29
3.7.3	Realce digital	31
3.7.4	Componentes principales de imágenes satelitales	31
3.8	Métodos directos de exploración	32
3.8.1	Espectrometría infrarroja de reflexión	32
3.8.2	Difracción de rayos X	33
4	MATERIALES Y MÉTODOS	33
4.1	Pre-procesamiento de imágenes satelitales	33
4.2	Modelo digital de elevaciones y recursos naturales	34
4.3	Procesos semejantes al caso de estudio	34
4.4	Otras zonas susceptibles a escala regional dentro de la subcuenca	34
4.5	Trabajo de laboratorio	35
4.5.1	Molienda y tamizado de muestras	35
4.5.2	Determinación del color y pH	36
4.5.3	Determinación de la presencia de Aluminio activo	36
4.5.4	Determinación de la densidad aparente	37
4.5.5	Determinación de la densidad real	37
4.5.6	Determinación de la permeabilidad	38
4.5.7	Medición de los límites de consistencia	38
4.5.8	Análisis del tamaño de partícula	40
4.5.8.1	Análisis del tamaño de partícula por sedimentación	41
4.5.9	Determinación de componentes minerales por espectrometría del infrarrojo	43
4.5.10	Determinación de componentes minerales por difracción de rayos X	44
5	RESULTADOS	45
5.1	Imágenes antes del deslizamiento: obtenidas del año 2010 del sensor TM del satélite Landsat	45
5.2	Imágenes después del deslizamiento, obtenidas del año 2014 del sensor OLI y TIRS de Landsat 8	46
5.3	Imágenes operadas para la detección de procesos de semejante magnitud a escala regional	47
5.4	Componentes principales de 4 bandas para la identificación de hidroxilos y óxidos	48
5.4.1	Localización de zonas con rasgos de metasomatismo	51
5.5	Sitios de muestreo y análisis de los materiales	51
5.5.1	Observaciones de campo	56
5.5.2	Muestras de la matriz de suelo y depósitos	57
5.5.2.1	Muestras externas	57
5.5.2.2	Perfiles expuestos en las partes que se mantuvieron intactas sobre la corona del deslizamiento	61
5.5.2.3	Muestras del flanco izquierdo de deslizamiento en la superficie de falla	65

5.5.2.4 Muestra en el cuerpo del deslizamiento: zona de cultivos.....	69
5.5.3 Cuadros resumen de las muestras analizadas.....	70
5.6 Análisis puntual de todas las muestras en una carta de plasticidad.....	74
5.7 Espectrometría del infrarrojo de muestras representativas.....	75
5.8 Difracción de rayos X de muestras seleccionadas.....	76
5.9 Correlación entre el pH y el límite líquido.....	76
5.10 Correlación entre tamaño de partículas y límite líquido.....	77
5.11 Carta de Actividad.....	77
5.12 Correlación entre porosidad y permeabilidad.....	78
5.13 Correlación entre el porcentaje de arcillas y permeabilidad.....	79
5.14 Litología.....	80
5.15 Suelos representativos.....	81
5.16 Unidades climáticas.....	82
5.17 Altitudes.....	84
5.18 Pendientes.....	87
5.19 Curvaturas.....	89
5.20 Orientación de laderas.....	92
5.21 Coberturas y usos de suelo.....	94
5.22 Susceptibilidad de zonas semejantes al deslizamiento y flujo de materiales.....	95
5.23 Susceptibilidad a desarrollar algún tipo de deslizamiento y flujo de materiales en toda la subcuenca.....	97
6 DISCUSIÓN.....	103
7 CONCLUSIONES.....	111
8 REFERENCIAS.....	113

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Principales factores que condicionan los deslizamientos y flujos de masas.....	11
Cuadro 2. Propiedades y procesos en los suelos influenciados por minerales de arcilla.....	12
Cuadro 3. Relación entre la faceta de vertiente, perfil topográfico y morfodinámica dominante.....	13
Cuadro 4. Clases de relieve en relación a la pendiente.....	13
Cuadro 5. Tamaño de partículas representativas en los suelos.....	17
Cuadro 6. Redondez de las partículas en los suelos.....	17
Cuadro 7. Simbología de las partículas en el SUCS.....	18
Cuadro 8. Rangos propuestos para definir cualitativamente la plasticidad.....	21
Cuadro 9. Comportamiento del suelo en relación a su índice de liquidez.....	22
Cuadro 10. Índice de Actividad de algunos minerales constituyentes de los suelos.....	23
Cuadro 11. Índice de Actividad para algunos grupos de arcillas.....	24
Cuadro 12. Índice de Actividad relacionado con el estado de arcilla.....	24
Cuadro 13. Comparación de las resoluciones de los satélites utilizados.....	30
Cuadro 14. Comparativa de los grupos a identificar espectralmente.....	31
Cuadro 15. Matriz de eigenvectores con 4 bandas para la identificación de hidroxilos.....	48
Cuadro 16. Matriz de carga con 4 bandas para la identificación de hidroxilos.....	48
Cuadro 17. Matriz de eigenvectores con 4 bandas para la identificación de óxidos.....	49
Cuadro 18. Matriz de carga con 4 bandas para la identificación de óxidos.....	50
Cuadro 19. Relación de muestras obtenidas en campo.....	56
Cuadro 20. Resumen del color, pH y reacción al aluminio activo de las muestras obtenidas en campo.....	70
Cuadro 21. Resumen de las densidades aparentes, reales y porosidades de las muestras obtenidas en campo.....	71
Cuadro 22. Resumen de los límites de consistencia y propiedades índices de las muestras obtenidas en campo.....	72
Cuadro 23. Resumen del tamaño de partícula, Actividad y textura de las muestras obtenidas en campo.....	73
Cuadro 24. Resumen de los ángulos de fricción interna residual (ϕ_r) estimados, redondez y fracción de partículas dominantes.....	74
Cuadro 25. Clasificación de grupos litológicos y sus propiedades geomecánicas.....	81
Cuadro 26. Clasificación de unidades climáticas de la RH27Ac.....	84
Cuadro 27. Clasificación de altitudes de la RH27Ac.....	87
Cuadro 28. Clasificación de pendientes de la RH27Ac.....	89
Cuadro 29. Clasificación de curvaturas de la RH27Ac.....	91
Cuadro 30. Clasificación de orientaciones de laderas de la RH27Ac.....	94
Cuadro 31. Clasificación de coberturas y usos de suelo de la RH27Ac.....	94
Cuadro 32. Jerarquización de factores condicionantes en la RH27Ac.....	98
Cuadro 33. Escala de comparación de factores utilizada en un proceso analítico jerárquico.....	98

Cuadro 34. Matriz de comparación por pares incluyendo la suma de los valores por columna y su inverso en un proceso analítico jerárquico.....	99
Cuadro 35. Peso de cada factor condicionante resultado del proceso analítico jerárquico.....	99
Cuadro 36. Nivel de susceptibilidad en porcentaje de la superficie RH27Ac.....	100
Cuadro 37. Localidades susceptibles a deslizamientos en la subcuenca RH27Ac.....	102

V. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comunidades de El Escalanar y El Capulín en el flanco izquierdo del deslizamiento.....	4
Figura 2. Localización nacional, estatal y municipal del deslizamiento ocurrido el 1° de octubre de 2013 en la zona serrana del municipio de Chiconquiaco, Veracruz.....	5
Figura 3. Red de drenaje de la subcuenca RH27Ac.....	6
Figura 4. Zonificación de la vegetación local y usos de suelo alrededor del deslizamiento.....	7
Figura 5. Estructura y principales componentes de un deslizamiento.....	9
Figura 6. Curvas características para la relación del contenido de arcilla con sus propiedades y procesos en el suelo.....	11
Figura 7. Contenido de humedad en el suelo con el tiempo y la profundidad alcanzada después de un evento de precipitación.....	12
Figura 8. Relación entre contenido de humedad en el tiempo, para suelos de textura gruesa y fina inicialmente saturados.....	12
Figura 9. Modelo de las partes de una ladera.....	14
Figura 10. Modelo de laderas de 9 unidades.....	14
Figura 11. Modelo de curvaturas en planta y perfil.....	15
Figura 12. Clasificación textural en el SUCS.....	18
Figura 13. Estados, límites de consistencia e índice de liquidez de un suelo.....	19
Figura 14. Modelo que relaciona procesos de remoción en masa por su contenido de agua, plasticidad y velocidad.....	20
Figura 15. Curva característica de contracción del suelo.....	22
Figura 16. Descripción de la carta de plasticidad.....	25
Figura 17. Firma espectral característica de la vegetación.....	32
Figura 18. Firmas espectrales características de óxidos e hidroxilos.....	32
Figura 19. Muestras representativas colocadas en el cuarto de secado para su posterior tamizado, molienda y homogenización.....	35
Figura 20. Determinación del color por vía seca (izquierda) y húmeda (derecha).....	36
Figura 21. Procedimiento utilizado para la medición del parámetro pH.....	36
Figura 22. Determinación de la densidad aparente.....	37
Figura 23. Determinación de la densidad real.....	38
Figura 24. Determinación de la permeabilidad.....	38
Figura 25. Pedestal con brazo ajustable (izquierda) donde se colca el cono (derecha).....	39
Figura 26. Preparación de las muestras (lado izquierdo) para la ejecución de cada ensayo de penetración con el cono (lado derecho).....	39

Figura 27. Ensayo de penetración para un contenido de humedad (izquierda) y extracción de una porción de muestra para ser ingresado a la estufa (derecha).....	40
Figura 28. Tamices utilizados para separar las fracciones de gravas (izquierda), arenas y finos (derecha).....	41
Figura 29. Separación de las partículas gruesas (izquierda) y finas (derecha).....	41
Figura 30. Hidrómetro para suelos ASTM 152H, escala de Bouyoucos.....	42
Figura 31. Preparación de las muestras para ser colocadas en las probetas de 1000 ml.....	42
Figura 32. Lecturas de la concentración con el hidrómetro.....	43
Figura 33. Espectrómetro y sonda de contacto de reflectancia.....	43
Figura 34. Difractómetro de rayos X Siemens D5000.....	44
Figura 35. Composición a color RGB de las bandas TM3, TM2, TM1 en el espectro visible antes del deslizamiento.....	45
Figura 36. Composición a color RGB de las bandas OLI4, OLI3, OLI2 en el espectro visible después del deslizamiento.....	46
Figura 37. Composición en falso color RGB de las bandas OLI5 (2014), OLI4 (2014), TM4 (2010) antes y después del proceso.....	47
Figura 38. Hidroxilos resultantes del análisis de componentes principales de 4 bandas.....	49
Figura 39. Óxidos resultantes del análisis de componentes principales de 4 bandas.....	50
Figura 40. Composición de falso color RGB de componentes principales de 4 bandas correspondientes a los óxidos, hidroxilos y óxidos + hidroxilos respectivamente del sensor MSI.....	51
Figura 41. Sitios de muestreo sobre un mapa litológico a escala de la microcuenca generada.....	52
Figura 42. Acercamiento a los sitios de muestreo.....	53
Figura 43. Rocas y productos piroclásticos depositados de las zonas de mayor altitud.....	54
Figura 44. Zona de transición correspondiente al límite entre la cobertura del bosque mesófilo de montaña y el deslizamiento (izquierda) y cambios en la cobertura vegetal del mismo bosque (derecha).....	54
Figura 45. Posición sobre la corona de deslizamiento (izquierda) y superficie del escarpe de deslizamiento visto desde abajo (derecha).....	55
Figura 46. Superficie expuesta del escarpe y la vegetación preexistente de la masa trasladada (izquierda) y vista de perfil del límite entre el escarpe y la masa trasladada (derecha).....	55
Figura 47. Cauce principal por donde continuaron fluyendo los materiales después del deslizamiento.....	56
Figura 48. Sitio para la recolección de la muestra EV-14.....	58
Figura 49. Sitio para la toma de la muestra EV-1.....	59
Figura 50. Sitio para la toma de la muestra EV-5.....	59
Figura 51. Muestras externas EV-14, EV-1, EV-5 ordenadas de mayor a menor altitud respectivamente, para determinar la presencia de aluminio activo.....	60
Figura 52. Afloramiento de materiales sedimentarios.....	60
Figura 53. Perfil expuesto EV-6 sobre el escarpe.....	61
Figura 54. Perfil expuesto EV-7 entre el escarpe y el flanco derecho del deslizamiento.....	63
Figura 55. Sitio para el muestreo EV-13 de la matriz en el escarpe interior del deslizamiento.....	64
Figura 56. Muestras EV-13 y los tres horizontes EV-6 que representan el grupo sobre el escarpe del deslizamiento para determinar la presencia de aluminio activo.....	65

Figura 57. Perfil EV-7 sobre el flanco derecho del deslizamiento para determinar la presencia de aluminio activo.....	65
Figura 58. Muestreo EV-12 del flanco izquierdo del deslizamiento.....	66
Figura 59. Muestreo EV-11 del flanco izquierdo del deslizamiento.....	67
Figura 60. Muestreo EV-10 del flanco izquierdo del deslizamiento.....	67
Figura 61. Muestreo EV-9 del flanco izquierdo del deslizamiento.....	68
Figura 62. Muestreo EV-8 del flanco izquierdo del deslizamiento.....	68
Figura 63. Muestreo en la zona de La Laguna.....	69
Figura 64. Muestras EV-12 a EV-8 representan el grupo del flanco izquierdo del deslizamiento y La Laguna, para determinar la presencia de aluminio activo.....	70
Figura 65. Análisis puntual de todas las muestras en una carta de plasticidad.....	75
Figura 66. Correlación entre pH y límite líquido.....	77
Figura 67. Correlación entre el % arcillas y límite líquido de todas las muestras.....	77
Figura 68. Correlación entre la fracción arcilla e índice de plasticidad.....	78
Figura 69. Correlación entre porosidad y permeabilidad para las muestras.....	79
Figura 70. Correlación entre el porcentaje de arcilla y permeabilidad de las muestras.....	79
Figura 71. Litología de la subcuenca RH27Ac.....	80
Figura 72. Suelos representativos en los alrededores del deslizamiento.....	81
Figura 73. Suelos representativos de la subcuenca RH27Ac.....	82
Figura 74. Clima predominante en los alrededores del deslizamiento.....	83
Figura 75. Unidades climáticas de la subcuenca RH27Ac.....	84
Figura 76. Altitudes a escala microcuenca.....	85
Figura 77. Altitudes de la subcuenca RH27Ac.....	86
Figura 78. Histograma del mapa de altitudes de la subcuenca RH27Ac aplicando el método de cortes naturales (jenks).....	86
Figura 79. Pendientes a escala microcuenca.....	87
Figura 80. Pendientes de la RH27Ac.....	88
Figura 81. Histograma del mapa de pendientes aplicando el método de cortes naturales (jenks).....	89
Figura 82. Morfología en planta y perfil de la microcuenca.....	90
Figura 83. Morfología de laderas en perfil y planta de la subcuenca RH27Ac.....	91
Figura 84. Orientación de laderas a escala microcuenca.....	92
Figura 85. Orientación de laderas de la subcuenca RH27Ac.....	93
Figura 86. Histograma del mapa de la orientación de las laderas de la subcuenca de la RH27Ac aplicando el método de intervalos iguales.....	93
Figura 87. Coberturas y usos de suelo de la subcuenca RH27Ac.....	95

Figura 88 Susceptibilidad a desarrollar deslizamientos semejantes al caso de estudio y las comunidades que se encuentran expuestas.....	96
Figura 89. Fotointerpretación en el relieve de deslizamientos en los alrededores del caso de estudio.....	97
Figura 90. Susceptibilidad a desarrollar algún tipo de deslizamiento en toda la subcuenca en localidades rurales y zonas urbanas expuestas.....	100
Figura 91. Histograma que representa porcentualmente los 5 niveles de susceptibilidad en la superficie RH27Ac.....	101
Figura 92. Ejemplos del tipo de daños mostrados en la carretera entre las localidades del municipio de Juchique de Ferrer y Plan de las Hayas antes de llegar a la colonia Libres, por precipitaciones del 18 de septiembre de 2010 (izquierda) y el tramo de carretera Colipa-Dehesa por un deslizamiento ocurrido el 18 de septiembre de 2017 (derecha).....	102

1. INTRODUCCIÓN

En esta tesis se aborda la problemática de los deslizamientos y flujos de materiales en zonas serranas con climas templados húmedos, empleando para ello un estudio detallado de un deslizamiento ocurrido a principios del mes de octubre de 2013, en un sitio ubicado entre las comunidades de El Escalanar y El Capulín, municipio de Chiconquiaco (Figura 1), en la zona serrana central del estado de Veracruz. Por su ubicación geográfica, dicho estado frecuentemente es el paso de huracanes, tormentas tropicales y frentes fríos, los cuales producen intensas precipitaciones que inducen movimientos de masas con diferentes profundidades y características particulares de los materiales geológicos. Estos agentes de precipitación, considerados como desencadenantes, son potencialmente peligrosos y junto con la actividad sísmica y la acción gravitacional, son por naturaleza parte del equilibrio del planeta. Las precipitaciones acumuladas saturan gradualmente el terreno, lo que puede producir presiones intersticiales que alteran la estabilidad local de los suelos y materiales terrestres, así como el aumento del peso propio de las masas por el agua que ocupa los vacíos de la matriz del medio granular.

Conjuntamente, existen factores condicionantes o intrínsecos que predisponen las masas de terreno a ser inestables, tales como aquellos definidos naturalmente por la geomorfología y el relieve, la estructura geológica y las propiedades de los materiales. Dependiendo del tipo de proceso de remoción estudiado se considerarán distintos factores condicionantes, porque cada tipo de movimiento es diferente. En algunos procesos tales como desprendimientos de roca, es necesario considerar la estructura geológica como factor condicionante; sin embargo, en deslizamientos y flujos de materiales inmersos en una matriz de gravas, arenas y finos, intervienen otros factores como las características geotécnicas del suelo, la abundancia o ausencia de vegetación nativa, entre otros.

Dentro de los factores desencadenantes se pueden incluir aquellos asociados a modificaciones hechas por el hombre en las laderas, con el fin de adaptar el terreno a otros usos que implícitamente generan cambios en los estados de equilibrio de los materiales. Es importante tener en cuenta que naturalmente aún sin la intervención humana, algunos deslizamientos se ven reflejados en la evolución natural del paisaje y es posible identificar, ya sea en imágenes o fotografías aéreas, las huellas que dejan en el relieve los eventos ocurridos en el pasado.

Dependiendo de las necesidades que se pretendan resolver, es como debe de ser abordado el problema. Como ejemplo, en muchas obras de ingeniería, particularmente en la construcción de carreteras donde se interactúa directamente con laderas de cerro, se tiene la necesidad de conocer con mayor o menor certeza las propiedades de los materiales. Debido a esa incertidumbre, es necesario la realización de estudios detallados de mecánica de suelos y de rocas, tales como la perforación, muestreo y selección de los sitios para realizar las pruebas directamente con los materiales y equipo. Para el caso del deslizamiento en laderas naturales que aquí se estudia, se presentan alternativas y métodos útiles para obtener la mayor cantidad y calidad de información en comunidades rurales susceptibles a este tipo de procesos, donde en ocasiones el acceso está muy limitado y sólo se cuenta con herramientas manuales para la extracción de muestras. Así mismo, es necesario elaborar un inventario regional de los procesos ocurridos en el pasado, para ubicar los sitios con características similares a las encontradas localmente en el área de estudio. Con este trabajo se pretende contribuir al entendimiento de deslizamientos y el desarrollo de flujos de materiales semejantes al caso de estudio dentro de la subcuenca RH27Ac.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Determinar los principales factores que condicionaron el proceso de deslizamiento y flujo de materiales entre las comunidades de El Escalanar y El Capulín en el estado de Veracruz.

1.1.2 Objetivos particulares

- Ubicar el deslizamiento y flujo de materiales del caso de estudio multitemporalmente con imágenes satelitales Landsat y Sentinel-2, para conocer su extensión e inventariar si se desarrollaron otros procesos semejantes no oficialmente registrados en la subcuenca durante la misma temporada.
- Determinar la distribución de grupos minerales y en su caso los principales minerales que condicionaron el deslizamiento
- Determinar los límites de consistencia e índices geotécnicos en las superficies de falla del deslizamiento
- Correlacionar algunas de las propiedades físico-químicas, geotécnicas de los suelos y materiales en las superficies de falla del deslizamiento
- Establecer afinidades con zonas próximas y susceptibles a desarrollar un deslizamiento semejante, utilizando la información del proceso ocurrido y sus alrededores.
- Analizar la susceptibilidad en toda la subcuenca dentro de la que se ubica el área de estudio, y definir la exposición de las comunidades cercanas.

1.2 Justificación

En el año 2013, el estado de Veracruz, enfrentó las consecuencias de más de diez tormentas tropicales severas, entre las consecuencias de estos eventos, se encuentran más de 780 deslizamientos de tierra ocurridos (Rodríguez y Morales, 2014). Este tipo de fenómenos, relacionados con los deslizamientos, requieren ser estudiados y analizados desde diferentes puntos de vista de la ciencia básica y aplicada, pues son los causantes de una enorme cantidad de pérdidas materiales y humanas, ya sea antes de la ocurrencia del fenómeno con la aparición de agrietamientos por movimientos en el terreno, así como durante y después de la ocurrencia del proceso. Las consecuencias de estos fenómenos se reflejan en la afectación de la comunicación entre las comunidades, y en muchas ocasiones con la pérdida de vidas humanas, no solo por el proceso ocurrido, también por suicidios ocurridos por algunos testimonios de los pobladores, al perder sus tierras, o no poder conseguir víveres para sus familias. Aunque puede resultar increíble para el estilo cotidiano de la vida en la metrópolis, estos hechos reflejan la percepción de los habitantes ante eventos de este tipo.

Con el objetivo de prevenir y minimizar estos daños, es necesario evaluar los factores condicionantes a través del estudio de las propiedades del suelo y en su caso, de las superficies inestables o de falla. Por otro lado, dentro de los factores desencadenantes, además de la presencia de tormentas tropicales atípicas, se incluyen esas acciones que modifican las condiciones preexistentes de las laderas, tales como el cambio de uso de suelo de conservación a uso de parcelas para cultivo, esto produce cambios en las propiedades del suelo que lo hacen más inestable y por ende susceptible a deslizar.

Existe un atlas de peligros geológicos del estado de Veracruz escala 1:250 000 publicado por la Subsecretaría de Protección Civil de dicho estado en el año 2011 (Mora y Rodríguez, 2011), sin embargo es necesario realizar investigaciones a detalle que permitan evaluar las condiciones locales del suelo en sitios altamente susceptibles a deslizamiento, como es el caso de la zona que se estudia en este trabajo.

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Proceso de deslizamiento y flujo de materiales cerca de las comunidades de El Escalnar y El Capulín

Entre junio y noviembre de 2013 se desarrollaron fenómenos meteorológicos que afectaron directamente a diferentes comunidades de la República Mexicana y en este caso del estado de Veracruz, a través de precipitaciones históricas por arriba de la media en la mayor parte del estado de acuerdo a información reportada por CONAGUA en 2013 después del evento de deslizamiento. Se reportaron valores críticos de lámina de agua entre los 3000 y 3750 mm (Guzmán y Morales, 2014) en las cuencas de los ríos Tecolutla, Nautla, Misantla y parte de la cuenca del río Papaloapan.

De acuerdo con reportes locales emitidos por la Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz, el 1 de octubre de 2013 sobre un cauce próximo a la comunidad de El Capulín, se produjo un deslizamiento de suelo que provocó un movimiento de material que abarcó más de 1 km de largo al pie de la ladera y la fracción más fluida continuó su descenso por el cauce del río que forma parte del río Nautla. No se dispone de datos de alguna estación local de las precipitaciones extraordinarias que precedieron el deslizamiento, por consiguiente, la información que se reporta en este estudio es a escala regional.

La zona superior del escarpe donde ocurrió la primera parte del deslizamiento está a 1440 m sobre el nivel del mar con una longitud aproximada de 200 m de largo desde la corona y 50 m de altura en el escarpe. El pie de ladera se encuentra aproximadamente a una elevación sobre el nivel del mar de 1100 m (Guzmán y Morales, 2014). La masa deslizante (Figura 1) destruyó una sección del camino de terracería que comunica las comunidades de El Capulín y Las Sombras, bloqueando el acceso entre ambos poblados.



Figura 1. Comunidades de El Escalanar y El Capulín en el flanco izquierdo del deslizamiento

2.2 Localización

Las coordenadas de la corona del deslizamiento son 19° 43' 35'' latitud norte y 96° 43' 15'' longitud oeste (UTM 14Q 737663 2183838), a una altura media sobre el nivel del mar de 1440 m. El municipio de Chiconquiaco limita al Norte con los municipios de Juchique de Ferrer, Yecuatla y Misantla; al Sur con Alto Lucero, Tepetlán y Acatlán y al Oeste con Landero y Cross (Figura 2).

2.3 Características y uso de suelo a nivel municipal

De acuerdo a características regionales del tipo de suelo referente a las bases de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017), la mayor parte del suelo en la zona es de tipo Andosol, esto se refleja en que 50% del territorio municipal es dedicado al uso agrícola-pecuario y de conservación forestal. Un 30% es destinado para viviendas, un 15% para el comercio y un 5% para oficinas y espacios públicos (INAFED, 2010).

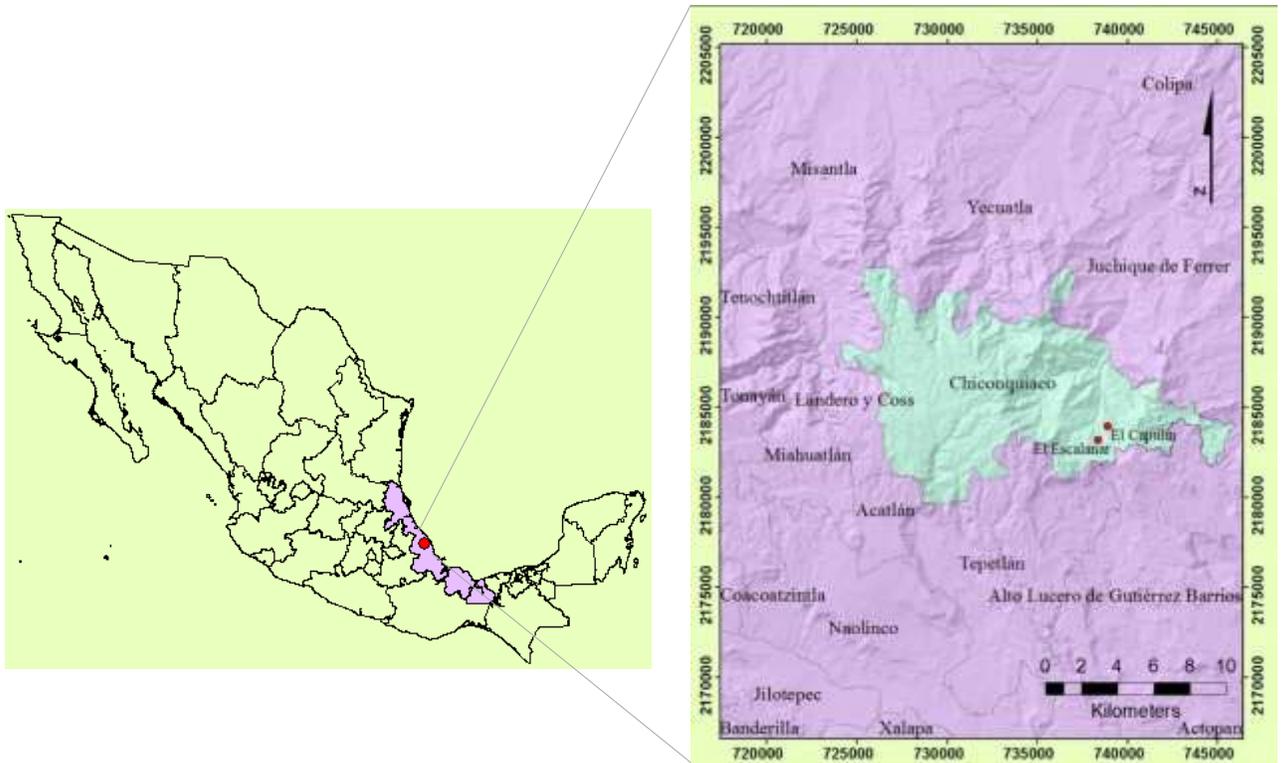


Figura 2. Localización nacional, estatal y municipal del deslizamiento ocurrido el 1° de octubre de 2013 en la zona serrana del municipio de Chiconquiaco, Veracruz

2.4 Subcuenca RH27Ac a la que pertenece la zona de estudio

El deslizamiento ocurrido entre las comunidades de El Escalamar y El Capulín se localiza en la subcuenca del río Yachite perteneciente a la cuenca río Nautla, la cual es de tipo exorreica y drena al Golfo de México. De acuerdo al Simulador de Flujos de Aguas de Cuencas, (SIATL, 2012) la subcuenca del río Yachite se ubica dentro de la región hidrológica RH27Ac (Figura 3), tiene un perímetro de 103.41 km y físicamente representa el límite del parteaguas con un área equivalente de 265.41 km².

La subcuenca RH27Ac tiene una elevación máxima de 2340 m y una elevación mínima de 0 m. La pendiente media se estima en 31.4 % (SIATL, 2012). Aunque la diversidad de relieve define sólo condiciones locales, el deslizamiento ocurrido tiene una pendiente media de casi 19°.

La red de drenaje es un buen indicador que refleja las condiciones del terreno y se refiere a las características de los cauces que comprenden el sistema. La elevación máxima de la corriente principal del río Yachite, de la subcuenca RH27Ac es de 449 m, tiene una elevación mínima de 3m, aporta una longitud de 17557 m, con una pendiente media de 2.54% (SIATL, 2012). El número de orden del río Yachite es de 3 a escala de la subcuenca.

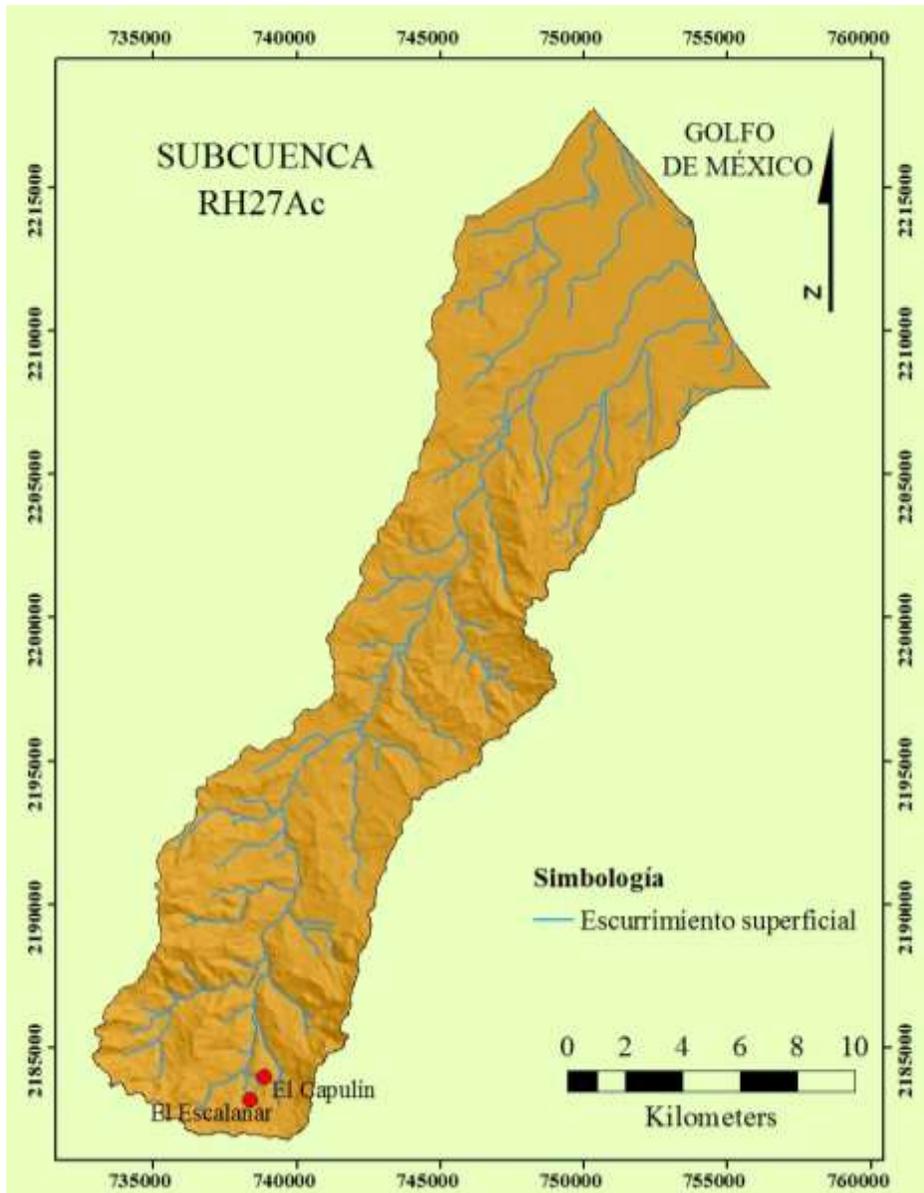


Figura 3. Red de drenaje de la subcuenca RH27Ac. El orden de corriente a la escala mostrada en el mapa equivale a 3, de acuerdo a INEGI (2017)

2.5 Clima y vegetación local

El clima predominante es templado-húmedo (Cf). Los atributos climatológicos reportados por el servicio meteorológico nacional (SMN, 2010) a través de la estación 00030040 Chiconquiaco con una latitud de $19^{\circ}44'35''$ N y una longitud de $96^{\circ}49'05''$ W a una elevación sobre el nivel del mar de 2063 m del período de 1951 a 2010 indica una temperatura media anual de 14.2°C . También se reporta una temperatura mínima anual de 9.7°C y una máxima anual de 18.7°C .

La precipitación media anual reportada tiene un valor de 1681 mm de lámina de agua, donde se observa que en el mes de mayo comienza el aumento de las precipitaciones pluviales. Es importante señalar que en esta estación sólo se tienen registros de hasta 20 años, con valores pluviales anuales máximos hasta el año de 1984. Estaciones vecinas tal como la estación meteorológica Misantla, en el

período de junio a noviembre de 2013 registró una precipitación de 3876 mm, lo cual superó en más de 1.5 veces el valor de la precipitación promedio durante la época de lluvias (Guzmán y Morales 2014).

En las zonas de mayor altitud (Figura 4), predomina el bosque mesófilo de montaña y es ideal para las plantaciones de café (CONABIO, 2010) y en esta misma zona se identificó la presencia de árboles de jaboncillo. Sobre el proceso de deslizamiento también se identificaron colonias de árboles de ilite y en menor densidad, árboles de olmo y liquidámbar. Particularmente en los alrededores del sitio donde ocurrió el proceso, se cosecha principalmente café, frijol y maíz, en un ambiente de pastizales cultivados para el ganado.

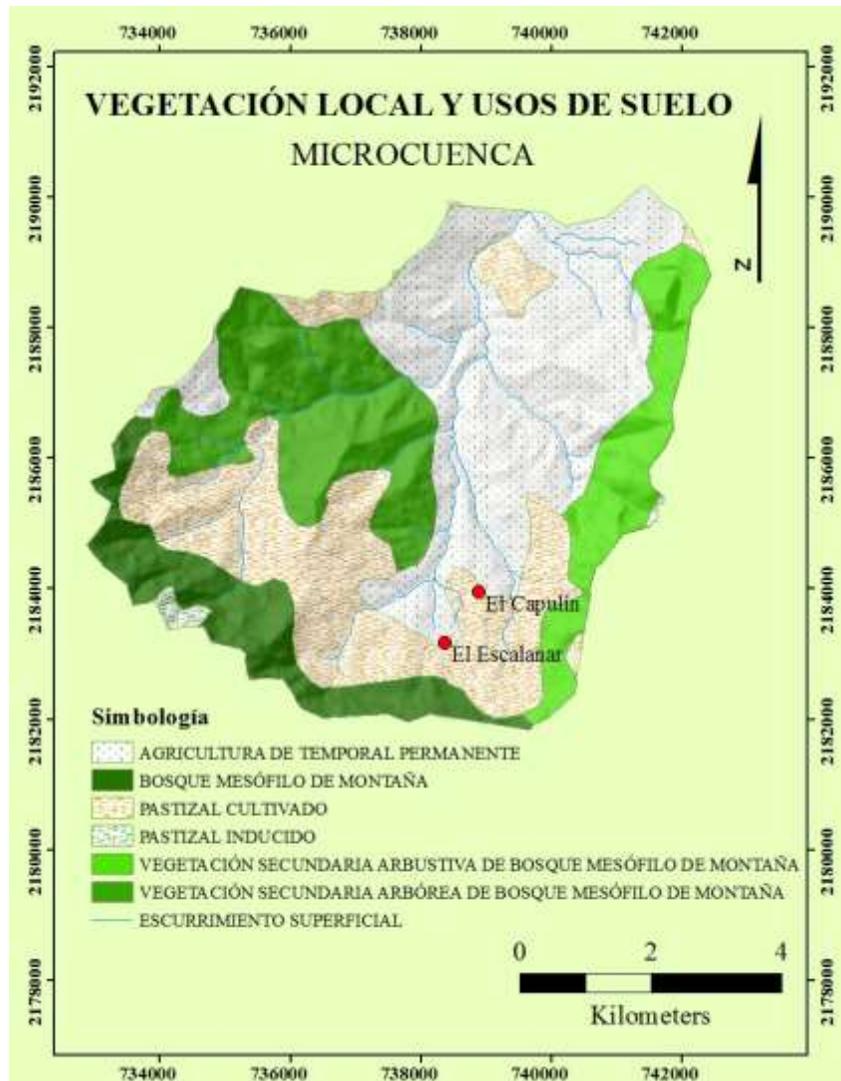


Figura 4. Zonificación de la vegetación local y usos de suelo alrededor del deslizamiento, de acuerdo a INEGI (2017)

2.6 Geología

2.6.1 Geología regional

Una gran porción de los volcanes activos, inactivos y campos volcánicos monogenéticos del cuaternario en México son de composición andesítica y basáltico-andesítica. Se localizan dentro de

la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), la cual es resultado de la subducción de las placas de Cocos y Rivera por debajo de la Placa Norteamericana, a lo largo de la trinchera del Pacífico (Ferrari et al., 2005).

El Complejo Volcánico Palma Sola Chiconquiaco (CVPSC) está situado cerca de la costa del Golfo de México. Pertenece al sector oriental de la FVTM, con edades que varían entre 3.2 y 6.9 Ma (Ferrari et al., 2005; Gómez et al., 2003). Aunque existen evidencias de vulcanismo monogenético más reciente, como sería el caso de los conos de escoria conocidos como Los Atlixcos. En cuanto a la litología del CVPSC, existe un predominio de basaltos-andesíticos, basaltos y en menor cuantía andesitas, dioritas y depósitos volcánicos detríticos. El vulcanismo en la región CVPSC y la geología en la región son complejos. De acuerdo a López (1991), el basamento pre-volcánico CVPSC está formado por esquistos, rocas vulcano-sedimentarias e intrusivas que en conjunto constituyen un alto estructural conocido como el macizo de Teziutlán, cuya edad varía entre el Paleozoico superior a Mesozoico y se eleva a lo largo de una estructura E-W que rompe la continuidad de las cuencas costeras de Tampico-Misantla y la cuenca de Veracruz hacia el sur. Calizas y esquistos pertenecen a la plataforma Mesozoica Tampico-Misantla y finalmente a la secuencia depositada en la cuenca de Veracruz que está formada esencialmente por lechos alternados de areniscas y depósitos de lutita durante el Terciario (López, 1991).

Según Gómez et al. (2003), en un lapso aproximado de 17 Ma, la actividad magmática del Cenozoico en la región consta de cuatro grupos de rocas: 1) cuerpos intrusivos del Mioceno medio al tardío de composición gabroidea a diorítica, expuestos principalmente a lo largo de la costa en las áreas de Misantla y Palma Sola; 2) una meseta basáltica alcalina del Mioceno tardío al Plioceno temprano centrada en el área de Chiconquiaco; 3) Los últimos flujos de lava del Plioceno del área de Alto Lucero-Actopan; y 4) Conos de ceniza del Pleistoceno tardío al Holoceno con flujos de lava asociados, localizados principalmente al sur de la meseta de Chiconquiaco.

2.6.2 Geología local

De acuerdo a Ferrari et al., (2005) la actividad volcánica que construyó la meseta de Chiconquiaco comenzó alrededor de 6.9 Ma, aunque el pulso principal del vulcanismo parece haber ocurrido al comienzo del Plioceno. En el área comprendida entre Alto Lucero y el sur de Actopan, varios caudales de lava avanzaron hacia el sureste, discordantemente sobre la meseta de Chiconquiaco. Estas lavas son altamente potásicas con edades casi idénticas de 1.97 y 2.04 Ma. A su vez estas edades son comparables con la edad de 2.2 Ma obtenida por López (1991) para un flujo de lava ubicado al sur de Chiconquiaco. Los diferentes derrames de lava están comúnmente separados por horizontes de depósitos rojos, finas capas de depósitos aluviales o capas gruesas de depósitos de brecha volcánica y tefra (López, 1991).

La litología de la subcuenca RH27Ac se caracteriza principalmente por una sucesión de derrames volcánicos de composición basáltica y basáltico-andesítica del Mioceno tardío al Pleistoceno temprano, emitido por fisuras y aberturas centrales (Ferrari et al., 2005). Particularmente en el primer tercio de la subcuenca predominan basaltos del Neógeno y tobas básicas del Cuaternario (INEGI, 2005). En la mitad de la subcuenca se encuentran las formaciones sedimentarias de lutitas-areniscas del Paleógeno. En la zona rumbo a la costa predominan unidades litológicas aluviales, conglomerados, eólicas del Cuaternario y latitas del Neógeno (INEGI, 2005). Las rocas muestran un grado de intemperismo desarrollado por efectos climáticos en condiciones templadas y húmedas extremas. En particular la localidad de El Capulín está situada sobre depósitos de ladera al pie de una

gran elevación conformada por lavas. Los depósitos de ladera están constituidos por fragmentos de rocas volcánicas dentro de una matriz de arena, limo y arcilla (Rodríguez y Morales, 2014).

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Procesos de remoción en masa

Los procesos de remoción en masa (PRM) se refieren a movimientos de materiales depositados en laderas, tales como suelos, rocas y otros materiales en ciertas cantidades y tamaños respecto a un estado inicial determinado (Rodríguez y Morales, 2014). Para la clasificación de estos procesos se utilizan indicadores como son el tipo de material, mecanismo de rotura, contenido de agua y velocidad del movimiento (Huitchinson, 1988, Cruden y Varnes, 1996, Hungr et al., 2013). En la Figura 5 se muestra de manera general un proceso que inicia como un deslizamiento de una masa de terreno en la cabecera o corona que expone el escarpe de falla principal y superficies de falla en los flancos. Es común encontrar agrietamientos y asentamientos diferenciales en los alrededores de la masa deslizada.

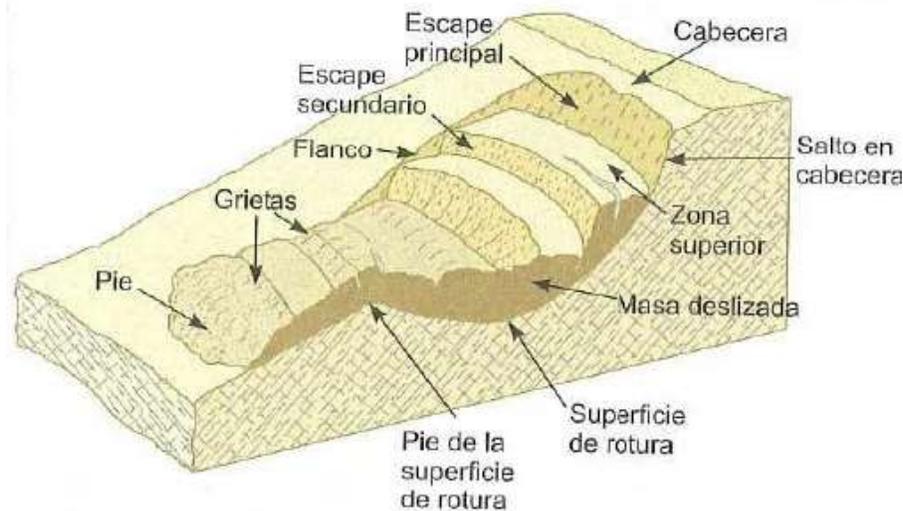


Figura 5. Estructura y principales componentes de un deslizamiento. De acuerdo a González et al. (2004)

• *Deslizamientos*

En esta clase de procesos se toma como clasificador el mecanismo de rotura. En los deslizamientos rotacionales, la superficie de falla se idealiza como una curva con centro de giro fuera de la masa rotada (Díaz, 2014) y por supuesto fuera del centro de gravedad del cuerpo en movimiento. Frecuentemente la forma y localización de la superficie de falla está influenciada por las discontinuidades, juntas y planos de estratificación. Se pueden generar muchas combinaciones y variantes en esta clase de deslizamientos debido a las condiciones locales (Suárez, 1998). Dependiendo del tipo de suelos y del contenido de agua, los deslizamientos rotacionales se transforman en flujos, aguas abajo del punto de despegue.

A diferencia de los mecanismos rotacionales con superficies de falla curvas, si la superficie de falla se aproxima a una superficie casi recta, se clasifica como deslizamiento de traslación. La traslación puede progresar indefinidamente al pie de ladera, alcanzar incluso el cauce de los ríos y comportarse de manera más fluida (Hungr et al., 2013). La traslación de los materiales está controlada por planos

de estratificación, zonas de cambio de estado de meteorización, es decir, la superficie de contacto entre un material base y un material con diferente respuesta a la resistencia al corte. Generalmente, los deslizamientos traslacionales son más rápidos que los rotacionales, por las características cinemáticas del mecanismo de rotura (González et al., 2004).

- *Flujos*

Los flujos de materiales, se refieren a movimientos continuos en masa con abundante presencia de agua, donde el material se comporta como un fluido viscoso. Los flujos se pueden presentar en laderas de bajas pendientes, por la presencia de materiales arcillosos poco cohesivos, que pierden su resistencia al ser movilizados. Un flujo posee tres unidades morfológicas: un origen que generalmente es un deslizamiento, un canal de flujo y una zona de acumulación (Suárez, 1998). El material fluye con cierta viscosidad de acuerdo a las condiciones topográficas y morfológicas. Los flujos arrastran los materiales disponibles y se pueden clasificar en su contenido y tamaño de partículas (Hungre et al., 2013). Este tipo de movimientos son muy destructivos, por la velocidad que adquieren y por su capacidad de acarrear grandes bloques de roca.

- *Movimientos complejos*

Los movimientos complejos ocurren cuando un movimiento inicial se transforma en otro, al irse desplazándose ladera abajo. Es el resultado del colapso repentino de una gran extensión de una masa de material granular (Hungre et al., 2013).

La distancia de recorrido generalmente, aumenta con el volumen de la masa fallada, ésta a su vez depende del espesor de la capa depositada transformando esa energía potencial en energía cinética de movimiento, describiéndose mejor en términos de mecánica de fluidos integrados en un modelo reológico.

3.2 Susceptibilidad

La susceptibilidad a deslizamientos se refiere a la predisposición de los materiales a generar movimientos sobre las laderas. Los mapas de susceptibilidad de este fenómeno identifican áreas potencialmente inestables, sin embargo, no predicen cuando ocurrirán los procesos analizados (Ayala y Cantos, 2002). Estos mapas tienen una función de resaltar las zonas críticas a nivel regional y donde se necesitan realizar estudios más específicos. La estimación de la susceptibilidad se basa en la correlación de los principales factores condicionantes o intrínsecos que contribuyen a la formación de movimientos en masa. Los mapas de susceptibilidad deben considerarse como referenciales (Villacorta et al., 2012).

3.2.1 Factores intrínsecos o condicionantes

Son varias las causas que contribuyen al movimiento de una ladera; aunque con frecuencia se atribuyen a la acción de algún factor desencadenante. Las inestabilidades no se producen de no existir una serie de condiciones predeterminadas que favorecen el fenómeno. Dentro de los factores condicionantes o factores intrínsecos (Cuadro 1) se encuentran las propiedades físicas y resistentes de los suelos y materiales. Las características morfológicas y geométricas de la ladera son fundamentales para la predisposición a la inestabilidad (González et al., 2004).

Aspectos como la composición, grado de alteración y porosidad del suelo, determinan la posibilidad del terreno a desplazarse ante la presencia de factores desencadenantes (González et al., 2004).

Cuadro 1. Principales factores que condicionan los deslizamientos y flujos de masas. Modificado de González et al. (2004)

<i>Factores condicionantes</i>	<i>Influencias y efectos</i>
Litología	Resistencia, densidad, comportamiento hidrogeológico
Intemperismo y zonas de alteración	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad
Relieve (altitud, pendiente, curvatura, orientación de ladera)	Distribución del peso del terreno, erosión y flujos, exposición a precipitaciones
Propiedades geomecánicas de los materiales	Presiones intersticiales, comportamiento hidrogeológico
Coberturas y usos de suelo	Modificaciones del balance hídrico, erosión

3.3 Factores que influyen en la infiltración y el escurrimiento

Existen factores regionales que influyen en el escurrimiento, tales como climáticos, geológicos y su relación con la posición en el relieve. Aunque localmente la cobertura vegetal, desde las copas de los árboles, su forma, altura, tipo de hojas y el mantillo predominante, condiciona la infiltración y escurrimiento. El suelo entre más poroso sea y menor contenido de material fino posea, tendrá una mayor capacidad de infiltración, lo cual retardará la aparición del escurrimiento superficial (Fattorelli y Fernández, 2011).

3.3.1 Propiedades de los materiales que influyen en la capacidad de infiltración

Las proporciones relativas de arena, limo y arcilla afectan numerosas propiedades del suelo, siendo esta última la fracción más reactiva. En la Figura 6 se muestran las propiedades y procesos en el suelo con el aumento en el contenido de arcilla (Lal y Shukla, 2004).

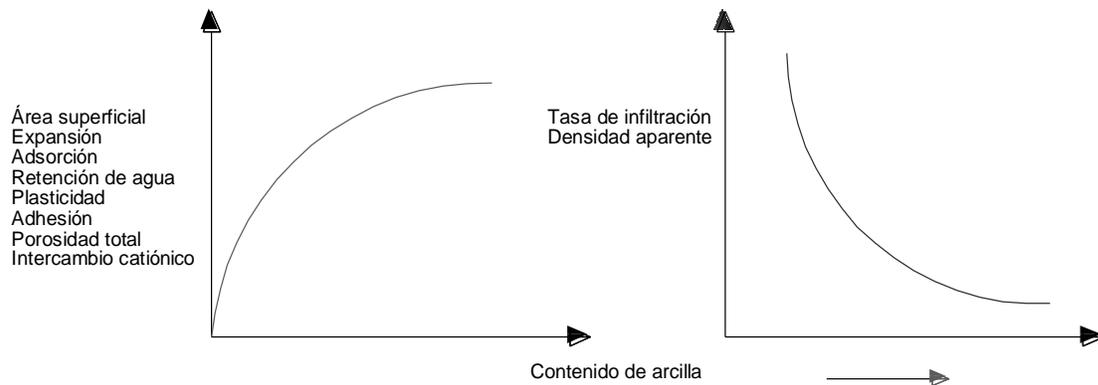


Figura 6. Curvas características para la relación del contenido de arcilla con sus propiedades y procesos en el suelo. Modificado de Lal y Shukla (2004)

Los suelos con abundancia de minerales de arcilla tienen propiedades particulares (Cuadro 2) y es posible relacionarlos con las zonas susceptibles a deslizamientos.

Cuadro 2. Propiedades y procesos en los suelos influenciados por minerales de arcilla. Modificado de Hillel (1998), Juárez y Rico (1992)

<i>Propiedad</i>	<i>Procesos</i>
Área superficial	Absorción, agregación, infiltración
Extensión de partículas laminares (húmedas o secas)	Capacidad de expansión- contracción
Forma	Plasticidad
Densidad aparente y densidad de partícula	Compactación, erosión
Adhesión, cohesión	Estructura del suelo

En la Figura 7 se ejemplifica el comportamiento del agua en el medio poroso con el tiempo (Lal y Shukla, 2004)

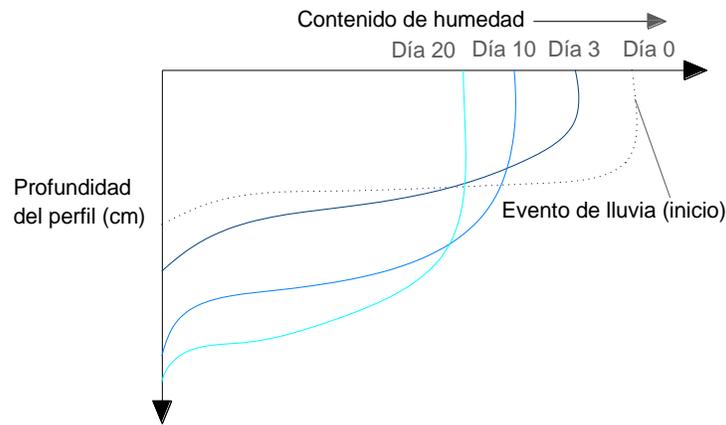


Figura 7. Contenido de humedad en el suelo con el tiempo y la profundidad alcanzada después de un evento de precipitación. Modificado de Lal y Shukla (2004)

Conforme transcurre el tiempo y el agua alcanza estratos más profundos, el contenido de humedad es mayor en suelos de textura fina y puede corresponder a los sitios con mayor susceptibilidad ante algún tipo de deslizamiento (Figura 8).

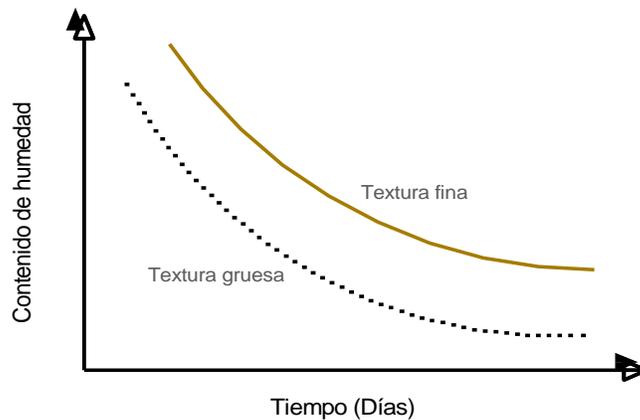


Figura 8. Relación entre contenido de humedad en el tiempo, para suelos de textura gruesa y fina inicialmente saturados. Modificado de Lal y Shukla (2004)

3.4 Atributos de las geoformas

Algunos de los atributos utilizados en la geomorfología, también son aplicados en otras disciplinas para describir el medio granular de suelos y materiales consolidados para encontrar factores que condicionan los deslizamientos.

3.4.1 Atributos geomorfológicos

Los atributos geomorfológicos describen la geometría de las geoformas en términos topográficos y planimétricos. Los atributos topográficos están relacionados con los niveles categóricos de las diferentes partes de la ladera y pueden visualizarse en dos dimensiones mediante cortes topográficos de perfil o en tres dimensiones mediante un modelo del terreno (Zinck, 2012). De acuerdo a la posición en la ladera, desde la cumbre convexa hasta el pie de ladera cóncava, se presenta una morfodinámica característica (Cuadro 3), mostrando procesos erosivos, de tránsito y acumulación.

También se han propuesto criterios para diferenciar las clases del relieve de acuerdo a intervalos de pendientes (Cuadro 4). El propósito de clasificar las pendientes, es establecer una definición del tipo de relieve de acuerdo a un valor numérico (González et al., 2004, Yalcin et al., 2008).

Cuadro 3. Relación entre la faceta de vertiente, perfil topográfico y morfodinámica dominante. Adaptado de Ruhe (1975)

<i>Faceta de vertiente</i>	<i>Perfil topográfico</i>	<i>Morfodinámica dominante</i>
Superficie cumbral propuesta	Plano/ convexo	Ablación erosión
Hombro de la ladera	Convexo	Erosión
Lomo de ladera	Rectilíneo-inclinado	Material de tránsito
Pie de ladera	Cóncavo	Acumulación lateral
Planicie	Cóncavo/plano	Acumulación longitudinal

Cuadro 4. Clases de relieve en relación a la pendiente. Modificado de González et al. (2004)

<i>Clases</i>	<i>Pendiente %</i>
Plano y pendiente ligera	0-2
Ondulado	2-8
Fuertemente ondulado	8-16
Escarpado	16-30
Muy escarpado	>30

Existen modelos de vertientes ampliamente conocidos, tal es el caso del modelo de cinco facetas propuesto por Ruhe (1975) (Figura 9) o el modelo de nueve facetas propuesto por Conacher y Darlymple (1977) (Figura 10). Igualmente el perfil topográfico general puede ser localmente modificado por erosión hídrica o por movimientos en masa. Además de la descripción en perfil, la planimetría se refiere a la proyección vertical de los límites de la geoforma sobre un plano horizontal.

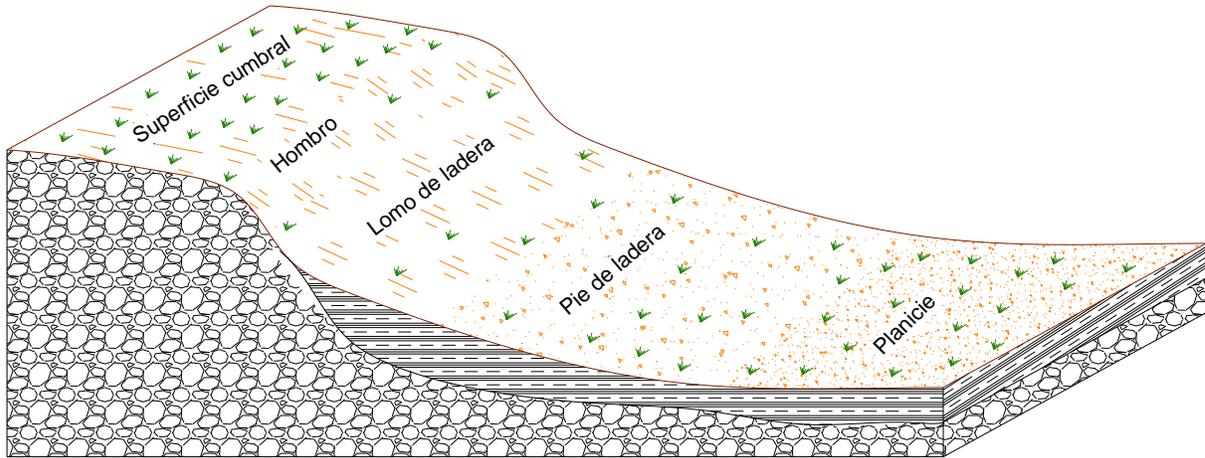


Figura 9. Modelo de las partes de una ladera. Modificado de Ruhe (1975)

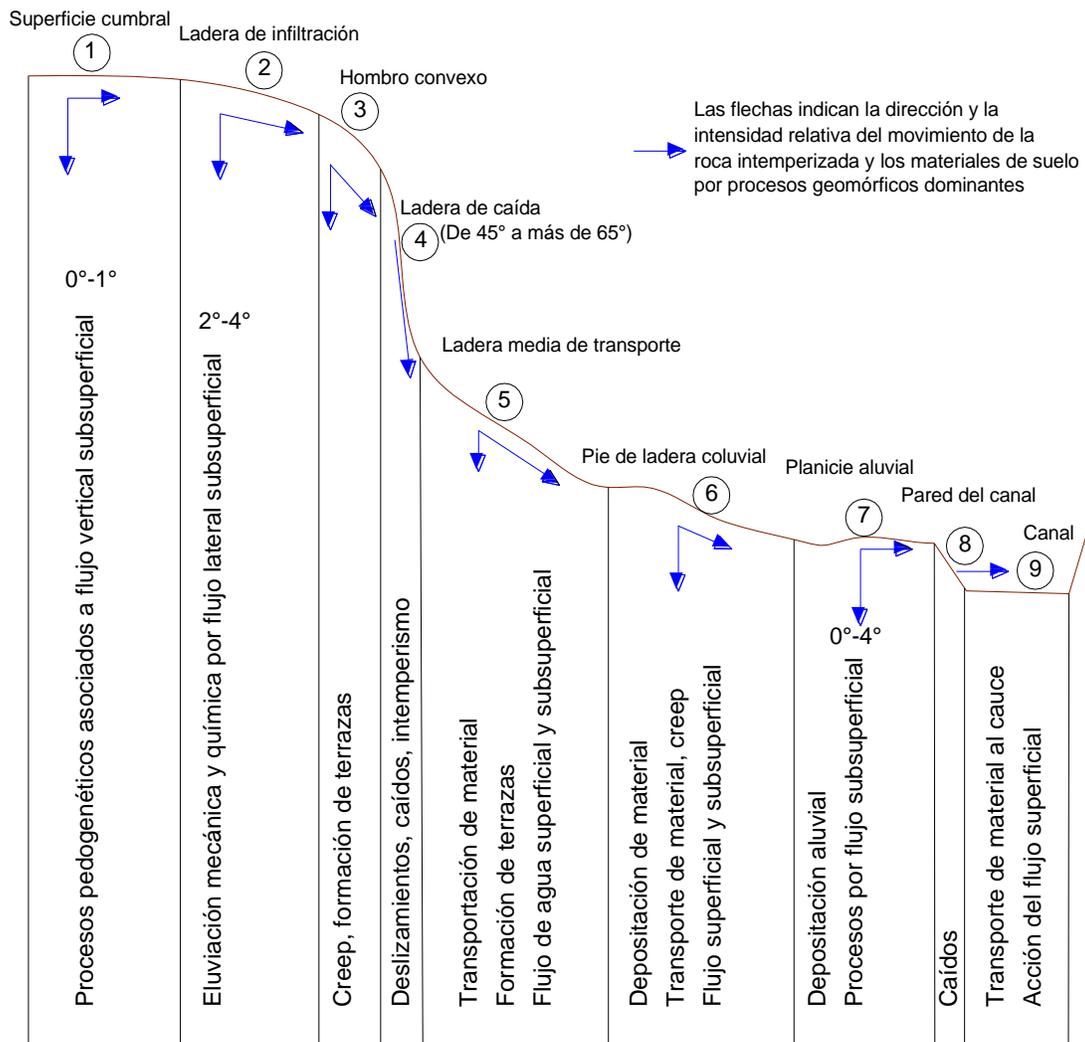


Figura 10. Modelo de laderas de nueve unidades. Modificado de Conacher y Darlymple (1977)

3.4.2 Atributos geomorfométricos

Son rasgos dimensionales de las geformas de carácter local y regional, en particular sólo algunos de estos rasgos contribuyen a la caracterización de las formas del terreno.

- *Altura relativa*

Son rangos numéricos que representan las condiciones locales, es descriptiva y diferenciante pero no completamente diagnóstica. Se puede evaluar mediante rangos de valores numéricos (Zinck, 2012).

- *Pendiente del relieve*

La pendiente es un atributo que describe las formas del relieve particulares. En algunos suelos residuales de origen ígneo permiten ángulos de ladera superiores a 45° (Wesley, 2009), en lutitas meteorizadas saturadas éste no excede los 20° y alcanza valores de hasta 10° (Suárez, 1998). Teóricamente en suelos granulares limpios y secos al ángulo de inclinación de la ladera con la horizontal no debe sobrepasar el ángulo de fricción del material (Suárez, 1998).

- *Curvatura en planta y perfil*

La curvatura se utiliza para describir las características físicas de una cuenca de drenaje para entender procesos de flujos en masa (Figura 11). La curvatura del perfil afecta la aceleración y desaceleración de flujos en masa, mientras que la curvatura en planta influye en la convergencia y divergencia de los flujos (ArcMap, 2017).

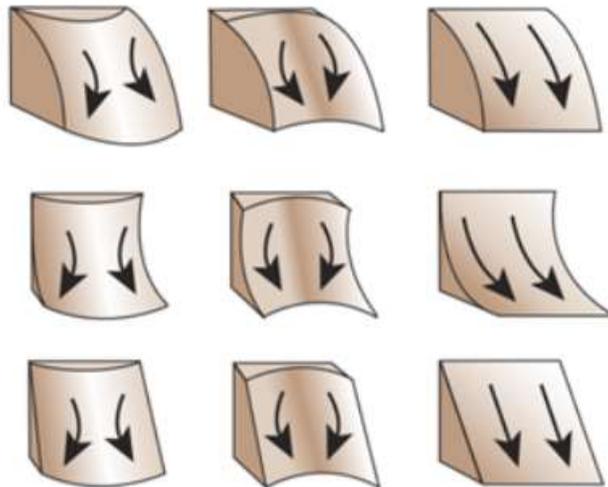


Figura 11. Modelo de curvaturas en planta y perfil. Fuente: funciones curvatura del programa ArcMap 10.3 (2017)

Los suelos y depósitos varían a través cada zona de ladera por dos razones: (1) la pendiente afecta los flujos de agua y materia, generalmente pendiente abajo y (2) los efectos del nivel de aguas freáticas (Schaeztl y Anderson, 2005). La mayoría de los sedimentos y agua se depositan en la base de la ladera, perdiéndose desde las partes con mayor altitud. Cuando el transporte es primeramente por procesos gravitacionales se puede decir que son depósitos coluviales (Suárez, 1998). En las partes de las cumbres, es supuesto que la mayor parte del agua tiende a infiltrarse. El hombro y lomo de la ladera son zonas con el mayor escurrimiento y mayor erosión, lo que provoca que se exhiban perfiles con poco o nulo desarrollo de suelo (Zinck, 2012).

La mayoría de laderas tienen dos o más puntos de inflexión, el primero ocurre en la posición del hombro y el segundo en el pie de la ladera. Estos puntos de inflexión marcan la localización de discontinuidades litológicas y por consecuencia, las fronteras de diferentes cuerpos de depósitos (Zinck, 2012).

- *Orientación de la ladera*

La orientación de las laderas como factor condicionante indica las direcciones hacia la cual se muestra la cara de la ladera y de los flujos de materiales en caso de desencadenarse (p.e. en El Capulín es hacia el NE), mientras que la curvatura se refiere al cambio de orientación a través de la cara de la ladera, y es mejor observable cuando las líneas topográficas se curvan (ArcMap 10.3, 2017). Cuando la curvatura es mínima, los contornos de las líneas topográficas son lineales vistos desde planta. En las pendientes principales con contornos cóncavos/ curvatura en planta, las líneas de flujo de agua con sedimentos cubrirán las partes más bajas de la ladera, es decir, pendientes convergentes. Por lo que menos precipitación será requerida para saturar los depósitos (Zinck, 2012). Los perfiles de suelo tenderán a ser más gruesos y acumulativos, y es probable que en un deslizamiento de masas los volúmenes removidos sean aún mayores. Donde las líneas de flujo divergen y las bases no están dispuestas a depositarse, los perfiles de suelo serán más delgados.

3.4.3 Atributos de suelos y materiales expuestos

El grado de desarrollo morfológico de los suelos puede ser inferido a partir de criterios como color, textura, espesor del suelo, abundancia de minerales, entre otros.

En un ambiente tropical húmedo, los fragmentos de rocas ígneas y metamórficas en las formaciones detríticas se alteran más rápidamente que la mayoría de las rocas sedimentarias. La roca cuarcita es la más resistente en todo tipo de clima y constituye generalmente los fragmentos residuales dominantes en las formaciones detríticas.

3.5 Marco físico, químico y geotécnico

3.5.1 El color de las muestras

El color ofrece una primera descripción de la génesis del suelo, en particular en climas tropicales húmedos. Generalmente a medida que se meteorizan los minerales ferromagnéticos del material parental hay un aumento gradual de la coloración roja. La posibilidad de diferenciar por el color se atenúa en suelos muy desarrollados, aunque algunos suelos rojos pueden también ser recientes cuando se derivan de materiales retomados por erosión de suelos rojos más antiguos y son redepositados en posiciones más bajas en el paisaje.

3.5.2 Textura y plasticidad

La importancia de conocer la textura, radica en la posibilidad de predecir el comportamiento físico del suelo. Los suelos de textura gruesa presentan una relación con su comportamiento mecánico, mientras que los suelos de textura fina se ven afectados por la presencia de agua; estas interacciones se reflejan en la plasticidad y la cohesión del material.

En mecánica de suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse en respuesta a un esfuerzo aplicado (Juárez y Rico, 1992). Es reconocido que existe una relación específica entre la plasticidad y las propiedades fisicoquímicas determinantes del comportamiento mecánico de partículas más finas de forma laminar. Los pioneros

en introducir el concepto de plasticidad, como Atterberg, Terzaghi y Goldschmidt sugirieron que la plasticidad de los suelos se debe a la carga eléctrica de las partículas laminares, que generan campos, y actúan como condensadores e influyen en las moléculas bipolares del agua (Juárez y Rico, 1992). El espesor de estas capas de agua viscosa es grande y su efecto en la interacción de las partículas de suelo determina su plasticidad. También se ha comprobado que las partículas equidimensionales con una relación área a volumen pequeña, tienen escasa actividad eléctrica superficial, y nunca constituyen suelos plásticos independientemente de su tamaño (Juárez y Rico, 1992).

La estimación del tamaño de partículas se define dentro de un rango que corresponde al diámetro de la partícula. En el Cuadro 5 se definen los rangos en tamaño para cada tipo de partícula.

Cuadro 5. Tamaño de partículas representativas en los suelos. Modificado de Díaz (2014)

<i>Partícula</i>	<i>Tamaño</i>
Boleo	>30 cm
Canto rodado	15 a 30 cm
Grava	4.75 mm a 75 mm
Arena	0.075 mm a 4.75 mm
Limo	0.002 mm a 0.075 mm
Arcilla	<0.002 mm

• *Redondez*

La redondez está referida a la agudeza de las aristas y de los vértices de un fragmento clástico. El Cuadro 6 resume la redondez de las partículas en los suelos y su descripción. Los fragmentos muy desgastados son un factor que favorece los deslizamientos (Díaz, 2014).

Cuadro 6. Redondez de las partículas en los suelos. Modificado de Díaz (2014)

<i>Redondez</i>	<i>Descripción</i>
Angulosa	Presenta poca o nula prueba de desgaste
Subangulosa	Efectos comunes de desgaste, y los fragmentos mantienen su forma original
Subredondeada	Exhibe desgaste considerable
Redondeada	Expone las caras originales completamente destruidas
Bien redondeada	Expone curvas definidas

3.5.3 *Sistemas de clasificación textural*

Los sistemas de clasificación de suelos proporcionan un lenguaje común para expresar de manera concisa las características de las muestras de suelo. Existen diferentes sistemas de clasificación, aquí sólo se menciona el estandarizado de acuerdo a la norma ASTM D2487 y se le conoce como Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Su procedimiento se resume en la Figura 12.

La base del SUCS es que los suelos finos se clasifican de acuerdo a su plasticidad y los gruesos de acuerdo a su granulometría. Los símbolos de cada grupo se resumen en el Cuadro 7 (Juárez y Rico, 1992).

En resumen, para emplear el sistema SUCS se requiere la siguiente información:

- a) Porcentaje de grava que pasa la malla número 3 (76.2 mm) y es retenida en la malla número 4 (4.75 mm)
- b) Porcentaje de arena que pasa la malla número 4 y es retenida en la malla número 200 (0.075 mm)
- c) Porcentaje de limo y arcilla que pasa la malla número 200
- d) Límite líquido e índice de plasticidad de la muestra que pasa la malla número 40

Cuadro 7. Simbología de las partículas en el SUCS. Modificado de Juárez y Rico (1992)

Símbolos	
Grava (G)	Arena (S)
Limo (M)	Arcilla (C)
Arcilla orgánica y limo orgánico (O)	Turba y otros suelos altamente orgánicos (Pt)

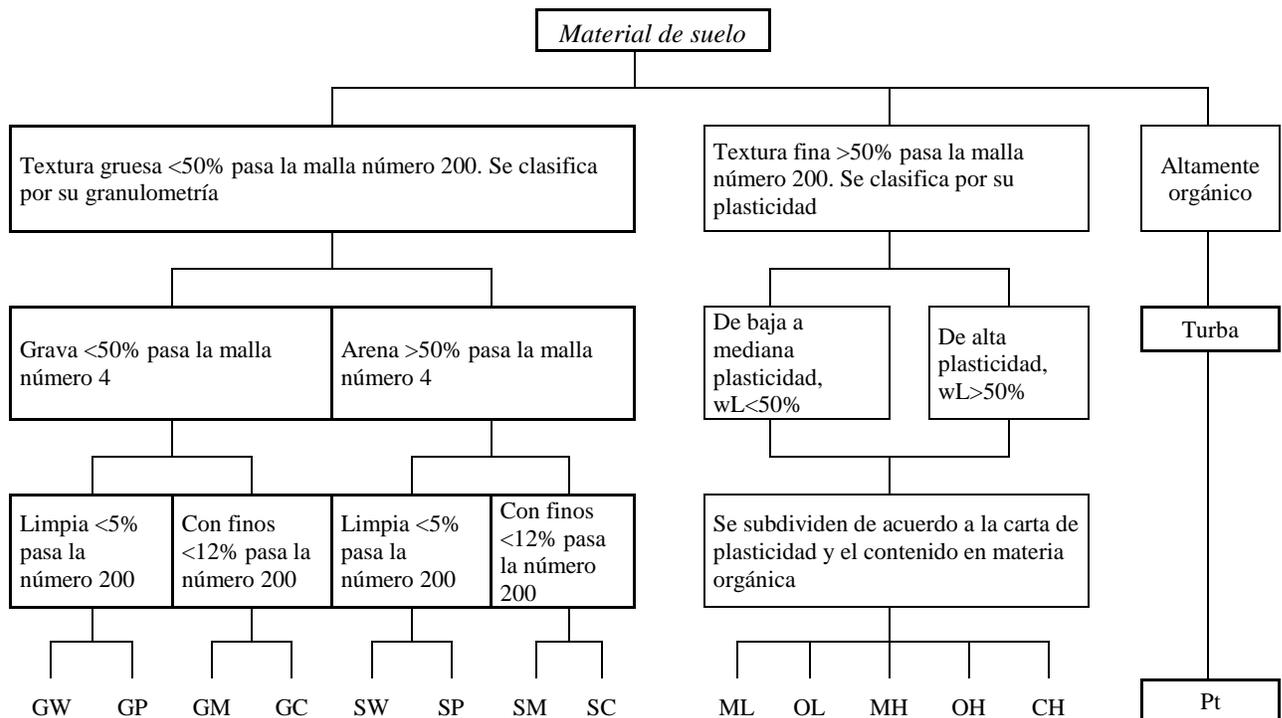


Figura 12. Clasificación textural en el SUCS. Modificado de Juárez y Rico (1992)

3.5.4 Límites de consistencia

Los límites de consistencia permiten describir el comportamiento mecánico, actual o potencial, de los materiales susceptibles de ser removidos por movimientos en masa, de acuerdo a diferentes contenidos de humedad. Por lo general, materiales arcillosos son mayormente susceptibles a deslizamiento, mientras que materiales de limo y arena fina son más propensos a soliflucción. Un bajo índice de plasticidad hace el material más susceptible a licuefacción, con riesgo de generar flujos de lodo (González et al., 2004).

En la Figura 13 se resumen los siguientes conceptos: El límite líquido es la frontera entre los estados líquido y plástico, el límite plástico entre los estados plástico y semisólido y el límite de contracción entre los estados semisólido y sólido. Los detalles de la determinación de los límites líquidos y plásticos se encuentran en la norma ASTM D4318.

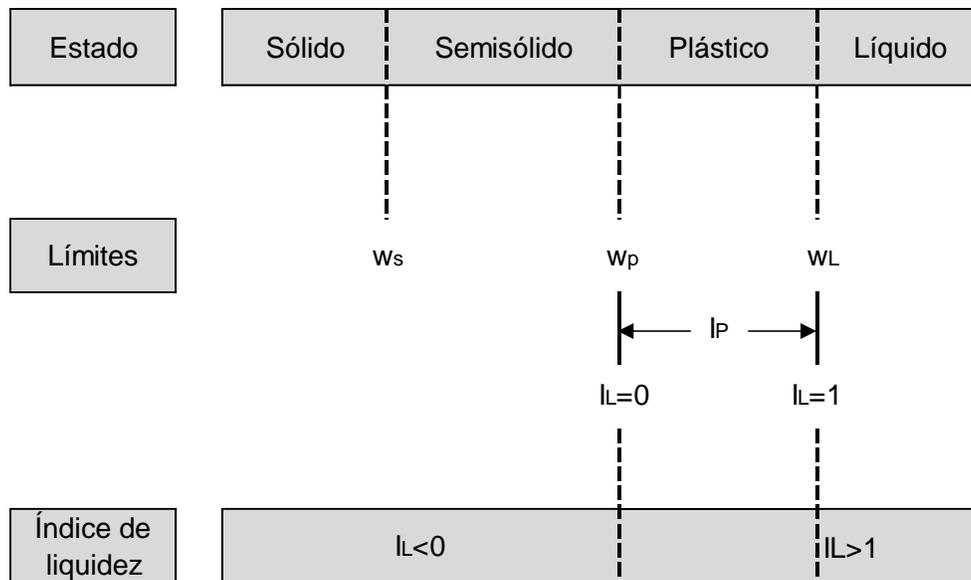


Figura 13. Estados, límites de consistencia e índice de liquidez de un suelo. Modificado de ASTM D4318

El modelo gráfico de Carson (1972) de Zinck (2012) que se presenta en la Figura 14, muestra la relación entre el estado de plasticidad que adquieren los materiales con el contenido de agua y las velocidades de cada tipo de proceso.

3.5.5 Factores que afectan los límites de consistencia

Los límites de consistencia son afectados por la naturaleza de los sólidos, de manera similar por aquellos que afectan el espesor y la dinámica de la doble capa difusa, incluyendo el contenido de arcilla, arena y contenido de materia orgánica (Lal y Shukla, 2004).

- *Contenido de arcilla*

La plasticidad es una función del área superficial total de la fracción fina (Peck et al., 1996). La cantidad de agua adsorbida depende del área superficial, la cual determina la cohesión y plasticidad, y a su vez depende del contenido de arcilla. Generalmente los suelos con bajo contenido de arcilla tienen un límite plástico bajo y como consecuencia, un índice de plasticidad también bajo. Entonces, el índice de plasticidad es una medida indirecta del contenido de arcilla para algunos suelos (Peck et al., 1996; Mitchell y Soga, 2005).

- *Minerales de arcilla*

El tipo de minerales, ya sea 2:1 o 1:1, expansivos o no expansivos controlan el contenido de agua en el suelo. La absorción de humedad de suelos arcillosos es usualmente en el orden siguiente: esmectita > illita > caolinita (Siebe et al., 2006).

- *Intercambio catiónico*

La plasticidad del suelo y los límites de consistencia también están influenciados por los cationes intercambiables por sus efectos sobre la hidratación, la dispersión, floculación y las características de la doble capa difusa. Los cationes polivalentes mantienen la red en expansión en comparación con cationes monovalentes. Todos los demás factores siguen siendo los mismos, los cationes afectan el índice de plasticidad de acuerdo al orden siguiente: $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > \text{Al}^{+2} > \text{Ti}^+$ (Lal y Shukla, 2004; Peck et al., 1996).

- *Contenido de materia orgánica en el suelo*

Se denominan suelos predominantemente inorgánicos con contenido de materia orgánica menor al 5% (Mitchell y Soga, 2005). El incremento de materia orgánica incrementa las fronteras superiores e inferiores de los límites de consistencia, aunque en algunos suelos por su profundidad, el contenido de materia orgánica no tiene algún efecto en el índice de plasticidad.

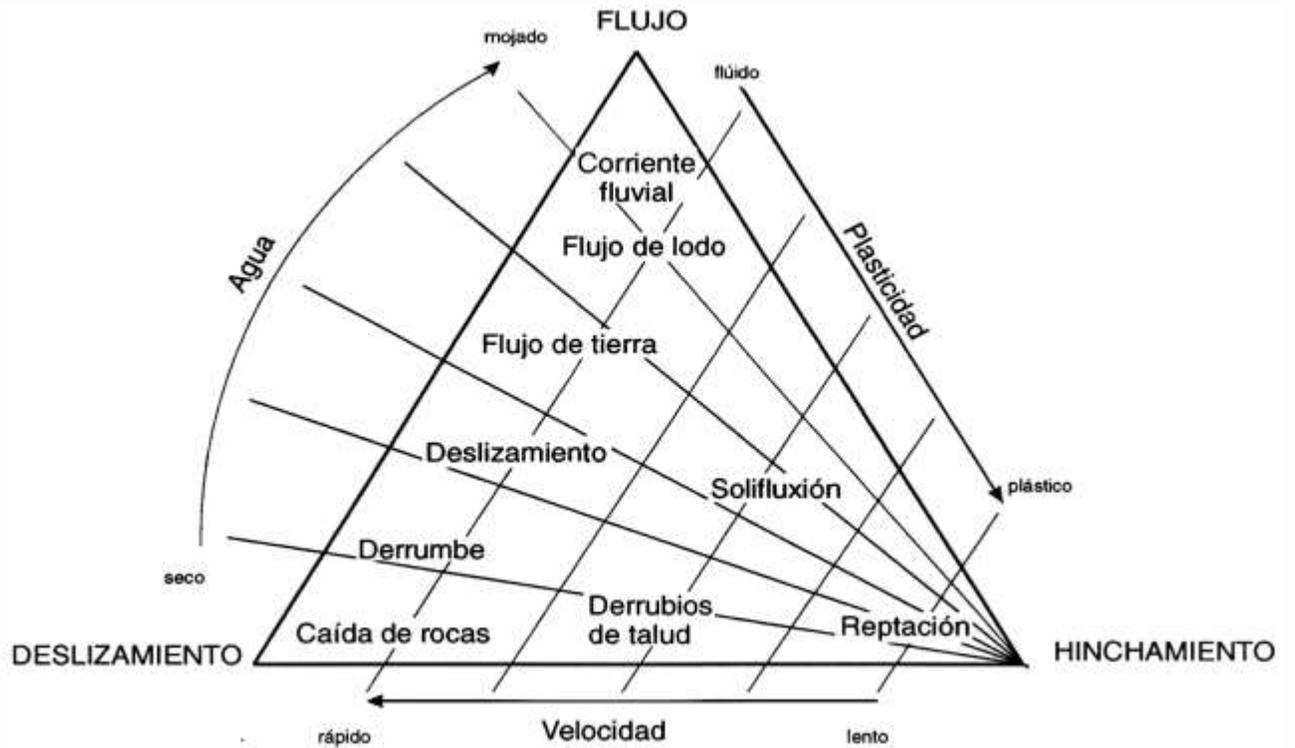


Figura 14. Modelo que relaciona procesos de remoción en masa por su contenido de agua, plasticidad y velocidad. Fuente: Zinck (2012)

3.5.6 Cono penetrante

Es un dispositivo en el cuál se relaciona la penetración en el suelo con el contenido de humedad. Ésta técnica se basa en la penetración con un cono metálico que cae por su peso propio, a partir de una posición en reposo en la que su punta toca justamente la superficie enrasada del material por ensayar (Mendoza y Orozco, 1997).

Los resultados obtenidos con el cono para diferentes suelos han sido comparados por Mendoza y Orozco (1997) con pruebas de veleta para diferentes contenidos de humedad y límites líquidos.

Entonces se puede estimar la resistencia no drenada en muestras inalteradas con solo permitir la penetración del cono. También se puede obtener información del comportamiento mecánico de los materiales mediante correlaciones semi-empíricas. Por su parte, cada uno de los límites de consistencia corresponde a un contenido de agua, que se define como el cociente de la masa de agua contenida en los poros del suelo y el medio particulado de la fracción sólida:

$$w (\%) = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Donde

m : Contenido de agua, en porcentaje

m_w : Masa del agua removida en la estufa, en g

m_s : Masa e las partículas sólidas del suelo, en g

Para el secado del suelo es necesario que permanezca en el horno por lo menos 16 horas si es muy poca muestra y recomendable 24 h, bajo una temperatura prácticamente constante de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ (Laboratorio de mecánica de suelos del Instituto de Ingeniería, 2018). Aunque es conocido que el agua puede existir de varias formas y las partículas minerales pueden tener agua estructural.

3.5.6.1 Índice de plasticidad (IP)

El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico (ASTM D4318). En el Cuadro 8 se relaciona el valor plasticidad con éste índice.

Cuadro 8. Rangos propuestos para definir cualitativamente la plasticidad. Modificado de Iglesias (1997)

IP (%)	Plasticidad
0-3	Nula
4-15	Baja
16-30	Media
>30	Alta

3.5.6.2 Límite de contracción (w_s)

El límite de contracción se define como el contenido de humedad del suelo para el cual deja de contraerse (Figura 15). El proceso de contracción es debido a la manifestación de la doble capa difusa, y a las fuerzas de la superficie de tensión en la interface aire-agua (Peck et al., 1996). La magnitud del cambio de volumen depende de la estructura del suelo, forma de los agregados, porosidad y su distribución, naturaleza y cantidad de arcilla. Por lo tanto, el proceso de contracción está relacionado con el cambio en el volumen total (Vt) en relación con el cambio en el volumen de agua (θ) en el suelo. La pendiente de la recta (contenido volumétrico de humedad-volumen de suelo) es un indicador del tipo de contracción. Si el ángulo es 45° , el suelo muestra una contracción normal. La contracción normal del suelo continúa hasta que hay una fuerte interacción entre partículas, y la contracción adicional es causada por la compresión y la orientación de las partículas en vez de la disminución en el volumen total (Lal y Shukla, 2004; Juárez y Rico, 1992).

El contenido de agua w_s que saturaría un suelo contraído por secado puede ser estimado para efectos prácticos. Para casos específicos el procedimiento está documentado en la norma ASTM D4318.

$$W_s = \frac{50w_p}{50+I_p} \quad (2)$$

Donde w_p es el límite plástico e I_p es el índice de plasticidad

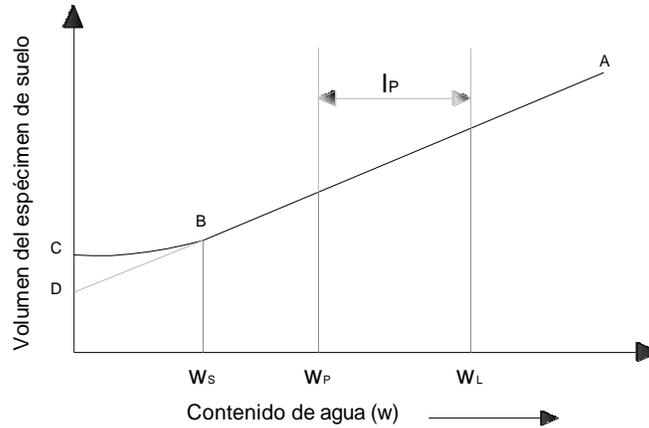


Figura 15. Curva característica de contracción del suelo. El punto B significa el contenido de humedad en el cual el aire entra en el suelo y corresponde al límite de contracción. El segmento DC corresponde a la porosidad llena de aire durante la contracción residual. La contracción residual es usualmente mayor en suelos bien estructurados. Modificado de Lal y Shukla (2004)

La compresibilidad de los suelos está determinada más por la forma que por el tamaño de las partículas y aumenta con el valor del límite líquido, permaneciendo todos los demás factores constantes (Juárez y Rico, 1992). Mientras que la plasticidad es una medida indirecta del contenido de partículas coloidales de forma laminar (Mitchell y Soga, 2005) y, por lo tanto, también de la compresibilidad del mismo suelo.

Los suelos que son comprimidos bajo cargas significativas tienen un índice de liquidez que tiende a cero y se considera que el material está preconsolidado, es decir, que ha soportado presiones efectivas en su historia geológica. Mientras que aquellos materiales que nunca han estado sometidos a presiones efectivas, su índice de liquidez es cercano a 1, lo que indica que el suelo está normalmente consolidado (Holtz y Kovacs, 1981). En ocasiones depósitos de suelo en estado inalterado con un índice de liquidez mayor a 1 pueden parecer estables, aunque cualquier aumento de humedad puede conducirlos al estado líquido (Cuadro 9). Las arcillas sensitivas tienen un contenido de agua mayor que el límite líquido, tienen por tanto el índice de liquidez mayor que 1, entonces en esos casos se considera que están normalmente consolidadas.

Cuadro 9. Comportamiento del suelo en relación a su índice de liquidez. Modificado de Holtz y Kovacs (1981)

<i>Índice de liquidez</i>	
<i>Valor</i>	<i>Comportamiento típico del suelo</i>
<0	Fractura frágil al corte. La humedad natural es menor al límite plástico
0-1	IL cercano a 0: Efectos de preconsolidación IL cercano a 0.2: Tendrá poca expansión, aunque sea altamente plástico IL cercano a 1: Estado normalmente consolidado (no ha estado sujeto a presiones efectivas)
>1	Sensitivos e inestables que puede cambiar súbitamente a estado líquido

3.5.6.3 Índice de actividad (A)

El índice de Actividad es aplicable a suelos plásticos, es decir, que tienen cambios en su volumen ante diferentes contenidos de humedad. Al dibujar en el eje de las abscisas la fracción granulométrica de tamaño arcilla y en la misma escala en el eje de las ordenadas el índice de plasticidad, se obtiene una relación (Skempton, 1953), que al ajustarle la ecuación de una recta que pasa por el origen de coordenadas, se obtiene la línea de Actividad (A)

$$A = \frac{IP}{\% \text{ de tamaño } \leq 0.002 \text{ mm}} \quad (3)$$

Donde:

IP es el índice de plasticidad

Conforme la Actividad es mayor, mayor es el potencial de expansión-contracción y más importante es la influencia de minerales arcillosos sobre las propiedades del material (Juárez y Rico, 1992; Díaz, 2014).

Se puede inferir que el valor de Actividad permanecerá aproximadamente constante para muestras que provengan de estratos del mismo origen geológico. En los Cuadros 10 y 11 se presentan valores típicos de Actividad para arcillas tipo y otros minerales. El valor de Actividad está influenciado por la historia de esfuerzos y deformaciones del suelo (Lambe y Whitman, 1969). En el Cuadro 12 se muestran otros valores de Actividad para el estado mecánico de las arcillas.

3.5.7 Carta de plasticidad

Las propiedades de limos y arcillas están correlacionadas con los límites de consistencia mediante una carta de plasticidad (Figura 16). La carta de plasticidad se encuentra dividida en regiones, donde las abscisas representan el límite líquido y las ordenadas representan el índice de plasticidad, a través de éstas coordenadas, el suelo se clasifica de acuerdo a su posición en las diferentes regiones de la carta.

Cuadro 10. Índice de Actividad de algunos minerales constituyentes de los suelos. Modificado de Díaz (2014)

<i>Mineral</i>	<i>Actividad</i>
Cuarzo	0.0
Caolinita	0.01 - 0.41
Halloysita	0.02 - 0.07
Calcita	0.18
Mica (moscovita)	0.23
Illita	0.23 - 0.80
Montmorillonita (Ca, Mg, K)	0.32 - 3.09
Montmorillonita (Na)	1.12 - 11.5

Cuadro 11. Índice de Actividad para algunos grupos de arcillas. Modificado de Iglesias (1997); Mitchell y Soga (2005)

<i>Actividad</i>	<i>Clasificación</i>	<i>Arcilla tipo</i>	<i>Potencial cambio de volumen</i>
A < 0.5	Inactivas	Caolinita	Bajo
0.5 - 1.0	Normales	Illita	Medio
1.0 - 2.0	Activas	Esmectita (montmorillonita (A>7))	Alto
2.0 - 7.0	Muy activas		Muy alto
0.5 - 1.2	–	Alofano	–

Cuadro 12. Índice de Actividad relacionado con el estado de arcilla. Modificado de Suárez (1998)

<i>Estado de arcilla</i>	<i>Actividad</i>
Arcillas muy sobreconsolidadas	-0.5 - 0.0
Arcillas con grava compactadas	-0.25 - 0.25
Arcilla ligeramente sobreconsolidada	0.0 - 0.5
Arcilla arenosa compactada	0.25 - 0.75
Normalmente consolidadas	0.5 - 1.0
Altamente sensitivas	0.75 - 1.5

La línea A de la carta de plasticidad representa una frontera empírica que pasa por las coordenadas (20, 0) y (50, 22), (ASTM D 2487) y tiene una ecuación $IP = 0.73 * (wL - 20)$ donde IP es el índice de plasticidad y wL es el límite líquido. Generalmente el límite líquido en suelos de origen sedimentario tiene una proporción directa al contenido de arcilla. Es común encontrar la caolinita y suelos orgánicos debajo de la línea A en la carta de plasticidad y se clasifican como limos, mientras las arcillas inorgánicas y la montmorillonita se ubican justo arriba de la línea A y se clasifican como arcillas de alta plasticidad. La línea U es el límite superior de la relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido, por lo que no existen resultados que se encuentren arriba de la línea U (Díaz, 2014) y tiene una ecuación $IP = 0.9 * (wL - 8)$.

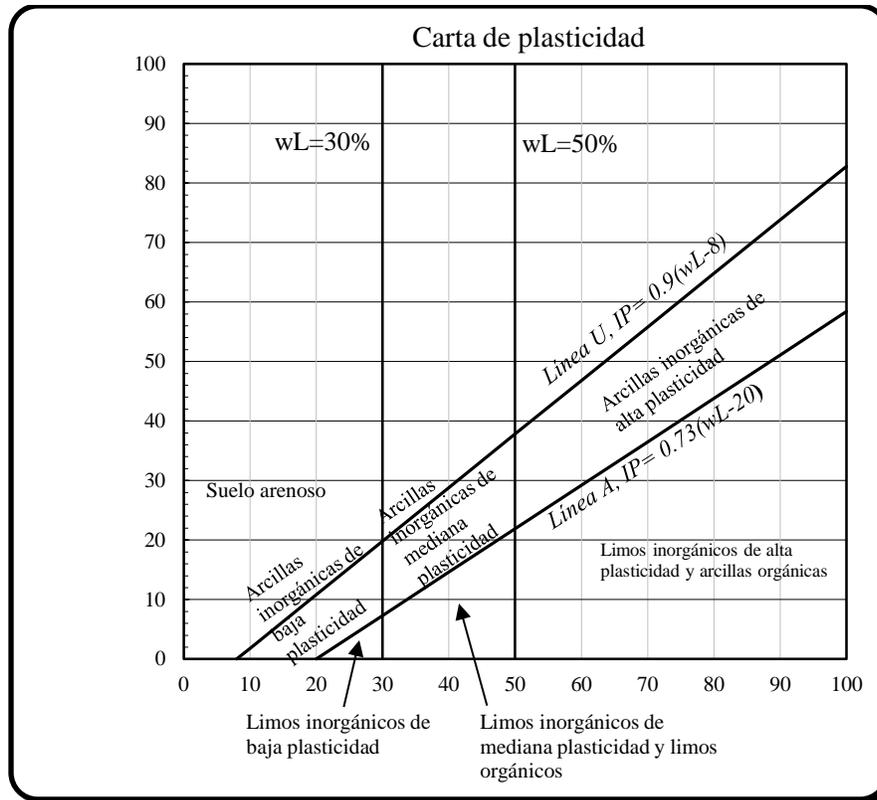


Figura 16. Descripción de la carta de plasticidad. Modificado de Díaz (2014); Mitchell y Soga (2005)

Se han divulgado relaciones empíricas entre el índice de plasticidad y la resistencia al esfuerzo cortante o el ángulo de fricción interna de un suelo (Wood y Wroth, 1978). Más reciente se ha comprobado que el límite plástico en la mayoría de los suelos tiene 100 veces mayor la resistencia cortante no drenada que tendría en su límite líquido, en este último se han medido valores entre 1.7 y 2.0 kPa (Mitchell y Soga 2005; Díaz, 2014). En la teoría crítica de la mecánica de suelos se ha mostrado que las estimaciones de resistencia al esfuerzo cortante no drenado dependen solamente del índice de liquidez del suelo.

El principal uso de la carta de plasticidad está en situar en ella un suelo desconocido, por medio del cálculo de los dos parámetros que definen su plasticidad. La colocación del suelo en uno de los grupos definidos indicará que participa del conjunto de propiedades mecánicas e hidráulicas características de ese grupo, entonces se tiene un modo simple y económico de adquirir valiosa información del material. Colocando cada punto en la carta pueden compararse las propiedades de plasticidad con las muestras de otros materiales en un sitio diferente en la ladera.

3.5.8 Permeabilidad

La permeabilidad es una propiedad del suelo que describe como el agua fluye dentro de medios porosos debido a un gradiente. Este parámetro es variable y depende de las condiciones intrínsecas del suelo. El gradiente hidráulico i , se define como la energía o carga h , por unidad de longitud, l (Holtz y Kovacs, 1981).

$$i = \frac{h}{l} \quad (4)$$

El flujo se define laminar cuando las líneas de flujo permanecen sin juntarse entre sí en su recorrido, por otro lado se define el flujo turbulento cuando la condición anterior no se cumple, hay fluctuaciones de las líneas de flujo con disipación interna de energía (Holtz y Kovacs, 1981; Juárez y Rico, 1992). La velocidad del flujo en la mayoría de los suelos es muy pequeña y se considera de tipo laminar. Entonces podemos representar la velocidad proporcional al gradiente i , donde la constante de proporcionalidad k , corresponde a cada material o suelo.

$$v = ki \quad (5)$$

Otro concepto de mecánica de fluidos es la ley de conservación de la masa. Se supone que para flujo constante incompresible, esta ley se reduce a una ecuación de continuidad:

$$q = v_1 A_1 = v_2 A_2 = \text{constante} \quad (6)$$

Donde q es la tasa de descarga en unidades de volumen sobre tiempo (L^3/T), v_1 y v_2 son las velocidades en las secciones 1 y 2. A_1 y A_2 son las áreas de las secciones transversales 1 y 2

Desde mediados del siglo diecinueve, investigadores como Darcy han experimentado con suelos, donde se muestra experimentalmente que la tasa de flujo, principalmente en arenas limpias (Holtz y Kovacs, 1981) es proporcional al gradiente hidráulico. La ecuación de Darcy es comúnmente escrita como:

$$q = vA = kiA \quad (7)$$

Donde q es la tasa total de flujo sobre la sección transversal A , y la constante de proporcionalidad k , es llamada coeficiente de permeabilidad

3.6 Procesos de alteración

La hidratación del vidrio volcánico implica la absorción de agua externa y la modificación de su estructura durante su enfriamiento a temperatura ambiente. Los cambios de composición que acompañan a la hidratación incluyen ganancias en H_2O y pérdidas menores en sílice (SiO_2) y álcalis (Na, K, Ca, Mg) (Gifkins et al., 2005). La hidratación no produce minerales nuevos directamente, pero puede formar fracturas perlíticas o palagonita, lo que facilita la alteración posterior por las condiciones ambientales y procesos diagenéticos (Gifkins et al., 2005).

3.6.1 Alteración hidrotermal

La alteración hidrotermal o metasomatismo se define como el conjunto de cambios significantes en textura, mineralogía y composición de las fases sólidas preexistentes (rocas) debido a la reacción con un fluido hidrotermal, en una escala de centímetros a kilómetros (Henley and Ellis, 1983 de Gifkins et al., 2005). Por su parte un fluido hidrotermal es una solución o gas acuoso caliente, con o sin asociación demostrable a procesos ígneos controlados por la presión y temperatura.

Los óxidos e hidróxidos libres que pueden estar presentes en los suelos se pueden encontrar en compuestos cristalinos y no cristalinos (amorfos) de silicio, aluminio y hierro. Estos se presentan como partículas discretas, como revestimientos sobre partículas y como agentes cementantes en la estabilización de agregados en suelos de regiones tropicales y subtropicales (Mitchell y Soga, 2005). Dichos materiales pueden condicionar los deslizamientos en estas zonas.

3.6.2 Suelos volcánicos en regiones tropicales

La fragmentación física e hidrólisis en regiones tropicales trabajan en el intemperismo de las rocas. Con éstos agentes, los iones más solubles son removidos y los minerales originales dan paso a estructuras cada vez más degradadas que condicionan los materiales. Por su parte los cationes liberados se combinan para formar nuevos minerales (Suárez, 1998).

En suelos de origen volcánico, los agregados de alofano son relativamente incompresibles, algunas veces son cementados por óxidos de fierro y aluminio (Peck et al., 1996). Cuando se elimina agua de suelos con alofano y posteriormente se contraen, el proceso es irreversible y el comportamiento del suelo resultante con partículas de tamaño limo y arena es prácticamente no plástico (Peck et al., 1996). Además el alofano aparece en rocas ígneas alteradas hidrotermalmente a partir de la descomposición de feldespatos (Lizcano et al., 2006). De acuerdo a Wesley (2009) la estructura, el tipo y composición mineralógica son parámetros que funcionan como base para distinguir suelos semejantes de origen volcánico.

3.6.2.1 Aluminio activo

El aluminio activo es aquel que proviene de minerales secundarios de bajo orden estructural tal como el alofano, óxidos e hidróxidos amorfos de aluminio, todos ellos neo formaciones características de suelos desarrollados a partir de materiales volcánicos bajo climas húmedos (García et al., 2004). La adición de Fluoruro de Sodio a un suelo de origen volcánico, muestra la presencia de materiales amorfos en los suelos, particularmente hidróxido de aluminio en la forma de $Al(OH)_3$. El principio de la prueba está basado en la reacción:



Durante el intemperismo generalmente se obtiene una composición elemental rica en Si, Al y cationes base. El Si y los cationes base son disueltos y el aluminio permanece; aunque también puede ser removido con el tiempo por el efecto del agua de lluvia (Lizcano et al., 2006; García et al., 2004).

3.6.2.2 pH en suelos con propiedades ándicas

El pH es un concepto en el que se compara la acidez o alcalinidad de un material, el valor obtenido depende de la proporción de suelo y agua. El pH disminuye al aumentar la concentración de sales neutras en solución y con cantidades crecientes de CO_2 disuelto (Mitchell y Soga, 2005). Los suelos con propiedades ándicas presentan carga variable, es decir, que tienen capacidad de intercambio catiónico dependiente del pH. Debido a la naturaleza de la carga variable del alofano, las propiedades hidráulicas de los suelos en los que estos amorfos están presentes, son altamente dependientes de la química de la solución del suelo (García et al., 2004). Es necesario tener en cuenta que los alofanos y la imogolita no son los únicos amorfos del suelo, puede haber otros geles de silicio y amorfos de fierro.

3.6.3 Comportamiento mecánico de suelos derivados de cenizas volcánicas

Los suelos derivados de cenizas volcánicas tienen propiedades y comportamiento mecánico particulares. El comportamiento mecánico es dependiente de la presencia de partículas que tienen una superficie específica, de la que están relacionadas principalmente las fuerzas electromagnéticas y el fenómeno capilar (Peck et al., 1996).

Estos suelos tienen una estructura relativamente rígida en su estado natural y debido a su alta permeabilidad, facilitan la tasa de consolidación. Si el suelo estuviera sujeto a cargas externas, las

presiones de poro generadas se dispararían inmediatamente y el suelo se comportaría en un estado drenado (Wesley, 2009).

La resistencia al esfuerzo cortante de suelos volcánicos es generalmente más alta que en suelos sedimentarios. El ángulo de fricción interna efectivo de suelos residuales está por arriba de 30° , aunque se han reportado pendientes estables en forma natural arriba de 45° y algunos cortes en laderas en estos suelos, se han hecho de hasta 60° . También tienen valores significativos de cohesión efectiva, este último término de cohesión se explica por los enlaces entre partículas. Se ha reportado que para índices de plasticidad arriba de 80, los suelos sedimentarios tienen valores representativos de resistencia residual de 10° mientras la arcilla de alofano tiene valores entre 30° a 40° (Wesley, 2009).

Para evaluar la susceptibilidad en el escenario más desfavorable de estos suelos residuales existen fuertes y prácticos argumentos a favor de usar el esfuerzo cortante no drenado, ya que puede ser medido o inferido con relativa facilidad. Las precipitaciones constantes en temporada de huracanes, provocan un incremento en las condiciones de presión de poro, lo que provoca que se desestabilice la ladera, y es en este escenario, el suelo se comporta en un estado no drenado por el continuo aporte de agua.

3.6.4 Relación entre propiedades físicas y resistencia residual

Skempton (1985) observó que después de ocurrido un deslizamiento la resistencia al esfuerzo cortante es equivalente al valor de la resistencia residual en arcillas sobreconsolidadas. Se puede inferir que el valor de resistencia residual tiende al valor de resistencia máxima en arcillas sobreconsolidadas, cuando los valores de Actividad (A) son relativamente bajos (Suárez, 1998). En arenas, gravas y limos no plásticos que se denominan como suelos granulares, la cohesión es muy baja y tiende a cero. El ángulo de fricción resistente también depende de la angulosidad y tamaño de las partículas, su mineralogía y densidad (Suárez, 1998). De acuerdo a Skempton (1985) cuando la fracción arcilla es alrededor del 50%, el esfuerzo residual es controlado casi completamente por esta fracción en caso de ocurrir un deslizamiento. En algunas muestras que contienen gran cantidad de mica y alofano, el ángulo de fricción interna residual es más alto (Wesley, 1977), comparado con la mayoría de los minerales de origen sedimentario.

Un suelo sedimentario que contiene gran cantidad de partículas de arcilla, indicará una significativa reducción de esfuerzo resistente. Para el alofano y la halloysita con el decremento del tamaño de partícula o con el incremento del límite líquido no existe una relación clara en la disminución del esfuerzo cortante resistente (Lizcano et al., 2006). De forma análoga para las partículas gruesas, con un aumento del 30% de la fracción de arena, el esfuerzo resistente de una ladera se incrementa rápidamente. Suzuki et al. (2005) consideran que cuando la fracción arena supera el 80%, el valor de esfuerzo resistente es casi equivalente a tener 100% de la fracción arena.

3.6.5 Relación entre el contenido de alofano y propiedades índice

Se ha observado en la práctica profesional aún con valores de contenido de agua y límites de consistencia altos, las propiedades geotécnicas en suelos de origen volcánico son sorprendentemente buenas, y a su vez el comportamiento del alofano es muy similar en aquellos suelos que tienen altos contenidos de arenas (Wesley, 2009).

Los límites de consistencia aumentan conforme la superficie específica, contenido libre de agua y con el incremento en la cantidad de alofano, aunque el índice de liquidez y el pH decrecen con el aumento en contenido de alofano. So Ei-Kon (1998) relaciona el contenido de alofano (A_p) y las propiedades índice (w_L , w_P , pH) para suelos volcánicos y propone las siguientes relaciones.

$$\text{pH} = -0.017A_p + 7.42, r = 0.518 \quad (9)$$

$$wL = 0.983A_p + 65.64, r = 0.629 \quad (10)$$

$$wP = 0.742A_p + 44.80, r = 0.642 \quad (11)$$

Aunque los suelos se comportan diferente en cada región, se observa en la primera relación, que a mayor contenido de alofano el pH va disminuyendo (como se ha reportado en suelos de semejante origen). Se observa la misma relación, que en la ausencia de alofano, el pH está ligeramente arriba de la neutralidad. De manera análoga los límites de consistencia aumentan con el contenido de alofano (So Ei-Kon, 1998).

3.6.6 Relación entre la consistencia de un suelo con alofano y la resistencia residual

El valor del ángulo de fricción interna de los materiales disminuye con el avance del proceso de intemperismo (Suárez, 1998). Esta realidad dificulta la evaluación del comportamiento de los suelos residuales utilizando los modelos de la mecánica de suelos tradicional (Suárez, 1998). Para suelos con un límite líquido mayor al 50%, la posición ocupada en la carta de plasticidad con respecto a la línea A es un buen indicador de esfuerzo residual (ϕ_r) (Suzuki et al., 2005). Para suelos con un límite líquido menor al 50%, la correlación no se cumple, posiblemente debido a inestabilidad de la superficie de deslizamiento, donde el cizallamiento puede ser turbulento, deslizante o ambos (Suzuki et al., 2005).

Suzuki et al. (2005), propone correlaciones para estimar el ángulo de fricción residual en materiales con alofano (A_p) y conociendo los límites de consistencia (wP y wL).

$$\tan \phi_r = 1.045 (wP/wL) - 0.077, r = 0.874 \quad (12)$$

$$\tan \phi_r = 0.201A_p^{-0.715}, r = 0.646 \quad (13)$$

Para suelos de esmectita el mismo autor propone una estimación del ángulo de fricción residual, como:

$$\tan \phi_r = 10^{1.143} F_{\text{arcilla}}^{-0.582} I_p^{-0.531}, r = 0.924 \quad (14)$$

3.7 Métodos indirectos de exploración

Se refieren a la aplicación de los sensores remotos que se reflejan en las imágenes satelitales, el modelo digital de elevación y la información disponible a escala regional de los recursos naturales.

3.7.1 Comparación de las diferentes resoluciones de los satélites Landsat y Sentinel

La resolución de las imágenes presenta las diferencias entre los sensores utilizados (Cuadro 13).

3.7.2 Corrección radiométrica y atmosférica

Se refiere a la corrección de factores como iluminación de la escena, condiciones atmosféricas, geometría de la vista, respuesta del instrumento. En esta parte del procesamiento de la imagen, se recupera la reflectancia más real del material de interés.

Cuadro 13. Comparación de resoluciones en los satélites utilizados. Fuente: USGS (2017)

<i>Landsat 5: TM</i>					
<i>Banda</i>	<i>Sensor</i>	<i>Resolución espectral (μm)</i>	<i>Resolución espacial (m)</i>	<i>Resolución temporal (días)</i>	<i>Resolución radiométrica (bits)</i>
B1 (Azul)	TM	0.45-0.52	30	18	6
B2 (Verde)		0.52-0.60	30		
B3 (Rojo)		0.63-0.69	30		
B4 (NIR)		0.76-0.90	30		
B5 (TIR1)		1.55-1.75	30		
B6 (TIR2)		10.40-12.50	30		
B7 (MIR)		2.08-2.35	30		
<i>Landsat 8: OLI y TIRS</i>					
<i>Banda</i>	<i>Sensor</i>	<i>Resolución espectral (μm)</i>	<i>Resolución espacial (m)</i>	<i>Resolución temporal (días)</i>	<i>Resolución radiométrica (bits)</i>
B1 (Costa)	OLI	0.43-0.55	30	16	12
B2 (Azul)		0.45-0.51	30		
B3 (Verde)		0.53-0.59	30		
B4 (Rojo)		0.64-0.67	30		
B5 (NIR)		0.85-0.88	30		
B6 (SWIR1)		1.57-1.65	30		
B7 (SWIR2)		2.11-2.29	30		
B8 (Oan)		0.50-0.68	30		
B9 (Cirros)		1.36-1.38	15		
B10 (TIRS1)	TIRS	10.60-11.19	100		
B11 (TIRS2)		11.5-12.5	100		
<i>Sentinel-2: MSI</i>					
<i>Banda</i>	<i>Sensor</i>	<i>Resolución espectral (μm)</i>	<i>Resolución espacial (m)</i>	<i>Resolución temporal (días)</i>	<i>Resolución radiométrica (bits)</i>
B1 (Aerosol)	MSI	0.433-0.453	60	5	12
B2 (Azul)		0.458-0.523	10		
B3 (Verde)		0.543-0.578	10		
B4 (Rojo)		0.650-0.680	10		
B5 (NIR1)		0.698-0.713	20		
B6 (NIR2)		0.733-0.748	20		
B7 (NIR3)		0.773-0.793	20		
B8 (NIR4)		0.785-0.900	10		
B8a (NIR5)		0.855-0.875	20		
B9 (Vapor)		0.935-0.955	60		
B10 (Cirrus)		1.360-1.390	60		
B11 (SWIR1)		1.565-1.655	20		
B12 (SWIR2)	2.100-2.280	20			

3.7.3 Realce digital

El realce digital consiste en extraer la mayor cantidad de información en los alrededores del deslizamiento por medio de imágenes. Es de interés poder entender la presencia e influencia de los minerales tamaño arcilla a través del grupo de hidroxilos, aunque también pueden tener una respuesta similar de reflectancia en este grupo, los carbonatos, sulfatos y micas.

Otro grupo son los minerales de hierro que incluyen minerales como la hematita, goethita, jarosita y los sulfatos hidratados como el yeso y la alunita. La Jarosita y la Alunita se forman únicamente durante procesos de alteración hidrotermal (Ruíz y Prol, 1995). Aunque otros minerales como la caolinita y hematita se forman comúnmente en la Tierra como producto de procesos muy desarrollados de la pedogénesis del suelo. Cabe mencionar que la resolución espectral de las bandas no permite la discriminación entre los distintos minerales particulares y si hace posible la detección de hidroxilos, óxidos y vegetación (Cuadro 14 y Figuras 17, 18).

3.7.4 Componentes principales de imágenes satelitales

La descomposición en componentes principales es una transformación al conjunto de datos que se aplica simultáneamente a todas las bandas que componen la imagen (Lira, 2010). Esta técnica estadística multivariada ayuda a disminuir la redundancia de la información y las nuevas componentes se pueden ver como combinaciones lineales de las bandas espectrales originales. La matriz de varianza-covarianza es una matriz simétrica que nos proporciona información de la dispersión de los valores en relación a la media. La matriz de correlación es una matriz simétrica que permite conocer la similitud o diferencia entre las bandas (Lira, 2010). El porcentaje de varianza va de mayor a menor valor, esto es que en la primera componente de los resultados se tiene mayor varianza de la información, lo que implica la variedad de materiales y va disminuyendo en la segunda y subsecuentes componentes, indicando cada vez más similitud entre los materiales y por consiguiente proporcionando cada vez menor información (Ruíz y Prol, 1995). Los eigenvalores indican la magnitud de cada nueva componente y los eigenvectores representan la nueva dirección de cada una de las componentes.

Cuadro 14. Comparativa de los grupos a identificar espectralmente. Fuente: USGS (2017)

<i>Grupo a identificar</i>	<i>Minerales</i>	<i>Banda de mayor reflectancia</i>			<i>Banda de menor reflectancia</i>		
		<i>Sensor</i>			<i>Sensor</i>		
		<i>TM</i>	<i>OLI</i>	<i>MSI</i>	<i>TM</i>	<i>OLI</i>	<i>MSI</i>
Hidroxilos	Ilita, Esmectita, Caolinita	5	6	11	7	7	12
Óxidos	Jarosita	1, 2, 3	2, 3, 4	2, 3, 4	-	-	-
	Goethita	2, 3	3, 4	3, 4	1	2	2
	Hematita	3	4	4	1, 2	2, 3	2, 3
Vegetación	-	2, 4, 5, 7	3, 5, 6, 7	3, 8, 11, 12	1, 3	2, 4	2, 4

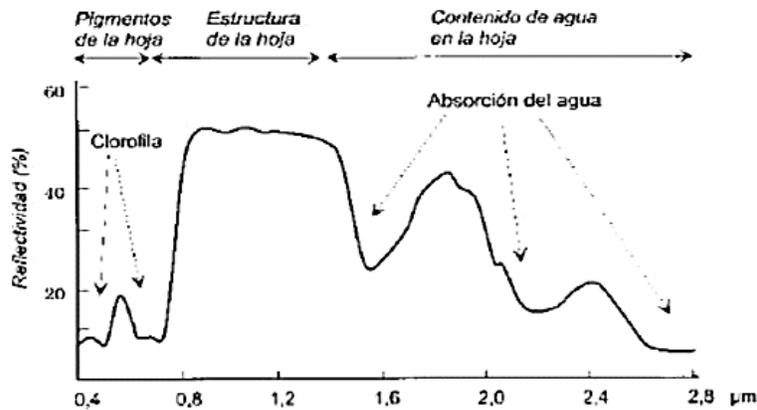
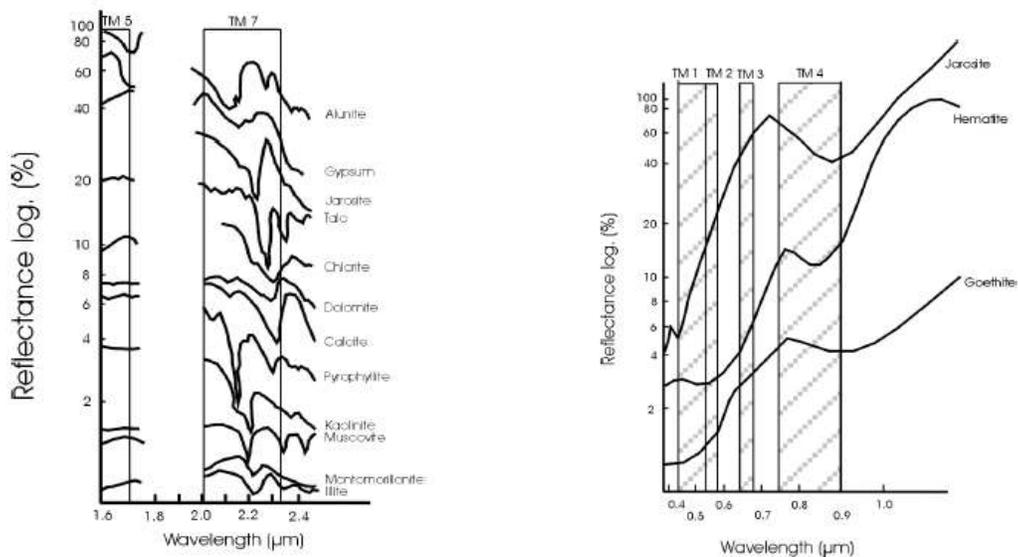


Figura 17. Firma espectral característica de la vegetación. El eje de las abscisas corresponde a la longitud de onda y en las ordenadas la reflectancia para la vegetación. Fuente: Chuvieco, 2008.



Reflectancia del grupo mineral hidroxilos y la resolución espectral de las bandas del sensor TM

Reflectancia del grupo mineral óxidos y la resolución espectral de las bandas del sensor TM

Figura 18. Firmas espectrales características de óxidos e hidroxilos. Fuente: Ruíz y Prol (1995)

3.8 Métodos directos de exploración

Se refieren a las visitas de reconocimiento del sitio de estudio, a la recolección física de materiales en los puntos de interés y al contacto directo con los materiales.

3.8.1 Espectrometría infrarroja de reflexión

La Espectrometría Infrarroja de Reflexión (EIR) es una técnica no destructiva que ayuda a la identificación de minerales. Para cada molécula dada, su espectro de absorción/emisión/reflexión constituye una huella digital de la misma (Ostrodumov, 2007).

El espectro infrarrojo de absorción, reflexión o de emisión de un compuesto químico inorgánico u orgánico es una característica única del mismo (Ostrodumov, 2007). El intervalo infrarrojo es de interés en el estudio cristalquímico de los minerales. La región infrarroja se divide en tres zonas: infrarrojo cercano (IRC: $13333-4000\text{ cm}^{-1}$ o $0.8-2.5\text{ }\mu\text{m}$), infrarroja media (IRM: $4000-400\text{ cm}^{-1}$ o

2.5-25 μm) e infrarroja lejana (IRL: 400-10 cm^{-1} o 25 a 1000 μm). Prácticamente todos los minerales presentan bandas de absorción en la región infrarroja media. Las vibraciones fundamentales del grupo de los minerales de aluminosilicatos y vidrios, así como los principales modos vibracionales de la mayoría de las especies moleculares (p.e. Si-O, C-O, S=O y P-O) se encuentran en el infrarrojo medio (King et al., 2004).

3.8.2 Difracción de rayos X

El fenómeno de la difracción de rayos X por cristales resulta de un proceso de dispersión en el cual los rayos X son dispersados por los electrones de los átomos sin cambio en la longitud de onda (dispersión coherente o de Bragg). El patrón de difracción resultante de un cristal, que comprende tanto las posiciones e intensidades de los efectos de difracción, es una propiedad física fundamental de la sustancia que sirve para su identificación (García et al., 2004, Díaz, 2014).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Pre-procesamiento de imágenes satelitales

Para el procesamiento de imágenes se utilizó el software de procesamiento de imágenes IDRISI 17.0 de Clark Labs, Clark University. Las imágenes satelitales fueron obtenidas a través de un explorador terrestre de U.S. Geological Survey (USGS) en la zona que incluyera la superficie de estudio para diferentes fechas, es decir antes y después de que ocurriera el deslizamiento. Por lo anterior, se decidió buscar imágenes disponibles con la menor cobertura de nubosidad (menor al 10%) para su tratamiento, lo que conduce a que las fechas de imágenes obtenidas sólo cumplen estas condiciones de menor nubosidad dentro de las fechas de la toma de los satélites disponibles. Se encontraron una serie de opciones para fechas antes del evento a través del satélite Landsat 5 con sensor TM (Thematic Mapper) para la fecha del 15 de diciembre de 2010. Para el estado posterior al evento se seleccionaron las imágenes de acuerdo a las condiciones mencionadas. El satélite Landsat 8 con el sensor OLI y TIRS (Operational Land Imager y Thermal Infrared Sensor) para la fecha 14 de abril de 2014 y el satélite Sentinel-2 con el sensor MSI (MultiSpectral Instrument) para la fecha 23 de febrero de 2017.

En el caso del sensor TM se procesó la información con las bandas 1,2,3,4,5 y 7 con su equivalencia para el sensor OLI y TIRS correspondiente a las bandas 2,3,4,5,6 y 7 y las bandas equivalentes del sensor MSI 2,3,4,8,11,12.

Dado que las imágenes muestran datos de acuerdo al tamaño de las imágenes disponibles de cada sensor, se decidió limitar una imagen que comprendiera la subcuenca RH27Ac porque los deslizamientos no son fenómenos aislados y también están condicionados por factores regionales. Las imágenes Landsat 5 y 8 fueron procesadas para observar cambios en la vegetación removida por el deslizamiento y flujo de materiales, y por lo tanto se procesaron con el mismo número de filas y columnas para ser operadas. Para obtener rasgos de metasomatismo, se utilizaron las imágenes Sentinel-2 de mayor calidad.

Para el realce de contraste se re-ajustó el histograma de los valores de brillantez corregidos atmosféricamente de cada banda, a una nueva escala lineal de números digitales de 0 a 255, es decir, el valor mínimo de la imagen toma el valor de 0 y el valor máximo de la imagen toma el valor de 255 y los valores intermedios se escalaron proporcionalmente.

Para el realce espectral se experimentaron con las técnicas de cocientes de bandas, análisis de componentes principales de 4 bandas (Crosta y McMoore, 1989). Adicionalmente se procesaron los

resultados anteriores en una composición de falso color RGB (rojo, verde, azul) para poder visualizar más claramente los resultados.

La primera prueba de realce espectral se realizó mediante el cociente de bandas para cada grupo a identificar, donde la banda de mayor reflectancia está en el numerador y la banda de menor reflectancia está en el denominador. Los números digitales (ND) de cada pixel de la imagen, particularmente las que se operen en el denominador, deben reclasificarse para que no se indetermine la imagen resultante. A la imagen resultante del cociente de bandas, se realizó un ajuste al histograma, esto porque al realizar el cociente de los ND se pierde contraste. En este trabajo se eligió cuantitativamente elegir un contraste lineal con saturación con ayuda del programa IDRISI 17.0.

Finalmente, al experimentar con los métodos mencionados, los mapas de óxidos e hidroxilos resultantes fueron obtenidos a partir del análisis de componentes principales con del análisis de 4 bandas.

4.2 Modelo digital de elevaciones y recursos naturales

Para el procesamiento y obtención de información se utilizó el software ArcMap 10.2.2 de ArcGIS. El primer insumo de entrada corresponde al Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0) del estado de Veracruz, obtenido del Instituto Nacional de Geografía y Estadística de México (INEGI, 2017) con una resolución espacial de 15 metros por pixel. El CEM se re proyectó a coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) con Datum WGS84 y referencia espacial en la zona 14N. Con el CEM se obtuvo información de pendientes, altitudes, curvaturas y orientación de laderas. Asimismo se procesó con el mismo software la información de la litología, coberturas y usos de suelo, tipos de suelo, unidades climáticas, inventario de procesos y localidades expuestas.

4.3 Procesos semejantes al caso de estudio

Se identificaron los principales factores que tienen las mismas condiciones litológicas, tipo de suelo superficial, el mismo uso de suelo, la misma unidad climática, las orientaciones que condicionan la dirección de los flujos de materiales al llegar a un estado líquido.

La operación de condiciones se realizó con la herramienta de “Raster calculator” de la caja de herramientas del software ArcGIS 10.2.2, al intersectar las zonas que cumplan las mismas condiciones propuestas para el deslizamiento y flujo de materiales. Posteriormente para validar el mapa de zonas susceptibles se realizó un recorrido virtual en la plataforma de Google Earth en las zonas marcadas como susceptibles a desarrollar un proceso similar. Con la información de campo también se validaron los suelos que condicionaron el deslizamiento de estudio.

4.4 Otras zonas susceptibles a escala regional dentro de la subcuenca

Se reconocieron los principales factores condicionantes a escala regional, para otros sitios dentro de la misma subcuenca RH27Ac, tales como unidades litológicas, unidades climáticas, altitudes, pendientes, curvaturas, orientaciones de laderas, coberturas y usos de suelo. Se utilizó un método heurístico que consiste en la superposición de capas de variables, este método implica el análisis cruzado de mapas y operaciones de geo procesamiento que demanda un conocimiento de la zona de la región. Para esto se utilizó la información proporcionada por las personas que conocen la región y donde se ha observado la presencia de algún deslizamiento. El uso de fuentes de información como periódicos digitales también fue útil para validar factores condicionantes a escala de la subcuenca. La jerarquización de criterios se sustentó en la información existente, consultas de trabajos semejantes y la investigación de campo.

El proceso para la obtención de pesos de cada factor condicionante se realizó mediante el proceso analítico jerárquico (Saaty, 2008) en una hoja de cálculo de Excel. En cada factor condicionante se hizo un análisis jerárquico entre sus elementos con la información regional. La combinación de factores se realizó en formato raster con el software ArcGIS 10.2.2. Se asignó cada uno de los pesos obtenidos a cada uno de los 7 factores condicionantes propuestos. La susceptibilidad a deslizamientos y flujo de materiales se propuso mediante la siguiente combinación lineal:

$$\text{SDF} = L (w_1) + \text{UC} (w_2) + \text{Al} (w_3) + \text{P} (w_4) + \text{C} (w_5) + \text{O} (w_6) + \text{US} (w_7) \quad (15)$$

Donde:

SDF: Susceptibilidad a deslizamientos y flujos de materiales, L: Litología, UC: Unidad climática, Al: Altitud, P: Pendiente, C: Curvaturas, O: Orientación de laderas, US: Usos y coberturas de suelo. Los valores w_i corresponde a los pesos obtenidos en el proceso jerárquico.

En el caso de la litología, donde no se cuenta con información detallada, cuantitativamente se comparó la resistencia efectiva al esfuerzo cortante entre cada unidad litológica, por medio de los valores reportados por Barton (1974), Hoek y Bray (1981), Jibson et al. (2000). Con este criterio, el mapa final de susceptibilidad para toda la región, se dividió en 5 clases, de muy baja a muy alta susceptibilidad. El método estadístico utilizado para la división de clases fue de cortes naturales (jenks). Los cortes de clase por este método se caracterizan porque agrupan mejor los valores similares y maximizan las diferencias entre clases (Smith et al., 2015).

4.5 Trabajo de laboratorio

Los ensayos de las muestras obtenidas sobre el caso de estudio y sus alrededores se ejecutaron en los laboratorios de geotecnia, física de suelos, geofísica y una muestra sedimentaria en el laboratorio de cristalografía del Instituto de Física.

4.5.1 Molienda y tamizado de las muestras

Para algunos parámetros como el color y pH, densidades aparente y real, permeabilidad, se realizaron en el laboratorio de Física de suelos. Para el color y pH, las muestras fueron dispuestas a temperatura ambiente en un cuarto de secado. Posteriormente se disgregó cada muestra con un mortero de madera y se homogenizó (Figura 19).



Figura 19. Muestras representativas colocadas en el cuarto de secado para su posterior tamizado, molienda y homogenización

4.5.2 Determinación del color y pH

La determinación del color en laboratorio se realizó utilizando las muestras tratadas en el cuarto de secado, molidas, tamizadas y homogenizadas con la malla número 10 para posteriormente ser colocadas en crisoles de porcelana y comparar su matiz, valor y croma con una tabla de Munsell (2009), por vía seca y húmeda (Figura 20).



Figura 20. Determinación del color por vía seca (izquierda) y húmeda (derecha). Comparación con Tabla Munsell (2009)

Para medir el pH se utilizó un sensor con electrodos de la marca Thermo scientific, modelo VersaStar Pro. Se utilizaron 20 g de muestra molida, tamizada (con la malla número 10) y homogenizada. Adicionalmente se tomaron 50 ml de agua destilada con una probeta para transportar el líquido y depositarlo en los recipientes con las muestras.

Con ayuda de un agitador de laboratorio se colocaron el grupo de muestras en sus respectivos frascos durante aproximadamente 40 min. Una vez listas las muestras y el medidor de pH calibrado, se insertaron los electrodos en la solución de suelo y agua destilada (1:2.5). La lectura se tomó hasta que se estabilizó el aparato (Figura 21). Para cada medición se limpiaron nuevamente los electrodos con una piseta de agua destilada en un vaso de precipitados.



Figura 21. Procedimiento utilizado para la medición del parámetro pH

4.5.3 Determinación de la presencia de Aluminio activo

La presencia de Aluminio activo se evaluó cualitativamente depositando un poco de material de suelo sobre placas de porcelana. Se añadieron unas gotas de indicador de fenolftaleína al 1% y después unas gotas de fluoruro de sodio (NaF) 1N. El fluoruro de sodio tiene una gran afinidad al Al activo y

reemplaza a los grupos OH asociados a éste, de manera que el pH ascenderá a valores mayores de 8.5, si hay aluminio activo en cantidades importantes (Siebe, 2006). Las muestras se hicieron reaccionar por grupos de acuerdo a su altitud y a la zona donde se recolectaron.

4.5.4 Determinación de la densidad aparente

Para el cálculo de la densidad aparente se utilizaron cilindros de acero inoxidable de 100 ml con tapa. Las muestras fueron obtenidas en campo con una barrena manual tipo Iwan y el juego de cilindros. Las muestras se introdujeron en la estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante (Figura 22).



Figura 22. Determinación de la densidad aparente

4.5.5 Determinación de la densidad real

Para este procedimiento se registró el peso de cada uno de los picnómetros por duplicado. De manera semejante se obtuvieron los valores en peso de cada picnómetro más agua destilada en dos ocasiones. Se utilizaron 2g de muestra por prueba. Con ayuda de una piseta, se saturó el material dentro del picnómetro hasta aproximadamente tres cuartos de su altura. Cada uno de los picnómetros fue llevado a un extractor de aire y en algunos casos fue necesario mantener funcionando el extractor por más de 12 h hasta que ya no se observara algún burbujeo. Los picnómetros libres de aire terminaron de llenarse con agua destilada (Figura 23). A cada picnómetro se le insertó su tapón correspondiente de tal forma que por el capilar del tapón fuera expulsada el agua excedente. De acuerdo a la información requerida, se obtuvo el dato del peso del picnómetro con la muestra y el agua destilada a la temperatura registrada (Flores y Alcalá, 2010).



Figura 23. Determinación de la densidad real. Extractor de aire (lado izquierdo) y peso de cada picnómetro con muestra y agua destilada (lado derecho)

4.5.6 Determinación de la permeabilidad

El método utilizado en laboratorio se basó en la aplicación directa de la Ley de Darcy a una columna de suelo (saturada por 24 h), con área uniforme conocida y la aplicación de una carga constante. Entonces se midió el volumen que pasó por la columna de suelo en un tiempo determinado. En esta prueba sólo se consideró una dirección de flujo y es en sentido de la dirección de la gravedad. Una vez saturadas las muestras, se montaron sobre cilindros de acrílico con conexiones de entrada y salida de agua. A través de embudos, el agua que atravesó el medio poroso, fue recolectada en probetas (Figura 24). Se tomaron 6 lecturas de tiempo por muestra para alcanzar un volumen establecido.



Figura 24. Determinación de la permeabilidad

4.5.7 Medición de los límites de consistencia

Para la medición de los límites de consistencia se utilizó un cono tipo Sueco fabricado en el Instituto de Ingeniería. El cono está constituido de un pedestal con un brazo ajustable vertical donde se coloca el cono (Figura 25). El brazo de sujeción vertical permite que el cono se ajuste al ras de la superficie del suelo. El sistema de sujeción del cono está compuesto por una pequeña bobina que al estar

encendida crea un campo electromagnético capaz de soportarlo y al interrumpir la corriente eléctrica, el cono cae por su peso propio para penetrar el suelo. El equipo tiene adosada una escala milimétrica de un vernier, donde se obtienen mediciones con una precisión de 0.1 mm.

Para aplicar el cono, cada muestra se tamizó por vía húmeda, debido a que las partículas se agregaban y se dificultaba su paso por la malla número 40 ($0.425\mu\text{m}$) como lo propone la norma (ASTM D 4318). El recipiente que contenía el medio particulado, tamizado y con agua, se dejó reposando hasta que la mayoría de las partículas se sedimentaron y el agua se tornó clara. Entonces el exceso de agua en la muestra fue extraída con ayuda de un sifón. Posteriormente cada muestra fue secada al ambiente. Durante el proceso de secado la muestra fue remodelada hasta alcanzar una masa uniforme sin grumos ni burbujas de aire. Para obtener el primer punto en cada una de las muestras, se ejecutó la primera penetración con el menor contenido de humedad. Si era necesario se repetía la prueba (Figura 26).

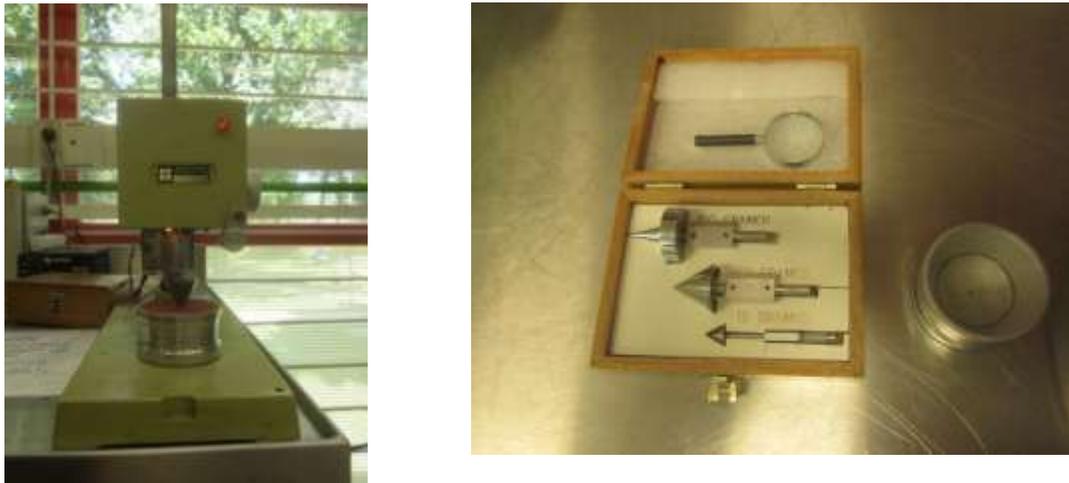


Figura 25. Pedestal con brazo ajustable (izquierda) donde se colca el cono (derecha)



Figura 26. Preparación de las muestras (lado izquierdo) para la ejecución de cada ensayo de penetración con el cono (lado derecho)

El aumento en el contenido de humedad de cada muestra para las siguientes 3 penetraciones, se realizó al homogenizar la muestra con agua destilada, y posteriormente medir en cada ensayo, la profundidad de penetración del cono. En cada muestra se obtuvieron dos puntos por debajo de 10 mm de penetración y dos puntos superiores a 10 mm con los respectivos contenidos de humedad para poder realizar un ajuste lineal de la curva de fluidez.

En cada punto ensayado se extrajo una pequeña porción del suelo ensayado, particularmente donde el cono penetró. Ésta porción extraída fue colocada en parejas vidrios de reloj previamente pesados de 10 cm de diámetro (Figura 27).

Las 4 muestras de los 4 puntos son ingresadas al horno de forma simultánea. El tiempo de secado de las muestras en el horno fue entre 22 y 24 horas.



Figura 27. Ensayo de penetración para un contenido de humedad (izquierda) y extracción de una porción de muestra para ser ingresado a la estufa (derecha)

4.5.8 Análisis del tamaño de partícula

Ésta prueba se realizó por vía húmeda con ayuda de un juego de tamices para separar las fracciones correspondientes a gravas, arenas y finos (ASTM D422). La distribución de partículas menores a 75 μm se determinó por un análisis de sedimentación.

El procedimiento utilizado en todas las muestras, como primer paso, fue saturarlas con agua durante 24 horas para disgregar las partículas. El primer tamiz donde se colocaron las muestras fue la frontera que separa la fracción de gravas y arenas, y corresponde al tamiz número 4 de apertura 4.75 mm; en algunos casos, para las gravas de mayor tamaño, fue necesario utilizar tamices de 1 (25.4mm), 3/4 (19.1 mm), 1/2 (12.7 mm), 3/8 (9.52 mm), como se hizo evidente en el depósito coluvial de la muestra EV-5. La fracción de arenas se clasificó con el juego de tamices comprendido entre lo que pasa la fracción del tamiz número 4 (4.75 mm) hasta la fracción retenida en el tamiz número 200 (75 μm) con tamices intermedios del número 10 (2 mm), 20 (850 μm), 40 (425 μm), 60 (250 μm), 80 (175 μm), 100 (150 μm) y 200 (75 μm) (Figura 28).

El material retenido en cada tamiz fue depositado en cápsulas de vidrio. El agua tuvo que ser prácticamente clara para asegurar no acarrear partículas finas y coloidales en un tamaño de partícula que no corresponde. En conjunto todas las cápsulas fueron ingresadas con la menor cantidad de agua libre en el horno durante 18 a 24 horas.



Figura 28. Tamices utilizados para separar las fracciones de gravas (izquierda), arenas y finos (derecha)

La fracción fina que pasó el tamiz 200 fue capturada en un recipiente de 19 litros y en la mayoría de los casos, al día siguiente con ayuda de un sifón, se eliminó el exceso de agua para que la fracción sedimentada se colocara en una charola de acero y así poder ser ingresada al horno por un día o más y medir su peso. Cada una de las fracciones de partículas secas en las charolas se ingresó a un desecador (Figura 29). Posteriormente se tomó su peso y fueron empaquetadas.

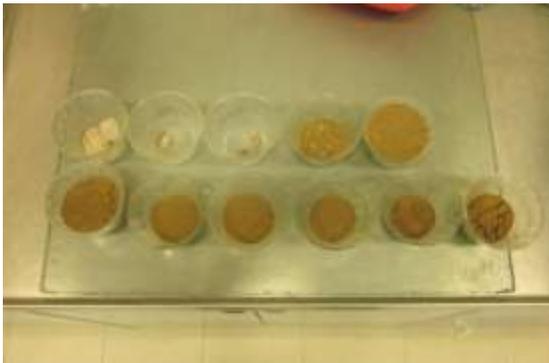


Figura 29. Separación de las partículas gruesas (izquierda) y finas (derecha)

4.5.8.1 Análisis del tamaño de partícula por sedimentación

Para el análisis del tamaño de partículas finas se utilizó el hidrómetro para suelos estandarizado ASTM 152H, con escala de Bouyoucos (g/L) de la marca Curtin Scientific Co. (Figura 30). El procedimiento utilizado fue preparar una solución de hexametáfosfato de sodio (HMF) 47g/L como agente dispersante. Se pesaron 25 g de suelo y cada muestra se colocó en un vaso de precipitados de

500 ml. Se agregaron 100 ml de HMF a la muestra y para el resto se utilizó agua destilada. En esta etapa de preparación de cada muestra, se dejó saturada con el dispersante un fin de semana.



Figura 30. Hidrómetro para suelos ASTM 152H, escala de Bouyoucos

Cada muestra tratada con el dispersante se transfirió a un vaso de metal y se homogeneizó con un agitador eléctrico durante 3 minutos (Figura 31). Posteriormente se utilizaron probetas de 1000 ml donde la mezcla fue colocada y se aforó con agua destilada.



Figura 31. Preparación de las muestras para ser colocadas en las probetas de 1000 ml

Las lecturas con el hidrómetro se realizaron 24 horas después del aforo (Figura 32). Se hizo un plan de medición empezando a una cierta hora. Para la primera muestra a las 9:59 se comenzó el agitado durante un minuto hasta las 10:00; para la segunda muestra se comenzó a las 10:02 durante un minuto hasta las 10:03, y así sucesivamente. La lectura con el hidrómetro se realizó dos horas después de manera análoga cada 3 minutos. Se anotaron las lecturas (R) de cada probeta así como una lectura base en la solución en blanco (R_L) que no contiene suelo (Flores et al., 2010).

La concentración del suelo (C) en suspensión (g/L) se calculó con la siguiente expresión: $C = R - R_L$ (Flores et al., 2010), donde R es la lectura del hidrómetro no corregida en g/L, y R_L es la lectura del hidrómetro de la probeta que se usó como testigo. R y R_L son lecturas tomadas en cada intervalo señalado.

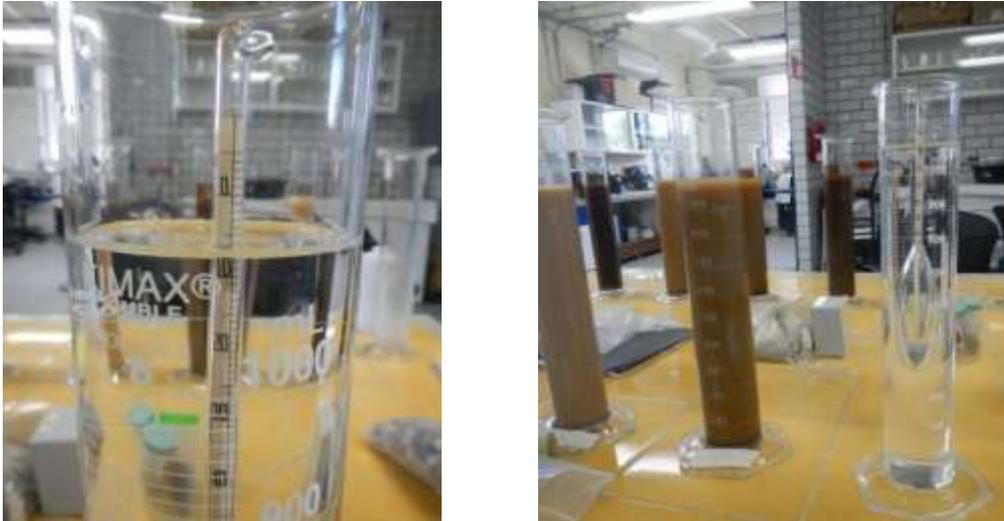


Figura 32. Lecturas de la concentración con el hidrómetro

4.5.9 Determinación de componentes minerales por espectrometría del infrarrojo

Para la identificación de minerales se utilizó un espectrómetro portátil de la marca Spectral Evolution, modelo: SM-3500 (Figura 33).

La firma espectral de cada una de las muestras fue medida con la sonda de contacto de reflectancia. El procedimiento de medición fue colocar la sonda en contacto con cada muestra para obtener su firma espectral. Dicha firma espectral fue comparada con la base de datos y así poder sugerir la presencia de los minerales característicos. Para precisar los resultados se realizaron al menos dos mediciones por cada muestra.



Figura 33. Espectrómetro y sonda de contacto de reflectancia

4.5.10 Determinación de componentes minerales por difracción de rayos X

La muestra fue secada en el ambiente con un foco incandescente. El análisis por polvos requirió que éstos sean muy finos (que pasen la malla 325) y para este método se utilizó un mortero de ágata. Una vez molida, la muestra se colocó en el portamuestras y posteriormente fue ingresada en el difractómetro. El difractómetro de rayos X utilizado fue de la marca Siemens, modelo D5000, con ranura de divergencia variable y para muestras giratorias (Figura 34). Los programas utilizados para el procesamiento de la información fueron Diffract AT, con archivos JCPDS (nivel II), también el programa Search/Match con el que fue posible el análisis cualitativo de fases, utilizando los files del JCPDS. La parte “search” recomienda soluciones de difractogramas y la parte “match” hace una comparación entre el patrón medido y las soluciones recomendadas. El programa “Fit” compara las curvas medidas con curvas teóricas, basadas en funciones matemáticas de distribución, con posibilidades de entrada de los parámetros de pico en forma automática o interactiva.



Figura 34. Difractómetro de rayos X Siemens D5000. Particularmente fue utilizado para la identificación de minerales en la superficie de falla que se mantuvo intacta en el flanco derecho del deslizamiento

5. RESULTADOS

5.1 Imágenes antes del deslizamiento: obtenidas del año 2010 del sensor TM del satélite Landsat

En la Figura 35 se representa una composición a color RGB (rojo, verde y azul) en el espectro visible a escala regional de la subcuenca RH27Ac. El recuadro en la parte inferior se perciben manchas color gris claro y corresponden a las comunidades (de abajo hacia arriba) de El Escalanar, El Capulín y Las Sombras. Para esta fecha el deslizamiento todavía no se había desencadenado.

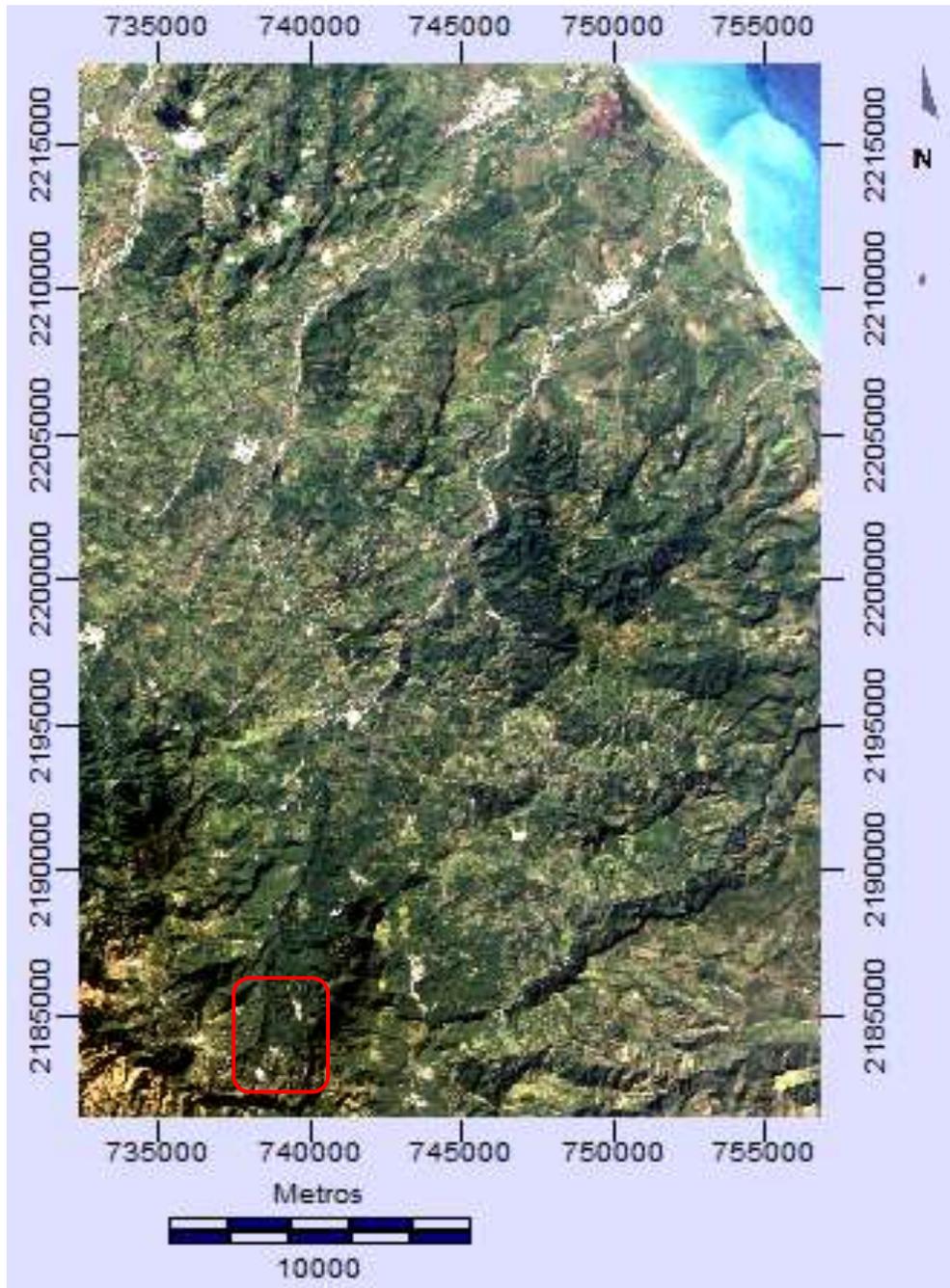


Figura 35. Composición a color RGB de las bandas TM3, TM2, TM1 en el espectro visible antes del deslizamiento. Las áreas urbanas aparecen en tonalidades marrón claro y la vegetación en tonos verdes

5.2 Imágenes después del deslizamiento, obtenidas del año 2014 del sensor OLI y TIRS de Landsat 8

La imagen del sensor OLI y TIRS de fecha 14 de abril de 2014 se muestra en la Figura 36. En esta imagen ya es posible diferenciar el deslizamiento cerca de las comunidades de El Escalaranar y El Capulín a escala regional.

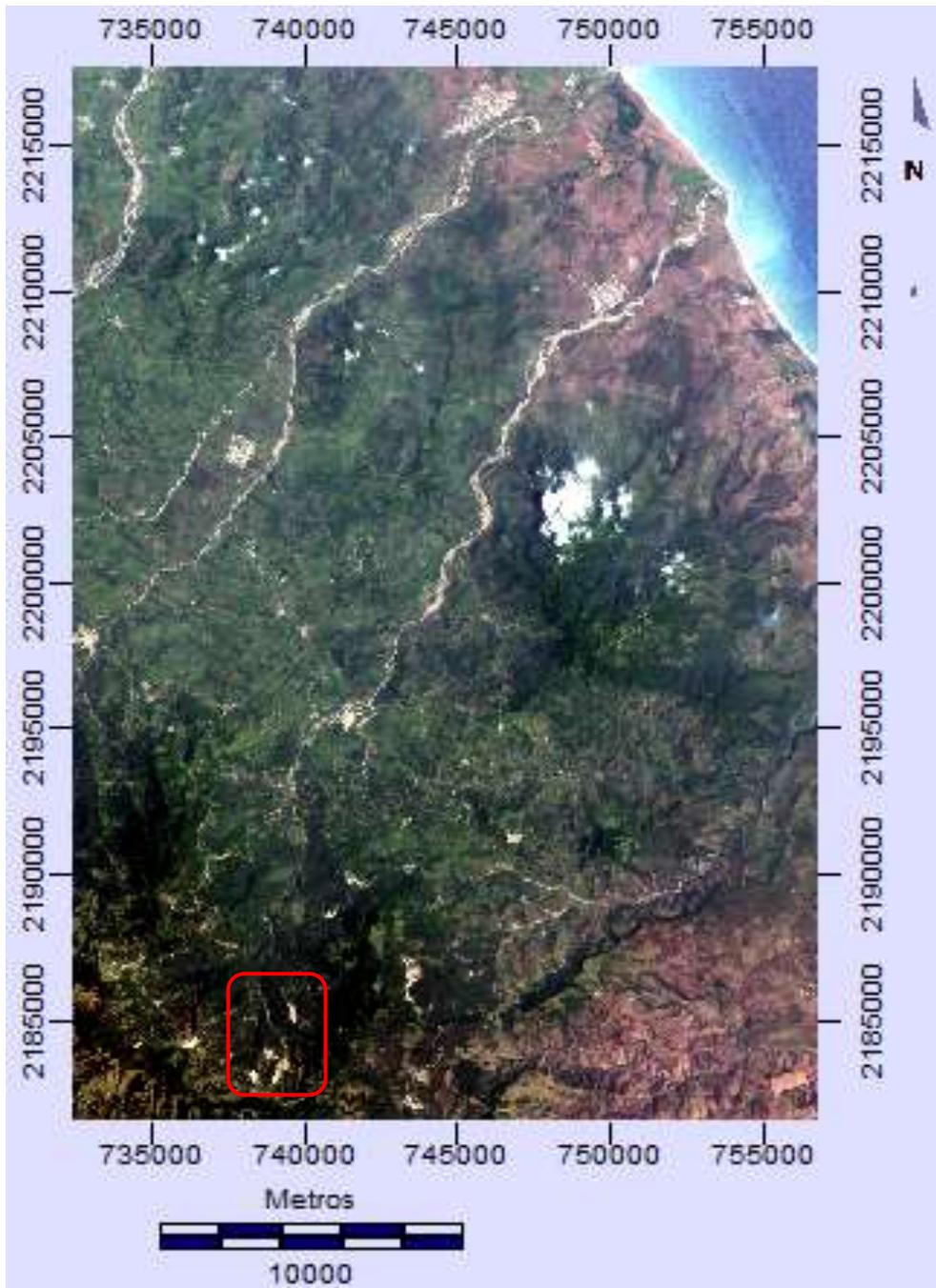
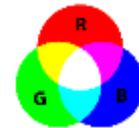


Figura 36. Composición a color RGB de las bandas OLI4, OLI3, OLI2 en el espectro visible después del deslizamiento. Las áreas urbanas aparecen en tonalidades gris claro y la vegetación en tonos verdes



5.3 Imágenes operadas para la detección de procesos de semejante magnitud a escala regional

En la Figura 37 se presenta a través de una composición en falso color RGB donde se observa la reflectancia de la estructura de las hojas saludables en color rojo, porque estamos utilizando bandas en el infrarrojo cercano y la banda de absorbancia por parte de la clorofila. Lo anterior permitió observar cambios en el relieve debido al deslizamiento y flujos de materiales. Las imágenes no están exentas de nubosidad y se debe tener precaución al momento de observar que en el último tercio de la subcuenca en dirección a la costa existe su presencia.

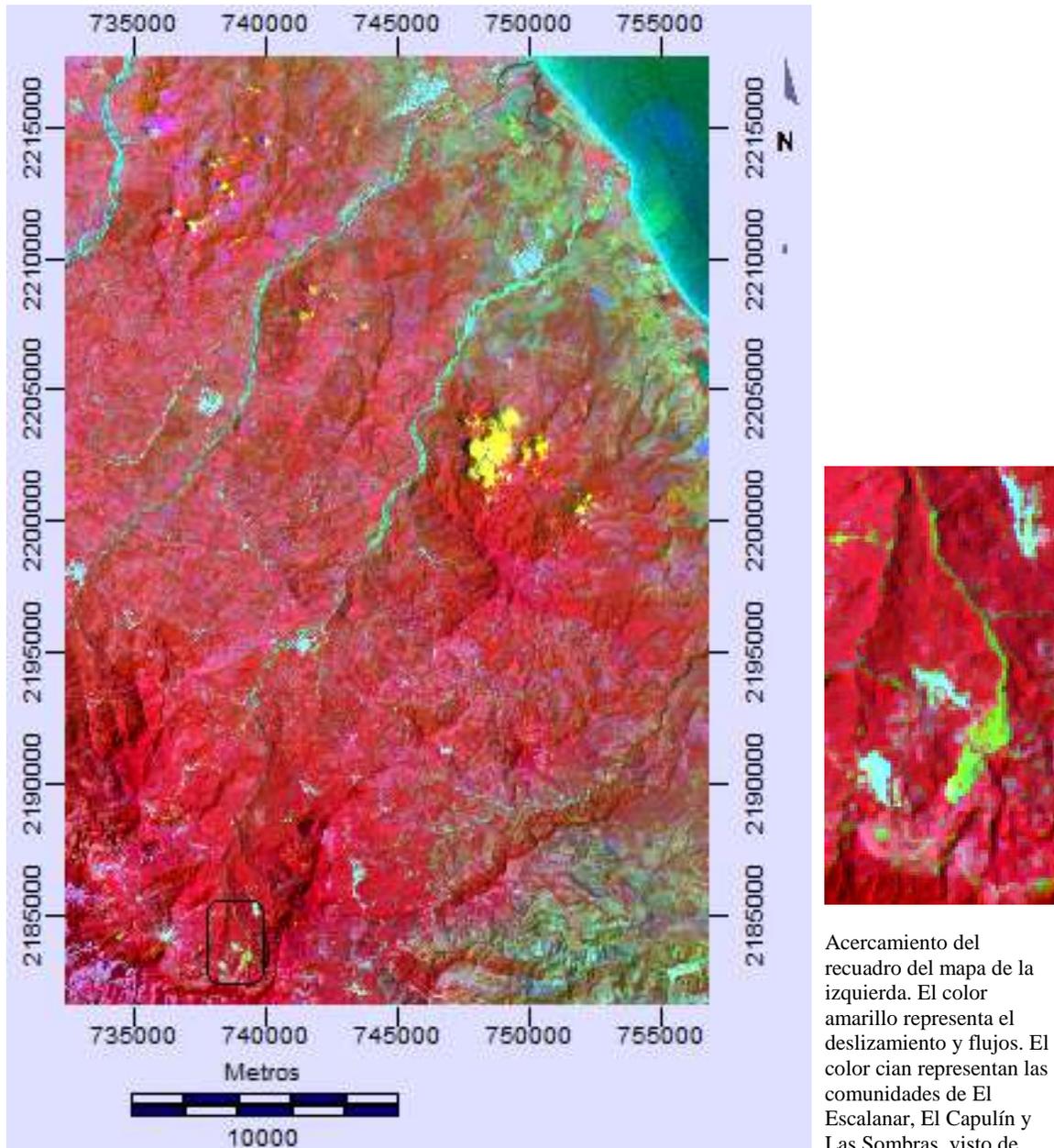


Figura 37. Composición en falso color RGB de las bandas OLI5 (2014), OLI4 (2014), TM4 (2010) antes y después del proceso. La superficie del deslizamiento y flujo de materiales se observa en color amarillo y las comunidades se observan en color cian dentro del recuadro negro. Los colores amarillos en la parte superior son nubosidad

5.4 Componentes principales de 4 bandas para la identificación de hidroxilos y óxidos

Los Cuadros 15 y 16 muestran respectivamente las matrices de eigenvectores y de carga obtenidas del análisis de componentes con 4 bandas, *MSI B2*, *MSI B8*, *MSI B11* y *MSI B12*, de acuerdo a su firma espectral que originaron 4 nuevas componentes principales. Lo anterior para obtener las Figuras 38 y 39 correspondientes al grupo de hidroxilos y óxidos respectivamente.

Cuadro 15. Matriz de eigenvectores con 4 bandas para la identificación de hidroxilos

<i>Matriz de eigenvectores</i>				
<i>Componente</i>	<i>C 1</i>	<i>C 2</i>	<i>C 3</i>	<i>C 4</i>
<i>% Varianza</i>	63.72	35.34	0.69	0.25
<i>Eigenvalor</i>	561109.32	311197.25	6040.83	2197.77
<i>Eigenvector 1</i>	0.098	0.112	0.725	0.673
<i>Eigenvector 2</i>	0.620	-0.774	0.102	-0.072
<i>Eigenvector 3</i>	0.667	0.437	-0.487	0.355
<i>Eigenvector 4</i>	0.400	0.443	0.476	-0.645

Cuadro 16. Matriz de carga con 4 bandas para la identificación de hidroxilos

<i>Matriz de carga</i>				
<i>Componente</i>	<i>C 1</i>	<i>C 2</i>	<i>C 3</i>	<i>C 4</i>
<i>MSI B2</i>	0.633	0.538	0.486	0.272
<i>MSI B8</i>	0.732	-0.681	0.013	-0.005
<i>MSI B11</i>	0.896	0.438	-0.068	0.030
<i>MSI B12</i>	0.766	0.631	0.094	-0.077

La componente C1 presenta una varianza de la información del 63.72% (Cuadro 15), con mayor carga en la banda *MSI B11* (Cuadro 16). La componente C2 con una varianza de información del 35.34%, tiene la mayor carga de -0.681 en la banda *MSI B8* negativa, lo que indica la dominancia de la vegetación en tono oscuro, en una escala de grises. La componente C3 con una varianza de 0.69% tiene la mayor carga en la banda *MSI B2* y describe diferencias de reflectancia en las bandas *MSI B11* y *MSI B12* para la identificación de hidroxilos en color oscuro, debido al signo negativo de la banda de reflectancia.

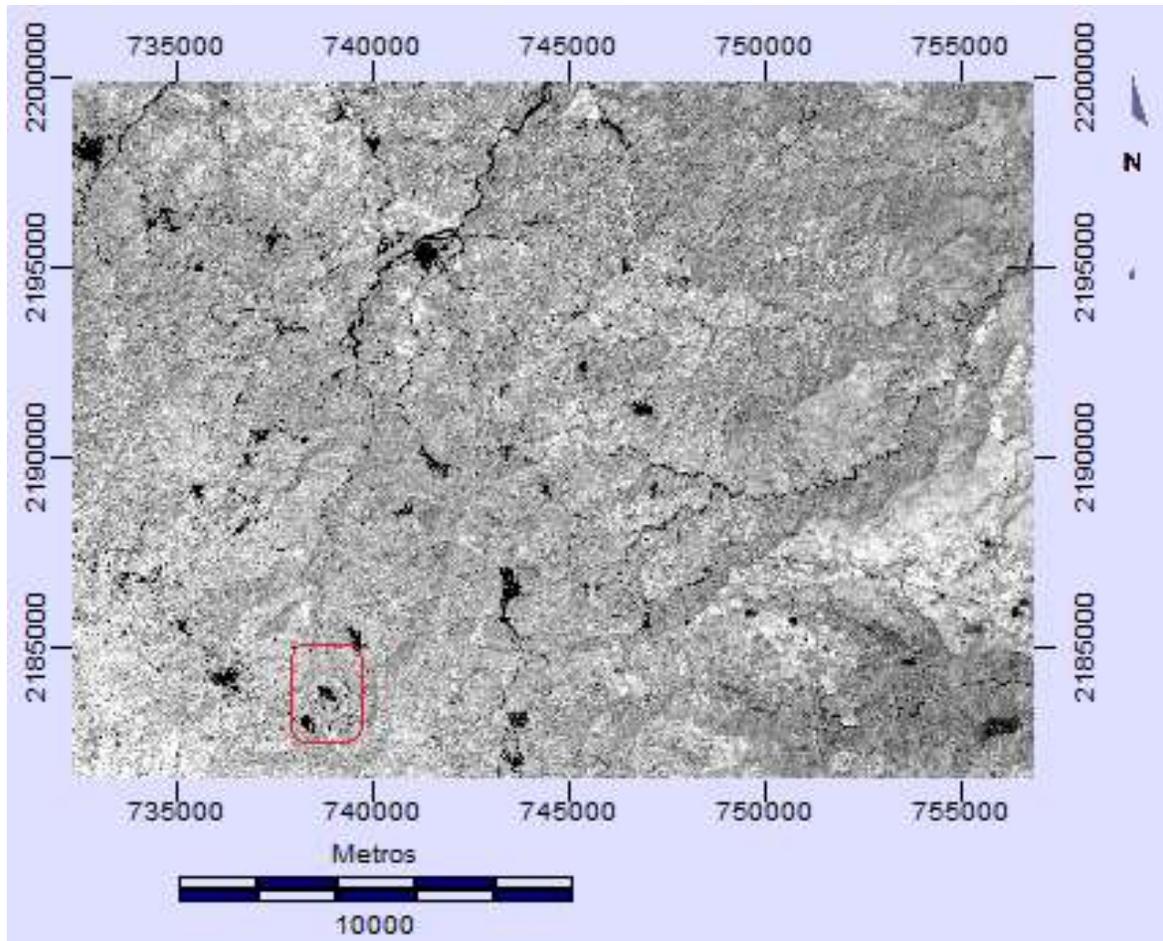


Figura 38. Hidroxilos resultantes del análisis de componentes principales de 4 bandas, con un ajuste lineal del histograma con saturación del 1%. Las zonas con tonos más brillantes presentan zonas con abundancia de hidroxilos. El recuadro en color rojo representa la zona del deslizamiento

Los Cuadros 17 y 18 muestran las matrices de eigenvectores y de carga obtenidas del análisis de componentes con 4 bandas para la identificación de óxidos.

Cuadro 17. Matriz de eigenvectores con 4 bandas para la identificación de óxidos

<i>Matriz de eigenvectores</i>				
<i>Componente</i>	<i>C 1</i>	<i>C 2</i>	<i>C 3</i>	<i>C 4</i>
<i>% Varianza</i>	67.26	31.35	1.33	0.07
<i>Eigenvalor</i>	504387.46	235073.28	9944.95	523.14
<i>Eigenvector 1</i>	0.077	0.163	0.624	0.761
<i>Eigenvector 2</i>	0.146	0.166	0.729	-0.648
<i>Eigenvector 3</i>	0.790	-0.612	0.015	0.038
<i>Eigenvector 4</i>	0.591	0.756	-0.283	0.010

Cuadro 18. Matriz de carga con 4 bandas para la identificación de óxidos

<i>Matriz de carga</i>				
<i>Componente</i>	<i>C 1</i>	<i>C 2</i>	<i>C 3</i>	<i>C 4</i>
<i>MSI B2</i>	0.474	0.682	0.536	0.150
<i>MSI B8</i>	0.689	0.533	0.481	-0.098
<i>MSI B11</i>	0.884	-0.468	0.002	0.001
<i>MSI B12</i>	0.752	0.657	-0.051	0.000

La componente C1 muestra una varianza de 67.26% con el mayor valor de carga de 0.884 en la banda MSI 11, además de que en las 4 bandas presenta eigenvectores positivos. La componente C2 tiene 31.34% de varianza de la información. La componente C3 con una varianza de 1.33% no presenta información para los óxidos. La componente C4 con una varianza de 0.07% sigue mostrando el mayor valor de reflectancia en la banda MSI B2 en contraste con la banda MSI B8 que por su valor negativo de reflectancia se observaría en tono oscuro en escala de grises. En la Figura 39, con este análisis, se muestra en tonos brillantes la presencia de óxidos sobre el parteaguas de la RH27Ac.

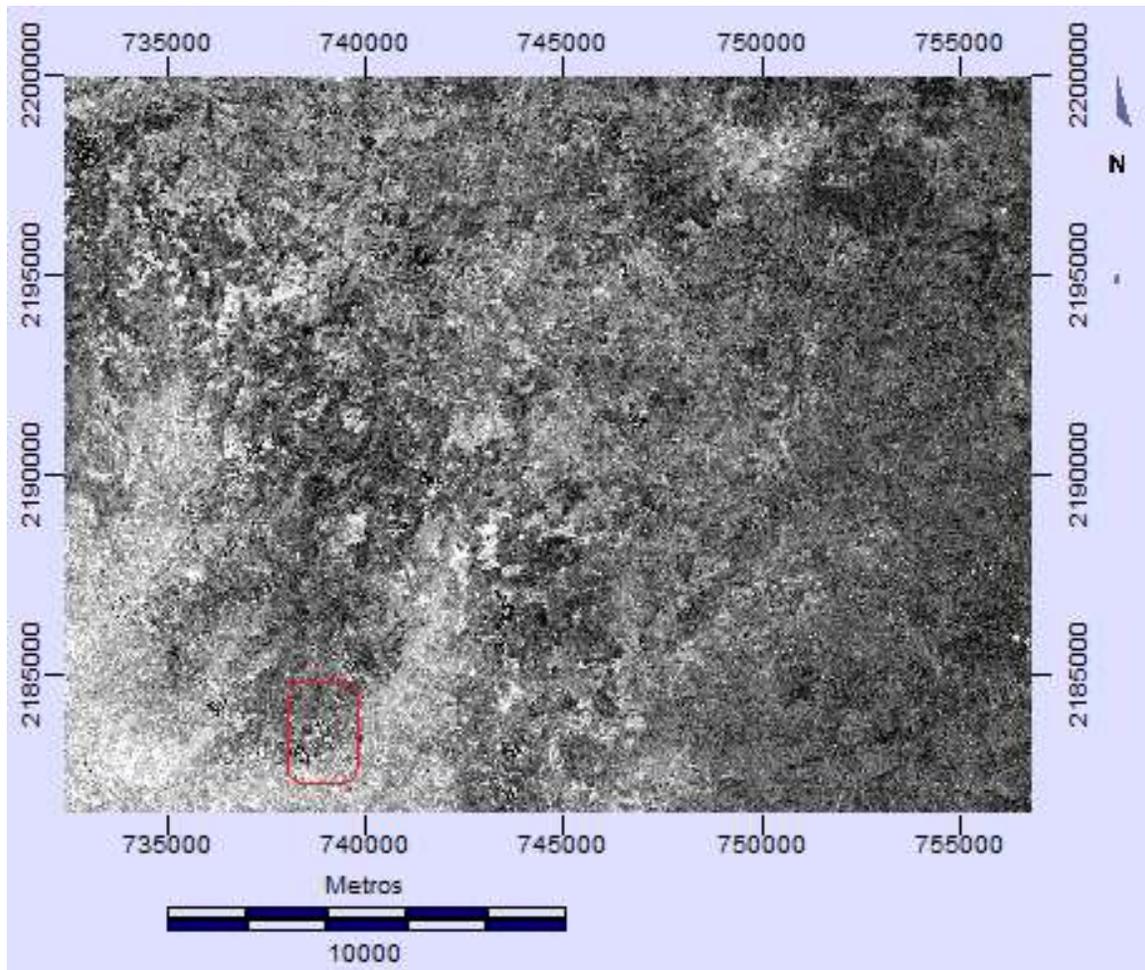


Figura 39. Óxidos resultantes del análisis de componentes principales de 4 bandas, con un ajuste lineal del histograma con saturación del 1%. Las zonas con tonos más brillantes presentan zonas con abundancia de óxidos. El recuadro en color rojo representa la zona del deslizamiento

5.4.1 Localización de zonas con rasgos de metasomatismo

Se generaron mapas en composiciones a color que representan las zonas que presentan rasgos de metasomatismo a escala regional. En la Figura 40, estas zonas de alteración se concentran en los límites del parteaguas de mayor altitud en la subcuenca.

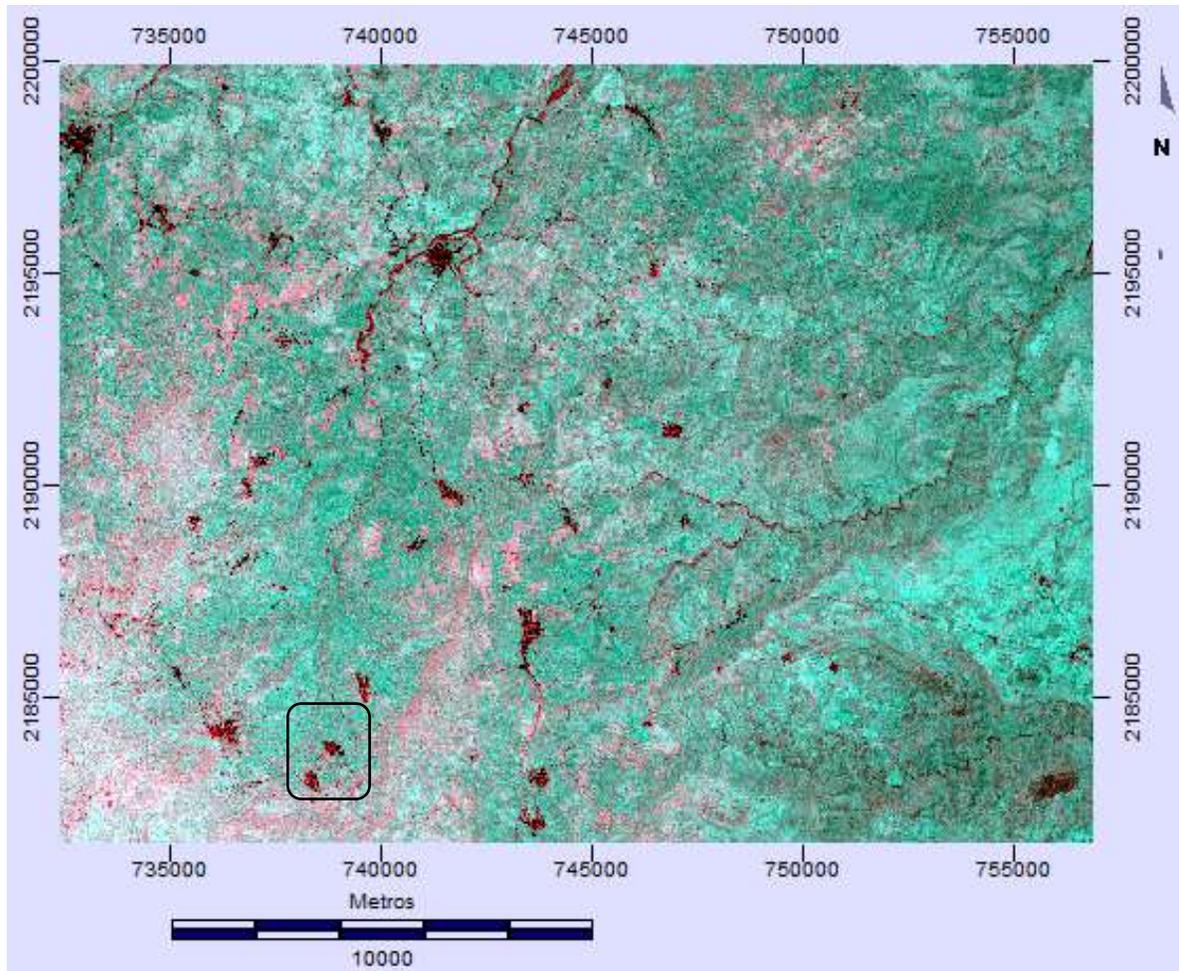


Figura 40. Composición de falso color RGB de componentes principales de 4 bandas correspondientes a los óxidos, hidroxilos y óxidos + hidroxilos respectivamente del sensor MSI. El color magenta en los límites del parteaguas representa las superficies con rasgos de metasomatismo. El recuadro en color negro representa la zona del deslizamiento



5.5 Sitios de muestreo y análisis de los materiales

Con el procesamiento de la información digital se obtuvieron mapas a escala regional de los posibles grupos minerales alterados que se esperaba encontrar en campo. Ahora en la Figura 41 se observa la posición de los sitios de muestreo sobre un mapa de litologías representativas. En la Figura 42 se presenta un acercamiento a los sitios de muestreo en las superficies de falla del deslizamiento.

En la zona de mayor altitud que delimita la subcuenca RH27Ac se validó la presencia de rocas basálticas y productos piroclásticos alterados por los procesos volcánicos y el posterior intemperismo (Figura 43).

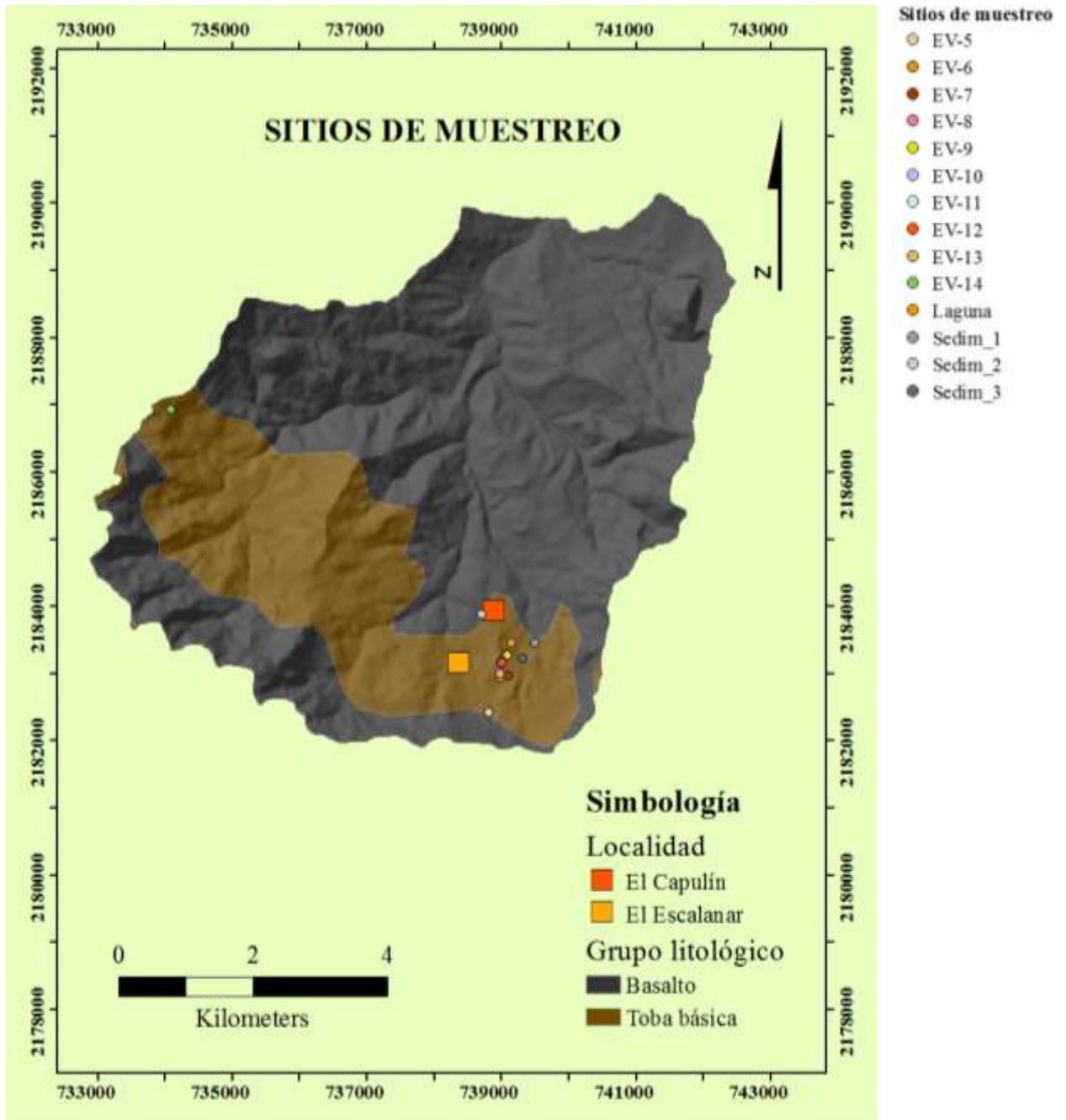


Figura 41. Sitios de muestreo sobre un mapa litológico a escala de la microcuenca generada. La zona donde se concentran los puntos representa la zona del deslizamiento. Sedim_1 y Sedim_2 son externas al deslizamiento y se localizan en la transición litológica entre los basaltos y la toba. Sedim_3 se localiza en el flanco derecho intacto del deslizamiento. Al extremo izquierdo de la imagen, en color verde, se localiza el sitio EV-14 en el límite de la subcuenca RH27Ac

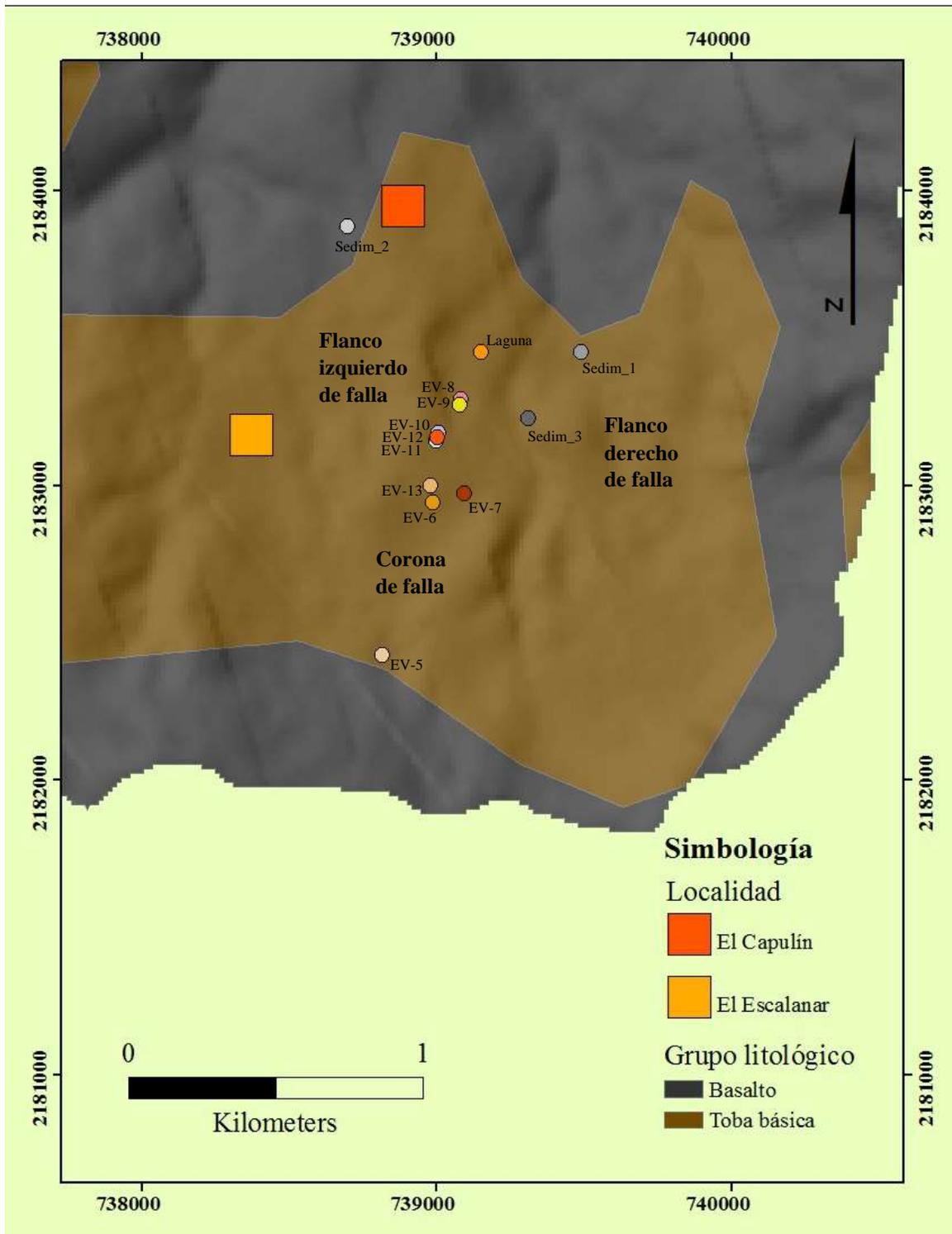


Figura 42. Acercamiento a los sitios de muestreo



Figura 43. Rocas y productos piroclásticos depositados de las zonas de mayor altitud

Así también en esa posición de referencia se ubican algunos depósitos coluviales. Pasando esta unidad y caminando dirección al deslizamiento se encuentra una zona de transición, con uso de suelo de pastizales para el ganado y donde se observan algunos bloques y caídas de roca basáltica (Figura 44).



Figura 44. Zona de transición correspondiente al límite entre la cobertura del bosque mesófilo de montaña y el deslizamiento (izquierda) y cambios en la cobertura vegetal del mismo bosque (derecha)

Pasando la zona de transición y sobre el escarpe del deslizamiento, se expone la masa que se mantuvo fija respecto a la que se desplazó (Figura 45).



Figura 45. Posición sobre la corona de deslizamiento (izquierda) y superficie del escarpe de deslizamiento visto desde abajo (derecha)

En algunos sitios entre la superficie del escarpe y la masa trasladada se expone el tipo de materiales y la vegetación preexistente (Figura 45).



Figura 46. Superficie expuesta del escarpe y la vegetación preexistente de la masa trasladada (izquierda) y vista de perfil del límite entre el escarpe y la masa trasladada (derecha). La superficie de falla alcanza ángulos de 57° al inicio y de 34° al final del escarpe

Las matrices que superaron su límite líquido, acarrearon los materiales y rocas de mayor tamaño, estos flujos heterogéneos estuvieron condicionadas por las orientaciones de los principales cauces fluviales (Figura 47).



Figura 47. Cauce principal por donde continuaron fluyendo los materiales después del deslizamiento

5.5.1 Observaciones de campo

Las observaciones de las muestras seleccionadas tomadas en campo se resumen en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Relación de muestras obtenidas en campo

<i>Muestra</i>	<i>Nombre</i>	<i>Ubicación</i>	<i>X (m)</i>	<i>Y (m)</i>	<i>Z (m)</i>	<i>Observaciones de campo</i>
1	EV-1	Externa	740744	2128392	1667	Depósito de material andesítico alterado y muy deleznable. El examen visual a detalle muestra la presencia de plagioclasa, anfíboles y rasgos de oxidación. El contraste de los minerales es tenue a excepción de los óxidos con un color de 7.5 YR 5/8 (Pardo fuerte) e incrustaciones de puntos y a veces manchas negras, comunes en la superficie (10-15%) de tamaño finas (<5 mm) con un límite bien definido. El color en húmedo hace prominente la heterogeneidad de los componentes de la superficie de la matriz. No se encontraron restos visibles de materia orgánica ya que la muestra se obtuvo en un corte del camino rumbo al deslizamiento a 3 m de la superficie de suelo.
2	EV-5	Externa	738816	2182422	1518	Matriz de depósitos coluviales inestables. Se observan diferentes tamaños de fragmentos de rocas de origen volcánico.
3	EV-6_H1	Corona exterior	738987	2182940	1453	Horizonte (0-71 cm). Límite claro entre horizontes, muy alta densidad de raíces (>50 por dm ²), bioturbación de raíces gruesas, agregados estables.
4	EV-6_H2	Corona exterior	738987	2182940	1453	Horizonte (71-150 cm). Límite claro entre horizontes, densidad media de raíces (6-10 por dm ²).
5	EV-6_H3	Corona exterior	738987	2182940	1453	Horizonte (150-215 cm). Límite claro entre horizontes, muy baja densidad de raíces (1-2 por dm ²).
6	EV-7_H1	Corona exterior	739096	2182973	1440	Horizonte (0-25 cm). Límite claro entre horizontes, presencia de bloques angulares de 10 cm de menos del 1%, muy alta densidad de raíces (>90 por dm ²).
7	EV-7_H2	Corona exterior	739096	2182973	1440	Horizonte (25-50 cm). Límite difuso entre horizontes, muy alta densidad de raíces (50 por dm ²) con bioturbación.
8	EV-7_H3	Corona exterior	739096	2182973	1440	Horizonte (50-100 cm). Límite claro entre horizontes, baja densidad de raíces (3-5 por dm ²), condiciones redox, presencia de concreciones de manganeso del 1% dentro los agregados y más del 50% de recubrimiento de óxidos.

9	EV-8	Flanco izquierdo	739081	2183293	1357	Depósito de material homogéneo y deleznable a 3 m del nivel del suelo sobre el flanco de deslizamiento. La matriz de la muestra consiste en componentes volcánicos líticos y pómez, con incrustaciones de minerales como la biotita y cuarzo. En la matriz del flanco expuesto se hacen notar algunos bloques redondeados de entre 30 y 50 cm junto a bloques subangulares de más de 30 cm con abundancia menor al 1%.
10	EV-9	Flanco izquierdo	739079	2183275	1359	Depósito de material a 4 m del nivel del suelo sobre el flanco izquierdo del deslizamiento. Presencia de plagioclasa, óxidos de hierro y hornablenda. El tamaño de los cantos gruesos subangulares es variable, desde 5 cm hasta bloques subangulares de más de 50 cm con abundancia del 1 al 2% en la matriz del material.
11	EV-10	Flanco izquierdo	739005	2183178	1375	Depósito de material a más de 4 m de la superficie del suelo con presencia de cantos medianos, gruesos y bloques subangulares, subredondeados y redondeados de hasta 40 cm, que juntos cubren entre el 25 y 30 % de la matriz muestreada. Cerca de la matriz, se observa un aparente dique.
12	EV-11	Flanco izquierdo	739000	2183150	1380	Depósito de material deleznable, con 2 a 3% de bloques de más de 20 cm. La muestra tiene cristales en puntos y filamentos color oscuro que cubren entre el 2 y 3%
13	EV-12	Flanco izquierdo	739003	2183164	1385	Depósito de material erosionado, posiblemente por acumulación concentraciones de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio por lixiviación. La muestra tiene puntos de cristales dorados que cubren entre el 2 y 3 %.
14	EV-13	Flanco derecho	738978	2183000	1454	Depósito de material con cierta cohesión y estabilidad, rompe en prismas, con cristales oscuros en puntos y filamentos que cubren del 2 al 7% por cara analizada, con manchas o motas circulares que cubren el 1% de 0.2 a 0.7 cm de color 7.5YR 7/6
14	EV-14	Externa	734079	2186928	1687	Depósito de ladera inestable con rasgos de alteración por fluidos de origen hidrotermal; se observan manchas y motas de color 5YR 3/1 que cubren el 1% de la matriz, finas de 0.4 a 1 cm.
16	Laguna	Cuerpo interior	739152	2183453	1313	Depósito de material aluvial y homogéneo donde el agua se acumulaba antes del flujo de materiales.
17	Sedim_1	Externa	739491	2183453	1300	Afloramiento de lutitas sobre el camino para salir de la comunidad de El Capulín.
18	Sedim_2	Externa	738698	2183878	1284	Afloramiento de lutitas saliendo de la comunidad de El Capulín.
19	Sedim_3	Flanco derecho	739311	2183227	1372	Superficie intacta de falla en el flanco derecho del deslizamiento sobre la cual se removieron los materiales residuales

5.5.2 Muestras de la matriz de suelo y depósitos

Las muestras representativas son descritas de mayor a menor altitud conforme a la dirección del flujo del deslizamiento y en cuatro zonas: muestras externas, perfiles expuestos de la parte intacta del escarpe, muestras en los flancos de deslizamiento, sitio La Laguna.

5.5.2.1 Muestras externas

EV-14

La muestra EV-14 fue tomada a una altura de 1687 m en un corte de carretera a nivel de suelo y es parte del límite del partaguas de la subcuenca RH27Ac (Figura 48). El interés adicional de comparar las propiedades de este sitio, es por la inestabilidad de los agregados que visiblemente se observan en la rasante del camino y donde la dinámica del sitio en el momento del muestreo, era audible por el rodamiento de arenas agregadas. Las partículas de esta muestra representativa forman agregados de mayor tamaño por algún cementante.

La matriz de la muestra representativa se clasifica como una arena arcillosa (SC). El mayor contenido de arenas tiene formas subangulares con una variedad de tamaños. Ante la prueba del aluminio activo, la muestra reacciona lentamente, con una intensidad en el color muy baja y su pH es ligeramente ácido.



Figura 48. Sitio para la recolección de la muestra EV-14. Vista desde la carretera. X: 734079, Y: 2183453, Z: 1687 m

EV-1

La muestra EV-1 fue tomada a una altura de 1667 m a 3 m debajo de la superficie del suelo en un depósito de material andesítico de apariencia homogénea y muy deleznable, al pie de la carretera rural rumbo al deslizamiento (Figura 49).

Esta muestra es dominada por la fracción fina. Las arenas tienen formas subredondeadas a redondeadas y no se obtuvieron gravas. La muestra representativa se clasifica como una arcilla de alta plasticidad (CH).

Ante la prueba del aluminio activo reacciona lentamente, con una intensidad en el color muy baja y su pH es ligeramente ácido.



Figura 49. Sitio para la toma de la muestra EV-1. X: 740744, Y: 2128392, Z: 1667 m

EV-5

La muestra EV-5 fue tomada sobre la trayectoria y antes de llegar al escarpe del deslizamiento, a una altura de 1518 m y a 3 m debajo una superficie vegetal de depósitos coluviales re trabajados Este sitio presenta características de los materiales parentales depositados de las zonas de mayor altitud del parteaguas. La muestra representativa corresponde a los materiales más finos de los depósitos. En los alrededores del sitio se visualizó la presencia de rocas basálticas alteradas, material téfrico y zeolitas (Figura 50).



Figura 50. Sitio para la toma de la muestra EV-5. X: 738816, Y: 2182422, Z: 1518 m

La matriz de material coluvial tiene un color pardo y se clasifica como una arena arcillosa (SC). Las gravas y arenas presentan una transición de formas subredondeadas a redondeadas y tienen nula compactación dentro de la matriz. La diferencia en la redondez de las partículas hace pensar en que el transporte de las partículas fue torrencial en algunas ocasiones.

La reacción al aluminio activo fue positiva y muy lenta, tiene un pH ligeramente ácido. Las reacciones de este grupo de muestras ante la presencia de aluminio activo se observan en la Figura 51.

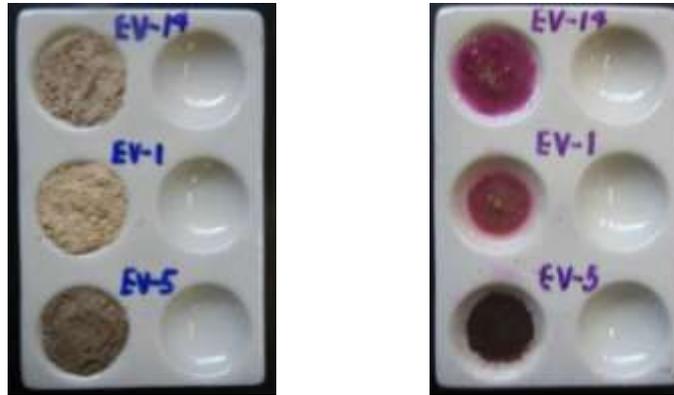


Figura 51. Muestras externas EV-14, EV-1, EV-5 ordenadas de mayor a menor altitud respectivamente, para determinar la presencia de aluminio activo. La fotografía de la izquierda representa la muestra sin reaccionar y en la derecha la reacción de las muestras

Materiales sedimentarios

Se encontraron varios sitios con un aparente origen sedimentario que reaccionan de manera espontánea al agregar ácido clorhídrico (Figura 52). Un primer afloramiento se encontró sobre el camino antes de llegar a la comunidad de El Capulín a una altura sobre el nivel del mar de 1300 m (Sedim_1) y el segundo afloramiento, saliendo de la misma comunidad a 1284 m (Sedim_2). El tercer sitio (Sedim_3) se encontró en la superficie intacta sobre el flanco derecho del deslizamiento.



Figura 52. Afloramiento de materiales sedimentarios. X: 738698, Y: 2183453, Z: 1300 m

Las densidades aparentes de las tres muestras sedimentarias tienen valores semejantes y lo mismo sucede con la densidad real. Esto se ve reflejado en valores semejantes de porosidad.

Los límites líquidos de Sedim_1 y Sedim_3 son semejantes, y en Sedim_2 disminuye su valor. Los límites plásticos resultan en valores muy semejantes de las tres muestras representativas y el pH de las muestras tiene valores alrededor de nueve.

5.5.2.2 Perfiles expuestos en las partes que se mantuvieron intactas sobre la corona del deslizamiento

Muestras EV-6

El perfil EV-6 se ubica a una altitud de 1453 m y representa las condiciones externas sobre el escarpe. El perfil se dividió en tres horizontes minerales para determinar sus propiedades. La división se hizo de acuerdo al contraste de color que reflejan ante la luz visible (Figura 53).



Figura 53. Perfil expuesto EV-6 sobre el escarpe. X: 738987, Y: 2182940, Z: 1453 m

Primer Horizonte

El horizonte A, EV-6_H-1, con un espesor de 0 a 71 cm tiene un límite claro con el horizonte subyacente. En el horizonte A, prácticamente no contiene gravas y las arenas existentes tienen formas subangulares hasta redondeadas. La mayor cantidad de esta fracción la ocupan los limos y se clasifica como un limo de alta plasticidad (MH).

La relación entre densidad real y aparente muestra que es un suelo muy poroso. La densidad de raíces es muy alta por los pastizales y los agregados son estables.

La reacción a la prueba del aluminio activo es instantánea y se hace visible una muy alta intensidad en el color de referencia, lo que sugiere la presencia de minerales de bajo orden estructural fácilmente intemperizables. Además el pH de la muestra es ácido.

Segundo Horizonte

El horizonte B, EV-6_H-2, con un espesor de 71 a 150 cm tiene un límite claro con una superficie uniforme.

El porcentaje dominante de arenas es mayor que el horizonte A con formas subangulares hasta subredondeadas y redondeadas. De los finos la fracción predominante son los limos y se clasifica como una arena limosa (SM).

Las densidades aparente y real disminuyen con respecto al primer horizonte y la porosidad aumenta, además de que se ve reflejado en el mayor contenido de arenas.

La reacción al aluminio activo fue instantánea con alta intensidad en el color de referencia, aunque ligeramente menor que el horizonte A. El pH es una unidad mayor al primer horizonte aunque se debe tener cuenta la escala logarítmica. Es muy notorio el aumento del límite líquido en relación al horizonte anterior.

Tercer Horizonte

El horizonte 2A, EV-6_H-3, con un espesor de 150 a 215 cm es de color más oscuro y tiene un límite claro con el horizonte B, sobreyacente.

Nuevamente el contenido de finos aumenta en relación al horizonte anterior y aunque ligeramente de menor valor que el primer horizonte, sigue predominado la fracción de limos. La distribución del tamaño de partícula de arena disminuye y es similar al primer horizonte. Se clasifica como un limo de alta plasticidad (MH).

Las densidades aparente y real vuelven a aumentar respecto al segundo horizonte y la porosidad se mantiene

La reacción al aluminio activo es casi instantánea, tarda un poco más que los primeros dos horizontes aunque es de alta intensidad. El pH disminuye ligeramente y continúa siendo ácido.

Los límites de consistencia también son muy similares al primer horizonte mineral.

Muestras EV-7

Muy cerca del primer perfil expuesto se encontró evidencia de otro asentamiento diferencial, es decir, la masa que se mantuvo intacta sobre la masa que se movió hacia el escarpe cerca de la corona (Figura 54). El asentamiento expone un perfil entre la diferencia de niveles de ambas masas a una altitud de 1440 m. El perfil naturalmente expuesto tiene una altura de 1 m y aunque presenta un menor contraste en el color, se diferenciaron tres horizontes principales: EV-7_H-1, EV-7_H-2 Y EV-7_H-3.



Figura 54. Perfil expuesto EV-7 entre el escarpe y el flanco derecho del deslizamiento. X: 739096, Y: 2182973, Z: 1440 m

Primer Horizonte

El primer horizonte A, EV-7_H-1, con un espesor de 0 a 25 cm tiene un límite claro por su alta densidad alta de raíces (>90 por dm²) y su color más oscuro. Los agregados son muy estables. La fracción de gravas aumenta respecto al perfil EV-6, junto a la abundancia de arenas redondeadas a subangulares. En su fracción fina tiene proporciones similares al tercer horizonte EV-6_H-3 con el dominio de la fracción de limos. Se clasifica como una arena limosa (SM).

Tiene una baja densidad aparente que le permite tener una porosidad representativa de los suelos con propiedades ándicas del sitio.

La reacción al aluminio activo es instantánea y de alta intensidad, el pH sigue siendo ácido.

Segundo Horizonte

El horizonte Bw, EV-7_H-2, con un espesor de 25 a 50 cm tiene un límite difuso y la densidad de raíces sigue siendo alta (50 por dm²) con buena estabilidad de agregados.

Las arenas dominan con más de la mitad del porcentaje total de la muestra, de formas angulares a subredondeadas, y en este caso las fracciones limo y arcilla tienen porcentajes similares en peso. La clasificación textural corresponde a una arena arcillosa (SC).

Las densidades aparente aumenta respecto al horizonte anterior y la porosidad disminuye.

La reacción al aluminio activo es moderada en la intensidad del color del reactivo y el pH sigue siendo ligeramente ácido.

Tercer Horizonte

El horizonte Br, EV-7_H-3, con un espesor de 50 a 100 cm tiene un límite claro con una superficie uniforme, presenta concreciones de manganeso del 1% dentro de los agregados y más del 50% de recubrimiento de óxidos.

Las arenas de formas angulares a subangulares dominan la muestra y el porcentaje de limos se mantiene respecto al primer horizonte de este perfil. Texturalmente se clasifica como una arena limosa (SM).

Las densidades aparente y porosidad son muy similares al horizonte anterior.

La reacción al aluminio es de baja a moderada intensidad en el color del reactivo y el pH sigue siendo ligeramente ácido.

EV-13

La muestra EV-13 es una muestra que representa las condiciones internas del escarpe en la superficie de falla a una altitud de 1454 m (Figura 55). Para este caso la fracción fina es dominante y la fracción de arenas presenta formas subangulares.



Figura 55. Sitio para el muestreo EV-13 de la matriz en el escarpe interior del deslizamiento. X: 738978, Y: 2183000, Z: 1454 m

Texturalmente esta muestra está dominada por el contenido de finos que parecen haber alcanzado un equilibrio; siendo el contenido de limos igual al contenido de la fracción arcilla y corresponde a un limo de baja plasticidad (ML).

La baja densidad aparente se mantiene, lo que resulta en una alta porosidad.

La reacción al aluminio activo es de muy baja intensidad y el pH es ligeramente básico. En las Figuras 56 y 57 se observa la intensidad en el color de la reacción para identificar la presencia de aluminio activo en este grupo de muestras.

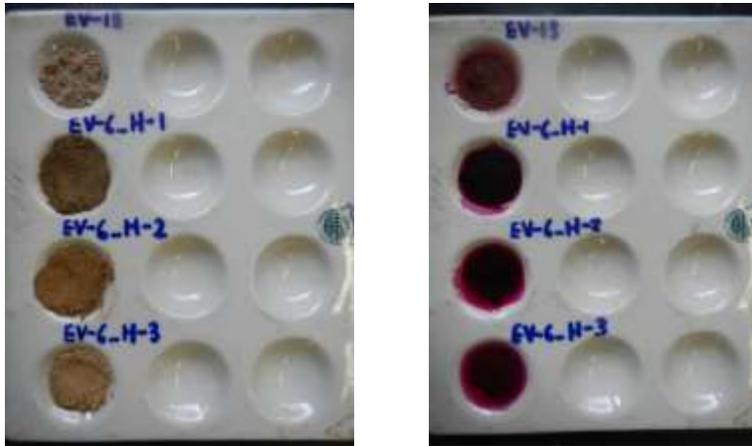


Figura 56. Muestras EV-13 y los tres horizontes EV-6 que representan el grupo sobre el escarpe del deslizamiento para determinar la presencia de aluminio activo. La fotografía de la izquierda muestra una fracción fina de cada muestra y a la derecha la reacción al aluminio activo. Las muestras se ordenaron de mayor a menor altitud, de arriba hacia abajo respectivamente



Figura 57. Perfil EV-7 sobre el flanco derecho del deslizamiento para determinar la presencia de aluminio activo. La fotografía de la izquierda muestra una fracción fina de cada muestra y en la derecha la reacción al aluminio activo

5.5.2.3 Muestras del flanco izquierdo de deslizamiento en la superficie de falla

EV-12

La muestra EV-12 ubicada a una altitud de 1385 m sobre el flanco izquierdo de falla, representa el contraste en color rojo con los materiales en la superficie de falla (Figura 58).

Texturalmente ésta muestra está dominada por el contenido de arenas y se clasifica por su granulometría que corresponde a una arena arcillosa (SC).

La porosidad se mantiene muy semejante a las muestras de la zona de la corona.



Figura 58. Muestreo EV-12 del flanco izquierdo del deslizamiento. X: 739003, Y: 2183164, Z: 1385 m

Los límites de consistencia en este sitio tienen un comportamiento diferente al de las muestras en la corona superficial. El origen y procesos de intemperismo también son diferentes a las muestras antes descritas.

La reacción al aluminio activo es prácticamente negativa y el pH es ligeramente básico. Éste sitio parece acumular óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio por la remoción gradual de sílice y sales.

EV-11

La muestra EV-11 representa las propiedades de la superficie de falla del flanco izquierdo a una altitud de 1380 m (Figura 59).

En este caso más de la mitad del peso total de la muestra corresponde a la fracción fina seguido de la fracción de arenas subangulares y no contiene gravas. Texturalmente ésta muestra se clasifica como una arcilla de baja plasticidad (CL). En este sitio parece que el agua logró que la matriz fina alcanzó un estado fluido.

La relación entre las densidades real y aparente resulta en valores semejantes de porosidad de los sitios del flanco izquierdo aunque su permeabilidad es moderadamente baja.

La reacción al aluminio activo es escasa a nula y el pH es ligeramente básico, muy similar a la muestra EV-12.



Figura 59. Muestreo EV-11 del flanco izquierdo del deslizamiento. X: 739000, Y: 2183150, Z: 1380 m

EV-10

La muestra EV-10 se ubica en la superficie de falla del flanco izquierdo a una altitud de 1375 m. La superficie de falla muestra la variedad de cantos medianos, gruesos y bloques subangulares, subredondeados y redondeados de hasta 40 cm que juntos cubren entre el 25 y 30% de la matriz muestreada (Figura 60). Texturalmente, la matriz de ésta muestra está dominada por el contenido de arenas y se clasifica como una arena arcillosa (SC).

En este caso la densidad aparente supera la unidad y por este ligero aumento, la porosidad en el sitio disminuye también.

La reacción al aluminio activo es negativa y el pH es básico. Sus límites de consistencia son relativamente bajos.



Figura 60. Muestreo EV-10 del flanco izquierdo del deslizamiento. X: 739005, Y: 2183178, Z: 1375 m

EV-9

La muestra EV-9 se ubica en la superficie de falla del flanco izquierdo a una altitud de 1359 m. En la superficie de falla se observa la vegetación, que aunque insipiente, tiende a colonizar ésta zona (Figura 61).



Figura 61. Muestreo EV-9 del flanco izquierdo del deslizamiento. X: 739079, Y: 2183275, Z: 1359 m

Texturalmente ésta muestra está dominada por el contenido de arenas y se clasifica como una arena arcillosa (SC). La relación entre densidades aparente y real estima una porosidad semejante a los sitios del flanco izquierdo.

La reacción al aluminio activo es de muy baja intensidad y el pH es básico.

EV-8

La muestra EV-8 se ubica en la superficie de falla del flanco izquierdo a una altitud de 1357 m. En la superficie de falla se observa que la vegetación que aunque insipiente tiende a colonizar ésta parte por su exposición (Figura 62). Esta muestra está dominada por el contenido de finos y se clasifica como una arcilla de baja plasticidad (CL).

La reacción al aluminio activo es de muy baja intensidad y el pH es neutro. Esta muestra tiene propiedades semejantes al sitio EV-11.



Figura 62. Muestreo EV-8 del flanco izquierdo del deslizamiento. X: 739081, Y: 2183293, Z: 1357 m

5.5.2.4 Muestra en el cuerpo del deslizamiento: zona de cultivos

La Laguna

La muestra de La Laguna se ubica en la orilla de los depósitos de material aluvial (Figura 63) donde se acumulaba el agua en la temporada de lluvias antes del deslizamiento y flujos, a una altitud de 1313 m y donde actualmente, en los alrededores, se han reactivado el uso de suelo para maíz y café. El muestreo se hizo en un pequeño perfil expuesto de 50 cm de material homogéneo. Se limpió la cara expuesta del perfil y se tomó la muestra mineral representativa.



Figura 63. Muestreo en la zona de La Laguna. X: 739152, Y: 2183453, Z: 1313 m

Las fracciones del medio particulado prácticamente no contienen gravas y en su mayoría son arenas angulares a subangulares que muestran el desgaste de las partículas acarreadas e intemperizadas. Como en la mayoría de las muestras el porcentaje de limos es dominante. Debido al mayor contenido de arenas se clasifica como una arena arcillosa (SC).

La densidad aparente resulta ser muy baja, el material en campo no presenta cohesión y se encuentra muy suelto; la densidad real es muy similar a la de los perfiles de suelo. Lo anterior resulta en una porosidad muy alta.

La reacción a la presencia de aluminio activo es inmediata con una muy alta intensidad del color en el reactivo y además responde a un pH ácido.

En la Figura 64 se presenta la escasa presencia de aluminio activo en la mayoría de las muestras de los flancos deslizados, a excepción de la zona de La Laguna.

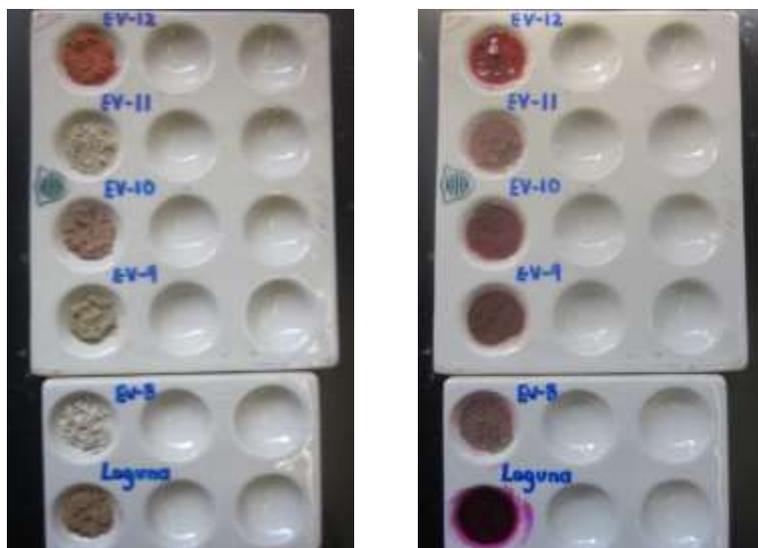


Figura 64. Muestras EV-12 a EV-8 representan el grupo del flanco izquierdo del deslizamiento y La Laguna, para determinar la presencia de aluminio activo. La muestra de la Laguna representa la zona de depósitos aluviales dentro del proceso. La fotografía de la izquierda muestra una fracción fina de cada muestra y a la derecha la reacción al aluminio activo. Las muestras se ordenaron de mayor a menor altitud, de arriba hacia abajo respectivamente

5.5.3 Cuadros resumen de las muestras analizadas

En los Cuadros resumen 20, 21, 22, 23, 24 se presentan los atributos de las muestras analizadas.

Cuadro 20. Resumen del color, pH y reacción al aluminio activo de las muestras obtenidas en campo

Muestra	Nombre	Color				pH	Reacción Fenolftaleína 1% y NaF 1N
		En seco	Descripción	En húmedo	Descripción		
1	EV-1	10YR 8/2	Blanco	10YR 5/4	Pardo amarillento	5.87	Lenta, muy baja intensidad
2	EV-5	10YR 5/3	Pardo	10YR 3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	6.08	Lenta, muy baja intensidad
3	EV-6_H-1	10YR 3/6	Pardo amarillento oscuro	10YR 2/2	Pardo muy oscuro	4.83	Instantánea, muy alta intensidad
4	EV-6_H-2	10YR 4/6	Pardo amarillento oscuro	10YR 3/4	Pardo amarillento oscuro	5.85	Instantánea, alta intensidad
5	EV-6_H-3	2.5Y 5/4	Pardo oliva claro	10YR 3/6	Pardo amarillento oscuro	5.01	Instantánea, alta intensidad
6	EV-7_H-1	10YR 4/3	Pardo oscuro	10YR 3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	5.78	Instantánea, alta intensidad
7	EV-7_H-2	10YR 5/4	Pardo amarillento	10YR 3/4	Pardo amarillento oscuro	5.42	Instantánea, moderada intensidad
8	EV-7_H-3	7.5YR 4/4	Pardo oscuro	7.5YR 3/4	Pardo oscuro	5.50	Casi instantánea, baja intensidad

9	EV-8	5Y 7/1	Gris claro	2.5Y 5/2	Pardo grisáceo	7.03	Muy baja intensidad
10	EV-9	5Y 6/4	Oliva pálido	5Y 4/4	Oliva	7.44	Muy baja intensidad
11	EV-10	5YR 6/2	Gris rosáceo	5YR 3/3-10R 4/8	Pardo rojizo oscuro-rojo (20%)	7.63	Negativa
12	EV-11	2.5Y 7/2	Gris claro	2.5Y 5/4	Pardo oliva claro	7.58	Negativa
13	EV-12	2.5YR 5/6	Rojo	10R 4/8	Rojo	7.36	Negativa
14	EV-13	7.5YR 7/2	Gris rosáceo	7.5YR 5/8	Pardo fuerte	7.71	Casi instantánea, baja intensidad
15	EV-14	5Y 5/2	Gris olivo	5Y 4/2	Gris olivo	8.75	NA
16	Laguna	10YR 5/6	Pardo amarillento	7.5YR 3/4	Pardo oscuro	5.83	Instantánea, muy alta intensidad
17	Sedim_1	10YR 7/1	Gris claro	10YR 4/2	Pardo grisáceo oscuro	8.82	NA
18	Sedim_2	10YR 7/2	Gris claro	10YR 5/2	Pardo grisáceo	9.15	NA
19	Sedim_3	5Y 6/1	Gris	5Y 4/2	Gris olivo	9.34	NA

NA: No aplica

Cuadro 21. Resumen de las densidades aparentes, reales y porosidades de las muestras obtenidas en campo

<i>Muestra</i>	<i>Nombre</i>	<i>Densidad aparente (g/cm³)</i>	<i>Densidad real (g/cm³)</i>	<i>Porosidad (%)</i>	<i>Permeabilidad (cm/h)</i>
1	EV-1	0.75	2.43	69%	NA
2	EV-5	0.69	2.39	71%	18.34
3	EV-6_H-1	0.73	2.01	64%	54.24
4	EV-6_H-2	0.53	1.83	71%	118.02
5	EV-6_H-3	0.67	2.20	70%	189.07
6	EV-7_H-1	0.84	2.26	63%	157.93
7	EV-7_H-2	0.96	2.32	59%	152.63
8	EV-7_H-3	0.91	2.31	60%	150.53
9	EV-8	0.68	2.59	74%	0.29
10	EV-9	0.65	2.27	71%	5.76
11	EV-10	1.05	2.63	60%	1.60

12	EV-11	0.82	2.65	69%	0.18
13	EV-12	0.78	2.50	69%	2.75
14	EV-13	0.65	2.49	74%	NA
15	EV-14	0.71	2.25	69%	NA
16	Laguna	0.31	2.19	86%	77.40
17	Sedim_1	1.35	2.58	48%	NA
18	Sedim_2	1.40	2.66	47%	NA
19	Sedim_3	1.36	2.54	46%	2.33

Cuadro 22. Resumen de los límites de consistencia y propiedades índices de las muestras obtenidas en campo

<i>Muestra</i>	<i>Nombre</i>	<i>Límite líquido wL (%)</i>	<i>Límite plástico wP (%)</i>	<i>Índice de plasticidad IP (%)</i>	<i>Límite de contracción (%)</i>	<i>Índice de liquidez</i>
1	EV-1	56.24%	12.36%	43.88%	6.58%	0.15
2	EV-5	67.93%	28.64%	39.29%	16.03%	0.08
3	EV-6_H1	81.13%	47.25%	33.88%	28.17%	0.20
4	EV-6_H2	114.67%	63.23%	51.44%	31.17%	0.59
5	EV-6_H3	82.70%	49.90%	32.80%	30.13%	1.07
6	EV-7_H1	78.05%	38.54%	39.51%	21.53%	0.16
7	EV-7_H2	79.47%	20.70%	58.77%	9.52%	0.48
8	EV-7_H3	67.56%	36.19%	31.37%	22.24%	0.42
9	EV-8	43.23%	17.46%	25.77%	11.52%	-0.14
10	EV-9	68.97%	32.25%	36.72%	18.59%	0.17
11	EV-10	36.16%	12.21%	23.95%	8.25%	-0.14
12	EV-11	35.68%	18.24%	17.44%	13.52%	-0.30
13	EV-12	58.95%	17.05%	41.90%	9.28%	0.19
14	EV-13	37.63%	28.15%	9.48%	23.66%	-0.05
14	EV-14	91.51%	28.00%	63.51%	12.34%	0.19
16	Laguna	85.25%	34.05%	51.20%	20.26%	1.92
17	Sedim_1	46.84%	12.00%	34.84%	7.07%	0.03
18	Sedim_2	30.77%	10.04%	20.73%	7.09%	-0.40
19	Sedim_3	43.89%	11.00%	32.89%	6.64%	0.18

Cuadro 23. Resumen del tamaño de partícula, Actividad y textura de las muestras obtenidas en campo

<i>Muestra</i>	<i>Nombre</i>	<i>%Gravas</i>	<i>%Arenas</i>	<i>%Limos</i>	<i>%Arcillas</i>	<i>Actividad</i>	<i>Textura (SUCS)</i>
1	EV-1	0.00%	40.72%	35.57%	23.71%	1.85	CH
2	EV-5	36.03%	49.45%	9.29%	5.23%	7.51	SC
3	EV-6_H1	0.29%	44.20%	46.62%	8.88%	3.82	MH
4	EV-6_H2	1.83%	65.35%	31.51%	1.31%	39.27	SM
5	EV-6_H3	6.04%	43.46%	39.39%	11.11%	2.95	MH
6	EV-7_H1	10.82%	46.59%	30.67%	11.93%	3.31	SM
7	EV-7_H2	7.90%	56.87%	18.32%	16.91%	3.48	SC
8	EV-7_H3	2.56%	75.51%	16.23%	5.70%	5.50	SM
9	EV-8	0.00%	24.30%	45.42%	30.28%	0.85	CL
10	EV-9	3.47%	67.44%	19.78%	9.31%	3.94	SC
11	EV-10	9.37%	56.50%	21.84%	12.29%	1.95	SC
12	EV-11	0.00%	41.20%	35.28%	23.52%	0.74	CL
13	EV-12	0.00%	52.97%	33.86%	13.17%	3.18	SC
14	EV-13	0.00%	27.35%	36.33%	36.33%	0.26	ML
14	EV-14	11.66%	76.72%	3.95%	7.67%	8.28	SC
16	Laguna	0.38%	66.59%	28.41%	4.62%	11.08	SC
17	Sedim_1	NA	NA	NA	NA	NA	NA
18	Sedim_2	NA	NA	NA	NA	NA	NA
19	Sedim_3	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Cuadro 24. Resumen de los ángulos de fricción interna residual (ϕ_r) estimados, redondez y fracción de partículas dominantes

<i>Muestra</i>	<i>Nombre</i>	ϕ_r (wL, wP)	ϕ_r (Arcilla, IP)	<i>Redondez predominante de arenas y gravas</i>
1	EV-1	9	16	Subredondeadas a redondeadas
2	EV-5	NA	37	Subredondeadas a redondeadas
3	EV-6_H1	28	31	Subredondeadas a redondeadas
4	EV-6_H2	NA	56	Subredondeadas a redondeadas
5	EV-6_H3	29	28	Subangulares a subredondeadas
6	EV-7_H1	24	25	Subangulares a redondeadas
7	EV-7_H2	NA	17	Angulares a subredondeadas
8	EV-7_H3	NA	39	Angulares a subangulares
9	EV-8	19	19	Subredondeadas
10	EV-9	NA	29	Subangulares a subredondeadas
11	EV-10	NA	31	Subangulares, subredondeadas y redondeadas
12	EV-11	25	26	Subangulares
13	EV-12	NA	23	Subangulares
14	EV-13	35	27	Subredondeadas
14	EV-14	NA	NA	Subredondeadas
16	Laguna	NA	35	Angulares a subangulares
17	Sedim_1	11	NA	NA
18	Sedim_2	15	NA	NA
19	Sedim_3	10	NA	NA

5.6 Análisis puntual de todas las muestras en una carta de plasticidad

La utilidad de la carta de plasticidad se refleja en la facilidad para visualizar los materiales con propiedades similares, y agruparlos por zonas dentro de la misma carta (Figura 65). Cabe recordar que cada una de las muestras tiene un porcentaje de fracción gruesa y fina que puede dominar la clasificación textural.

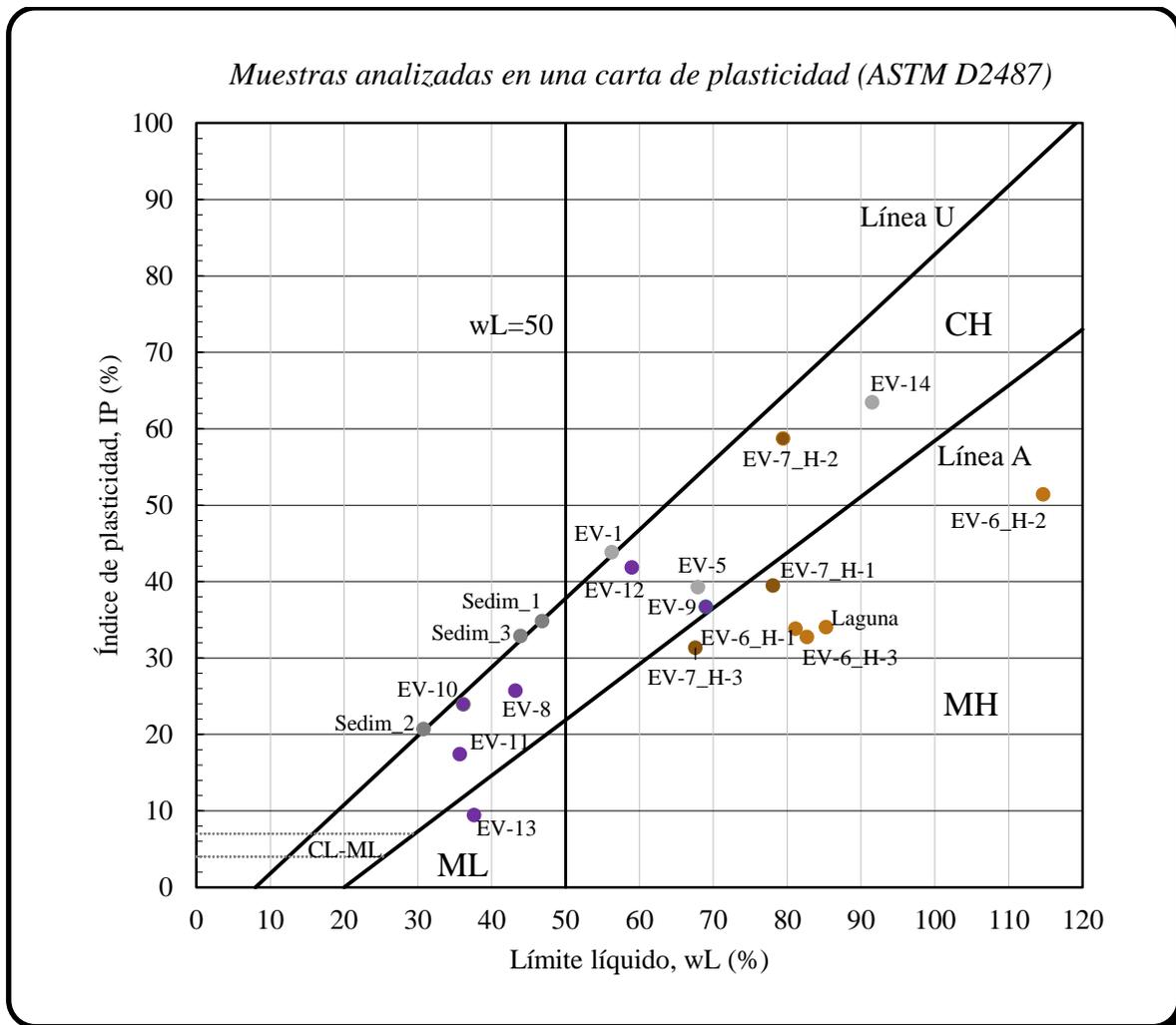


Figura 65. Análisis puntual de todas las muestras en una carta de plasticidad. Los puntos en color pardo representan las muestras superficiales de los perfiles expuestos producto de los asentamientos diferenciales justo arriba del escarpe. El sitio La Laguna, es un suelo superficial con propiedades muy similares a los perfiles expuestos. En color morado se presentan los puntos de muestreo a mayor profundidad sobre los flancos de deslizamiento y el escarpe. Los puntos en color gris son puntos externos de referencia, ajenos a las superficies de falla (excepto Sedim_3) del deslizamiento.

5.7 Espectrometría del infrarrojo de muestras representativas

La utilización del espectrómetro del infrarrojo para algunas muestras, sugiere la presencia de minerales de acuerdo a la librería disponible.

Primeramente se realizó la espectrometría sobre muestras de roca basáltica con cavidades, pertenecientes a una pared de lava dentro del flanco izquierdo del deslizamiento. En dicha roca se encontró nontronita, clinoptilolita, thenardita y mordenita + clinoptilolita.

Para el primer caso del medio particulado, correspondiente al horizonte EV-6_H1, y de acuerdo a los picos de absorción, se sugiere la presencia de montmorillonita con una correlación de 0.859 entre la curva obtenida y la disponible en la librería, aunque los picos son tenues y no están bien definidos. Para el horizonte EV-6_H2 se sugiere la presencia de minerales de montmorillonita con una correlación entre curvas de 0.943, también se detecta la presencia de nontronita, estilbita, sauconita y

clinoptilolita. Para el horizonte EV-6_H3 se sugiere la presencia de montmorillonita con una correlación de 0.913 y otros posibles minerales como nontronita.

Para el horizonte superficial EV-7_H1, los picos de la firma espectral siguen siendo tenues aunque coinciden con la montmorillonita y una correlación de 0.905, también puede tener nontronita y sauconita. La misma montmorillonita se sugiere para el horizonte EV-7_H2 con una correlación de 0.859, aunque también contiene nontronita y natrolita. El horizonte EV-7_H3 tiene una correlación de 0.915 con la montmorillonita, aunque los picos de absorción de la muestra son todavía muy suaves, también hay presencia de natrolita y escolecita.

En algunas muestras del flanco izquierdo tal como la muestra EV-8 se sugiere la presencia de moscovita con una correlación de 0.894 y otros minerales como nefelina y celestita. La muestra EV-11 tiene una correlación de 0.614 para minerales de illita, y posible presencia de microclina y lepidolita.

Otra muestra de interés fue la muestra EV-12 que sugiere la presencia de minerales de goethita con una correlación de 0.832, además de natrolita y schwertmannita.

La muestra Sedim_3 del flanco derecho tiene una correlación de 0.973 con el mineral illita. Puede haber corrensita y oligoclasa.

5.8 Difracción de rayos X de muestras seleccionadas

Debido a las limitaciones del uso del equipo la difracción de rayos X, sólo se aplicó para la muestra sedimentaria (Sedim_3) del flanco derecho del deslizamiento. De acuerdo a los picos del difractograma, se estimó que el 49.57% corresponde al mineral calcita CaCO_3 y el 47.83% corresponde a sílice SiO_2 . El 2.6 % restante corresponde principalmente a flogopita.

5.9 Correlación entre el pH y el límite líquido

Al correlacionar el pH con el límite líquido sin considerar los sitios con valores extremos correspondientes a los puntos EV-6_H-2 y EV-14, el coeficiente de determinación aumenta a casi 0.67 (Figura 66) y el límite líquido es mejor explicado con la determinación del pH.

Se identifican dos grupos; el primero para pH ácidos que están relacionados directamente con los perfiles de suelo superficiales y presencia de aluminio activo; y el segundo grupo con pH básicos, principalmente las muestras más profundas y con un mayor desarrollo en el proceso de consolidación, tomadas sobre las superficies de falla del deslizamiento. Los suelos superficiales tienen menor susceptibilidad para llegar a un estado líquido, su pH es ácido debido a la hidrólisis y lixiviación de cationes que dejan elementos tales como el Aluminio; caso contrario sucede en los materiales sedimentarios donde su pH es alcalino por la reacción positiva al CaCO_3 .

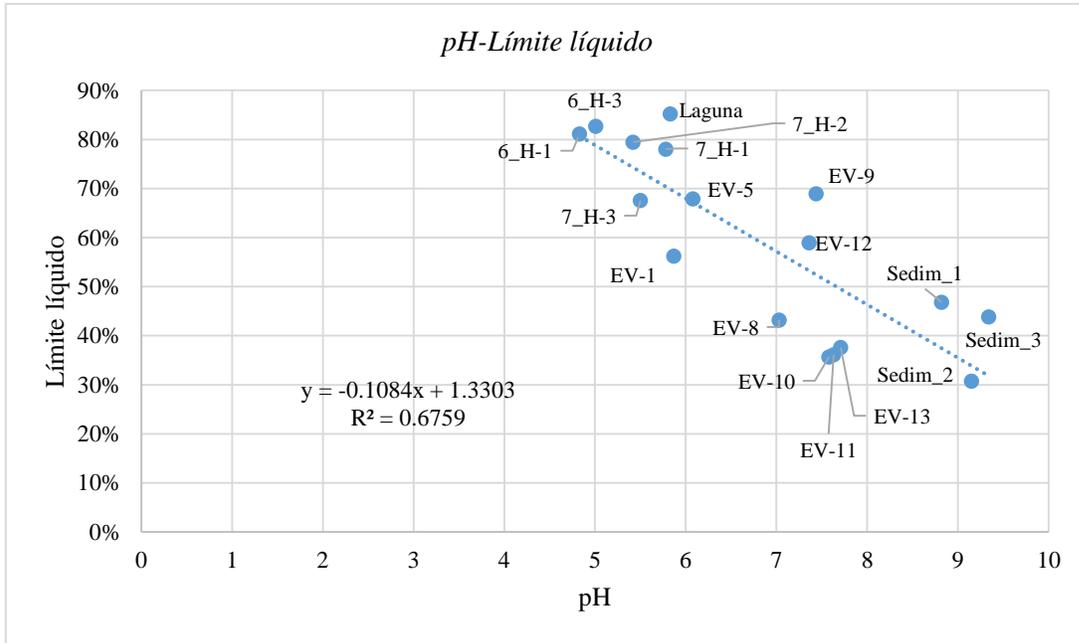


Figura 66. Correlación entre el pH y límite líquido

5.10 Correlación entre el porcentaje de arcillas y límite líquido

Al relacionar la fracción arcilla con el límite líquido, la tendencia de todas las muestras es disminuir el límite líquido conforme aumenta el porcentaje de arcilla (Figura 67).

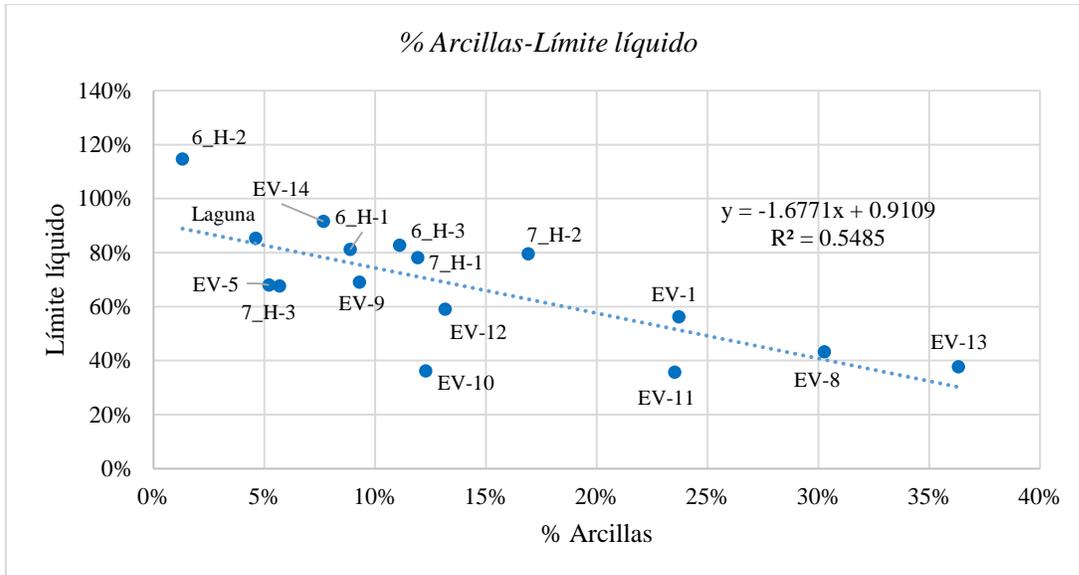


Figura 67. Correlación entre el % arcillas y límite líquido de todas las muestras

5.11 Carta de Actividad

Cabe recordar que al trazar una línea recta que parte del origen y sigue la misma tendencia de los puntos, resulta en materiales con procesos de formación semejantes y conforme aumenta la pendiente, aumenta la Actividad. En la Figura 68, se observan las tendencias y comportamiento similar de

algunas muestras. En el caso de la muestra EV-13, localizada en el extremo inferior izquierdo, debido a su baja Actividad. En el otro extremo está EV-6_H-2, con la mayor Actividad.

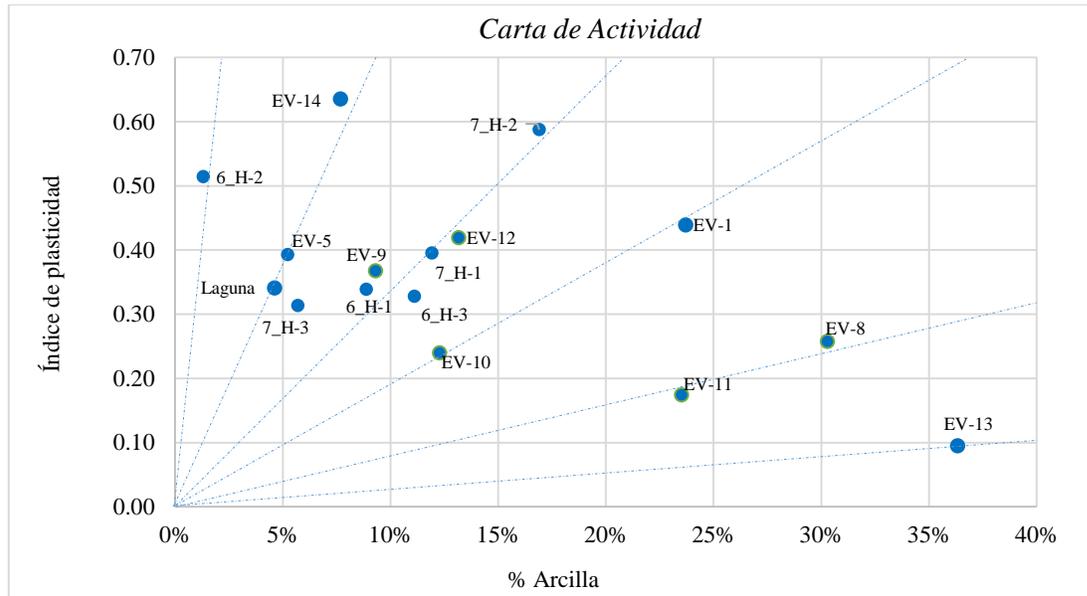


Figura 68. Correlación entre la fracción arcilla e índice de plasticidad

El grupo de los perfiles EV-6 y EV-7 así como la muestra Laguna se encuentran arriba de la parte media, parecen tener una alta superficie específica con presencia de minerales de bajo orden estructural y están relacionados con la clasificación geotécnica en la carta de plasticidad como (MH) o limos de alta plasticidad.

5.12 Correlación entre porosidad y permeabilidad

Se observa nuevamente que las muestras superficiales con propiedades ándicas, se agrupan en la parte superior de la Figura 69 y las muestras con un proceso de consolidación mayor, se agrupan en la parte inferior. Al mostrar todas las muestras en una sola gráfica, el coeficiente de determinación es muy bajo. Sin embargo, en el extremo inferior izquierdo de la gráfica, la muestra que presenta la menor porosidad (46.46%) con baja permeabilidad (2.33 cm/h) corresponde a Sedim_3. Por el contrario, con propiedades diferentes, la muestra con mayor porosidad representa al sitio de La Laguna.

Es de notarse que en algunos sitios con semejante valor de porosidad, tienen valores diferentes de permeabilidad, tal es el caso de los sitios subsuperficiales de las superficies de falla contra los suelos superficiales. Por su parte los suelos con propiedades ándicas tienen minerales de bajo orden estructural que permiten mejor el paso del agua que los materiales subsuperficiales con un mayor arreglo estructural.

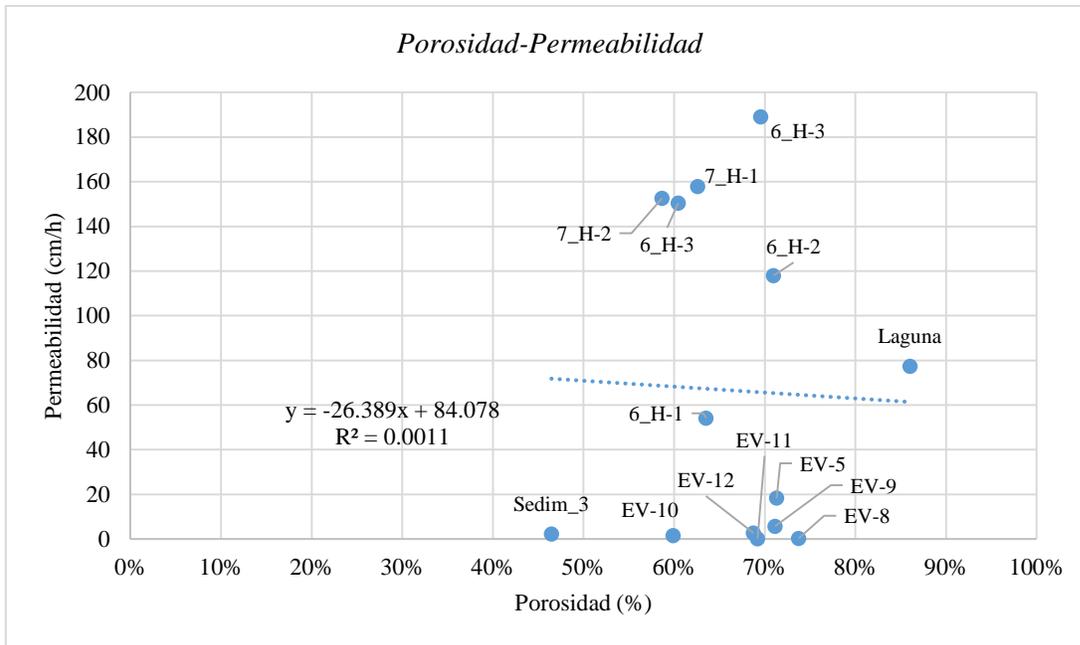


Figura 69. Correlación entre porosidad y permeabilidad para las muestras

5.13 Correlación entre el porcentaje de arcillas y permeabilidad

La tendencia general para todas las muestras es disminuir su permeabilidad al aumentar el porcentaje de finos. Se nota una tendencia divergente entre el grupo suelos superficiales y el grupo de materiales subsuperficiales, en su mayoría de la matriz del flanco izquierdo (Figura 70). Para semejantes contenidos de arcilla, la permeabilidad es diferente, esto indica las diferentes propiedades y procesos de formación de cada sitio con semejantes contenidos en el tamaño arcilla.

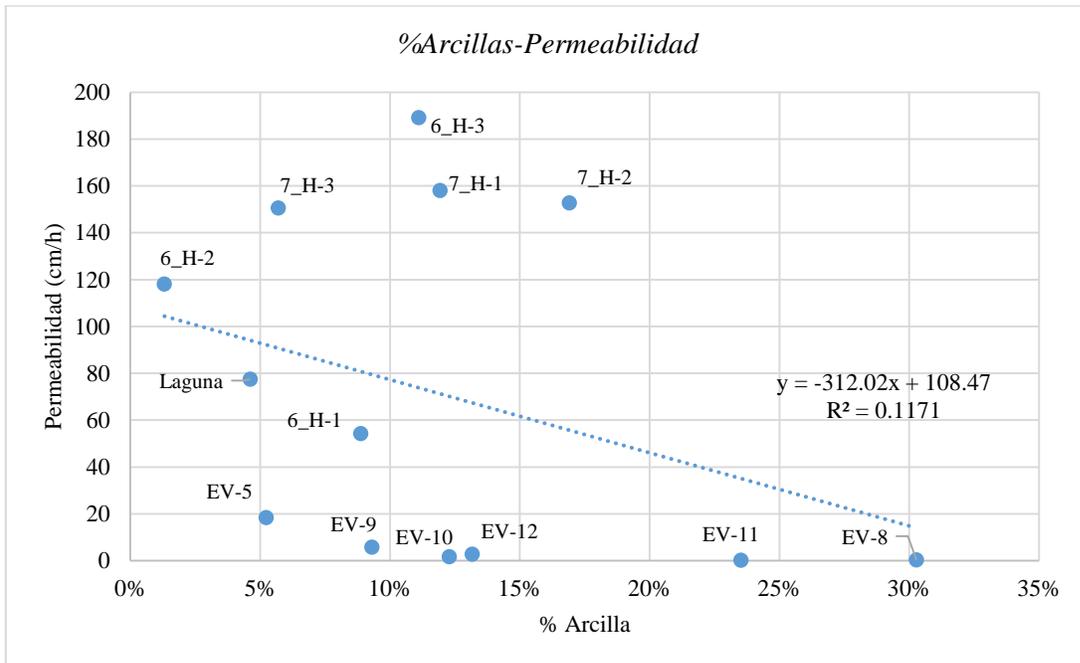


Figura 70. Correlación entre el porcentaje de arcilla y permeabilidad de las muestras

5.14 Litología

En la subcuenca RH27Ac se tienen registradas 10 unidades litológicas (Figura 71). Cabe recordar que el valor del factor que favorece la susceptibilidad ante deslizamientos se definió al comparar la resistencia al ángulo de fricción efectiva (ϕ') y el umbral de pendiente máxima entre las mismas unidades (Barton, 1974, Hoek, 1981, Jibson et al., 2000).

Con este criterio la unidad litológica que se consideró más susceptible corresponde a las lutitas-areniscas y la menos susceptible es la unidad de basalto (Cuadro 25). El orden del factor que contribuye a la susceptibilidad podría cambiar ligeramente por el grado de alteración de los materiales y disminuir sus valores de resistencia en las zonas con abundancia de precipitaciones.

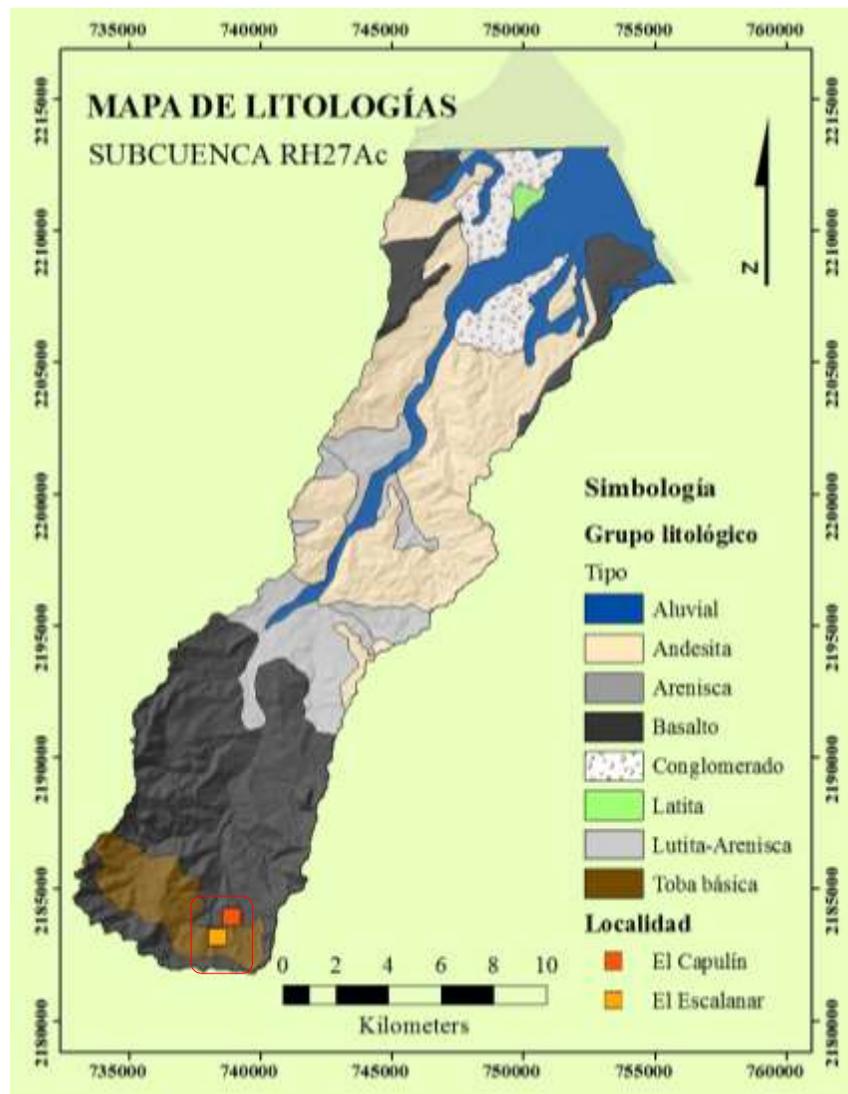


Figura 71. Litología de la subcuenca RH27Ac, de acuerdo a INEGI (2005). El recuadro en color rojo representa la zona del deslizamiento

Cuadro 25. Clasificación de grupos litológicos y sus propiedades geomecánicas. Modificado de Barton (1974), Hoek (1981), Jibson et al. (2000).

No.	Grupo litológico	ϕ'	Umbral de pendiente ($^{\circ}$)	Nivel del factor
1	Lutita-arenisca	25	45	6
2	Aluvial	30	45	5
3	Conglomerado	32	50	4
4	Arenisca	35	45	3
5	Toba básica	35	60	3
6	Andesita	40	60	2
7	Latita	40	60	2
8	Basalto	42	60	1

5.15 Suelos representativos

La Figura 72 corresponde a los suelos representativos en los alrededores del caso de estudio. En esta escala sólo se menciona a los andosoles. Las principales propiedades ándicas fueron verificadas en campo, como bajas densidades aparentes, reacción positiva a la presencia de minerales de bajo orden estructural. Los materiales que subyacen estos suelos tienen una variedad de propiedades, tal como los expuestos en el caso de estudio.

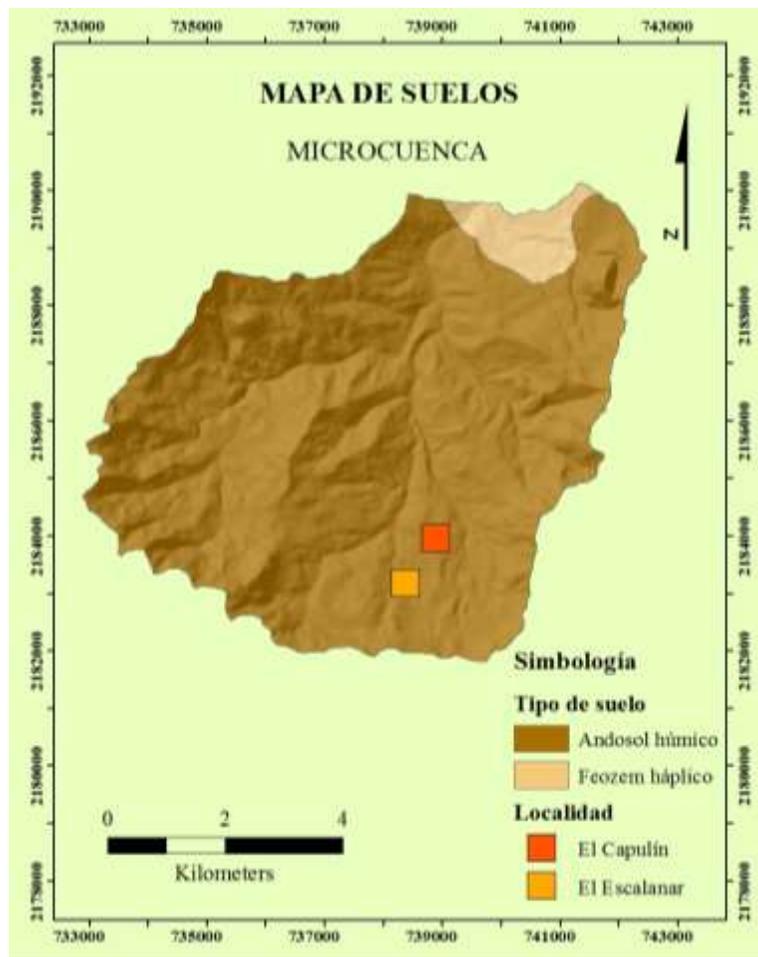


Figura 72. Suelos representativos en los alrededores del deslizamiento, de acuerdo a INEGI (2017)

En la Figura 73 se presentan los suelos representativos en toda la subcuenca. Es visible que los suelos de tipo andosol sólo se localizan en el primer tercio de la subcuenca en las superficies de mayor altitud. El tipo de suelo es de utilidad para localizar sitios semejantes al caso de estudio y estimar sus alcances.

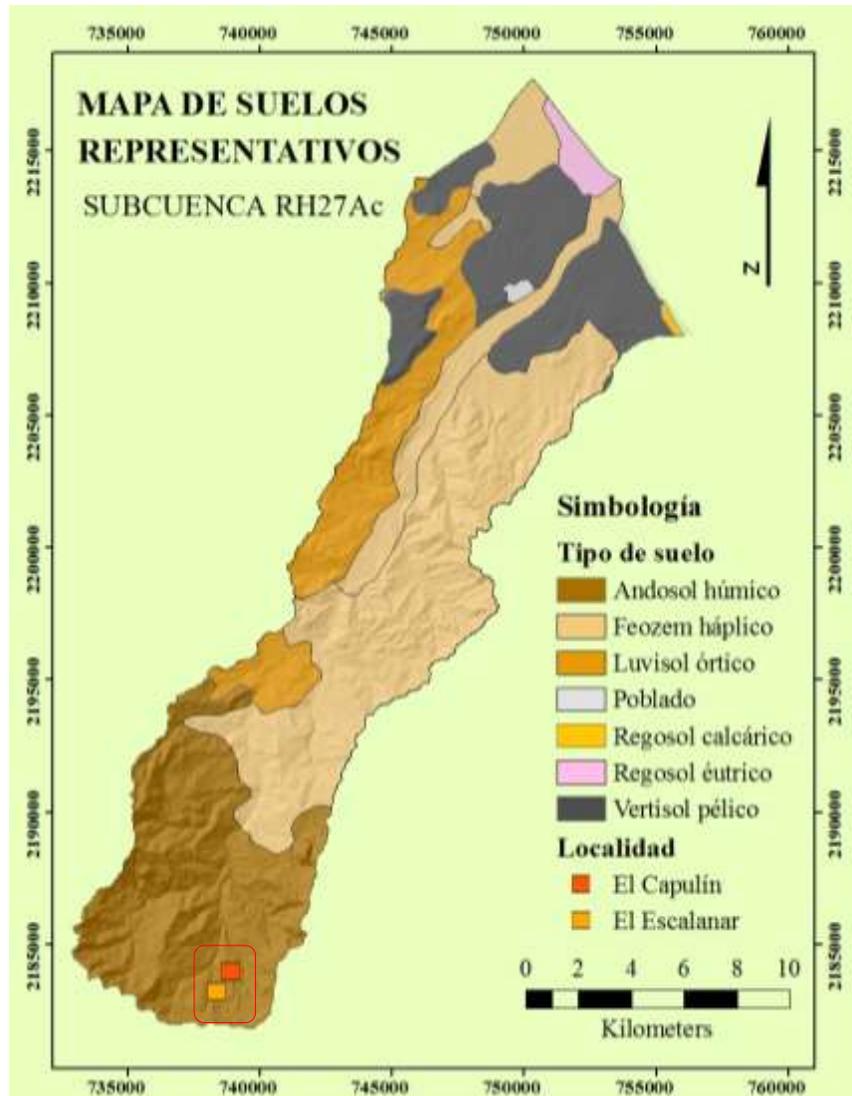


Figura 73. Suelos representativos de la subcuenca RH27Ac, de acuerdo a INEGI (2017). El recuadro en color rojo representa la zona del deslizamiento y flujo de materiales

5.16 Unidades climáticas

Las zonas con mayor grado de intemperismo proporcionan a los materiales de cada región propiedades y valores de resistencia particulares. En los alrededores del deslizamiento predomina el clima templado húmedo (Figura 74).

Las unidades climáticas en la subcuenca reportadas por el INEGI (2017) corresponden a templado húmedo C (m), cálido subhúmedo Aw1 (w), semicálido húmedo (A) C (fm), cálido húmedo Af (m) y Am (f) (Figura 75). Se considera que las zonas con mayor grado de alteración por las condiciones del clima predominante sobre los materiales, se puede establecer por la cantidad de precipitación y la

posición en el relieve. Al revisar los mapas de isoyetas, se observa que el aumento en el valor de la lámina de precipitación está relacionada directamente con el aumento de la altitud. La unidad climática abarca una superficie semejante a los suelos reportados de tipo andosol en esta escala. La unidad climática templada húmeda se considera que tiene el valor más alto del factor que contribuye a la susceptibilidad ante deslizamientos y flujo de materiales (Cuadro 26).

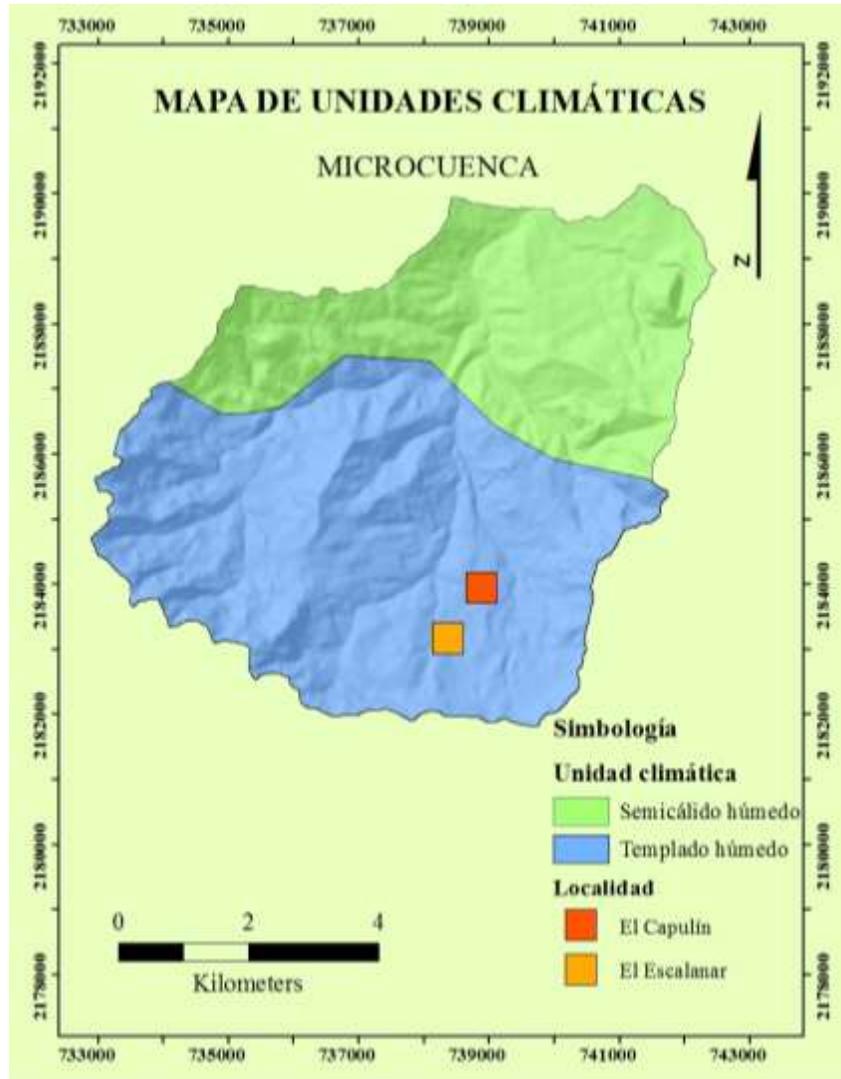


Figura 74. Clima predominante en los alrededores del deslizamiento, de acuerdo a INEGI (2017)

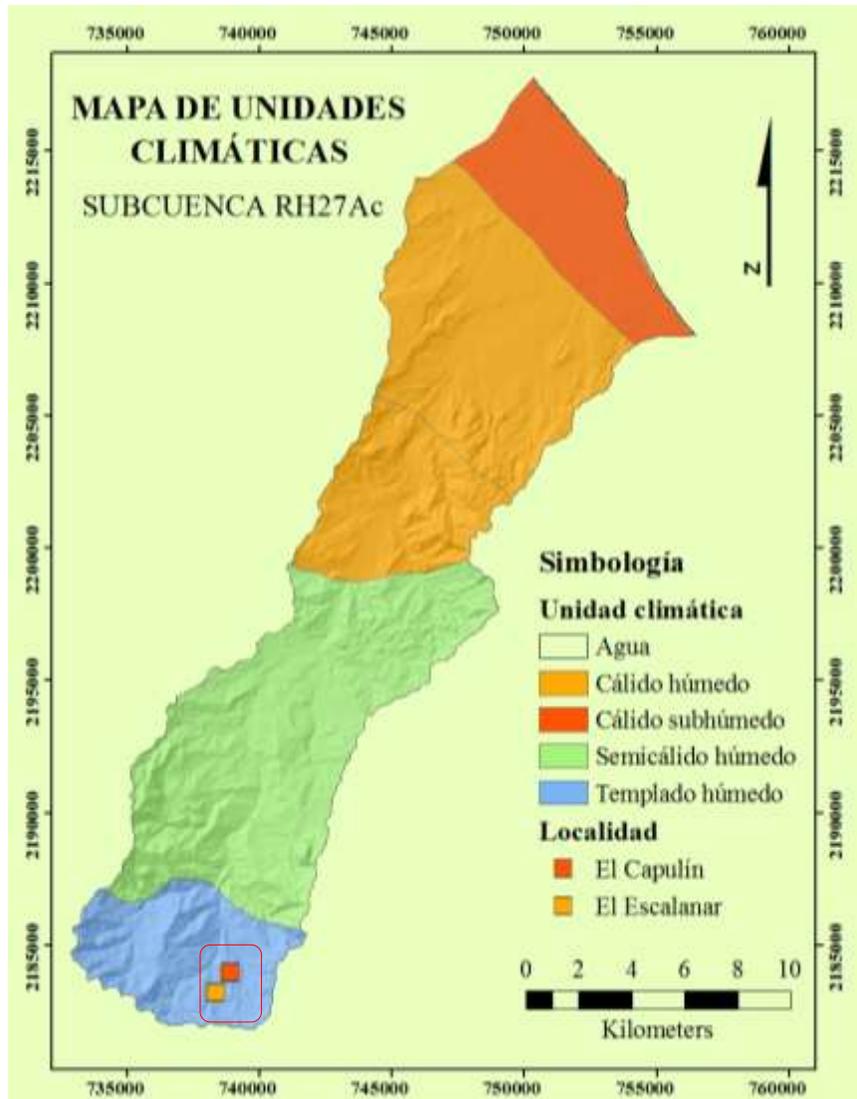


Figura 75. Unidades climáticas de la subcuenca RH27Ac, de acuerdo a INEGI (2017). El recuadro en color rojo representa la zona del deslizamiento

Cuadro 26. Clasificación de unidades climáticas de la RH27Ac

No.	Clima	Valor del factor
1	Templado húmedo C(m)	5
2	Cálido subhúmedo Aw1(w)	4
3	Semicálido húmedo (A)C(fm)	3
4	Cálido húmedo Af (m)	2
5	Cálido húmedo Am (f)	2

5.17 Altitudes

La Figura 76 permite visualizar intervalos de altitudes en los alrededores del caso de estudio. De la misma manera, a través de la Figura 77 se visualizan los intervalos de altitudes de las zonas serranas hasta llegar a la costa. Ambas figuras presentan las zonas que se encuentran en un intervalo de alturas

de acuerdo con una distribución natural (Smith, 2015) y se analizaron con el histograma (Figura 78) para la generación de las clases de intervalos (Cuadro 27).

Se consideró que las zonas de mayor altitud tienen más energía potencial acumulada, además de que el relieve es irregular y los materiales que lo integran frecuentemente resultan inestables, dichas zonas se localizan en las superficies próximas al parteaguas de la subcuenca. También se observó que el parteaguas está relacionado con la presencia de zonas de alteración por fluidos hidrotermales. Las superficies ubicadas a mayor altitud son consideradas con el valor más alto del factor que contribuye a la susceptibilidad ante deslizamientos.

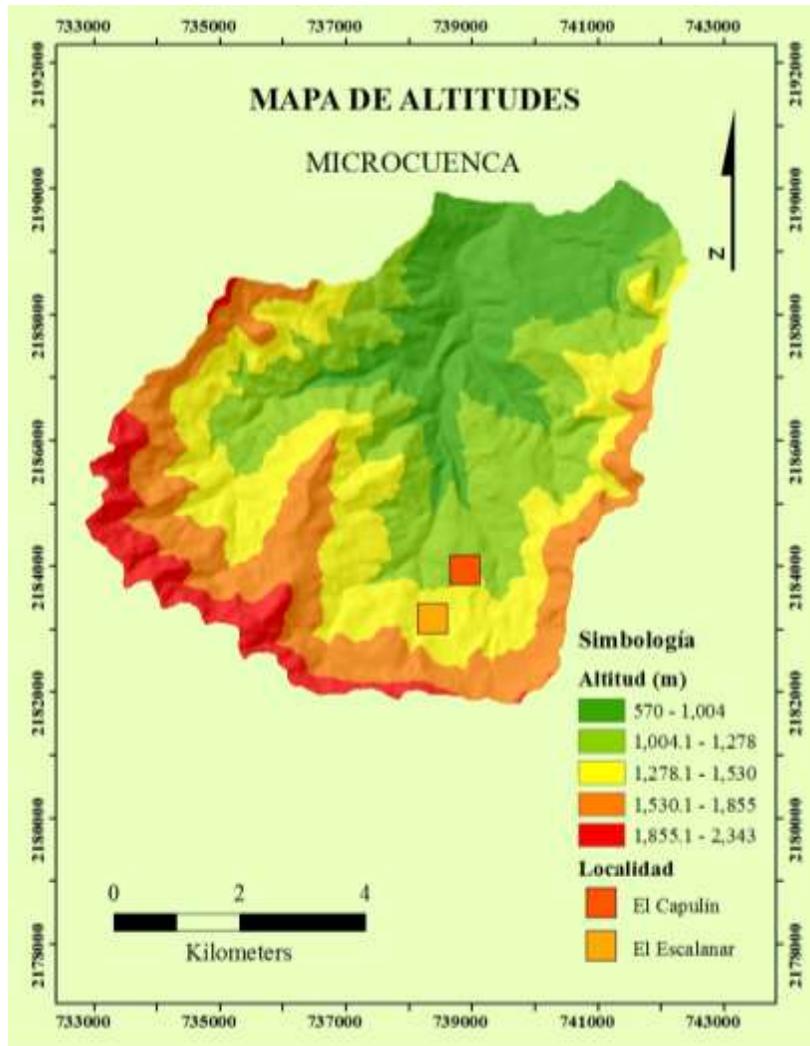


Figura 76. Altitudes a escala microcuenca, de acuerdo a INEGI (2017)

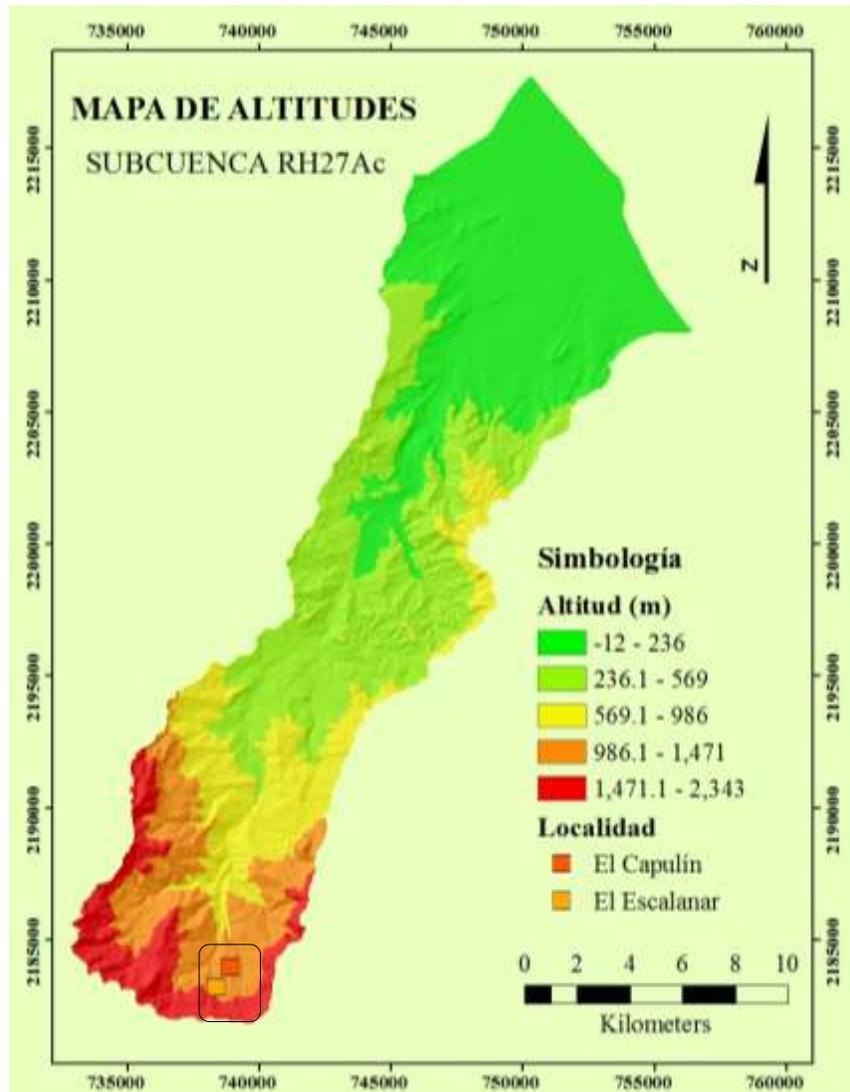


Figura 77. Altitudes de la subcuenca RH27Ac, de acuerdo a INEGI (2017)

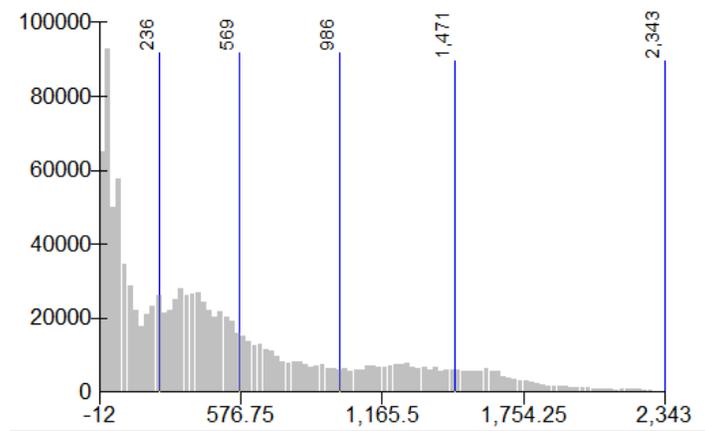


Figura 78. Histograma del mapa de altitudes de la subcuenca RH27Ac aplicando el método de cortes naturales (jenks). Los valores del eje de las abscisas representan las altitudes, el eje de las ordenadas representa la frecuencia de los valores representados.

Cuadro 27. Clasificación de altitudes de la RH27Ac

No.	Rango de altitud (m)	Valor del factor
1	-12 - 236	1
2	236.1 - 569	2
3	569.1 - 986	3
4	986.1 - 1471	4
5	1471.1 - 2343	5

5.18 Pendientes

En la Figura 79 se observa en los bordes del parteaguas las superficies con pendientes pronunciadas. Para toda la subcuenca (Figura 80) el intervalo de mayores pendientes corresponde el máximo valor del factor que contribuye a la susceptibilidad y el intervalo de menores pendientes corresponde al menor valor (Cuadro 28). En el histograma de la Figura 81 se observa que conforme aumenta el valor de pendiente, la frecuencia va disminuyendo, es decir, los sitios muy escarpados son los menos predominantes. Se asignaron 5 intervalos resultado del análisis con el método de cortes naturales (ArcMap, 2017).

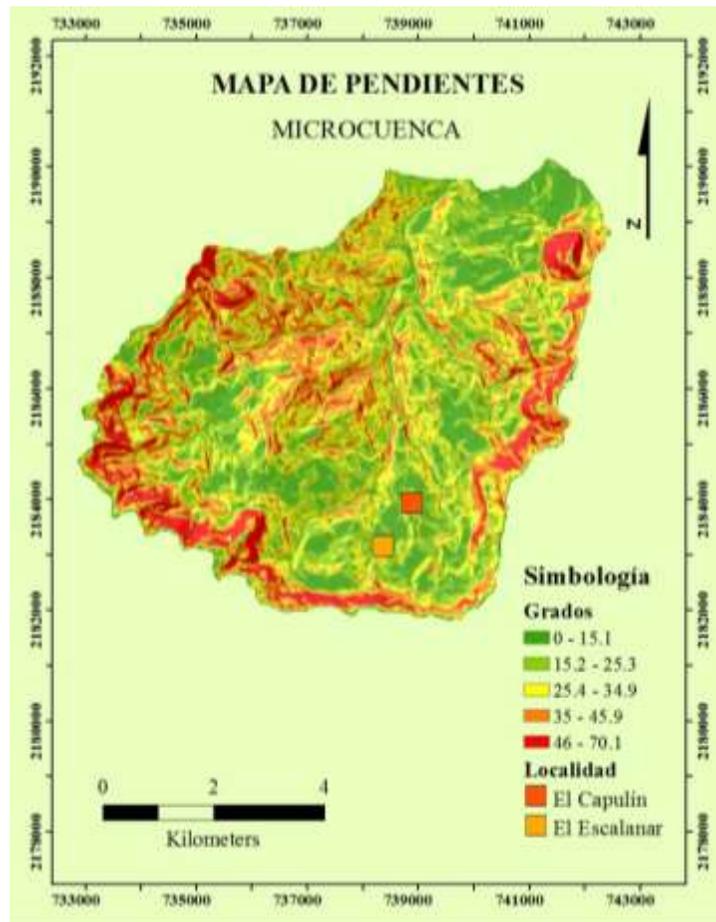


Figura 79. Pendientes a escala microcuenca, de acuerdo a INEGI (2017)

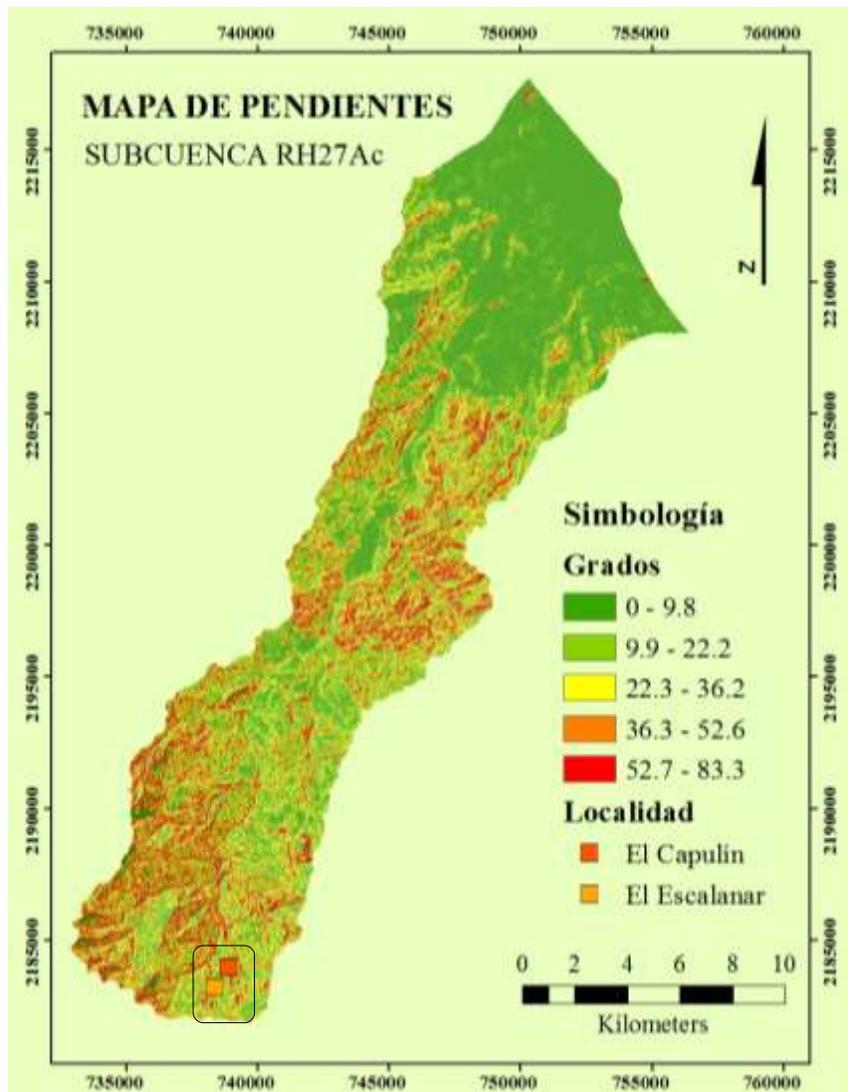


Figura 80. Pendientes de la RH27Ac, de acuerdo a INEGI (2017)

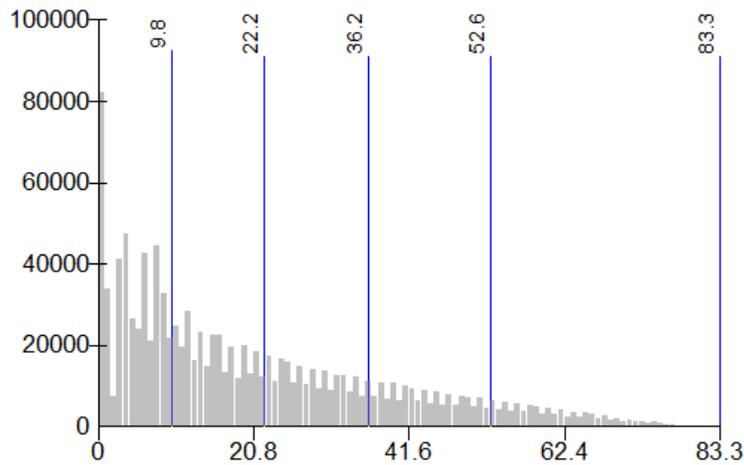


Figura 81. Histograma del mapa de pendientes aplicando el método de cortes naturales (jenks). Los valores del eje de las abscisas representan las pendientes en grados, el eje de las ordenadas representa la frecuencia de los valores representados.

Cuadro 28. Clasificación de pendientes de la RH27Ac

No.	Pendiente (°)	Nivel del factor
1	0 – 9.8	1
2	9.9 – 22.2	2
3	22.3 – 36.2	3
4	36.3 – 52.6	4
5	52.7 – 83.3	5

5.19 Curvaturas

La Figura 82 muestra valores de referencia para definir zonas susceptibles ante flujos de masas. Cabe recordar que valores de salida para un relieve moderado varían de -0.5 a 0.5 y para un relieve escarpado, los valores pueden variar entre -4 a 4 (funciones ArcMap). Los valores que dominan la superficie se encuentran en el intervalo de -1.22 a 0.34 (color verde) y corresponden a un relieve moderado. Los intervalos extremos de -28.9 a -5.28 y 4.41 a 28.5 representan ruido en la imagen y esos píxeles no son considerados. El intervalo de -5.27 a -1.23 coincide con el cauce de los ríos y por consiguiente se considera que es el de mayor valor para formar flujos de materiales, cuando la matriz dominante supera su límite líquido.

La Figura 83 muestra las curvaturas en toda la subcuenca. Se verifica nuevamente que los intervalos extremos representan principalmente ruido y los cauces principales coinciden con las zonas de mayor susceptibilidad ante flujos de masas. El Cuadro 29 muestra los niveles propuestos de los factores que contribuyen a la susceptibilidad ante deslizamientos.

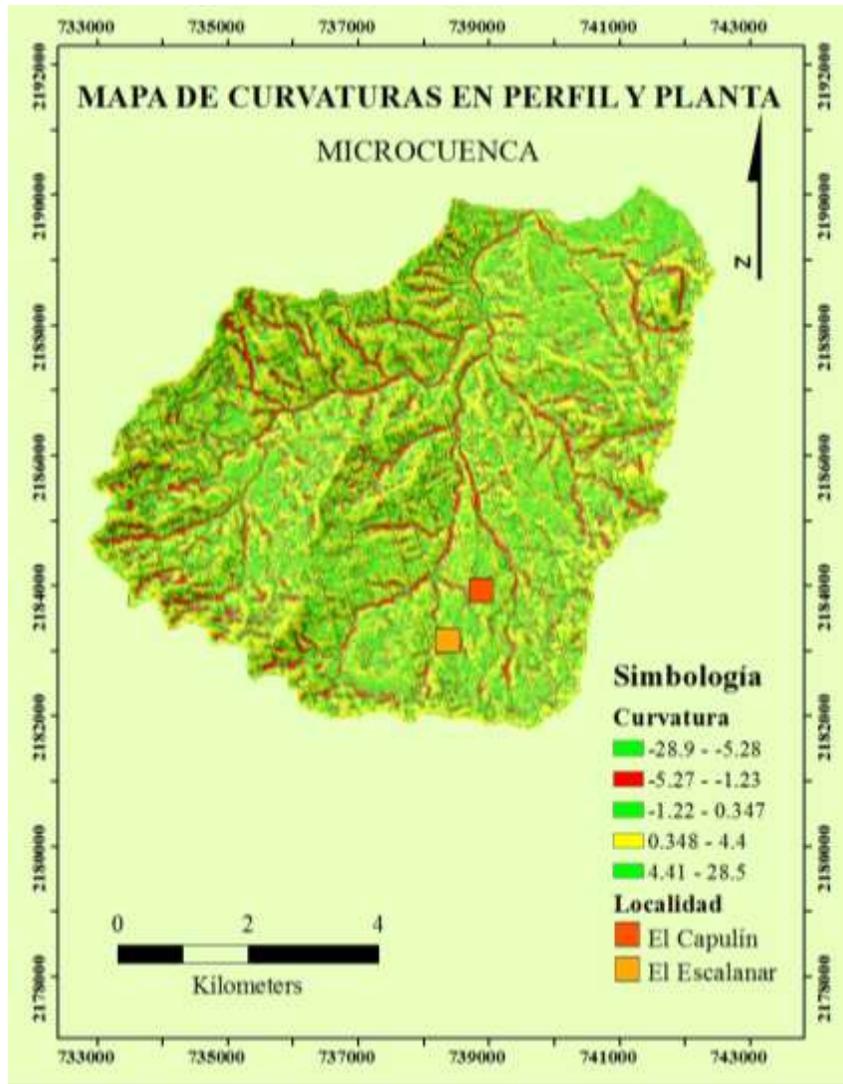


Figura 82. Morfología en planta y perfil de la microcuenca, de acuerdo a INEGI (2017)

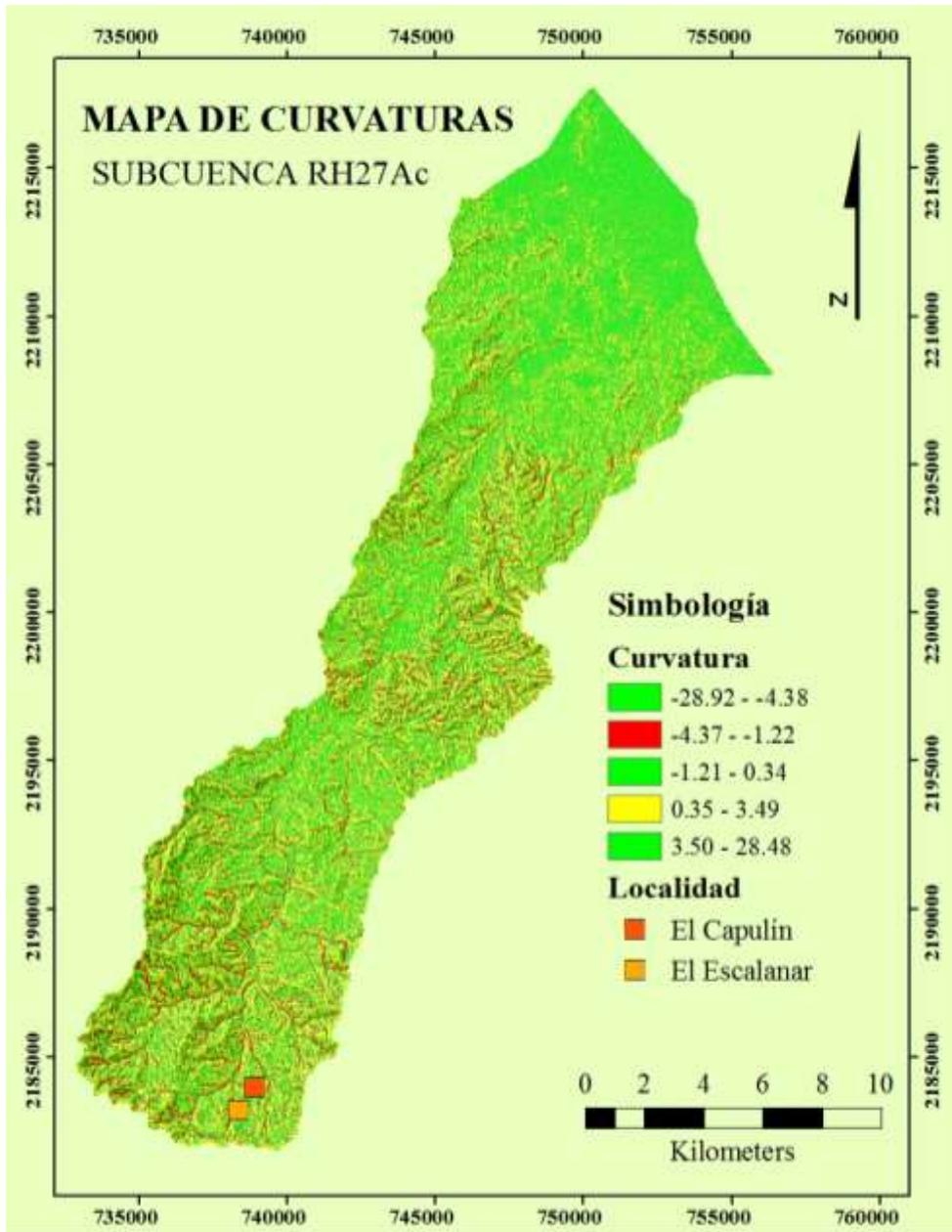


Figura 83. Morfología de laderas en perfil y planta de la subcuenca RH27Ac, de acuerdo a INEGI (2017)

Cuadro 29. Clasificación de curvaturas de la RH27Ac

No.	Intervalo	Nivel del factor
1	-28.92 - -4.38	No aplica
2	-4.37 - 1.22	3
3	-1.21 - 0.34	1
4	0.35 - 3.49	2
5	3.50 - 28.48	No aplica

5.20 Orientación de laderas

Para definir las clases de este factor condicionante se analizaron las nueve direcciones posibles respecto al Norte: N (337.5°-0°-22.5°), NE (22.5°-67.5°), E (67.5°-112.5°), SE (112.5°-157.5°), S (157.5°-202.5°), SW (202.5°-247.5°), W (247.5°-292.5°), NW (292.5°-337.5°). El terreno plano no tiene dirección de pendiente. En la Figura 84 se presentan las nueve direcciones de laderas en los alrededores del deslizamiento. En la Figura 85 se presentan las mismas nueve direcciones para el resto de la subcuenca.

En la Figura 86 se muestra el histograma de la RH27Ac. Se visualiza de mayor a menor frecuencia las nueve orientaciones respectivamente: NE, E, NW, SE, N, W, S y SW. Nótese que todas las corrientes se unen al cauce principal que tiene la dirección NE y es en esa misma dirección por donde continuaron fluyendo los materiales del caso de estudio; entonces ésta dirección es la que se considera con el mayor valor del factor que condiciona a formar flujos de materiales posteriores a un deslizamiento de gran magnitud (Cuadro 30).

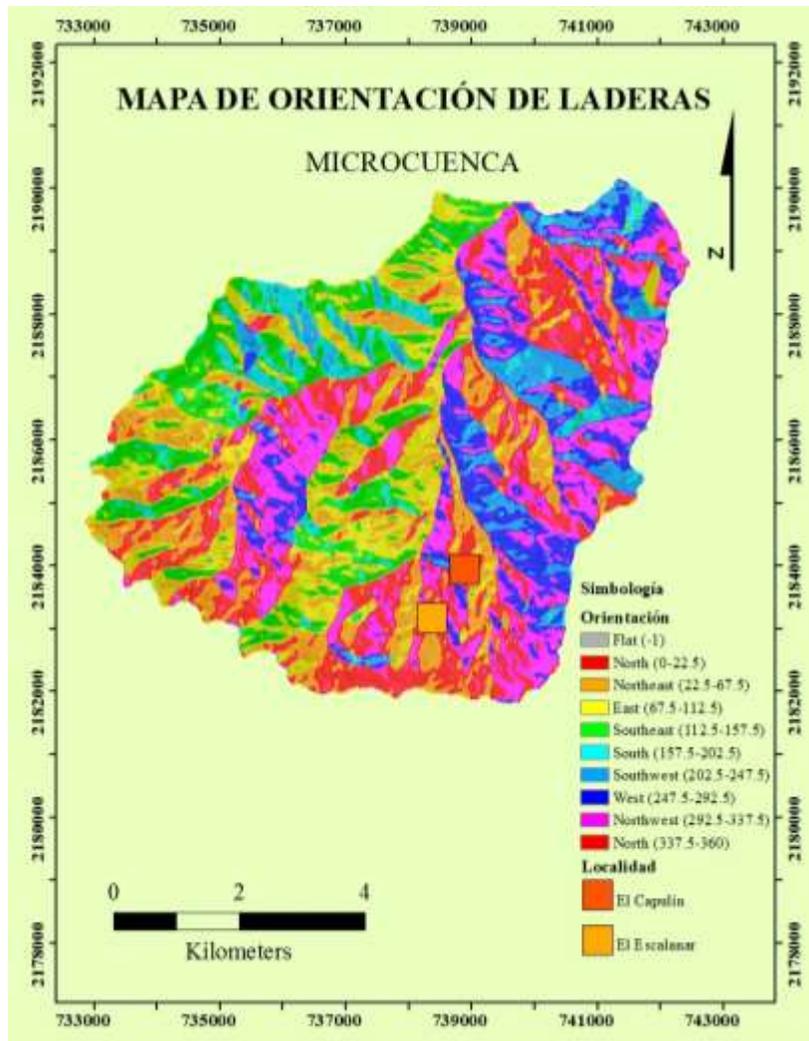


Figura 84. Orientación de laderas a escala microcuenca, de acuerdo a INEGI (2017)

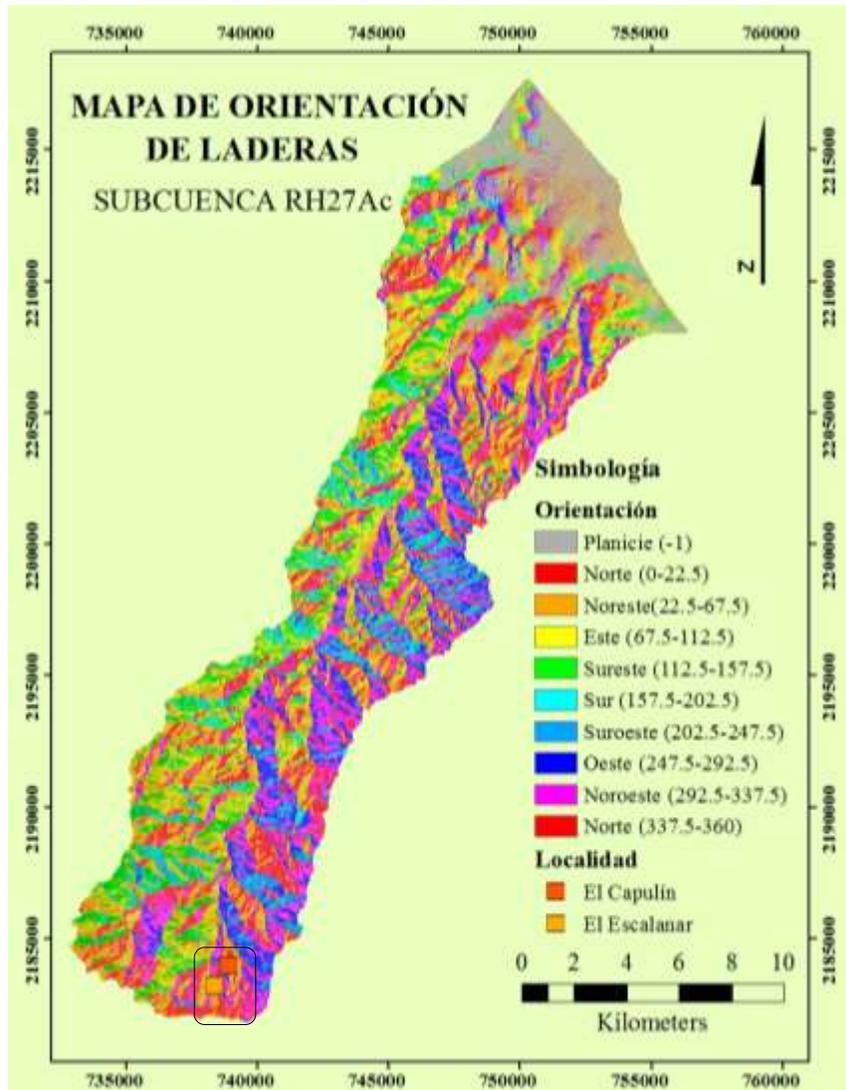


Figura 85. Orientación de laderas de la subcuenca RH27Ac, de acuerdo a INEGI (2017)

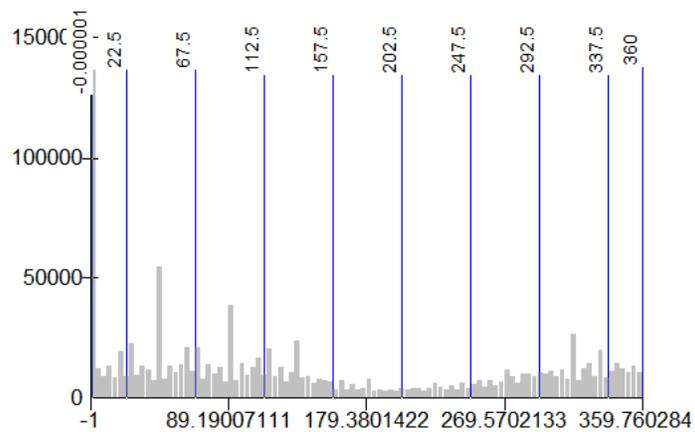


Figura 86. Histograma del mapa de la orientación de las laderas de la subcuenca de la RH27Ac aplicando el método de intervalos iguales. Los valores del eje de las abscisas representan las orientaciones en grados, el eje de las ordenadas representa la frecuencia de los valores representados.

Cuadro 30. Clasificación de orientaciones de laderas de la RH27Ac

No.	Orientación de ladera	Nivel del factor
1	Planicie (-1)	1
2	N (0-22.5)	4
3	NE (22.5-67.5)	8
4	E (67.5-112.5)	7
5	SE (112.5-157.5)	5
6	S (157.5-202.5)	2
7	SW (202.5-247.5)	1
8	W (247.5-292.5)	3
9	NW (292.5-337.5)	6

5.21 Coberturas y usos de suelo

Los componentes de usos y coberturas de suelo se ordenaron jerárquicamente de acuerdo a la experiencia obtenida en la zona de El Capulín y la información regional recopilada. El uso de suelo donde ocurrió el deslizamiento corresponde a pastizales cultivados rodeados por bosque mesófilo de montaña con vegetación secundaria y arbórea (Figura 87). Seguido se encuentra el uso de agricultura de temporal permanente intercalado con pastizales cultivados. El cambio de uso de suelo para pastizales y agricultura fue el factor que se consideró con mayor peso en favor de la susceptibilidad ante deslizamientos (Cuadro 31).

Las 16 unidades definidas en la subcuenca se reclasificaron en siete grupos de referencia

Cuadro 31. Clasificación de coberturas y usos de suelo de la RH27Ac, de acuerdo a INEGI (2017)

No.	Coberturas y usos de suelo	Grupos	Nivel del factor
1	Pastizal cultivado	Pastizales	7
2	Pastizal inducido		
3	Agricultura de temporal permanente	Agricultura	6
4	Agricultura de temporal anual		
5	Agricultura de humedad anual y permanente		
6	Agricultura de humedad anual y semipermanente		
7	Vegetación secundaria arbustiva de la Selva Alta Perennifolia	Vegetación secundaria arbustiva y arbórea de la SAP	5
8	Vegetación secundaria arbórea de la Selva Alta Perennifolia		
9	Vegetación secundaria arbustiva del Bosque Mesófilo de Montaña	Vegetación secundaria arbustiva y arbórea del BMM	4
10	Vegetación secundaria arbórea del Bosque Mesófilo de Montaña		
11	Vegetación de Galería	Vegetación y bosque de galería	3
12	Bosque de Galería		
13	Bosque Mesófilo de Montaña	Bosque Mesófilo de Montaña	2
14	Vegetación de duna	Vegetación costera	1
15	Manglar		
16	Tular		

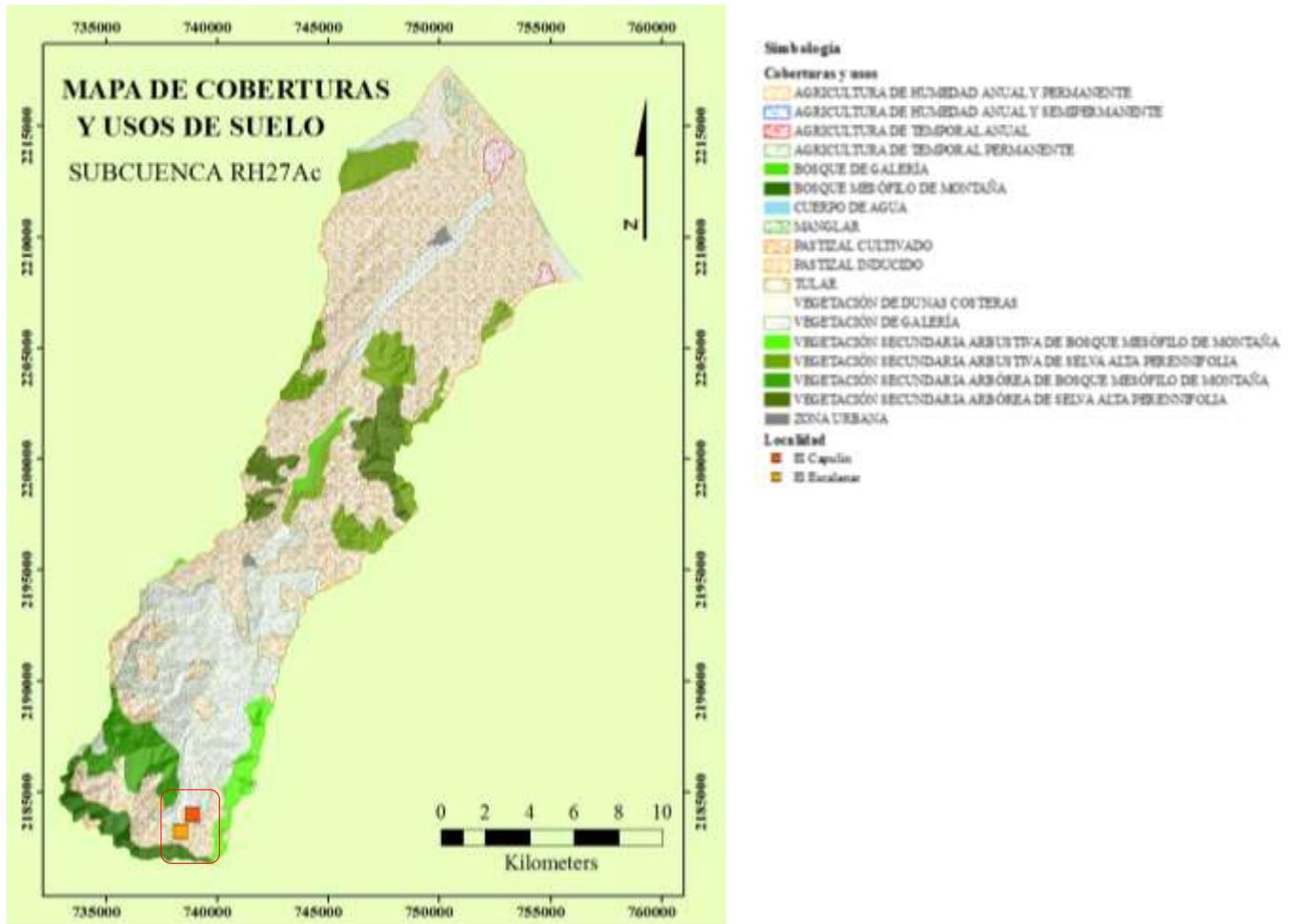


Figura 87. Coberturas y usos de suelo de la subcuenca RH27Ac, de acuerdo a INEGI (2017)

5.22 Susceptibilidad de zonas semejantes al deslizamiento y flujo de materiales

En primer lugar destaca la condición de que el deslizamiento está localizado sobre una litología de toba básica con una resistencia al esfuerzo cortante efectivo estimada de 35° y con un umbral de pendiente de hasta 60° encontrada entre la primera zona de mayor altitud del parteaguas, de composición basáltica y la segunda zona de transición toba-basalto.

Otra condición observada en el deslizamiento es que el suelo mineral es de tipo andosol y éstos tienen porosidades muy altas que favorecen la infiltración a estratos más consolidados y que generan superficies de diferente competencia mecánica, entonces se incluye una capa donde se encuentran los suelos de tipo andosol.

Otro factor condicionante considerado fue la orientación de laderas junto con la condición de que el deslizamiento se encontró sobre un cambio de uso de suelo para pastizales cultivados y agricultura. Para ello se activaron las superficies con un uso de suelo que estuvieran dedicadas al pastoreo y a la agricultura.

La unidad climática expone las propiedades de los suelos y materiales geológicos y tiene una cobertura muy semejante a los suelos con propiedades ándicas.

Los sitios que cumplen estas condiciones se presentan en la Figura 88 y corresponden a los pixeles marcados en rojo y las localidades expuestas.

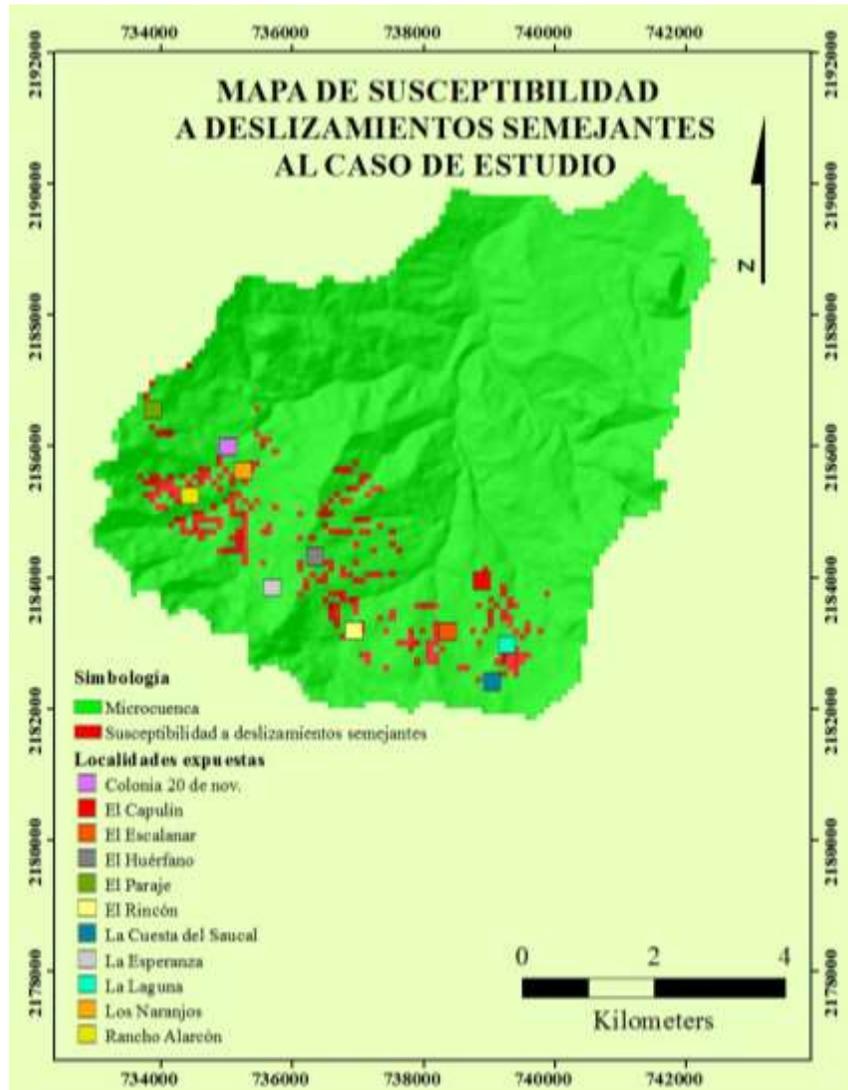


Figura 88. Susceptibilidad a desarrollar deslizamientos semejantes al caso de estudio y las comunidades que se encuentran expuestas

Es posible visualizar que al menos 11 localidades están localizadas sobre sitios susceptibles a desarrollar un deslizamiento similar y con los mismos factores condicionantes que se encontraron en los alrededores de El Escalanar y El Capulín. En la Figura 89 se observan algunas huellas de deslizamientos ya ocurridos en las zonas susceptibles propuestas.

Con la experiencia del deslizamiento de estudio y de acuerdo a la información proporcionada por los pobladores y representantes de Protección Civil, las familias fueron desalojadas a tiempo y aceptaron reunirse en albergues. Esto refleja la magnitud del evento y la confianza entre las comunidades afectadas para abandonar temporalmente sus tierras y sus recursos materiales.

Después de este proceso se generaron situaciones no previstas, tales como el traslado de parcelas cultivadas ladera abajo hacia terrenos vecinos y la incomunicación entre comunidades, por lo anterior

algunas familias quedaron divididas. Un ejemplo de esto, es el de jóvenes que laboran en el municipio de Alto Lucero, donde al interrumpirse el acceso a sus comunidades no pudieron regresar a sus hogares. Posteriormente la limitación en el suministro de víveres también impactó psicológicamente a la gente de las comunidades de El Capulín y El Escalanar. Esto sin mencionar la incomodidad de los pobladores al sobrevivir en los albergues mientras se rehabilitaba la comunicación.

En los recorridos de campo, las comunidades son semejantes por el entorno serrano, aunque no son iguales. En las comunidades del caso de estudio, los pobladores son más desinhibidos para hablar debido a la experiencia del deslizamiento, en comparación de aquellos sitios donde los asentamientos humanos alcanzan las partes de mayor altitud sobre la sierra, tal como El Paraje, donde las personas viven en un entorno cada vez más aislado.



Figura 89. Fotointerpretación en el relieve de deslizamientos en los alrededores del caso de estudio. En la parte superior se observa la comunidad de El Escalanar y en la parte inferior la comunidad de El Capulín

5.23 Susceptibilidad a desarrollar algún tipo de deslizamiento y flujo de materiales en toda la subcuenca

Se realizó un proceso analítico jerárquico (Cuadros 32, 33, 34, 35) entre cada uno de los factores intrínsecos propuestos en toda la región. El factor con mayor importancia propuesto en esta comparación fue la litología, seguido de las unidades climáticas, altitudes, pendiente, curvaturas, orientación de laderas, coberturas y usos de suelo. Para el grado de importancia se utilizó una escala de comparaciones a través de la experiencia adquirida en la zona de estudio, el análisis de la información existente a escala regional e información proporcionada por la gente que conoce la zona.

Cuadro 32. Jerarquización de factores condicionantes en la RH27Ac

<i>¿Cuál de los factores es más importante?</i>			<i>¿Cuál es el grado de importancia?</i>								
<i>Factor A</i>	<i>Mayor importancia</i>	<i>Indicador B</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
Litología	A	Coberturas y usos		X							
Litología	A	Pendiente		X							
Litología	A	Orientación de laderas		X							
Litología	A	Unidad climática		X							
Litología	A	Altitud		X							
Litología	A	Curvaturas		X							
Coberturas y usos	B	Pendiente		X							
Coberturas y usos	B	Orientación de laderas		X							
Coberturas y usos	B	Unidad climática		X							
Coberturas y usos	B	Altitud		X							
Coberturas y usos	B	Curvaturas		X							
Pendiente	A	Orientación de laderas		X							
Pendiente	B	Unidad climática		X							
Pendiente	B	Altitud		X							
Pendiente	Igual	Curvaturas	X								
Orientación de laderas	B	Unidad climática		X							
Orientación de laderas	B	Altitud		X							
Orientación de laderas	B	Curvaturas		X							
Unidad climática	Igual	Altitud	X								
Unidad climática	A	Curvaturas		X							
Altitud	A	Curvaturas		X							

Cuadro 33. Escala de comparación de factores utilizada en un proceso analítico jerárquico, de acuerdo a Saaty (2008)

<i>Valor</i>	<i>Escala de comparaciones</i>
1	Son igualmente importante
2	Entre igualmente y moderadamente importante
3	Moderadamente importante
4	Entre moderadamente y fuertemente importante
5	Fuertemente importante
6	Entre fuertemente y muy fuertemente importante
7	Muy fuertemente importante
8	Entre muy fuertemente y extremadamente importante
9	Extremadamente importante

Cuadro 34. Matriz de comparación por pares incluyendo la suma de los valores por columna y su inverso en un proceso analítico jerárquico

	<i>Litología</i>	<i>Coberturas y usos</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Orientación de laderas</i>	<i>Unidad climática</i>	<i>Altitud</i>	<i>Curvaturas</i>
<i>Litología</i>	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
<i>Coberturas y usos</i>	0.50	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
<i>Pendiente</i>	0.50	2.00	1.00	2.00	0.50	0.50	1.00
<i>Orientación de laderas</i>	0.50	2.00	0.50	1.00	0.50	0.50	0.50
<i>Unidad climática</i>	0.50	2.00	2.00	2.00	1.00	1.00	2.00
<i>Altitud</i>	0.50	2.00	2.00	2.00	1.00	1.00	2.00
<i>Curvaturas</i>	0.50	2.00	1.00	2.00	0.50	0.50	1.00
<i>Total</i>	4.00	13.00	9.00	11.50	6.00	6.00	9.00
<i>1/Total</i>	0.250	0.077	0.111	0.087	0.167	0.167	0.111

Cuadro 35. Peso de cada factor condicionante resultado del proceso analítico jerárquico

	<i>Litología</i>	<i>Coberturas y usos</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Orientación de laderas</i>	<i>Unidad climática</i>	<i>Altitud</i>	<i>Curvaturas</i>	<i>Suma</i>	<i>Peso</i>	<i>Prioridad</i>
<i>Litología</i>	0.25	0.15	0.22	0.17	0.33	0.33	0.22	1.69	0.24	1
<i>Coberturas y usos</i>	0.13	0.08	0.06	0.04	0.08	0.08	0.06	0.52	0.07	5
<i>Pendiente</i>	0.13	0.15	0.11	0.17	0.08	0.08	0.11	0.84	0.12	3
<i>Orientación de laderas</i>	0.13	0.15	0.06	0.09	0.08	0.08	0.06	0.64	0.09	4
<i>Unidad climática</i>	0.13	0.15	0.22	0.17	0.17	0.17	0.22	1.23	0.18	2
<i>Altitud</i>	0.13	0.15	0.22	0.17	0.17	0.17	0.22	1.23	0.18	2
<i>Curvaturas</i>	0.13	0.15	0.11	0.17	0.08	0.08	0.11	0.84	0.12	3

Total 7 1 5

Con este criterio de comparaciones se obtuvieron cada uno de los pesos de cada factor condicionante y la combinación lineal resultó en:

$$SDF = L (0.24) + UC (0.18) + Al (0.18) + P (0.12) + C (0.12) + O (0.09) + US (0.07) \quad (16)$$

Al realizar la operación de cada uno de los factores con sus pesos, se obtuvieron las zonas susceptibles a desarrollar algún tipo de deslizamiento en toda la subcuenca (Figura 90). Con este criterio se estimó el porcentaje que ocupa la superficie por nivel de susceptibilidad (Cuadro 36).

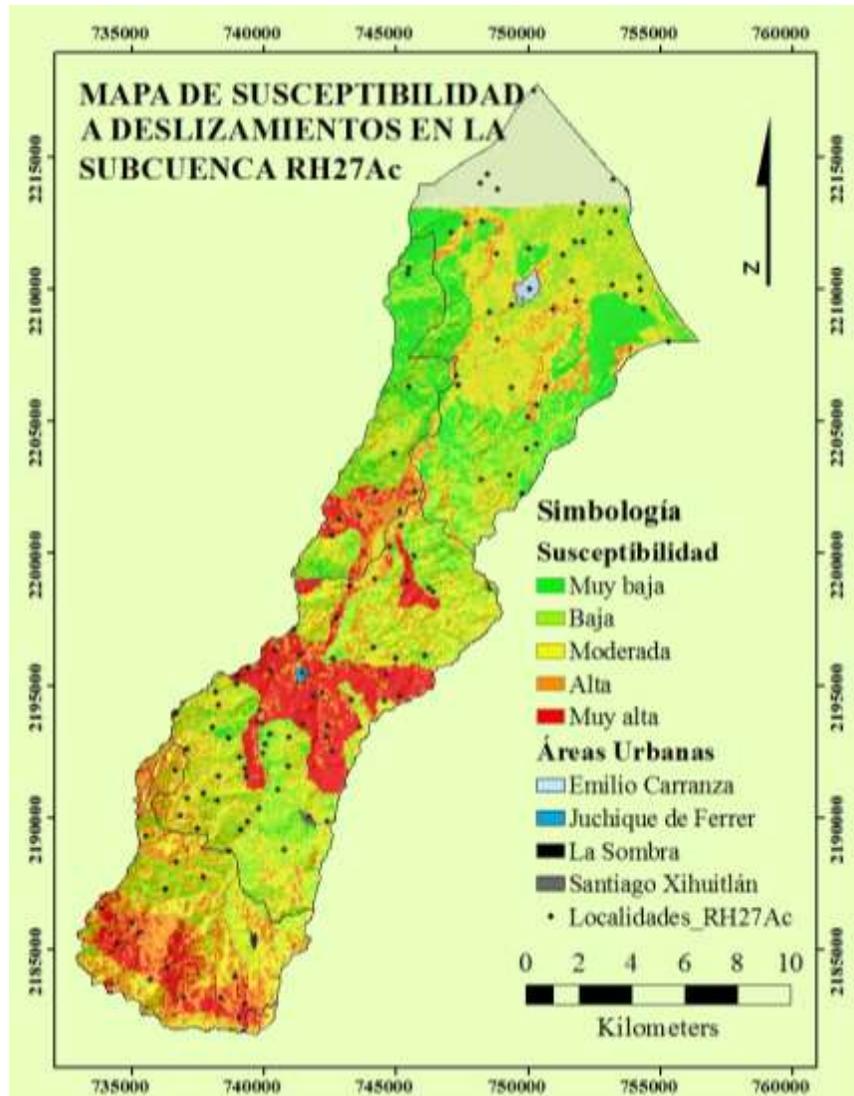


Figura 90. Susceptibilidad a desarrollar algún tipo de deslizamiento en toda la subcuenca en localidades rurales y zonas urbanas expuestas

Cuadro 36. Nivel de susceptibilidad en porcentaje de la superficie RH27Ac

<i>Nivel de susceptibilidad</i>	<i>Porcentaje de la superficie RH27Ac</i>
Muy baja	12.29%
Baja	28.50%
Moderada	32.17%
Alta	15.01%
Muy alta	12.04%

Para la subcuenca, el 12.29% de la superficie presenta una muy baja susceptibilidad, el 28.50% tiene una baja susceptibilidad, el 32.17% tiene una moderada susceptibilidad. El 15.01% presenta una alta susceptibilidad y el 12.04% una muy alta susceptibilidad (Figura 91). Los municipios que tienen muy

alta susceptibilidad a deslizamientos y flujos son Juchique de Ferrer (26 localidades), Chiconquiaco (11 localidades) y Colipa (5 localidades) respectivamente (Cuadro 37).

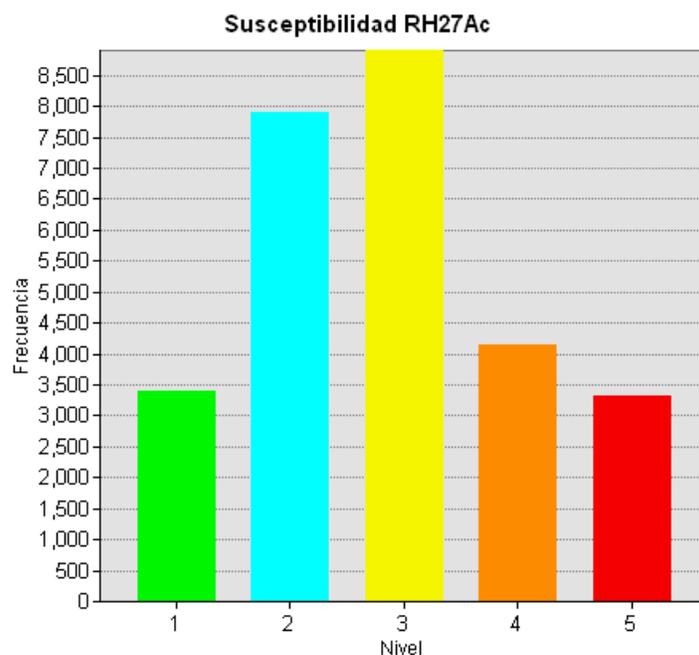


Figura 91. Histograma que representa porcentualmente los 5 niveles de susceptibilidad en la superficie RH27Ac

Para validar la Figura 90 se revisaron registros históricos de movimientos en el terreno en las zonas propuestas. Tal es el caso de la zona marcada con muy alta susceptibilidad ante deslizamientos y flujos, ejemplo de ello son los eventos ocurridos en el municipio de Juchique de Ferrer (Figura 92). Adicionalmente se entrevistó a gente que conoce la región y afirman que el terreno en dicho municipio es muy inestable o en su lenguaje, “muy fangoso”.

Cuadro 37. Localidades susceptibles a deslizamientos en la subcuenca RH27Ac

<i>Subcuenca RH27Ac</i>	
<i>Municipio</i>	<i>Localidades con alta o muy alta susceptibilidad a deslizamientos y flujos de materiales</i>
Chiconquiaco	1. Colonia 20 de Noviembre, 2. El Capulín, 3. El Escalanar, 4. El Huérfano, 5. El Paraje, 6. El Rincón, 7. La Cuesta del Saucal, 8. La Esperanza, 9. La Laguna, 10. Los Naranjos, 11. Rancho Alarcón
Colipa	1. Coyolillo, 2. El Limonario, 3. La Ceiba, 4. La Pahua, 5. Vista Hermosa
Juchique de Ferrer	1. Colonia Libres del Norte, 2. Colonia Libres del Sur, 3. Corralitos, 4. El Campamento, 5. El Mirador 6. El Rubí, 7. El Tecolote, 8. Flor de Chilpancingo, 9. Jardines de Juchique, 10. Juchique de Ferrer, 11. La Aurora, 12. La Esmeralda, 13. La Fila, 14. La Gloria, 15. La Nueva Reforma, 16. Las Pailas, 17. La Pita, 18. Loma Bonita, 19. Loma Hermosa, 20. Loma de San Nicolás, 21. Los Laureles de Belén, 22. Miguel Fernández Barradas, 23. Puente Colgante, 24. Rancho Naolinco, 25. San Juan del Río, 26. Santa Rosa Norte



Figura 92. Ejemplos del tipo de daños mostrados en la carretera entre las localidades del municipio de Juchique de Ferrer y Plan de las Hayas antes de llegar a la colonia Libres, por precipitaciones del 18 de septiembre de 2010 (izquierda) y el tramo de carretera Colipa-Dehesa por un deslizamiento ocurrido el 18 de septiembre de 2017 (derecha)

6. DISCUSIÓN

6.1. Sensores remotos y observaciones de campo

Las imágenes de los satélites Landsat y Sentinel-2 están limitadas por su resolución espacial y sólo aquellos cambios en el relieve que en magnitud espacial son considerables, como en el caso de estudio, pueden ser percibidos e inventariados de manera remota, debido a la forma del deslizamiento (visto desde planta) y el subsecuente flujo de materiales. Aquellos cambios de menor magnitud, generan incertidumbre si se trata o no de un deslizamiento y no es posible discernir sólo con imágenes a esta escala. Las imágenes están condicionadas a cada ciclo del sensor para cada toma (18 y 16 días respectivamente), esta resolución temporal condiciona la existencia de tomas con la menor presencia de nubosidad, que con frecuencia obstruyen la visibilidad de la información. En algunos casos no se cumplen estas condiciones y se tiene que recurrir a tomas de meses anteriores.

El procesamiento de estas imágenes también permite zonificar rasgos de metasomatismo a escala regional y es en campo donde se corroboran estos rasgos de alteración por fluidos hidrotermales. Aunque este método geofísico tiene un amplio espectro de aplicación, tal como su uso para zonas de prospección en yacimientos minerales, en este caso el interés radica en la relación que existe entre los sitios con metasomatismo y las huellas de deslizamientos de gran magnitud.

6.1.1 Detección de minerales sobre el deslizamiento

La espectrometría del infrarrojo hace notar que las firmas espectrales de los suelos sobre el deslizamiento son muy particulares. Con esta técnica se sugiere que los minerales donde coinciden los picos de absorción medidos contra los picos de los minerales tipo a través de su firma espectral, resultan en un valor de correlación. La firma espectral de los suelos con propiedades ándicas sobre el deslizamiento, en su mayoría, corresponde al mineral de montmorillonita, aunque los picos de reflectancia de las muestras todavía son tenues por sus curvas suaves, por lo que se sugiere que son sitios donde el vidrio y materiales volcánicos han sido parcialmente alterados por la diagénesis, metasomatismo y el clima templado húmedo, lo que se refleja en su bajo orden estructural. En estos sitios también se detectaron minerales de nontronita. La presencia de vidrio hidratado, nontronita y las tendencias a formar montmorillonita en un estado de bajo orden estructural, sugieren una fase de transición entre el vidrio volcánico y la montmorillonita, sin embargo Gifkins et al., 2005 mencionan que el producto final no siempre pertenece al grupo de las esmectitas.

Los materiales subsuperficiales del flanco izquierdo del deslizamiento presentan una variedad de minerales, aunque abundan los grupos de las micas y plagioclasas, que contrastan con otros depósitos en el mismo flanco, donde se concentran productos de la meteorización de minerales de hierro en ambientes oxigenados o precipitados primarios en ambientes hidrotermales; tal es el caso del sitio EV-12 donde la espectrometría del infrarrojo sugiere la presencia de goethita y otros minerales como la schwertmannita, que son minerales secundarios que se precipitan por el drenaje en el medio poroso y con un alto contenido de sulfato de hierro.

Los sitios clave y de interés, EV-8 y EV-11 sobre el mismo flanco izquierdo, en campo muestran evidencias de que llegaron a un estado líquido. Para el primer caso la espectrometría sugiere la presencia del aluminosilicato moscovita, en el segundo caso se sugiere la presencia de illita como producto de alteración de la moscovita, entre otros minerales secundarios detectados, tales como la lepidolita, mineral que está asociado a fluidos hidrotermales. Como referencia geomecánica, estos sitios tienen relativamente menor Actividad que los suelos superficiales.

Algunos minerales detectados en cavidades de rocas recolectadas sobre el deslizamiento, pertenecen al grupo de las esmectitas y zeolitas, esto puede explicarse por una secuencia de reacciones de hidratación y disolución en dichas rocas portadoras de vidrio volcánico.

Otros minerales detectados con la espectrometría del infrarrojo en las cavidades de rocas dentro del deslizamiento, son la mordenita y clinoptilolita, ambos pertenecientes al grupo de las zeolitas. La mordenita se forma como posible producto secundario de la hidratación de vidrio volcánico y la clinoptilolita puede ser el resultado de la desvitrificación de cristales silíceos y su presencia es muy común en tobas. Aunque Gifkins et al., (2005) menciona que el estado mordenita + clinoptilolita puede representar un estado mineral más estable. En general, el grupo de las zeolitas puede formarse por los fluidos que atravesaron las rocas y la diagénesis clástica después de la hidratación inicial y oxidación del vidrio volcánico. Estos minerales junto con rasgos de clorita también se encontraron en el sitio EV-14, externo al deslizamiento aunque sobre la zona de depósitos volcánicos del mismo parteaguas de la RH27Ac. Estos factores refuerzan la identificación de sitios susceptibles a deslizamientos a través de los materiales con algún tipo de alteración en el pasado y las condiciones templadas húmedas actuales.

De acuerdo a la disponibilidad de recursos, el uso de métodos físicos de difracción de rayos X permite la identificación de sitios clave para explicar el deslizamiento en la zona, tales como los materiales sedimentarios. Estos depósitos que subyacen los materiales residuales y depósitos de ladera, pueden generar zonas susceptibles a deslizamientos y flujos de materiales.

La aplicación de la espectrometría del infrarrojo tiene limitaciones en materiales complejos, tales como minerales opacos y anhidros, como el óxido de silicio encontrado en combinación con carbonato de calcio. Esta técnica no reemplaza la difracción de rayos X aunque tiene la ventaja de discriminar muestras para un posterior análisis de difracción. Esto permite validar las zonas con rasgos de metasomatismo que pueden condicionar los deslizamientos.

6.2. Propiedades de los materiales en el deslizamiento

Los suelos con contenido de aluminio activo tienen matices pardos con sus grados de valor y croma, son los más jóvenes en la zona del deslizamiento y son un indicador de suelos derivados de productos volcánicos poco desarrollados en climas húmedos. Éstos a su vez tienen valores de pH ácidos alrededor de 5 y de acuerdo a valores reportados por Lizcano (2006) en suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia y otros países, también reportan suelos de origen volcánico con pH ácidos, y ninguno alcanza el valor de pH igual a 7. Esta acidez puede ser provocada por la acumulación de iones de hidrógeno provenientes de compuestos químicos disueltos en agua y acarreados por las lluvias, en ellos la concentración ácida permite que otros cationes atrapados como el aluminio se mantenga activos disolviéndose en las soluciones.

En cambio los materiales subsuperficiales de las superficies de falla del flanco izquierdo, alcanzan valores de pH arriba de 7. Estos últimos tienen un proceso más avanzado de consolidación y químicamente parecen tener mayor estabilidad, tienden a disminuir sus matices con variedades de grises, olivas y algunos más rojizos. Por su parte los materiales de origen sedimentario del flanco derecho del deslizamiento tienen matices grises y su pH aumenta considerablemente hasta valores arriba de 9.

Todos los materiales superficiales tienen altas porosidades con muy altas permeabilidades en condiciones saturadas. Por su parte los materiales subsuperficiales expuestos por el flanco izquierdo del deslizamiento tienen menor porosidad y su permeabilidad, de acuerdo a la clasificación de Flores

y Alcalá (2010), es moderada hasta muy lenta, para las muestras clave como EV-8 y EV-11. En cambio, los materiales del flanco derecho tienen una permeabilidad moderada y al parecer no han terminado de consolidarse.

Por su parte los materiales de la superficie de falla del flanco izquierdo del deslizamiento son muy heterogéneos y están ubicados a mayor altitud en comparación con los del flanco derecho, lo que muestra un diferencial de energía potencial que condicionó el deslizamiento. Esto parece indicar que la superficie de falla del flanco derecho que permaneció intacta expone la superficie de origen sedimentario que aparentemente sirvió como “patín” ante los depósitos de ladera ubicados a mayor altitud. Estos materiales sedimentarios no afloran en alguna parte del flanco izquierdo, porque el espesor de los depósitos de ladera es mayor y su reconocimiento en estas zonas serranas, sólo se puede identificar con transectos geofísicos. Además, estos materiales sedimentarios que subyacen los depósitos de ladera, poseen las mayores densidades, son materiales más antiguos con abundancia de carbonato de calcio que tienden a crear superficies de diferencia competencia mecánica y que pueden favorecer los deslizamientos en la región.

6.2.1 Uso y utilidad de la carta de plasticidad

En la carta de plasticidad (ASTM D2487) se verifica que aquellos materiales que tienen el mismo origen geológico, se ubican en grupos a lo largo de una recta paralela a la línea A. La fracción fina de los suelos superficiales del deslizamiento se localiza en dicha carta, en el grupo de limos (MH) con límites líquidos mayores al 50%. Autores como So Ei-Kon (1998), Lizcano (2006), Wesley (2009), ubican a los suelos de origen volcánico, con presencia de alofano, en esta misma zona. La muestra EV-13 obtenida de la matriz del escarpe también se localiza por debajo de la línea A aunque con un límite líquido menor al 50% y con esta misma norma, se clasifica como un limo de baja plasticidad (ML). Este comportamiento es similar a lo reportado por Wesley (2009) en suelos volcánicos de regiones tropicales, tales como las montañas de Nueva Guinea, Java e Indonesia.

Por el contrario, todos los materiales subsuperficiales más antiguos y con un proceso más avanzado de consolidación, se localizan por encima de la línea A de la carta de plasticidad, incluyendo las muestras sedimentarias. Estas últimas también fueron visibles en afloramientos exteriores sobre la comunidad de El Capulín y tienen propiedades muy semejantes en la misma región.

La diferencia entre la ubicación por debajo o por encima de la línea A en materiales con un semejante límite líquido está en la diferencia de su límite plástico. En la zona del deslizamiento los sitios que se encuentran por encima de la línea A tienen un límite plástico menor, es decir, se desmoronan y agrietan más fácilmente, y son los materiales que han padecido metasomatismo junto a procesos de intemperismo por el clima templado húmedo.

Los suelos superficiales producto del intemperismo tropical de productos piroclásticos, presentan límites líquidos altos (mayores al 50%), es decir, necesitan mayor cantidad de agua para llegar a un estado líquido, se considera que es debido a las propiedades ándicas del suelo, y también reportado por el INEGI (2015).

6.2.2 Propiedades texturales

Texturalmente la fracción arcilla de los anteriores materiales es la menos predominante y se observa una tendencia para el caso de estudio, en la abundancia de arenas finas subangulares y limos respectivamente. Lizcano (2006) también reporta la fracción arcilla como la menos predominante para suelos volcánicos de Colombia, Japón y zonas tropicales de Nueva Zelanda, además la fracción

de limos predomina en sus muestras reportadas. Wesley (2009) reporta la abundancia de arenas finas y limos en los suelos volcánicos en el continente asiático.

En relación a la granulometría y forma de los diferentes tamaños de partícula, la abundancia de arenas, gravas y rocas subangulares en la ladera son un factor favorable en la estabilidad, sin embargo Skempton (1985) menciona que los sitios de laderas donde la fracción fina es mayor al 50%, son controlados por dicha fracción dominante. Para el caso de estudio, las superficies de falla incluyendo el escarpe, existe un porcentaje significativo de cantos y rocas que no alcanza un porcentaje significativo ante la matriz dominante mencionada.

6.2.3 Utilidad de los índices geotécnicos

A través de la estimación del límite de contracción, se observa que los suelos superficiales sobre el escarpe son estables y dejan de contraerse con valores de humedad alrededor del 30%. En cambio los materiales de las superficies de falla cambian su volumen con valores menores conforme pierden humedad. Por su parte los materiales sedimentarios parecen continuar el proceso de contracción hasta valores estimados de 7% de humedad. Estos últimos parecen ser los que más cambian su volumen en contra de la estabilidad de laderas.

El índice de liquidez depende de las condiciones actuales de humedad. Las muestras fueron tomadas al excavar sobre las superficies expuestas y tratando de conservar su humedad actual. Sin embargo, la humedad real es diferente antes y después del deslizamiento por el cambio de los patrones de flujo antes y después del deslizamiento. En estas condiciones, el índice de liquidez sólo proporciona una idea de la generación de esfuerzos efectivos (es decir cuando el material pierde agua y los esfuerzos tomados por los sólidos) entre los propios materiales. Algunos materiales de los flancos de falla presentan valores menores de cero, lo que indica que han soportado esfuerzos de preconsolidación y su fractura al corte en las condiciones actuales es frágil. Por su parte los suelos superficiales con uso para pastizales y el ganado local, se encuentran normalmente consolidados. Wesley (2009) también menciona el favorable comportamiento y resistencia de los suelos con bajo orden estructural, ante la presencia de precipitaciones aún con estrés de la presencia humana.

El índice de Actividad es útil para identificar muestras con un origen semejante e inferir minerales tipo, aunque debe aplicarse conservadoramente porque sólo es un índice y deben utilizarse otras herramientas para la identificación de minerales que controlan el flujo de materiales.

El resultado de valores altos de Actividad, es porque el bajo porcentaje de la fracción arcilla en el denominador y el índice de plasticidad en el numerador, resulta en un índice de Actividad alto. Éste índice sugiere resultados semejantes a los encontrados por la espectrometría del infrarrojo, tales como la identificación de las muestras que tienden a formar esmectitas para altos índices de Actividad (en los suelos superficiales de los perfiles) y con menor Actividad, los minerales derivados del grupo de las micas y óxidos precipitados (en los flancos de falla).

6.3. Correlaciones entre los parámetros físicos, químicos y límites líquidos de los suelos y materiales residuales

La disminución del límite líquido conforme aumenta el pH puede aplicarse para conocer cualitativamente la tendencia de los materiales muestreados en campo, por ejemplo, aquellos suelos y materiales alcalinos tienen límites líquidos más bajos y por consiguiente son más susceptibles a convertirse en flujos de materiales ante eventos de lluvia atípicos. Por su parte los suelos superficiales tienen los mayores límites líquidos para pH ácidos. Entonces se pueden identificar estos suelos en los alrededores del deslizamiento tomando este parámetro relativamente económico. Los alcances de esta

correlación corresponden a los alrededores del deslizamiento hasta los límites del parteaguas en las zonas de mayor altitud y los suelos con propiedades ándicas. Debe tenerse en consideración que la acidez de los suelos superficiales puede estar influenciada por la materia orgánica.

En la mayoría de los depósitos de ladera y suelos con propiedades ándicas, la tendencia general es con el aumento del porcentaje de finos y la fracción arcilla, el límite líquido tiende a disminuir. Caso contrario sucede para los afloramientos sedimentarios, donde al aumentar el contenido de arcillas el límite líquido aumenta. Estos resultados son semejantes a los planteados por Wesley (2009) donde hace referencia al diferente comportamiento entre suelos sedimentarios y suelos de bajo orden estructural, relativamente más jóvenes.

La mayoría de las investigaciones que se realizaron para establecer los principios de la geotecnia en el siglo pasado, están basadas en su mayoría en suelos sedimentarios, incluyendo el caso particular de la Ciudad de México. Los suelos serranos del caso de estudio, contradicen el comportamiento típico de los suelos que por ejemplo, esperaríamos encontrar en un muestreo de esta ciudad, esto se vio reflejado en las pruebas del laboratorio de geotecnia, tales como los límites de consistencia, donde no se usó el dispositivo de Casagrande, esto debido al bajo contenido de arcillas laminares en las muestras, que dificultaba su tratamiento debido a su menor plasticidad; en su lugar se utilizó un cono sueco para disminuir el error y la pérdida de humedad.

6.3.1. Correlación entre porosidad y permeabilidad

Dado el cuestionamiento de que el aumento de porosidad está relacionado directamente con el aumento de permeabilidad, no se observa una buena correlación para todas las muestras. Al relacionar sólo los suelos superficiales y los materiales sedimentarios, estos últimos cumplen más claramente ésta hipótesis. En contraste las muestras del flanco izquierdo, presentan una variabilidad espacial en los depósitos de ladera que permiten el flujo de agua a diferentes velocidades. En la realidad el agua circula a través del medio poroso con cambios de dirección por la diferente permeabilidad de cada sitio representativo.

6.3.2. Correlación entre la fracción fina y permeabilidad

La permeabilidad es muy variable ante porcentajes similares de arcilla entre los suelos superficiales y los materiales del flanco izquierdo. Esto muestra que las fracciones finas del flanco izquierdo de falla tienen menor permeabilidad. Aun cuando sus porcentajes de arcilla son similares a los suelos superficiales, el proceso de formación y tipo de arcillas es diferente.

6.4. Procesos semejantes al caso de estudio

La utilidad de la información a escala regional disponible, permite observar las condiciones en donde se encuentra el deslizamiento ocurrido. Dicha información es válida por el trabajo de campo y gabinete, aunque tiene la limitante de que en sitios muy particulares puede encontrarse información adicional a la reportada por el INEGI, tal es el caso de los depósitos de origen sedimentario que sólo afloran en algunos sitios y forman parte de la superficie de falla del flanco derecho del deslizamiento. El espesor de los depósitos de ladera que cubren estos depósitos de diferente origen geológico es variable.

La presencia de una franja de tobas volcánicas sobre el relieve, sólo está identificada en la transición basalto-toba en el límite del parteaguas en toda la subcuenca, es precisamente en ésta transición donde se originó el deslizamiento y donde afloran algunos depósitos sedimentarios que subyacen los depósitos de ladera y los suelos de tipo andosol. En el resto de las litologías de la subcuenca no se

observó algún deslizamiento similar, ni dentro del inventario de deslizamientos disponible. Por esta razón adicional, se consideró que en esta franja tiene la principal condicionante para encontrar sitios semejantes al caso de estudio. Dentro de los sitios propuestos para que ocurra un deslizamiento semejante se considera el caso más desfavorable, donde los depósitos sedimentarios subyacen la misma zona de alta susceptibilidad ante deslizamientos.

El clima templado húmedo condiciona las propiedades de los materiales expuestos. Además estos materiales tienen rasgos de metasomatismo. Lizcano et al. (2006) menciona que el clima y la altitud proporcionan a los materiales expuestos características muy particulares y de estas condiciones depende el tipo de mineral dominante, que condiciona los deslizamientos en regiones volcánicas.

Por su parte las direcciones de flujo sobre el relieve condicionan el transporte de los materiales una vez que la matriz dominante llega a un estado líquido. Esto se puede observar en los cauces fluviales, con una gran cantidad de materiales graduados que fueron acarreados. También en otros fenómenos de la naturaleza, tales como los flujos piroclásticos, se observa una tendencia a fluir sobre los propios cauces que ofrecen la menor resistencia para su avance ladera abajo. La mayor frecuencia en el histograma de orientaciones corresponde a las mismas direcciones del cauce de los ríos, y en este estudio también se consideran que estas direcciones presentan el mayor nivel de susceptibilidad.

El cambio de uso de suelo a pastizales cultivados reportado a escala regional, es el mismo uso que se observa en los recorridos de campo, aunque algunas parcelas son utilizadas para la agricultura y el ganado. Entonces la capa de información de coberturas y usos de suelo también es de utilidad para encontrar zonas donde se han modificado las coberturas naturales. En caso de presentarse precipitaciones extraordinarias, ésta es la primera capa receptora de agentes de lluvia.

La superposición de capas de información sugiere sitios susceptibles a deslizamientos similares sobre el depósito de toba volcánica identificado a escala regional. Entonces si el caso de estudio fue el único en su tipo en esta zona, durante la temporada de precipitaciones del año 2013, se sugiere que este tipo de deslizamientos no son repentinos y ocurren por etapas. Tal como el movimiento del terreno previo al deslizamiento, reportado en la misma zona en el año de 2010 por Guzmán (2014).

El caso de estudio no es el primero y por las condiciones mencionadas, parece que no va a ser el último, en la franja marcada de muy alta susceptibilidad para originarse deslizamientos. La validez de esta afirmación se observa en campo, en laderas adyacentes con forma semejante al caso de estudio y ahora cubiertas por la vegetación.

En caso de desarrollarse un proceso semejante en otra comunidad, los cultivos son susceptibles a perderse, así como el daño a viviendas expuestas o la infraestructura cercana al proceso. La interrupción de las vías terrestres puede generar los mismos efectos secundarios y situaciones no previstas al caso de las comunidades de El Escalanar, El Capulín y Las Sombras.

Otros efectos secundarios por la ocurrencia del deslizamiento es el ejemplo de la procesadora de café, ubicada en la comunidad de El Huérfano. Dicha procesadora depende de la producción local porque las cosechas de café son vendidas en este sitio y las personas obtienen un ingreso adicional. Otros productos de temporada y materias primas son destinados a los mercados cercanos, tales como los ubicados en el centro de Xalapa y sus alrededores. Sobre estas situaciones está el impacto que estos eventos generan a la mayoría de las personas y por eso debe considerarse la conservación del bosque ante el cambio de uso de suelo en las zonas de mayor susceptibilidad ante deslizamientos.

El conocimiento de considerar el espacio del bosque mesófilo de montaña y el desarrollo de sus actividades primarias deriva en la supervisión y control por parte de los representantes municipales y

de los propios pobladores para no rebasar el equilibrio entre la conservación y el aprovechamiento que su entorno les proporciona. Algunas acciones ya se han tomado, estas incluyen la instalación de gaviones sobre los cauces para controlar los flujos de materiales y algunas estructuras hidráulicas para desalojar el agua pluvial, aunque parecen ser insuficientes ante eventos de gran magnitud. Esto se refleja en campo, debido a que algunos gaviones ya se han deformado, entonces es de mayor jerarquía entender los factores que condicionan estos eventos.

6.5. Otras zonas susceptibles a escala regional dentro de la subcuenca

En este caso se consideran siete factores condicionantes para establecer un mapa de susceptibilidad ante deslizamientos en toda la subcuenca RH27Ac. Cabe señalar que algunos de los factores derivados del modelo digital de elevaciones y recursos naturales también son considerados en esta escala regional.

La litología fue el primer factor que se considerado. Cualitativamente cada litología se diferenció por su valor de ángulo de fricción efectiva. A escala regional la resistencia de los materiales se estima por el tipo de formación litológica aunque si fuera posible medir tantas zonas (que en su mayoría no están expuestas) los valores podrían cambiar, sin embargo, cualitativamente se sabe que hay materiales más resistentes que otros y esto es suficiente para estimar en toda la subcuenca que zonas son más susceptibles que otras. Algunos autores como Niño et al. (2014) utilizan valores generales de resistencia de las unidades litológicas con información del portal del INEGI, y la litología es el principal factor que consideran para deslizamientos. Jibson et al. (2000) también propone valores de resistencia de unidades litológicas para mapas regionales de peligro ante deslizamientos. El peso que cada factor condicionante para el mapa de susceptibilidad es propuesto por cada autor y en cada estudio es diferente, debido a la metodología utilizada para la obtención de los pesos y los factores considerados. Por ejemplo, Villacorta et al. (2012) propone mapas de susceptibilidad para deslizamientos en masa y asigna el mayor peso a la litología, seguido por factores morfométricos, pendiente, cobertura vegetal, principalmente, y la validación la realiza con un inventario nacional de información recopilada. En este trabajo la litología tiene el mayor peso en el proceso analítico jerárquico ejecutado entre factores condicionantes.

Debido al estado alterado de los suelos, producto del intemperismo del clima templado húmedo, la unidad climática es gran importancia para este trabajo. Los suelos con propiedades ándicas también están ubicados en las zonas de mayor altitud con este clima y permiten el paso de agua hacia los estratos subsuperficiales con acarreo de álcalis y silicio. El relieve en las zonas de mayor altitud de la subcuenca, tiene una diversidad de laderas que son afectadas por este tipo de clima. Estos factores son muy particulares de la zona y también están implícitos en el mapa de susceptibilidad.

La pendiente es otro factor condicionante por definición en laderas, dado que los depósitos están regidos por las leyes naturales de la física, tal como la gravedad. Un valor alto de pendiente está relacionado directamente con un alto grado de susceptibilidad ante deslizamientos. Este factor es considerado en estudios de estabilidad de laderas. Además a lo largo de la subcuenca se tienen identificados otros tipos de suelo y litologías, tales como de lutitas y andesitas sobre laderas pronunciadas, donde el factor pendiente tiene relevancia. Los suelos con propiedades ándicas pueden comportarse de manera estable hasta valores de treinta grados como se estimó en este trabajo y como menciona Wesley (2009), aunque las superficies de falla pueden estar controladas por los materiales subsuperficiales, tal como se observó en el caso de estudio. En dicho caso, la ladera no tiene un alto valor de pendiente, y fueron los materiales los que tuvieron el mayor peso jerárquico para su desarrollo.

En lo que se refiere a la curvatura de laderas en perfil y planta, no se observan cambios muy marcados en toda la subcuenca, sólo en los sitios que convergen hacia los principales cauces fluviales.

La orientación de laderas es considerada como un factor que condiciona los flujos en toda la subcuenca y también se incluyó en el mapa de susceptibilidad para toda la subcuenca.

El cambio de uso de suelo también se consideró en toda la subcuenca, aunque este factor no es el más importante para los pesos del mapa de susceptibilidad regional. Por ejemplo, Villacorta et al. (2006) obtienen un peso del 5% para este factor, en este caso de estudio se obtuvo un peso del 7% con un proceso analítico jerárquico.

Al comparar y jerarquizar todos los factores condicionantes propuestos, se obtienen resultados muy semejantes en cada uno de los escenarios para el mapa regional de susceptibilidad, por el mayor peso que se le dio al factor litológico. Por un lado, los sitios de procesos semejantes al caso de estudio se mantienen y por otro lado se hace evidente otra zona de muy alta susceptibilidad ante deslizamientos, principalmente en los alrededores del municipio de Juchique de Ferrer, ubicado a media subcuenca. Esta zona está dominada por las litologías de lutitas-areniscas y depósitos aluviales. Para validar la información resultante en dicho mapa se entrevistaron a los representantes del municipio de Chiconquiaco y de las localidades de El Escalanar y El Capulín, conocedores de la región. Dichos pobladores han observado una alta frecuencia de movimientos en el terreno en los alrededores de Juchique de Ferrer. Oficialmente a través de periódicos digitales también se encontraron reportes de daños sobre las carreteras que se comunican hacia el municipio central de Juchique, producto de asentamientos diferenciales en el suelo y deslizamientos que han ocurrido en años anteriores en temporada de precipitaciones, dichos reportes son del año 2010. Otro ejemplo es el de la carretera recién construida Colipa-Dehesa que fue destruida por el deslizamiento ocurrido el 18 de septiembre de 2017.

7. CONCLUSIONES

7.1. Factores que condicionaron el deslizamiento y flujo de materiales

La aplicación de imágenes multitemporales Landsat y Sentinel-2 fue útil para validar la presencia del caso de estudio y para descartar la presencia de deslizamientos y flujos de materiales semejantes en toda la subcuenca RH27Ac, durante el mismo período de tormentas tropicales. Es posible visualizar estos cambios debido a la destrucción en masa de las coberturas y usos de suelo.

El estudio forense del deslizamiento tanto en campo como en gabinete permitió determinar los principales factores que lo condicionaron y con esta experiencia determinar zonas susceptibles ante este fenómeno. Los depósitos sedimentarios con abundancia de carbonato de calcio y sílice, encontrados en el flanco derecho del deslizamiento son una de las principales evidencias adicionales no previstas, encontradas en campo, que condicionan los depósitos de ladera a deslizarse, debido a que la diagénesis de los cementantes en materiales sedimentarios disminuye los espacios porosos creando superficies de diferente competencia mecánica e hidráulica, facilitando los deslizamientos. Además el cambio de uso de suelo y la alta permeabilidad de suelos de origen volcánico favorecen la circulación de agua a estratos más profundos. El flujo plástico que se desarrolla en estas zonas de contacto, marca las condiciones límite sobre las superficies de falla, ya que suavizan las irregularidades de pedregosidad, lubrican el contacto entre ambas superficies con diferentes propiedades, lo que facilita el deslizamiento de las masas.

La validación de los suelos y matrices en las superficies de falla a través de parámetros físicos, químicos y geotécnicos sustentan la confiabilidad de la información a escala regional del INEGI en los alrededores del caso de estudio aunque se pueden encontrar factores condicionantes adicionales en campo.

Los sitios que exhiben asentamientos diferenciales alrededor del deslizamiento facilitan el muestreo a detalle, sin embargo, en las superficies de falla y el escarpe esto no es posible porque el acceso a dichas superficies está controlado por la accesibilidad en campo. En el escarpe, por ejemplo, exhibió 50 m de altura por lo que en superficies inaccesibles y con los medios disponibles, estos sitios sólo permiten la toma de muestras representativas.

7.2. Distribución de grupos minerales que condicionan los deslizamientos

Las zonas con abundancia de óxidos sólo se identificaron en las formaciones basálticas del parteaguas. La presencia de hidroxilos no es clara porque muchos minerales contienen este grupo, aunque también se encuentran en la zona donde se encuentran los óxidos. La intersección de ambos grupos en este trabajo es de utilidad para sugerir zonas con metasomatismo debido a procesos volcánicos en el pasado, y estos materiales forman parte de los factores que condicionan los sitios susceptibles ante deslizamientos y flujos de materiales.

El material de origen basáltico, en las zonas de mayor altitud del sitio de estudio, está sujeto a procesos meteóricos adicionales al metasomatismo del pasado, como lo sugieren los mapas de percepción remota y evidencias en campo. Los basaltos en los límites del parteaguas por dichas alteraciones presentan zonas de debilidad y también forman parte del aporte de material parental sobre los depósitos de ladera. Esto se refleja en la disminución de la resistencia al esfuerzo cortante conforme aumenta el grado de metasomatismo e intemperismo.

7.3. Indicadores de susceptibilidad del deslizamiento y flujo de materiales

Los suelos superficiales con propiedades ándicas facilitan el drenaje subsuperficial y son menos susceptibles a llegar a un estado líquido y formar parte de flujos de materiales. Las coberturas de árboles como ilite, liquidámbar y olmo, proporcionan estabilidad al suelo ante deslizamientos de gran magnitud, aunque si la superficie de falla supera la profundidad fisiológica, esta vegetación tiende a trasladarse ladera abajo. Estos suelos están adaptados a las condiciones templadas húmedas, aún en pendientes pronunciadas. Aunque debido a la abundancia de precipitaciones, la hidrólisis trabaja generando un intemperismo químico mayor y afecta la agregación y estructura de partículas primarias.

La matriz de los suelos con propiedades ándicas abundan fracciones de limo y arenas finas, y no son las arcillas las que dominan el tamaño de partícula. Por su parte la matriz de los suelos del flanco izquierdo de deslizamiento está más desarrollada y tiene mayor contenido de arcillas trilaminares moderadamente inactivas y con un nivel mayor de susceptibilidad a formar flujos de materiales. Aun cuando el deslizamiento ya ocurrió, las superficies de los flancos y escarpe son inestables. Después de cinco años de su ocurrencia para esta fecha, la vegetación no se ha desarrollado claramente sobre las superficies de falla del deslizamiento y debido a las nuevas condiciones de desecación, se generan grietas. Estas grietas generan nuevas condiciones de susceptibilidad ante otros procesos de desgaste como erosión.

La angulosidad de las fracciones gruesas favorece la estabilidad de la ladera aunque no es suficiente ante estratos de diferente competencia mecánica. La abundancia de arenas finas, limos y arcillas controlan el flujo de materiales cuando superan su límite líquido, por su parte los cantos, boleos y rocas de mayor tamaño son dependientes de estas fracciones más finas y sólo siguen el patrón de flujo.

7.4. Mapa de susceptibilidad de zonas semejantes al deslizamiento y flujo de materiales

Sólo depende de los pobladores y sus representantes no crear más asentamientos en estas zonas susceptibles y moderar el uso del bosque mesófilo de montaña. Lo anterior porque existen las condiciones para que se desarrolle un deslizamiento semejante en las zonas marcadas como de alta susceptibilidad.

7.5. Mapa de susceptibilidad a desarrollar algún tipo de deslizamiento y flujo de materiales en toda la subcuenca

Las condiciones en los alrededores de El Escalanar y El Capulín del caso de estudio son diferentes a las condiciones de las localidades de Juchique de Ferrer y Colipa, como la segunda zona de muy alta susceptibilidad. Sin embargo, en las localidades de Juchique de Ferrer existe mayor concentración de población y se han reportado estos fenómenos, que han llegado a interrumpir las vías de comunicación y daños a la infraestructura local.

Se confirma que el estudio y aplicación de factores que condicionan los deslizamientos y flujos de materiales permiten delimitar zonas susceptibles ante este tipo de procesos. Esto tiene una aplicación para limitar los asentamientos humanos o en el caso de que se decida generar nuevas obras civiles, es necesario el estudio del suelo a detalle en estas zonas marcadas de muy alta susceptibilidad, porque es mayor el costo de mantenimiento y reconstrucción que el costo de estudios previos para la prevención.

8. REFERENCIAS

- ArcMap 10.3 (2017). Funciones de programa para computadora
<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>
- ASTM D2487 (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International
- ASTM D4318 (2005). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International
- ASTM D422 (1998). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International
- Ayala, F.J. y Cantos, J. (2002). Riesgos naturales. Colección Ciencia. Barcelona: Ariel. 1304
- Barton, N.R. (1974). A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. Norwegian Geotechnical Institute. No. 105
- Chuvieco, E. (2008). Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio (3ª edición digital). España: Ariel. 61.
- CONABIO (2010). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. El Bosque Mesófilo de Montaña en México. Amenazas y Oportunidades para su conservación y Manejo Sostenible. México. 28-37
- Conacher, A.J. y Dalrymple, J.B., (1977). The nine unit Surface model: an approach to pedogeomorphic Research. Geoderma 18. Amsterdam: Elsevier. 154
- Crosta, A.P., y McMoore, J., (1989). Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil. A prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain. Environmental Institute of Michigan Calgary, 1173-1187
- Cruden, D.M., y Varnes, D.J., (1996). Landslides types and processes, en Turner, A Keith, y Schuster, Robert L. eds. Landslides. Investigations and mitigation: Transportation Research Board Special report no. 247, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C. 37-75
- Díaz, J. A. (2014). Mecánica de suelos, naturaleza y propiedades. México: Trillas. 28-83, 98-100
- Fattorelli, S. y Fernández, P. (2011). Diseño hidrológico (2ª edición digital). Water Assessment and Advisory Global Network. 206-216
- Ferrari, L., Tagami, T., Eguchi, M., Orozco, M.T., Petrone, C.M., Jacobo, J., López, M., (2005). Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the Southwestern Gulf of Mexico: The Eastern Alkaline Province revised. Journal of volcanology and geothermal research. Vol. 146: 285,295-299, 301
- Flores, L. y Alcalá, J.R. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos. Laboratorio de Física de Suelos: Instituto de Geología. 5-8, 25-56
- García C., N.E., Angel H., M., Bribiesca, S., Dixon J., B., Acevedo, O.A., Hidalgo, C., Lozano, R., Vallejo, E., Osterrieth, M. (2004). Cristalografía de Suelos. Sociedad Mexicana de Cristalografía A.C. México. 4, 18, 51, 130-134, 141
- Gifkins C., Herman, W., Large, R. (2005). Altered Volcanic Rocks. A guide to description and interpretation. Centre of Ore Deposit Research. Australia: University of Tasmania. 4-6, 64-71, 87-90, 97-114.
- Gómez, T.A., LaGatta, A., Langmuir, C., Goldstein, S., Doherty, L., Ortega-Gutiérrez, F., Carrasco-Núñez, G., (2003). Temporal Control of Subduction Magmatism in the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: Mantle sources, slab contributions, and crustal contamination. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Vol. 4, no. 8. 14, 17, 19, 22, 26-29
- González, V., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo C. (2004). Ingeniería geológica. Madrid: Pearson Educación, 104, 632-635
- Guzmán, N. y Morales, W.V. (2014). La gestión de riesgos por deslizamientos de laderas en el estado de Veracruz durante el 2013, Xalapa, Veracruz: Secretaría de Protección Civil, ISBN: 978-607-7527-90-9

- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. University of Massachusetts: Academic Press, 27, 63-66, 76-80, 157
- Hoek E. y Bray, J.W. (1981). *Rock slope engineering* (3ª edición). London: Institution of Mining and Metallurgy. 3
- Holtz, R. y Kovacs, W. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. USA: Prentice-Hall. 26-34, 77-102
- Hutchinson J. (1988). General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hidrology. Proceedings, fifth International Symposium on Landslides, ed. Bonnard: Netherlands. Vol. 1, 3-33
- Hungr O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2013). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Iglesias, C. (1997). *Mecánica del suelo*. España: Sintesis. 145-151
- INAFED (2010). Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM30veracruz/municipios/30057a.html
- INEGI (2005). Instituto Nacional de Geografía y Estadística. Guía para la interpretación de cartografía geológica. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/geologia/infoescala.aspx>
- INEGI (2015). Instituto Nacional de Geografía y Estadística. Guía para la interpretación de cartografía. Uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie V. México
- INEGI (2017). Instituto Nacional de Geografía y Estadística <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/>
- INEGI (2017). Instituto Nacional de Geografía y Estadística. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/default.aspx>
- Jibson, R. W., Harp E.L., Michael, J.A. (2000). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology* 58: 270-290
- Juárez, E. y Rico, A. (1992). *Mecánica de suelos*. Tomo 1. México: LIMUSA. 150-158, 102-104
- King, P.L., Ramsey, M.S., Swayze, G.A. (2004). *Infrared spectroscopy in geochemistry, exploration geochemistry and remote sensing*. Series Vol. 33. London, Ontario. 58
- Lal, R. y Shukla, M. (2004). *Principles of soil physics*. The Ohio State University. USA: Board, 61-79, 181-187, 221-228
- Lambe W. y Whitman R. (1969). *Soil Mechanics*: Massachusetts Institute of Technology, 34-38
- Lira, J. (2010). *Tratamiento digital de imágenes multispectrales*. UNAM. Instituto de Geofísica. 185-194
- Lizcano A., Herrera M.C. y Santamarina J.C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 6 (2), 167-171
- López M. (1991). Petrologic study of the volcanic rocks in the Chiconquiaco-Palma Sola area, central Veracruz, Mexico. MS thesis. New Orleans: Tulane University of Louisiana
- Mendoza, M.J. y Orozco, M. (1997). Técnicas alternativas para la determinación del Límite líquido de suelos. *Informe técnico*. México: Instituto de Ingeniería, 20, 21, 23-30
- Mitchell, J. y Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. USA: John Wiley, 5-25, 59-66, 99-105
- Mora, I. y Rodríguez, S.R. (2011). Peligros geológicos e hidrometeorológicos en el estado de Veracruz. México: Colección la ciencia en Veracruz. Biblioteca del especialista
- Munsell (2009). *Soil-Color Charts*. USDA, Soil Conservation Service. Agricultural Handbook no. 18. U.S. Gov. Print. Office
- Niño, M., Jaimes M.A., Reinoso E. (2014). Seismic event based methodology to obtain earthquake induced translational landslide regional hazard maps. *Natural Hazards*. 1697-1713
- Ostrodumov, M. (2007). *Espectrometría infrarroja de reflexión en mineralogía avanzada, gemología y arqueometría*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica. ISBN: 978-970-32-5009-7. 6-19

- Peck, R., Terzaghi, K., Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice. USA: John Wiley and Sons. 1-32
- Rodríguez, S.R. y Morales, W. V. (2014). Peligros geológicos asociados a deslizamientos, hundimientos y agrietamientos del terreno en localidades del centro y norte de estado de Veracruz. Análisis, evaluación e integración en un Sistema de Información Geográfica. Informe técnico inédito
- Ruíz, J.R. y Prol, R.M. (1995). Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal. Instituto de Geofísica, Física de la Tierra, no. 7. 105-137
- Ruhe (1975). *Geomorphology: Geomorphic Processes and Superficial Geology*. 246
- Saaty, T.L. (2008). Decision making with the Analytic Hierarchy Process. *Int. J. Services Sciences*. Vol. 1, no. 1. 83-94
- SIATL (2012). Simulador de Flujos de Aguas de Cuencas Hidrográficas
http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#
- Siebe C., Jahn R., Stahr, K. (2006). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. México: Instituto de Geología
- Smith, M., Goodchild, M., Longley, P. (2015). *Geospatial Analysis-A Comprehensive Guide to Principles (5ª edición)*. UK: Techniques and Software Tools
- SMN (2010). Servicio Meteorológico Nacional
<http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=ver>
- Skempton, A. W. (1985). Residual strenght of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique*. 3-18
- Skempton, A.W. (1953). The colloidal “Activity” of clays. *Proceedings of the 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 57-60
- So Ei-Kon (1998). Statistical correlation between allophane content and index properties for volcanic cohesive soil. *Japanese Geotechnical Society. Soils and foundations*. Vol. 38, no. 4. 85-93
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Colombia: Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos. 35-37, 39-57, 201, 226-228
- Suzuki, M., Tsuzuki, S., Yamamoto, T. (2005). Physical and Chemical Index Properties of Residual Strenght of Various Soils. *Mem Fac Eng Yamaguchi Univ*. Vol. 56, no. 1, 3-9
- USGS (2017). U.S. Geological Survey. Imágenes Landsat y Sentinel-2. <https://www.usgs.gov/>
- Villacorta, S., Fidel, L. y Zavala, B., (2012). Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú. *Revista de la Asociación Geológica de Argentina*. 394
- Wesley, L. (1977). Shear strength properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia. *Geotechnique*. Vol. 27, no. 2. 125-133
- Wesley, L. (2009). Behaviour and geotechnical properties of residual soils and allophane clays. *Obras y Proyectos*. Vol. 5. 5-10
- Wood, D.M. y Wroth, C.P. (1978). The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, no. 2, 137-145
- Yalcin A., Reis S., Aydinoglu A., Yomralioglu T. (2011). A GIS-based comparative study of frecuency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena* no. 85. 277
- Zinck, J. A. (2012). Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. Netherlands: ITC; Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. 63-66, 75, 78, 85, 89-116

