



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA



ESTUDIO GEOTÉCNICO Y DE PELIGRO GEOMORFOLÓGICO DE UNA PORCIÓN DE LA SIERRA DE SAN MIGUELITO, S.L.P.

TESIS

Para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN GEOLOGÍA APLICADA

Presenta:

Wendy Lorena Puente Castillo

San Luis Potosí, S.L.P.

Enero 2014



Índice de contenido

<u>Resumen</u>	xiii
<u>CAPÍTULO I. Introducción</u>	1
<u>Objetivo</u>	5
<u>Objetivos específicos</u>	5
<u>Metas</u>	6
<u>CAPÍTULO II. Descripción geográfica y geológica del área de estudio</u>	7
<u>II.1. Generalidades del área de estudio</u>	7
<u>II.1.1. Localización y vías de acceso</u>	7
<u>II.1.2. Fisiografía</u>	8
<u>II.1.3. Geología general</u>	9
<u>II.1.4.- Hidrografía</u>	33
<u>II.1.5. Clima y vegetación</u>	33
<u>CAPÍTULO III. Metodología aplicada</u>	38
<u>Gabinete:</u>	38
<u>Campo:</u>	38
<u>Laboratorio:</u>	38
<u>III.1. Análisis geomecánico</u>	40
<u>III.2. Análisis hidrológico</u>	45
<u>III.2.1 Pruebas en campo</u>	47
<u>III.3. Análisis geomorfológico</u>	50
<u>CAPÍTULO IV. Resultados</u>	55
<u>IV.1. Propiedades físicas y mecánicas de las rocas</u>	55
<u>IV.1.1.- RQD</u>	55
<u>IV.1.2.- RMR</u>	56
<u>IV.1.3.- GSI</u>	58
<u>IV.2.- Propiedades hidráulicas de los suelos y rocas</u>	60
<u>IV.3. Geomorfología</u>	84
<u>IV.3.1. Procesos endógenos</u>	84
<u>IV.3.2. Procesos exógenos</u>	87

<u>CAPÍTULO V. Análisis de factores de peligro y discusiones</u>	95
<u>Movimiento de masas</u>	95
<u>Caída de rocas</u>	97
<u>Vuelcos</u>	99
<u>Flujos de escombros</u>	100
<u>Peligro de erosión de suelos</u>	100
<u>Peligro de inundación en el curso fluvial</u>	102
<u>Discusiones</u>	105
<u>Conclusiones</u>	108
<u>Propiedades físicas y mecánicas de las rocas asociadas a peligros</u>	108
<u>Propiedades hidráulicas asociadas a peligros</u>	111
<u>Recomendaciones</u>	113
<u>Bibliografía</u>	115
<u>Apéndices técnicos</u>	123
<u>Apéndice A: Propiedades físicas y mecánicas de las rocas</u>	123
<u>A.1.- Determinación del tamaño de los fragmentos y distribución de las discontinuidades</u>	123
<u>A.2.- Cálculo de ROD</u>	140
<u>A.3.- Point load test (PLT)</u>	141
<u>A.4.- Creación del diagrama de cajas (Box plot)</u>	155
<u>A.5.- Cálculo de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas por el método de Bieniawski (1989) y GSI de Hoek (1997)</u>	155
<u>A.6.- Cálculo de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas por medio del GSI propuesto por Hoek (2000)</u>	161
<u>Apéndice B: Propiedades hidráulicas de las rocas y suelos</u>	162
<u>B.1.- Pruebas de permeabilidad</u>	162
<u>B.2.- Análisis granulométrico de suelos</u>	169
<u>B.3.- Análisis de finos</u>	176
<u>Apéndice C: Análisis geomorfológico</u>	180
<u>C.1.- Creación del modelo digital de elevación (MDE)</u>	180
<u>C.2.- Creación de polígonos con base en las imágenes de satélite</u>	180
<u>C.3.- Creación del modelo de pendientes</u>	183

Anexo 1: Mapa geológico del área de estudio

Anexo 2: Mapa geotécnico del área de estudio

Anexo 3: Mapa de peligros geomorfológicos del área de estudio

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio, tomada de www.googleearth.com	7
Figura 2. Mapa fisiográfico, tomado de Raisz (1959).	9
Figura 3.- Fotografías de algunos miembros de la Riolita San Miguelito, A) Brechas de desintegración, B) Miembro desvitrificado central y C) Caparazón de la Riolita San Miguelito.....	15
Figura 4.- Fotografías del miembro no soldado de la Ignimbrita Cantera, A) Estratificación de la base de la Ignimbrita Cantera, B) Aspecto del miembro no soldado de la Ignimbrita Cantera.....	17
Figura 5.- Fotografía de las columnas del miembro soldado de la Ignimbrita Cantera.	18
Figura 6.- Fotografía mostrando el miembro superior de la Riolita Panalillo.	21
Figura 7.- Fotografía del Conglomerado Halcones.....	22
Figura 8.- Fotografía mostrando el aspecto de la Pumicita del Desierto.	24
Figura 9.- Fotografía del suelo endurecido donde se observa macroporosidad.	25
Figura 10.- Fotografía del suelo residual.....	26
Figura 11.- Imagen de la columna estratigráfica del área de estudio.....	26
Figura 12.- Lámina de fotografías: A) Falla normal del miembro no soldado de la Ignimbrita Cantera, S.L.P. y B) brecha de falla del miembro soldado de la Ignimbrita Cantera, comunidad de Escalerillas.....	28
Figura 13.- Lámina de fotografías: A) y B) Falla de las Escobas mostrando la posición de las estrías, C) Falla con desplazamiento oblicuo en el área del Santuario de la Iglesia del Desierto.	29
Figura 14.- Lámina de fotografías: A) Brecha co-ignimbrítica del Santuario de la Iglesia del Desierto, B) Dique con material piroclástico en la Presa del Peaje, C) Fragmento de una brecha co-ignimbrítica en la Presa del Potosino.....	30
Figura 15.- Fotografía de la falla de las escobas mostrando las fracturas tipo Riedel.	30
Figura 16.- Lámina de diagramas de densidades y rosetas de los basculamientos observados en las secciones hechas en el trabajo de campo.....	31
Figura 17.- Lámina de diagramas del promedio de planos y polos (A) y densidades (B) de los datos de las fallas obtenidos en campo.....	31
Figura 18.- Lámina de diagramas de planos y polos (A, C y E) y densidades y rosetas (B, D y F) de los datos de las secciones hechas en campo.	32
Figura 19.- Cuencas Hidrográficas del Estado de San Luis Potosí, tomada de INEGI 2002.	34
Figura 20.- Lámina de fotografías: A) Prosopis juliflora (Mezquite), B) Larrea divaricata (Gobernadora), C) Agave atrovirens (Maguey), D) Yucca filífera (palma).....	36
Figura 21.- Lámina de fotografías: A) Opuntia (plati opuntia) (nopal), B) Echino cactus (Biznaga), C) Zacatal, D) Encinar arbustivo, F) Matorral Crasicaule.	37
Figura 22.- Imagen de las etapas de la metodología de trabajo, mostrando las principales actividades de cada etapa.....	39

Figura 23.- Imagen de la relación entre RQD y espaciado de las discontinuidades λ , tomada de Zhang (2005).	42
Figura 24.- Ejemplo de tabla de RQD y espaciado de las discontinuidades del sitio 1.....	43
Figura 25.- Estimación de GSI, basado en la observación de campo y resultado de RMR de Bieniawski (1989); tomada de Hoek (1994).	47
Figura 26.- Ejemplo de tabla de datos de cálculo de asíntota y variables, PPR-12, BOMBA 1.	50
Figura 27.- Diagrama de RQD de las unidades volcánicas del área de estudio.....	55
Figura 28.- Fotografía del sitio 4; Ignimbrita Cantera miembro no soldado (Tic) mostrando 2 capas con diferentes propiedades físicas.	56
Figura 29.- Diagrama de cajas de RMR (Bieniawski, 1986) de las unidades volcánicas del área de estudio.....	57
Figura 30.- Diagrama de cajas de GSI de Hoek (1997) de las unidades volcánicas del área de estudio.....	58
Figura 31.- Resultados de los macizos rocosos en la Clasificación GSI de Hoek, tomada de Hoek (1994), los círculos corresponden a las unidades volcánicas del área de estudio.....	61
Figura 32.- Ubicación de pruebas de permeabilidad:	62
A.- Santuario de la Iglesia del Desierto.....	62
Figura 33.- Lámina de gráficos finales de PPR1 y resultados, coordenadas UTM en X: 284370, Y: 2447370.....	67
Figura 34.- Lámina de gráficos finales de PPR2 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 284375, Y: 2447231.....	68
Figura 35.- Lámina de gráficos finales de PPR3 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 284179 y Y: 2447337.....	69
Figura 36.- Lámina de gráficos finales de PPR6 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: son X: 288903, Y: 2451817.....	70
Figura 37.- Lámina de gráficos finales de PPR7 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 286749, Y: 2446446.....	71
Figura 38.- Lámina de gráficos finales de PPR8 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 286611, Y: 2446090.....	72
Figura 39.- Lámina de gráficos finales de PPR9 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 283450, Y: 2452438.....	73
Figura 40.- Lámina de gráficos finales de PPR10 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 283461, Y: 2452451.....	74
Figura 41.- Lámina de gráficos finales de PPR11 y tabla de resultado, coordenadas UTM en X: 284200 y Y: 2451979.....	75
Figura 42.- Lámina de gráficos finales de PPR12 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 284651, Y: 2452254.....	76

Figura 43.- Lámina de gráficos finales de PPR13 y tabla de resultados, coordenadas UTM: en X: 284889, Y: 2450275.....	77
Figura 44.- Lámina de tabla de resultados PPR4, coordenadas UTM en X: 284179, Y: 2447337...80	80
Figura 45.- Lámina de tabla de resultados PPR-4', coordenadas UTM en X: 284179, Y: 2447337. 81	81
Figura 47.- Fotografía mostrando el horizonte de suelos del área de estudio.....	83
Figura 48.- Fotografía mostrando el basculamiento y fracturamiento columnar del miembro soldado de la Ignimbrita Cantera (Tics)	85
Figura 49.- Lámina de fotografía mostrando los basculamientos en el área de estudio; A), B), C) y E) Localidad de Escalerillas, D) Presa del Peaje, S.L.P.....	88
Figura 50.- Fotografía mostrando lajamiento e hidroclastismo en la Riolita San Miguelito (Tsm), ubicada en la Cañada del Lobo.....	89
Figura 51.- Lámina de fotografías mostrando termoclastismo en el miembro soldado de la Ignimbrita Cantera, A) y C), comunidad de Escalerillas, C) Mesa de los Conejos, S.L.P.....	91
Figura 52.- Lámina de fotografías A) y B) Escorrentía a través de fisuras, C) testigo de erosión, y D) formación de cárcava.....	93
Figura 53.- Fotografía mostrando erosión remontante en el área del Santuario de la Iglesia del Desierto.....	94
Figura 54.- Modelo digital de elevación para verificar los peligros observados en el área de est. 96	96
Figura 55.- Lámina mostrando caída de bloques, A) Presa el Potosino, B) y C) Presa de San José, D) Santuario del Desierto.....	97
Figura 56.- Lámina mostrando caída bloques en la comunidad de Escalerillas.....	98
Figura 57.- Lámina mostrando volcadura de bloques en A) y B) comunidad de Escalerillas, C) Presa el Potosino y D) Santuario de la Iglesia del Desierto.....	99
Figura 58.- Lámina de fotografías mostrando flujos de escombros en el área de estudio A), B) y D) Santuario de la Iglesia del Desierto, C) y E) San Luis Potosí y F) Mesa de los Conejos.....	103
Figura 59.- Lámina de fotografías mostrando erosión de suelos en el área de estudio A), C), E) y F) Santuario de la Iglesia del Desierto, B) Presa de San José, D) Mesa de los Conejos-S.L.P.....	104
Figura 60.- Lámina de fotografías A) fracturamiento debido al acomodo del depósito de los flujos piroclásticos, Escalerillas y B) Afloramiento cerca de zona de falla, Presa de San José.....	109
Figura 61.- Fotografía mostrando columnas de la Ignimbrita Cantera en la Presa del Peaje.....	110
Figura 62.- Imagen mostrando el ángulo α para una familia de discontinuidades, tomada de González de Vallejo <i>et al.</i> , (2002).....	124
Figura 63.- Imagen del <i>Software ImageJ</i> , tomada de Image J, versión 1.47h.....	124
Figura 64.- Histograma de los Sitios 1 y 2.....	127
Figura 65.- Láminas de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.....	128
Figura 66.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.....	129
Figura 67.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.....	130

Figura 68.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.....	131
Figura 69.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.....	132
Figura 70.- Lámina de histogramas de los sitios de muestreo en el área de estudio.	133
Figura 71.- Láminas de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.	134
Figura 72.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.....	135
Figura 73.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.....	136
Figura 74.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.....	137
Figura 75.- Figura de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.	138
Figura 76.- Imagen mostrando la relación entre RQD y espaciado de las discontinuidades λ , tomada de Zhang, L., 2005.	139
Figura 77.- Lámina de fotografías: A) Aparato digital para medir el índice de resistencia a la compresión, B) y C) secuencia de presión de muestras hasta llegar a la fractura de éstas, D), E) y F) preparación de muestras midiendo largo ($W1$), ancho ($W2$) y alto ($W3$).....	141
Figura 78.- Componentes del diagrama de cajas (<i>box plot</i>), tomada de (www.wikipedia.org).....	156
Figura 79.- Lámina de resultados obtenidos por medio del RMR (Bieniawski, 1989) y GSI (Hoek, 2000) de las unidades volcánicas del área de estudio.	158
Figura 80.- Lámina de resultados obtenidos por medio del RMR (Bieniawski, 1989) y GSI (Hoek, 2000) de las unidades volcánicas del área de estudio.	159
Figura 81.- Lámina de resultados obtenidos por medio del RMR (Bieniawski, 1989) y GSI (Hoek, 2000) de las unidades volcánicas del área de estudio.	160
Figura 82.- Lámina de fotografías mostrando A) Material de campo en las pruebas de permeabilidad, B) TDR y área de encharcamiento.....	162
Figura 83.- Lámina de fotografías: A) Tamizado de muestras y B) separación y pesado de muestras por tamaño de grano.....	171
Figura 84.- Curvas granulométricas de las muestras de suelos del área de estudio.....	176
Figura 85.- Imagen ráster del área de estudio.	181
Figura 86.- Peligros observados en el área de estudio.	182

Índice de tablas

Tabla 1.- Valores de RQD, tomada de Singh, B., y Goel, R.K., 1999.	42
Tabla 2.- Parámetros de evaluación de RMR de Bieniawski, tomada de Bieniawski (1989), Singh y Goel, (1999) García-Vallejo <i>et al.</i>, (2002)	46
Tabla 5.- Resultados de las pruebas de suelos.	78
Tabla 6- Tabla de comparaciones de los resultados obtenidos de campo, de Vieux (2004)	79
Tabla 7.- Contenido de gravas y conductividad hidráulica (K_s)	106
Tabla 8.- Datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM)	143
Tabla 8.- (Continuación) de datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM)	143
Tabla 8.- (Continuación) de datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM)	144
Tabla 8.- (Cont.) de datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia	145
Tabla 9.- Datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del caparazón de la Riolita San Miguelito (TSMC)	145
Tabla 10.- Datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del vitrófido de la Riolita San Miguelito (TSMB)	145
Tabla 11.- Datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del miembro no soldado de la Ignimbrita Cantera (TIC)	146
Tabla 12.- Datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del miembro soldado de la Ignimbrita Cantera (TICS).	147
Tabla 13.- Datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM)	149
Tabla 13.- (Continuación) de datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM)	150
Tabla 13.- (Continuación) de datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM)	151
Tabla 14.- Datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del caparazón de la Riolita San Miguelito (TSMC)	151
Tabla 15.- Datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del vitrófido de la Riolita San Miguelito (TSMB)	152
Tabla 16.- Datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro no soldado de la Ignimbrita Cantera (TIC)	152

<u>Tabla 16.- (continuación) de datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro no soldado de la Ignimbrita Cantera (TIC)</u>	<u>153</u>
<u>Tabla 17.- Datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro superior de la Riolita Panalillo (TRP)</u>	<u>153</u>
<u>Tabla 18.- Datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro soldado de la Ignimbrita Cantera (TICS)</u>	<u>154</u>
<u>Tabla 19.- Resultados sitio 1 y 2</u>	<u>157</u>
Tabla 20.- Resultados del pasante de las muestras de suelos para la construcción de curvas granulométricas	175
<u>Tabla 21.- Resultado de contenido de arenas, limos, arcillas y esqueleto (gravas) de las muestras de suelo del área de estudio</u>	<u>179</u>

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Altura de Diaconish	41
Ecuación 2: Espaciado de las discontinuidades	41
Ecuación 3: Cálculo de ROD	41
Ecuación 7: Resistencia de la roca a la compresión uniaxial (UCS)	44
Ecuación 28.- Módulo de elasticidad (GPa)	44
Ecuación 29.- Cálculo del Índice de Resistencia de la roca (GSI)	44
Ecuación 30: Fórmula de Wooding	45
Ecuación 10.- Asíntota	48
Ecuación 1: Cálculo de altura de Diaconish	126
Ecuación 2: Cálculo de espaciado de las discontinuidades	139
Ecuación 3: Cálculo de ROD	139
Ecuación 4: cálculo del diámetro de la muestra	148
Ecuación 5: Cálculo del índice de resistencia del punto de carga	148
Ecuación 6: Cálculo del factor de corrección	148
Ecuación 7: Cálculo de la corrección de forma al índice de resistencia obtenido	148
Ecuación 8: Cálculo del índice de resistencia a la compresión uniaxial (UCS)	148
Ecuación 9: Cálculo del tiempo parcial	165
Ecuación 10: Cálculo del radio equivalente	165
Ecuación 11: Asíntota	166
Ecuación 12: Cálculo del campo B de la ecuación de la asíntota	166
Ecuación 13: Cálculo de la descarga	167
Ecuación 14: Cálculo de 1/r	167
Ecuación 15: Cálculo de la densidad de flujo q	167
Ecuación 16: Cálculo del contenido de humedad del suelo (Delta Θ)	168
Ecuación 17: Fórmula de la densidad de flujo calculada	168
Ecuación 18: Cálculo del porcentaje absoluto del error	168
Ecuación 19: Cálculo del total de la muestra	171
Ecuación 20. Peso neto del material retenido en cada tamiz	172
Ecuación 21. Peso neto total de la muestra por cada malla	172

<u>Ecuación 22. Cálculo de pérdida de muestra en gr</u>	172
<u>Ecuación 23. Cálculo del porcentaje parcial retenido por cada tamiz ($W_{\%R}$)</u>	172
<u>Ecuación 24. Cálculo del porcentaje acumulado retenido ($W_{\%AR}$)</u>	173
<u>Ecuación 25. Cálculo de porcentaje acumulado de material pasante ($W_{\%AP}$)</u>	173
<u>Ecuación 26: Masa de arcillas en muestra (MA_m)</u>	177
<u>Ecuación 27. Factor de multiplicación (F)</u>	177
<u>Ecuación 28. Total porcentual de arcillas en muestra de suelo ($T\%Ams$)</u>	178

Dedicatoria

Con todo mi amor y cariño para mi familia, Claudio y esa lucecita que crece en mi
vientre

Wendy Puente

Agradecimientos

Agradezco a mi asesor Dr. Lorenzo Borselli y Dr. Margarito Tristán, por su guía, dedicación y paciencia.

También a los profesores que me brindaron su atención ante cualquier duda.

Al Proyecto de medición y producción de mapas de la capacidad de infiltración en áreas semiurbanas con aplicaciones a la mitigación de riesgo por inundaciones: aplicación a la Ciudad de San Luis Potosí FAI/UASLP (2011).

Al proyecto: Modelado de procesos hidrológicos, dinámica de hidrofobicidad e infiltración, para su aplicación en la evaluaciones del riesgo debido a inundaciones y lahares: aplicación en la ciudad de San Luis Potosí y en el Volcán de Colima (**CONACYT-Ciencia Basica-2012-01 -184060**)

Al Proyecto de estudio geotécnico e hidrológico para la evaluación del peligro geomorfológico de la Sierra de San Miguelito, San Luis Potosí (SLP) (2012-2013)(PROMEP uaslp-ptc-372).

También a Azalea, Isi y a todos los compañeros y amigos que me brindaron su tiempo, conocimiento y apoyo en el desarrollo de este trabajo.

También a las personas que colaboraron con su ayuda o material para llevar a cabo este trabajo.

A mis compañeros de generación Mercedes, David, Manuel y Alfredo por compartir su amistad, momentos de alegría y estrés.

A todas aquellas personas que pusieron un granito de arena en la elaboración de este trabajo.

Resumen

En la actualidad, tomar en cuenta los procesos geomorfológicos que modifican el relieve de la superficie terrestre junto con la calidad de las rocas y suelos, son factores importantes previos al desarrollo de infraestructura ya que generan un panorama de los peligros naturales a los que las futuras poblaciones estarían expuestas, causando una mejor toma de decisiones en cuanto a diseño y planeación, tratando de evitar o minimizar las consecuencias de estos peligros.

En la Ciudad de San Luis Potosí, se tienen planes para futuro desarrollo de urbanización, en áreas bajo peligros naturales en diferentes áreas de la Sierra de San Miguelito S.L.P. El área de estudio abarca la parte NW y centro de la Ciudad de San Luis Potosí que se encuentra en la Sierra de San Miguelito, teniendo un área de 114.148 km², donde se encuentran áreas de urbanización con amenaza de peligros de caída y volcadura de bloques, zonas de flujos de escombros, zonas con erosión de suelo.

La Sierra de San Miguelito presenta afloramientos de lavas riolíticas e ignimbritas de edad terciaria, las cuales se dividieron en unidades geotécnicas de acuerdo a los parámetros de evaluación de los macizos rocosos (*Rock Mass Rating*) RMR e índice geológico de resistencia (*Geological Strength Index*) GSI, ya que las riolitas dieron como resultados rocas que van de buena a muy buena calidad, dependiendo de los miembros en los que se tomaron muestras en éstas unidades, por lo que se dividió en dos unidades geotécnicas; las ignimbritas formaron dos tipos de depósitos un miembro sin soldar cuyo resultado fue de una roca de mala a calidad media y el miembro soldado dio resultado de una roca de buena calidad, por lo que cada miembro se dividió en 1 unidad geotécnica diferente.

Para conocer los parámetros de la capacidad de infiltración y transformación de un volumen de agua en escorrentía (conductividad hidráulica K_s y carga capilar G), se aplicó la metodología infiltración por goteo portátil (*Portable Drip Infiltrometer*) PDI.

Donde a través de la obtención de las áreas de encharcamiento, se llevó a cabo un modelo de ajuste no lineal para una función asintótica que permite la estimación del valor teórico máximo del radio de estas áreas en un estado estable. Dando como resultado valores de conductividad hidráulica (K_s) promedio de 6.1 mm/s y red capilar (G) promedio fue de 1128.42 mm, determinando que los suelos caen en la categoría de suelos loam areno-arcillosos y las pruebas que se aplicaron a rocas determinaron un valor promedio de 0.3 que corresponden materiales poco permeables, que favorecen la escorrentía, generando erosión de suelo, flujos de escombros y zonas de inundación en temporada de lluvias.

Los peligros geomorfológicos observados fueron caída y volcadura de bloques, deslizamientos, flujos de escombros, áreas de inundación fluvial y erosión de suelos observados a través de imágenes de satélite, fotografías aéreas, modelado de pendientes y trabajo de campo y laboratorio

CAPÍTULO I. Introducción

La ingeniería geotécnica es una rama de la ingeniería civil y geológica que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas e hidráulicas de los materiales que existen en la corteza terrestre, con el fin de comprender, solucionar o mitigar problemas generados por los procesos naturales que remodelan la superficie de la tierra y los causados por la actividad antrópica en el medio geológico. Se basa en dos aspectos importantes, el primero se dirige hacia las obras de ingeniería, donde el terreno constituye el soporte, material de excavación o de construcción; el segundo y más importante se basa en la mitigación y control de los riesgos geológicos (Vallejo *et al.*, 2002).

La geomorfología se basa en el estudio de los procesos endógenos y exógenos que modifican el relieve terrestre, así como estructura, origen, historia de desarrollo y dinámica actual; por lo que conocerlos es de gran importancia para áreas de población ya que una de las finalidades de esta rama es tomar en cuenta los factores que actúan en la modificación del relieve, generando peligros y riesgos geomorfológicos donde poblaciones y obras de ingeniería se encontrarían expuestas.

Por lo tanto, conocer las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de las rocas y suelos, así como comprender la historia, origen y desarrollo de los materiales que se han generado a lo largo del tiempo geológico debido a los procesos geomorfológicos que han llevado a la modificación de éstos, es de vital importancia para prevenir, solucionar o mitigar problemas que se presentan durante la construcción de obras de ingeniería.

El campo de la geomorfología y la geotecnia comenzaron a adquirir una mayor importancia en el mundo desde mediados del siglo XX teniendo un gran auge a partir de la década de los 80, debido a los grandes desastres que han sido causados por la actividad antrópica y por daños de las obras de ingeniería, teniendo consecuencias graves para poblaciones así como por actividades

naturales que han generado pérdidas de vidas humanas y grandes daños en áreas urbanas que se encuentran cerca de zonas de riesgos geomorfológicos.

Con la finalidad de evitar o mitigar futuros desastres o daños creados por la actividad natural y antrópica, se han creado métodos de clasificación de los macizos rocosos y suelos siendo el más usado el método de Clasificación del Macizo Rocosos (RMR) de Bieniawski (1989), que hace una puntuación de los cuerpos de roca a través de sus propiedades físicas en el lugar, Índice Geológico de Resistencia (GSI) de Hoek (2000), el cual se basa en la identificación y clasificación de las características físico-mecánicas de las rocas, el Sistema Q de Barton *et al.* (1974), que se utiliza para el diseño de soporte de numerosas obras de ingeniería, etc; actualmente se están diseñando técnicas y aplicaciones para determinar mejor cada una de las propiedades físicas de los macizos rocosos ya sea *in situ*, como el propuesto por Feng *et al.* (2003) que propone un nuevo procedimiento para medir la rugosidad de la superficie de las rocas en percepción remota, o a través de las pruebas de laboratorio, Li (2001) establece un método gráfico para presentar el módulo de deformación de las juntas de los macizos rocosos, Singh (2000) construye la aplicación de un modelo constitutivo para las juntas de los macizos rocosos, Bearman (1999) busca el uso de las pruebas de punto de carga para una rápida estimación de la dureza del fracturamiento, etc.

El campo de la geomorfología también ha tenido un gran desarrollo a nivel mundial en la construcción de mapas de riesgos para zonas urbanas a través de los Sistemas de Información Geográfica (GIS) y modelado espacial, debido a que son herramientas que se utilizan para el manejo, asesoramiento y predicción de los peligros, riesgos naturales y vulnerabilidad de áreas urbanizadas; éstos son contruidos a través de bases de datos espaciales (Carrara, *et al.*, 1999; Lee y Chou, 2003) que incluyen mapas de peligros, topográficos, geológicos, objetos dañables, imágenes de satélite, datos meteorológicos y datos de análisis del terreno. También a través de éstos sistemas, pueden crearse mapas temáticos mostrando zonas de peligro que pueden ser evaluadas para planeación, análisis

de riesgos y toma de decisiones para el diseño de infraestructura (Mantovani, *et al.*, 2009).

Desde los años 1980 en el estudio, manejo y predicción de los peligros naturales se han implementado técnicas de geotecnia y geomorfología aplicada al diseño de construcción de infraestructura (Alexander, 1991; Fookes *et al.*, 2007), haciendo especial énfasis en los peligros naturales que son causados por inundaciones, movimientos de masa, terremotos, volcanes y degradación de la tierra (Clague, 1982), donde la correcta evaluación ayuda a la toma de decisiones para diseño, desarrollo y planificación de acuerdo a la información obtenida de 1) localización de los eventos geomórficos pasados y sus impactos, tamaño aproximado y el intervalo de recurrencia, 2) evolución y origen de los suelos y estructuras superficiales junto con sus propiedades mecánicas y sísmicas, 3) estabilidad de las pendientes y la formas de inestabilidad; teniendo esta información y la obtenida a través de técnicas de percepción remota son creadas bases de datos especiales que incluyen peligros geomorfológicos y que pueden ser manipuladas a través de SIG, para conocer, entender, evaluar y predecir futuros peligros (Lee y Tu, 2005; Lee y Pradhan, 2006; Oh, *et al.*, 2009) y crear mapas de acuerdo a las necesidades de cada lugar.

En México, antiguamente, los métodos más usados para el diseño de infraestructura, ha sido el de Clasificación del Macizo Rcoso (RMR) de Bieniawski (1989) y sus modificaciones, incluyendo la aplicada a la construcción de túneles y minería subterránea junto con el Sistema Q de Barton (Barton *et al.*, 1974). La geomorfología se llevaba a cabo a través de fotografías aéreas y mapeo de campo, donde se determinaban las diferentes formas del terreno junto con los procesos que las generaban. Actualmente en éstos campos comienzan a aplicarse nuevas técnicas, debido a los desastres que han sido causados por mala toma de decisiones en el diseño y desarrollo de infraestructura, relacionando las características físicas de los macizos rocosos, con los procesos que están actuando en alguna zona modificando el relieve y generando peligros o riesgos naturales e inducidos dependiendo de la vulnerabilidad de áreas urbanas. Por

ejemplo Capra *et al.*, 2003, en el Poblado Zapotitlán de Méndez, Puebla, estudió los fenómenos de remoción en masa relacionando la litología con el tipo de deslizamiento, debido a que la depresión tropical número 11 desencadenó deslizamientos superficiales en suelos volcánicos y rotacionales profundos en lutitas plegadas provocando los daños mayores a las construcciones de este lugar.

Durgin (1977), hizo relaciones basándose en el intemperismo de los batolitos graníticos con tipos de deslizamientos, dividiéndolos en las etapas de erosión de éstas rocas, las etapas fueron: 1) rocas frescas en las que se desarrolla caída de rocas y deslizamientos de rocas, sugiriendo que este comportamiento se debe a las juntas de los macizos rocosos, en lugares donde las juntas son suaves encontró que los movimientos de masa fueron de avalanchas y flujos de detritos; 2) en la etapa de núcleos de rocas observó que los movimientos fueron de avalanchas de caídas y volcadura de rocas; 3) en la etapa de granitoide descompuesto, es decir con desintegración granular, determinó movimientos de flujos, avalanchas y deslizamientos de escombros; 4) en la etapa de saprolito, es decir la roca de granito residual es vulnerable a deslizamientos rotacionales; como también concluyó que mientras aumentaba la descomposición de los afloramientos de las rocas graníticas, disminuía el ángulo crítico de la pendiente permitiendo el fallo de las pendientes a lo largo de la historia del intemperismo.

Debido a los desastres naturales y por causa de la actividad antrópica, que han ocurrido en México, especialmente en el Estado de San Luis Potosí, a través de las unidades de protección civil y en el marco del Programa de Prevención de Riesgos en Asentamientos Humanos de la SEDESOL, han tomado la iniciativa solicitando la colaboración de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, a través del Instituto de Geología, formando un convenio para la elaboración de un Atlas de Riesgo para los municipios de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez (2012) con el fin de generar un conocimiento previo de los agentes naturales que actúan en las futuras áreas de urbanización, a fin de definir el rumbo

hacia donde se orientará el mayor esfuerzo para poder planificar y diseñar medidas o establecer procedimientos para combatir los riesgos.

Objetivo

El crecimiento de la población en San Luis Potosí, está llevando a la construcción de infraestructura hacia zonas geológicas adversas, debido a la falta de consideración de los peligros naturales por mala evaluación y selección de los lugares de construcción, ocasionando mala toma de decisiones en cuanto al diseño, planeación y desarrollo de las zonas urbanas; debido a esto ha surgido la necesidad de construir un mapa a escala 1:20,000 de peligros naturales, en donde se tienen planes a futuro para áreas de urbanización, basado en el Atlas de Riesgos (2012), construido por el Gobierno del Estado de S.L.P., a través de las unidades de Protección Civil y en el marco del Programa de Prevención de Riesgos en Asentamientos Humanos de la SEDESOL en convenio con el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

El objetivo de este trabajo es hacer un estudio geotécnico y de peligro geomorfológico de la parte NE y centro de la Sierra de San Miguelito, S.L.P. con el fin de tomar en cuenta los procesos geomorfológicos activos y así llegar a una correcta planeación y toma de decisiones en el diseño, poder evitar o mitigar los daños ocasionados a los bienes por la acción de los agentes naturales y actividad antrópica en el desarrollo de futuras áreas de urbanización.

Objetivos específicos

- Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los macizos rocosos, donde se aplicó el método de RMR de Bieniawski (1989) comparando los resultados con el GSI de Hoek (1997), resistencia de la roca intacta (UCS) (Chau y Wong, 1996, Hawkins, 1998, Kahraman, 2001, Fener *et al.*, 2005) y así poder determinar la cohesión (C) y ángulo de fricción interna (ϕ), parámetros que son importantes para definir la resistencia al corte (Hoek, 1990).

- Evaluación de las propiedades hidráulicas de las rocas y suelos a través del método de Infiltración por Goteo Portable (PDI) (Borselli *et al*, 2013) y obtener los parámetros de conductividad hidráulica (K_s) y carga capilar (G) (Wooding, 1968; Philip, 1992; Warrick, 1992; Shani y Or; 1995). Análisis granulométrico de suelos para obtener la concentración de limos y arcillas del área de estudio.
- Creación de polígonos sobre imágenes multitemporales de Google Earth; Creación de un modelos Digital de Elevación (DEM) a escala de 10 x 10 m a través de Sistemas de información Geográfica (SIG); creación de un modelo de pendientes.

Metas

La caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas se hicieron con el objetivo de construir un mapa geotécnico dividiendo las unidades volcánicas del área de estudio en unidades geotécnicas.

La evaluación de las propiedades hidráulicas de los suelos y granulometría, se hicieron con el objetivo de determinar área de escorrentía y zonas con peligro de inundación.

La creación de polígonos, DEM a escala de 10 x 10 m y modelado de pendientes se hicieron con el objetivo de construir un mapa de peligros naturales del área de estudio, con características de caída y volcadura de bloques, flujos de escombros y deslizamientos.

Este conjunto de metodologías se hizo para crear una base de datos para la construcción de un mapa de peligros geomorfológicos.

CAPÍTULO II. Descripción geográfica y geológica del área de estudio

II.1. Generalidades del área de estudio

II.1.1. Localización y vías de acceso

El área de estudio se encuentra en una porción de la parte centro y noroeste de la Sierra de San Miguelito S.L.P., cubriendo un área aproximada de 114.148 km² (

Figura 1).

Se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas 22°04'9.78" a 22°12'36.84" de Latitud Norte y 100°58'8.31" a 101°6'45.61" de Longitud Oeste (Figura 1).

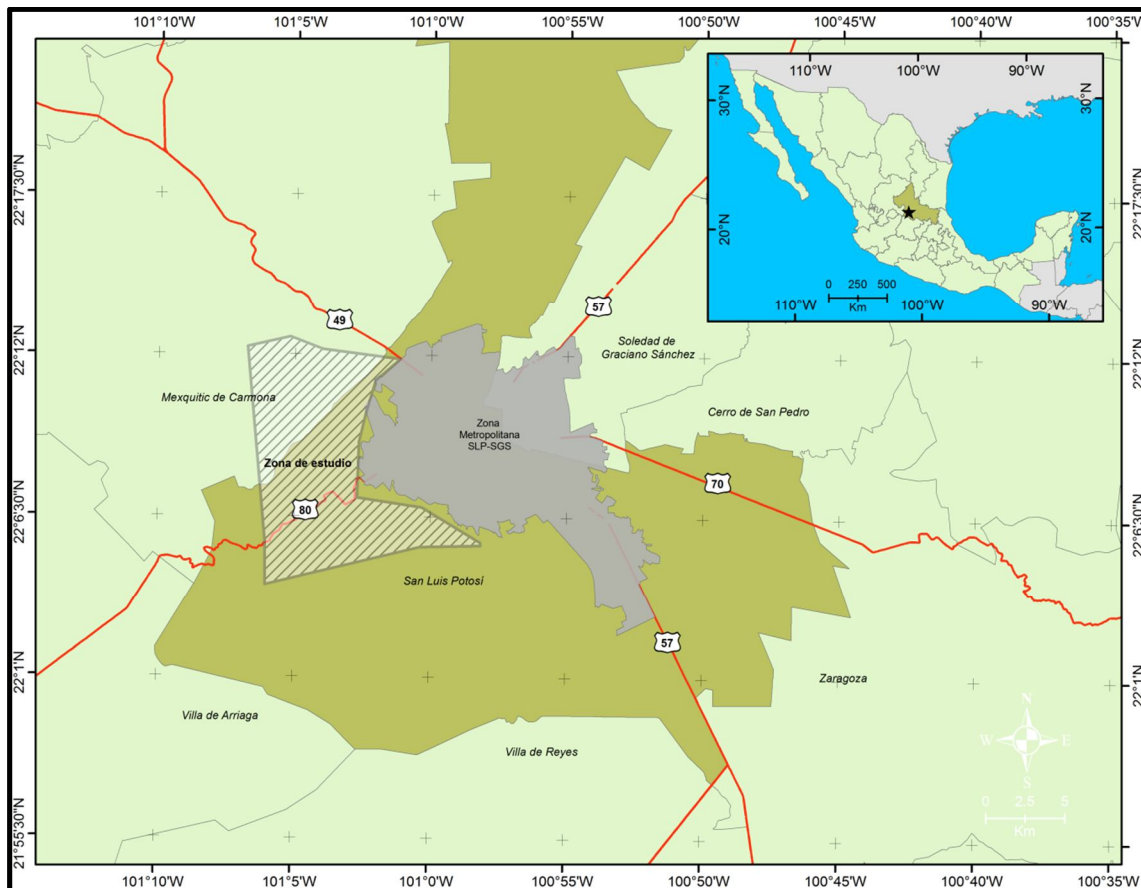


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio, tomada de www.googleearth.com.

Las vías de acceso son la Carretera Estatal No 80 San Luis Potosí-Guadalajara, con desviación a la comunidad de Escalerillas y Presa del Peaje; anillo periférico libramiento sur y este, con desviación hacia la Cañada del Lobo, Capulines, Iglesia del Desierto, Presa de San José, Villa Magna y Horizontes, Carretera Estatal No. 49 con desviación hacia el poblado Suspiro Picacho y también algunos caminos de terracería que comunican pequeñas comunidades con poblados (Anexo 1).

II.1.2. Fisiografía

El área de estudio se encuentra en el Estado de San Luis Potosí, que pertenece a la provincia Fisiográfica de la Mesa Central (Raisz, 1959). La cual está representada por suaves lomeríos con una elevación promedio de 1,700 m.s.n.m. en la porción central y oriental, abarca los estados de Zacatecas, Aguascalientes y parte de los estados de San Luis Potosí, Jalisco, Guanajuato, Querétaro, Coahuila y Nuevo León; se encuentra delimitada por las provincias Sierra Madre Occidental y Oriental, hacia la parte sur por el Eje Neovolcánico (Figura 2).

En la Mesa Central se conocen dos regiones:

Región Sur: donde las cotas son mayores a 2000 m.s.n.m. es una región montañosa cubierta en su mayor parte por rocas volcánicas de edad Cenozoica (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005) con estado de erosión más activo que la región norte y con desniveles más pronunciados.

Región Norte: Es el área de mayor tamaño, con un estado de erosión más avanzado con cuencas continentales rellenas de sedimentos lacustres, algunas de ellas endorréicas, tiene las cotas más bajas y los desniveles menores, donde la parte septentrional tiene una elevación menor a 2000 m.s.n.m.

En el área de estudio las cotas más elevadas se encuentran en el Cerro Grande con una elevación de 2540 m.s.n.m. y las menores corresponden al Valle de San Luis Potosí cuyas cotas son menores a 1880 m.s.n.m.

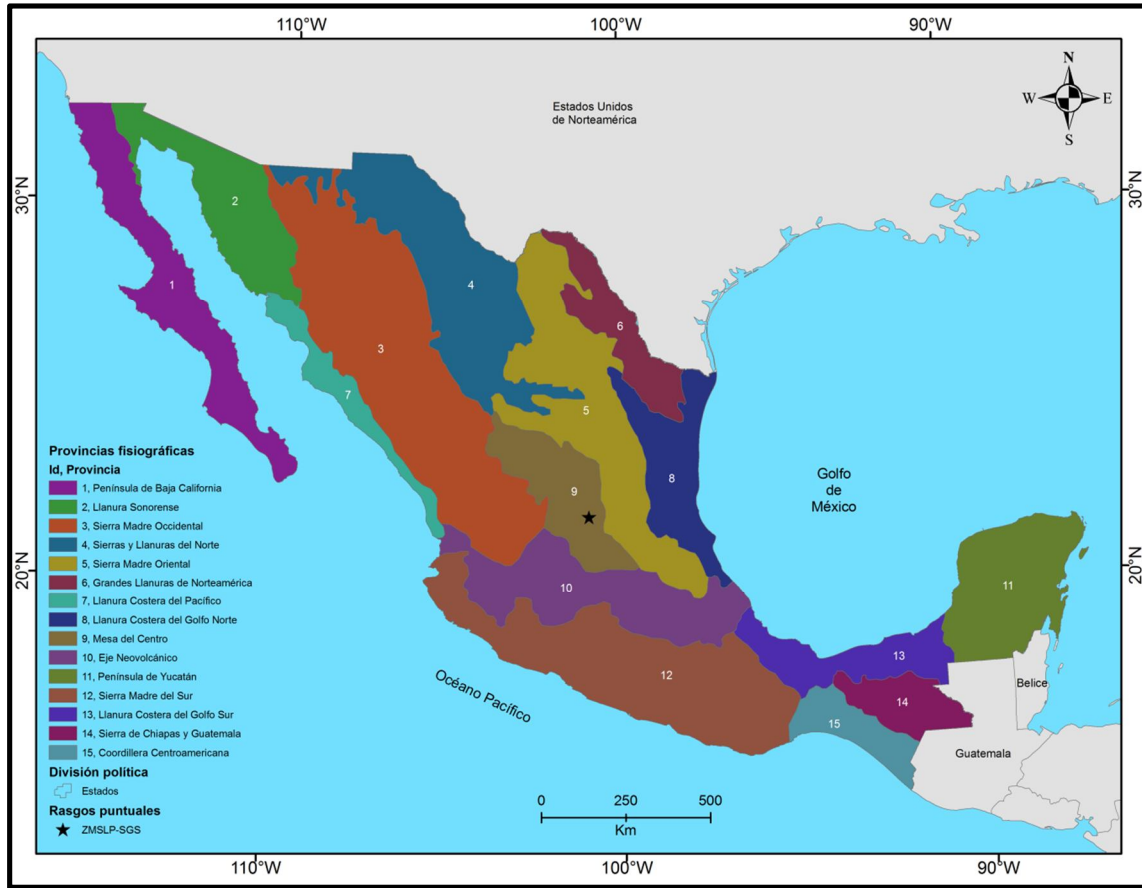


Figura 2. Mapa fisiográfico, tomado de Raisz (1959).

El límite entre estas dos regiones lo constituye un lineamiento de más de 1,600 km de longitud con rumbo NW que ha sido documentado como un sistema de fallas normales de edad Cenozoica, el Sistema de fallas San Luis-Tepehuanes (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Silva-Romo, 1996; Aranda-Gómez *et al.*, 2003).

II.1.3. Geología general

II.1.3.1. Marco geológico regional

El área de estudio se encuentra dentro de la Provincia Volcánica de la Sierra Madre Occidental (SMOc), la cual se generó en el Cretácico tardío-Cenozoico temprano, asociada a la subducción de la Placa Farallón bajo la Placa de

Norteamérica y a la apertura del Golfo de California (McDowell y Clabaugh *et al.*, 1979).

Las rocas marinas corresponden a la Cuenca Mesozóica de Centro de México (CMCM) la cual abarca gran parte de la porción central, oriental y suroriental en la Mesa Central (MC; Carrillo-Bravo, 1982). Las rocas más antiguas corresponden a facies turbidíticas de edad triásica que delimitan burdamente la zona del margen continental en ese tiempo (Barboza-Gudiño *et al.*, 1999), sobreyaciendo a estas rocas aparecen distribuidas en toda la Mesa Central rocas continentales de edad jurásica, donde en el Oxfordiano hasta finales del Cretácico prevalecieron condiciones marinas dentro de la CMCM.

De manera paralela a la sedimentación de la cuenca, se desarrollaba la secuencia marina de la Plataforma Valles–San Luis Potosí que comienza su formación en el Cretácico temprano, localizada al oriente de la Cuenca Mesozóica del Centro de México (Carrillo Bravo, 1971) y cuyas rocas pertenecen a la Sierra Madre Oriental.

Las rocas marinas y continentales de la CMCM, fueron afectadas por la Orogenia Laramide, que acortó las secuencias de rocas hacia el oriente, formando el Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental (Cserna *et al.*, 1956).

Sobre la secuencia marina y continental de la porción suroriental de la MC, se emplazaron rocas volcánicas que formaron el Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP), el cubre un área aproximada de 40, 000 km². El vulcanismo dio inicio en el Eoceno medio con la emisión de derrames de lava andesítica depositados sobre sedimentos lacustres del Paleoceno tardío al Eoceno temprano – medio (45 Ma)

La etapa del vulcanismo voluminoso del Campo Volcánico de San Luis Potosí se llevó a cabo en el rango de 31 a 25 Ma, de composición riolítica de alto sílice, que formó domos y piroclásticos de gran volumen. Entre los 22 y 20 Ma se traslaparon eventos restringidos de vulcanismo intraplaca en el CVSLP, que fue de

composición basáltica. El último evento fue de forma intermitente, con generación de lavas basaníticas del Plio-Cuaternario (Tristán González, *et al.*, 2009).

La secuencia de rocas volcánicas del Terciario del CVSLP, fue afectada por la tectónica extensional que provocó la formación de fosas y pilares tectónicos limitados por fallas de alto ángulo, esta región se conoce como Provincia de Cuencas y Sierras de México (PCS; Stewart, 1978 y 1998; Henry y Aranda-Gómez 1992).

Por la magnitud, el vulcanismo y fallamiento son los eventos más importantes que han afectado a la región de la PCS durante el Terciario. Esta región se extiende de manera casi continua por más de 1, 200 km desde la porción NW de la frontera de México y Estados Unidos, hasta la Faja Volcánica Transmexicana (Stewart, 1978).

La extensión tectónica que formó la PCS parece haber formado un sello en el vulcanismo, ya que está ligado a la actividad volcánica y extensión en la MC de México (Aranda-Gómez *et al.*, 2000).

II.1.3.2.- Geología Local

El área de estudio se encuentra dentro del Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito (CVSSM), localizado al sur y occidente de la Ciudad de san Luis Potosí, donde las unidades volcánicas abarcan desde el Oligoceno temprano al tardío (Tristán-González *et al.*, 2009), formada por lavas e ignimbritas.

El inicio de esta actividad originó derrames de lava de composición dacita-riodacita (Latita Portezuelo) y continuó con lavas que formaron domos exógenos y piroclásticos de composición riolítica (Riolita San Miguelito e Ignimbrita Cantera). La serie de domos se emplazaron siguiendo estructuras regionales con orientación NW-SE (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982).

Gran parte del volumen de las rocas volcánicas de la secuencia superior lo forman los domos exógenos de las Riolitas San Miguelito y El Zapote entre la que se encuentran intercalados paquetes gruesos de depósitos de flujos piroclásticos pertenecientes a la Ignimbrita Cantera y San José con una edad de 29 Ma (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Torres-Hernández, 2009).

Entre los 27 y 28 Ma, hubo actividad volcánica puntual de composición félsica siguiendo las fallas principales con orientación NW-SE. Los productos de este vulcanismo fueron ignimbritas de composición riolítica (Ignimbrita Panalillo) con intercalaciones de basalto (Basalto La Placa) lo cual sugiere un vulcanismo bimodal (Torres-Aguilera y Rodríguez-Ríos, 2005).

Estratigrafía (Figura 11)

Latita Portezuelo (Tlp)

Terciario (Oligoceno 31.0 ± 0.7 Ma)

- Definición: originalmente fue descrita informalmente como latita Porfirítica por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1978), en la cartografía geológica de la Hoja San Luis Potosí; posteriormente fue propuesta formalmente como Latita Portezuelo por Labarthe-Hernández *et al.*, (1982), considerando su localidad tipo en la inmediaciones del poblado de Portezuelo, S.L.P.
- Distribución: aflora hacia la porción NW del área, en las cercanías del Santuario de la Iglesia del Desierto y hacia el fondo del afluente NE del Arroyo El Palmarito, en la zona central norte.
- Litología y espesor: la descripción de campo consiste de una roca de color crema a pardo, de textura porfirítica, en una matriz desvitrificada; 15% de fenocristales de 2 a 6 mm de sanidino y plagioclasa euhedrales a subhedrales con cuarzo anhedral. Como minerales accesorios tiene magnetita. Presenta estructura fluidal y fracturamiento columnar.

En general intemperiza con un color café rojizo, en forma de picachos, produciendo además una gravilla con tamaño de sus fragmentos de 1 a 3 cm.

Hacia su cima presenta un caparazón, que consiste de un vitrófido negro a gris oscuro verdoso con cierta abundancia de desvitrificación en esferolitas y bandas. Este caparazón tiene unos 20 cm de espesor.

Análisis químicos de algunas muestras de esta unidad colectadas en el CVSLP, las sitúan como una riolacita rica en K (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982).

Al no aflorar su base, se desconoce su espesor; sin embargo en el pozo de agua PSLO-2, perforado en el poblado de Cándido Navarro, localizado éste en la porción NE del Valle de San Luis, se cortaron 466 m de esta unidad. (Martínez-Ruiz y Cuellar-González, 1979).

- Relaciones estratigráficas: es la unidad más antigua del área y está sobreyacida por la Riolita San Miguelito y también por la base sin soldar de la Ignimbrita Cantera.
- Edad: la edad isotópica por el método K/Ar de una muestra de esta unidad, tomada en la Sierra El Durazno en el norte del Campo Volcánico de San Luis Potosí, al norte de Ahualulco, dio una edad de 31.0 ± 0.7 Ma (Tristán-González *et al.*, 2009).

Riolita San Miguelito (Tsm)

Terciario (Oligoceno, 30.0 ± 1.5 Ma)

- Definición: originalmente fue descrita por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1978), en la cartografía geológica de la Hoja San Luis Potosí; posteriormente fue propuesta formalmente por Labarthe-Hernández *et al.*, (1982), considerando su localidad tipo en la estribación norte de la Sierra de San Miguelito, bordeando el valle de la Ciudad de San Luis Potosí (Lat.

22°05.7' N, Long. 100°59.8' W). Labarthe-Hernández y Jiménez-López (1992; 1993; 1994), la clasificaron como derrames episódicos. En campo se describe como una roca de color rosa a pardo con fenocristales subhedrales a anhedrales de cuarzo 10%, sanidino euhedral 15%, con biotita como mineral accesorio, en una matriz desvitrificada. Labarthe-Hernández *et al.*, (1982) dividen a esta unidad en cuatro unidades, que de la base a la cima son como sigue: tefra basal (Tsmb); brecha de desintegración (Tsmo); riolita desvitrificada central (Tsm) y caparazón (Tsmc).

- Distribución: ocupan gran parte del área estudiada, principalmente en las porciones central poniente, sureste.
- Litología y espesor:

Descansando sobre la Latita Portezuelo, aparece la tefra basa que consiste de un flujo piroclástico pobremente estratificado y líticos y pómez sin colapsar, de 10 a 20 m de espesor.

Sobre la tefra basal aparece en forma lenticular, una zona de brecha que consiste de fragmentos angulares de 30 a 60 cm de vitrófido negro y gris oscuro verdoso, en matriz de fragmentos finos y ceniza de color crema amarillento, el espesor va de 15 a 40 m. Sobreyaciéndolas aparece un vitrófido masivo, de color negro a gris oscuro, lenticular, que va de 3 hasta 20 m de espesor (Figura 3, A).

Arriba de las brechas de desintegración y/o del vitrófido masivo, está lo que es la porción central de los flujos de lava riolíticos que consisten en una roca de color gris claro a gris rosáceo, de textura holocristalina, porfirítica, con matriz afanítica, con 15-20% de fenocristales de 2 a 4 mm de sanidino euhedral y cuarzo subhedral a anhedral en la misma proporción o predominando el primero, con magnetita diseminada en la matriz, parcialmente alterada a hematita. La matriz está totalmente desvitrificada se observa textura fluidal, pliegues de flujo y en general, presenta una estructura columnar hacia su parte alta y planar en la porción media e inferior (Figura 3, B).

Transicionalmente sobre la riolita desvitrificada de la porción central de los flujos de lava, aparece un caparazón que es un flujo de cenizas sin soldar de color anaranjado o rosa, con abundante pómez sin colapsar y un 3 a 5% de fenocristales de cuarzo y sanidino (Figura 3, C). El espesor es del orden de los 90 m.

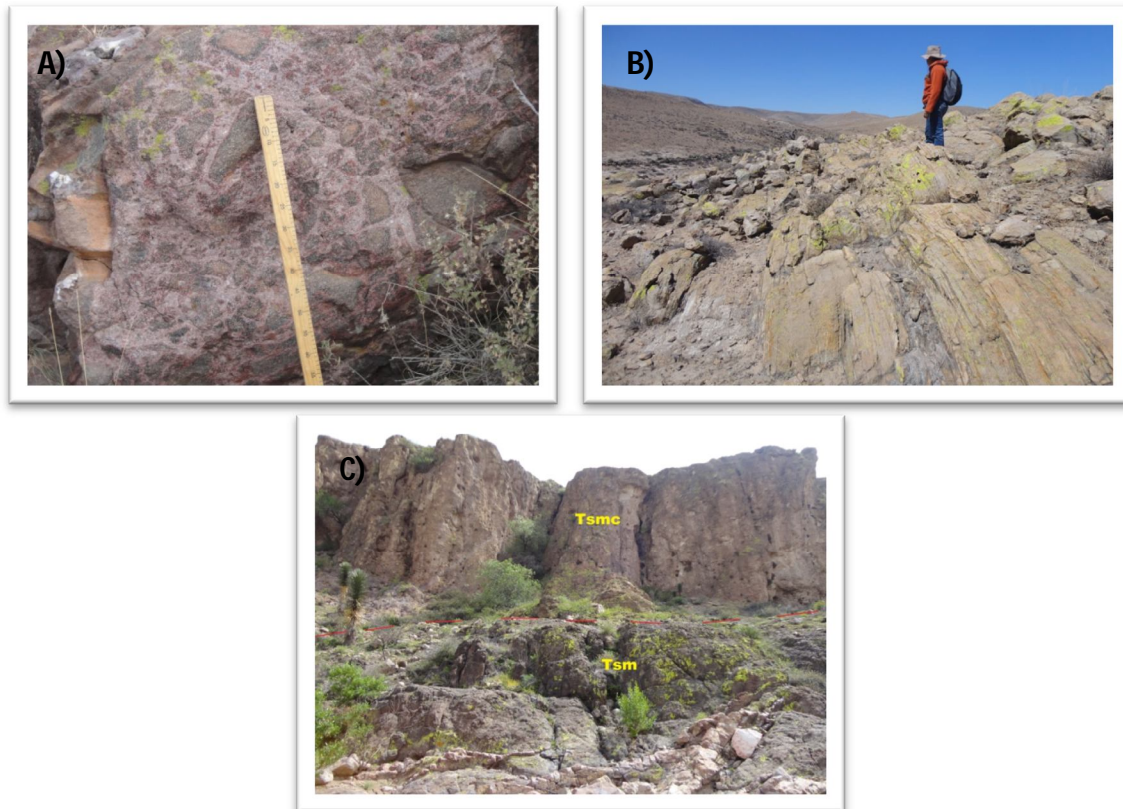


Figura 3.- Fotografías de algunos miembros de la Riolita San Miguelito, A) Brechas de desintegración, B) Miembro desvitrificado central y C) Caparazón de la Riolita San Miguelito.

- Relaciones estratigráficas: la Riolita San Miguelito sobreyace a la Latita Portezuelo con los contactos descritos. Hacia la zona de la Iglesia del Desierto, la primera no llega a cubrir a la segunda, estando la Ignimbrita Cantera directamente sobre el caparazón de la Latita. Esto indica que en esta porción, se está en el final de uno de los lóbulos de la Riolita San Miguelito; por otra parte subyace a la Ignimbrita Cantera.

- Edad: fue determinada por K/Ar, dio 29.1 ± 0.7 Ma., (Tristán-González *et al.*, 2009).

Ignimbrita Cantera (Tic)

Terciario Oligoceno (29.0 ± 1.5 Ma)

- Definición: originalmente fue descrita informalmente por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1978), en la cartografía de la Hoja San Luis Potosí; posteriormente fue propuesta formalmente por Labarthe-Hernández *et al.*, (1982), considerando su localidad tipo en el Arroyo de la Cantera, localizado a 2.5 km al NE del poblado de Arroyos, S.L.P.
- Distribución: es la unidad que aflora en la mayor parte del área de estudio, principalmente en porción central y norte del área, ocupando una depresión topográfica entre los domos del Cerro Grande al NE.
- Litología y espesor: Se trata de flujos de ceniza, que Labarthe-Hernández, *et al.*, (1982) la dividieron de acuerdo a su grado de soldamiento en sin soldar (Tic) y bien soldada (Tics). Esto ayuda mucho para saber dónde se está estratigráficamente, sobre todo por el intenso fallamiento que se presenta en el área.

❖ Base sin soldar (Tic)

La base de la Ignimbrita Cantera, consiste de la porción sin soldar de un flujo de cenizas riolítico. Su espesor es de 2 hasta 30 m. De un color blanco a rosa, con fenocristales de sanidino euhedral 15%, cuarzo anhedral 10%, pómez sin colapsar 10%, líticos 5%, empacados en una matriz de ceniza. No presenta fracturamiento notable (Figura 4, fotografías A) y B)).

❖ Ignimbrita Cantera Soldada (Tics)

Transicionalmente, la base sin soldar pasa a una zona parcialmente soldada y luego al paquete de flujo de cenizas bien soldadas, que consiste de una roca de color gris rosáceo a café grisáceo, de textura porfirítica, en campo se observa una mineralogía de cristales de 2 a 4 mm de sanidino euhedral 15%,

cristales subhedrales de cuarzo 7% en una matriz desvitrificada; presenta fiames de pómez colapsada, líticos verdosos, rojizos de areniscas (Formación Caracol?) y café de rocas volcánicas.

Presenta un fracturamiento columnar muy notable. Su cima consiste de un horizonte parcialmente soldado de color rosa o ligeramente anaranjado que es de donde se extrae la mayoría de la cantera ornamental en el área, y sobre él, en forma lenticular, una capa delgada sin soldar, de color crema, que tiene un espesor de 0.5 a 1 m (Figura 5).

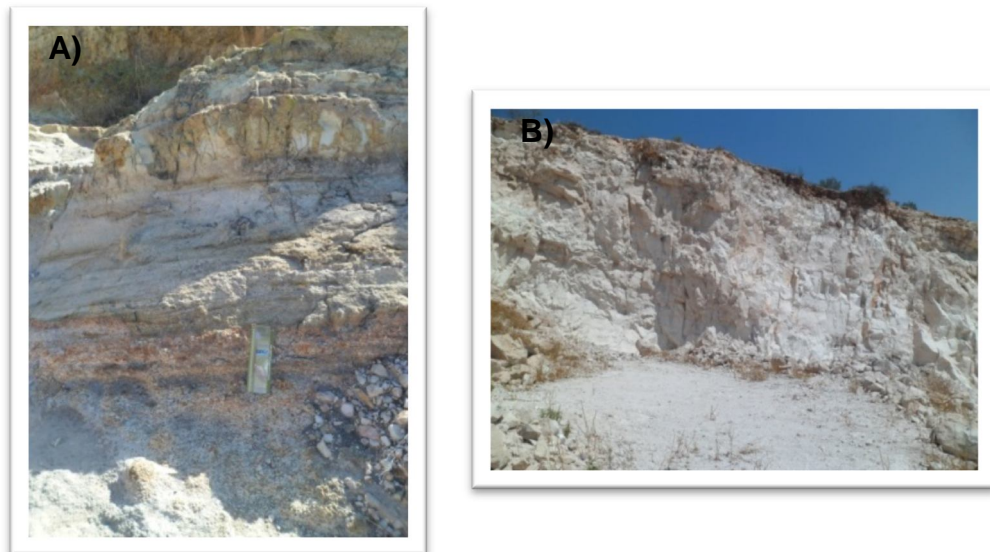


Figura 4.- Fotografías del miembro no soldado de la Ignimbrita Cantera, A) Estratificación de la base de la Ignimbrita Cantera, B) Aspecto del miembro no soldado de la Ignimbrita Cantera.

El espesor de toda la Ignimbrita Cantera, incluyendo su base sin soldar, es del orden de 350 m. En el Valle de San Luis el pozo para agua IMMSA, localizado al W de la ciudad Capital, cortó 343 m, que con un echado supuesto de 15° NE, da un espesor de 331 m (Labarthe-Hernández y Jiménez-López, 1992).

- Relaciones estratigráficas: sobryace con los contactos descritos a la Latita Portezuelo y a la Riolita San Miguelito y subyace al miembro inferior de la

Riolita Panalillo y en ocasiones discordantemente al Conglomerado Halcones

- Edad: Labarthe-Hernández *et al.*, (1982), obtuvieron una edad de 29.0 ± 1.5 Ma, por el método de K/Ar de roca completa, de una muestra de esta unidad, tomada al oriente del área estudiada.



Figura 5.- Fotografía de las columnas del miembro soldado de la Ignimbrita Cantera.

Basalto La Placa (Tbp)

Terciario Oligoceno

- Definición: Originalmente fue descrito informalmente por Tristán-González y Labarthe-Hernández (1979), en la cartografía de la Hoja Tepetate, simplemente como un basalto. En la Hoja San Francisco lo reportan como Basalto, intercalado entre los dos miembros de la Riolita Panalillo. Por otro lado, Labarthe-Hernández *et al.*, (1982), lo incluyeron como parte del basalto Cabras. Aquí informalmente se está llamando como basalto La

Placa, a una roca de esta composición que se encuentra subyaciendo al Miembro Superior de la Riolita Panalillo.

- Distribución: aflora solamente en la porción sur del área, en una faja delgada de orientación NW.
- Litología y espesor: se trata de una roca de color negro, frecuentemente vesicular, afanítica, de textura holocristalina, inequigranular, microporfirítica y pilotaxítica bien desarrollada en la matriz. Los microfenocristales son de andesina calcárea y olivino alterado a bowlingita. La matriz es de microlitos de plagioclasa, magnetita oxidada y posible piroxeno intersticial. Su espesor es de 10 a 15 m.
- Relaciones estratigráficas: sobreyace a la Riolita San Miguelito y subyace al miembro superior de la Riolita Panalillo.
- Edad: Tristán-González *et al.*, (2009), reportaron una edad por el método de K/Ar de roca entera de 21.5 ± 0.5 .

Riolita Panalillo (Trp)

Terciario Oligoceno (26.8 ± 1.3 Ma)

- Definición: originalmente fue descrita informalmente por Labarthe-Hernández y Tristán-González (1978), en la cartografía de la Hoja San Luis Potosí; posteriormente fue propuesta formalmente por Labarthe-Hernández *et al.*, (1982), considerando su localidad tipo al poniente del poblado del Panalillo, S.L.P.
- Distribución: aflora en manchones aislados, generalmente distribuida irregularmente en forma alargada hacia la parte central del área de estudio.
- Litología y espesor: se trata de un paquete de rocas volcánicas que se dividieron en dos miembros:
 - ❖ Miembro inferior (Tap)

Consiste de una serie de flujos de ceniza sin soldar, de color crema a amarillento, con 5 a 10% de fenocristales de sanidino y cuarzo, pómez sin colapsar y líticos de areniscas (Formación Caracol?) rojizas y verdes, y de rocas volcánicas, en una matriz de esquirlas de vidrio y fragmentos del tamaño de ceniza. Con intercalaciones de tobas de caída, bien estratificadas, en capas de 2 a 10 cm, gradadas, muy finas y laminares, casi sin fenocristales y aisladamente con estratificación cruzada. Con cierta frecuencia presenta pequeños diques de tuficita de 10 a 40 cm. Estas tuficitas se llegan también a observar muy esporádicamente en la Ignimbrita Cantera infrayacente.

Desde el poblado de Pozuelos y siguiendo el arroyo del Juachín, hasta 3.5 km al NW, la base de este miembro inferior, consiste en lo que se ha interpretado como una brecha co-ignimbrítica de rezago ("co-ignimbrite lag breccia" Tap), que consiste de un depósito rico en líticos, pobremente clasificado, estratificado, con fragmentos de la Riolita San Miguelito, que van desde 5 cm a megabloques de 3 o 4 m. Los fragmentos son tanto angulares como subredondeados y se encuentran en una matriz de cenizas. La proporción de estas es muy variable, ya que mientras en algunos lugares los fragmentos están empacados unos con otros casi sin cenizas, en otros predomina ésta, y a veces se intercalan delgadas capas de flujos de ceniza. Se trata de un depósito de caída libre, en o muy cerca de la zona de fuente.

El espesor del Miembro inferior de la Riolita Panalillo en la margen N de la Presa del Peaje es de 243 m. y en el Valle de San Luis en el pozo del poblado de La Rivera se cortaron 234 m. La brecha co-ignimbrítica tiene hasta 30 m de espesor (Labarthe-Hernández y Jiménez-López, 1992).

❖ Miembro superior (Trp)

Consiste de un flujo de cenizas riolítico, bien soldado, de poco espesor (10-30 m), que puede tener dos presentaciones: La primera es una roca de café claro a rosa claro, de textura microcristalina, porfirítica y eutaxítica, con 5 a 10% de fenocristales de 1-2 mm de cuarzo y sanidino, en una matriz parcialmente desvitrificada, con esquirlas de vidrio (Figura 6).

Tiene pómez bien colapsada y líticos. La segunda es de color gris rosáceo, café o gris rojizo, de textura merocristalina, porfirítica, fluidal, con un 10 a 15% de fenocristales de 1 a 4 mm, de cuarzo y sanidino en una matriz parcialmente desvitrificada. Tiene pómez bien colapsada y su característica principal es que presenta numerosas esferolitas de 0.5 a 2.0 cm rellenas de calcedonia. Presenta estructura columnar muy típica y forma mesetas planas.

Su contacto con el miembro inferior es un vitrófido negro de 1-2 m de espesor o bien una zona sin soldar muy delgada (20-50 cm).



Figura 6.- Fotografía mostrando el miembro superior de la Riolita Panalillo.

- Relaciones estratigráficas: sobreyace a la Ignimbrita Cantera y al Basalto La Placa, y sólo subyace discordantemente al Conglomerado Halcones.
- Edad: Tristán-González *et al.*, (2009) determinaron una edad de 28.5 ± 0.5 Ma por el método K/Ar de roca entera.

Conglomerado Halcones (Tcgh)

Terciario superior

- Definición: Labarthe-Hernández y Jiménez-López, (1992) designan informalmente con este nombre a un conglomerado que descansa discordantemente sobre las rocas volcánicas.
- Distribución: se halla aflorando hacia la porción norte y central de la zona.
- Litología y espesor: consiste de un conglomerado, en general poco consolidado, sin gradación, con cantos redondeados hasta 60 cm de diámetro, de todas las rocas volcánicas del área, incluyendo el Miembro Superior de la Riolita Panalillo. También tiene gravas y gravillas (Figura 7). Este conglomerado se encuentra en algunas porciones altas, lo que evidencia un rejuvenecimiento de la zona, llegando a tener más de 50 m sobre el fondo de los arroyos.

Su espesor es del orden de 2 a 15 m, engrosándose hacia el Valle de San Luis.



Figura 7.- Fotografía del Conglomerado Halcones.

- Relaciones estratigráficas: descansa discordantemente sobre todas las rocas volcánicas terciarias del área.

- Edad: aunque no se ha determinado su edad, ya sea por palinología o por fósiles, tentativamente se ha colocado en el Terciario tardío

ROCAS CUATERNARIAS

Pumicita del desierto (Qd)

Fue descrita originalmente por Tristán-González y Labarthe-Hernández (1979), en la cartografía de la Hoja Tepetate, S.L.P. Aflora hacia el sur del Santuario de la Iglesia del Desierto; cerca del panteón de Pozuelos, también a unos 300 m al sur del Club de Tiro Halcones. Consiste de un horizonte de 0.5 a 2.5 m de espesor, de un depósito con fragmentos del tamaño de la ceniza, de color blanco, sin consolidación, bien estratificado y en ocasiones con estratificación cruzada. Hacia su base presenta lentes pequeños de grava. Consiste de un depósito fluvial de material retrabajado y descansa sobre un suelo residual de la roca aflorante en esa zona o directamente sobre la misma roca (Figura 8).

Este depósito de ceniza es muy interesante en cuanto a que representa cenizas de caída, actualmente retrabajadas y depositadas en algunos arroyos, provenientes de una intensa actividad explosiva de los estratovolcanes de la Faja Volcánica Transmexicana y posiblemente sea del volcán Nevado de Colima, ya que los vientos dominantes van desde ahí a la porción central del País. De hecho hay reportes de caída de cenizas en Saltillo y en San Luis, durante la fase eruptiva de 1913 del volcán de Colima (Lurh y Carmichael, 1990).

Suelo residual (Qr)

En el área de estudio se observa dos tipos de suelos principalmente:

1. Uno consiste de un suelo de color crema polilitológico, con clastos que van de 1 hasta 8mm subredondeados a redondeados 40%,

soportados en una matriz que va de arenas medias a muy finas, masivo, mal seleccionado, compactado y en partes dispersas endurecido, con una costra que va de 5 a 10 cm de espesor, en él se pueden observar macroporos llegando a formar en algunas partes cuevas, también se muestran testigos de erosión. Éste suelo es sobreyacido por el suelo residual llamado “tepetate” (Figura 9).



Figura 8.- Fotografía mostrando el aspecto de la Pumicita del Desierto.

2. El otro suelo consiste de un suelo de color crema a naranja y pardo, polilitológico, con clastos que van de un tamaño mayor a bloques, con clastos que van de subangulosos a subredondeados de 1cm a tamaño de bloques 30%, soportado en una matriz que va de arenas medias limos, masivo con ligera gradación normal, con baja compactación; presenta una fina capa en la superficie que consta de limos (Figura 10).

Algunas de las unidades volcánicas, pero principalmente la Ignimbrita Cantera, se intemperizan dejando en las partes planas unas capas de 0.5 a

1 m de espesor, de suelo residual de color gris a crema, con cierta compactación, al cual localmente se le da el nombre de “Tepetate”.

Aluvión (Q)

Está constituido por gravas, arenas, limos y arcillas, que forman los valles de San Luis al N y NE, y el de Villa de Arriaga al S y SW del área. También aparecen estos depósitos aluviales en las vegas de los arroyos principales.



Figura 9.- Fotografía del suelo endurecido donde se observa macroporosidad.



Figura 10.- Fotografía del suelo residual.

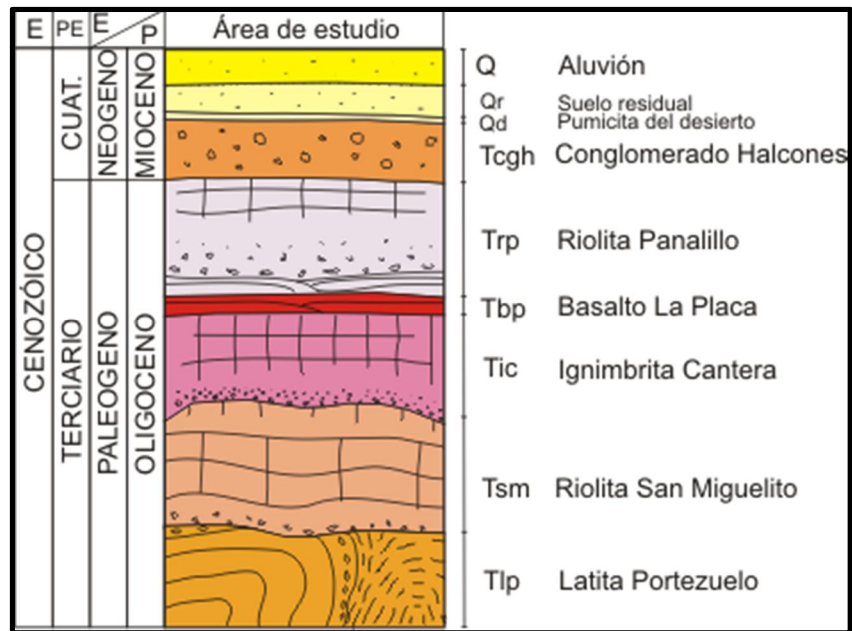


Figura 11.- Imagen de la columna estratigráfica del área de estudio.

Geología estructural

Análisis estructural

Se hizo un análisis estructural con el método de dirección de inclinación, por medio de la brújula tipo Clar, con el que se tomaron datos de fallas, basculamientos, foliación de flujo y diques; con el fin de determinar la actitud de las fallas mayores que bascularon la secuencia de las unidades volcánicas, tomando como guía la Ignimbrita Cantera la cual es un paquete de flujos piroclásticos de ceniza y pómez que ocurrió en pulsos cuyo depósito fue sobre una topografía irregular creada por los domos exógenos de la Latita Portezuelo y la Riolita San Miguelito. Los datos de campo fueron analizados por medio del programa Stereo 32, versión 1.0.3, cuya interpretación se llevó a cabo por medio de diagramas de polos, círculos mayores, rosetas y densidades.

Se levantaron cuatro secciones orientas SW-NE, a las cuales se les dio el nombre de sección Presa del Peaje-Presa de San José, sección Presa del Peaje-San Luis Potosí, Sección Presa de San José-Santuario de la Iglesia del Desierto y Sección Cañada del Lobo.

Las estructuras que se tomaron en cuenta para llevar el análisis de las fallas normales fueron: indicadores cinemáticos como estrías, escalones y brechas de falla (Figura 12, A y B). El rumbo promedio de las fallas va de 102° - 152° con inclinaciones que van de 50° a 85° hacia el SW (Figura 17, A y B) en la sección Presa del Peaje- Presa de San José. Se observó la presencia de fallas antitéticas cerca de las falla principales cuyo rumbo es de $330^{\circ}/85^{\circ}$ NE.

Se observó que algunas de las fallas normales tienen un ligero componente lateral derecho basado en la actitud de su *pitch*, como lo muestran las flechas que se observan en el diagrama de planos y polos de la Figuras 18, A, C y E.

Se observó que muchos de los diques piroclásticos están asociados a las zonas de fallas normales a través de los cuales se puede observar la salida del material; tienen un rumbo de $144^{\circ}/075^{\circ}$ SW. (Figura 14, B).

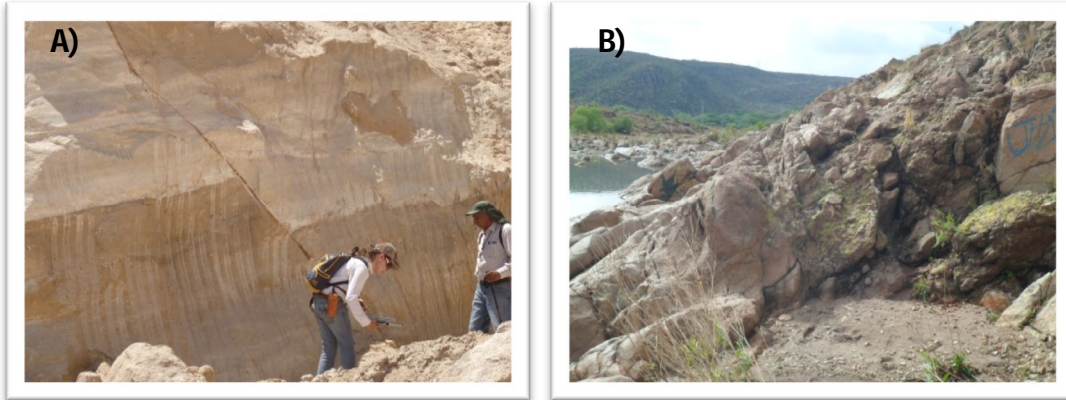


Figura 12.- Lámina de fotografías: A) Falla normal del miembro no soldado de la Ignimbrita Cantera, S.L.P. y B) brecha de falla del miembro soldado de la Ignimbrita Cantera, comunidad de Escalerillas.

Algunas fallas tienen asociadas brechas co-ignimbríticas, ya que los fragmentos mayores de hasta 1 m están sobre éstas fallas disminuyendo en tamaño hasta los más finos en las partes alejadas, lo que sugiere que en partes puntuales de las fallas hubo salida de materiales piroclásticos (Figura 14; A y C).

Se analizaron datos de fallas y basculamientos sobre las cuatro secciones utilizando estereogramas (Figura 17, A y B), donde se observa que el esfuerzo principal (σ_1) $137^\circ/64^\circ\text{SW}$ tiene un sentido vertical y el de menor esfuerzo (σ_3) $233^\circ/02^\circ\text{SW}$ en sentido horizontal, ya que la inclinación de las fallas ocurre tanto al sentido NE como al SW. El rumbo promedio de las fallas es $135^\circ/068^\circ\text{SW}$ (Figura 17, A y B). Hay fallas que tuvieron componentes laterales como la falla de las Escobas y Falla de los Conejos (Figura 18, A, C, y G); las fallas produjeron un basculamiento en bloques al NE, producto de un fallamiento lístrico.

En los diagramas de densidades de basculamientos y rosetas (Figura 16, A, B, C, y D) de las secciones que se realizaron en el área de estudio puede observarse que el promedio de los rumbos del basculamiento tiene una dirección $310^\circ/015^\circ$ -, $300^\circ/015^\circ$ - 035°NE (Figura 16, D) en la sección Presa del Peaje-S.L.P. y $340^\circ/015^\circ$ - 035°NE en la sección Presa de San José-Santuario de la Iglesia del Desierto, la inclinación principal de los bloques basculados de las unidades

volcánicas; va de 15 a 35° (Figura 16) diagramas de densidades y rosetas de basculamientos.

La actividad de las fallas normales fue sin-extensional ya que se aprecia diferencia de basculamiento entre la Ignimbrita Cantera (28 Ma y la Ignimbrita Panalillo Inferior 26 Ma), lo que confirma que el fallamiento normal estuvo reactivándose. El ángulo de basculamiento de los bloques aumenta de oriente a poniente, lo que sugiere que el patrón de fallas es más bien de tipo lístrico.



Figura 13.- Lámina de fotografías: A) y B) Falla de las Escobas mostrando la posición de las estrías, C) Falla con desplazamiento oblicuo en el área del Santuario de la Iglesia del Desierto.

El componente lateral ocasionó que en algunas fallas normales se formaran fracturas de cizalla *Riedel* (Figura 15), como en el caso de la falla de Las Escobas facilitando la apertura para la salida de material piroclástico de la Ignimbrita Panalillo Inferior.



Figura 14.- Lámina de fotografías: A) Brecha co-ignimbrítica del Santuario de la Iglesia del Desierto, B) Dique con material piroclástico en la Presa del Peaje, C) Fragmento de una brecha co-ignimbrítica en la Presa del Potosino.



Figura 15.- Fotografía de la falla de las escobas mostrando las fracturas tipo Riedel.

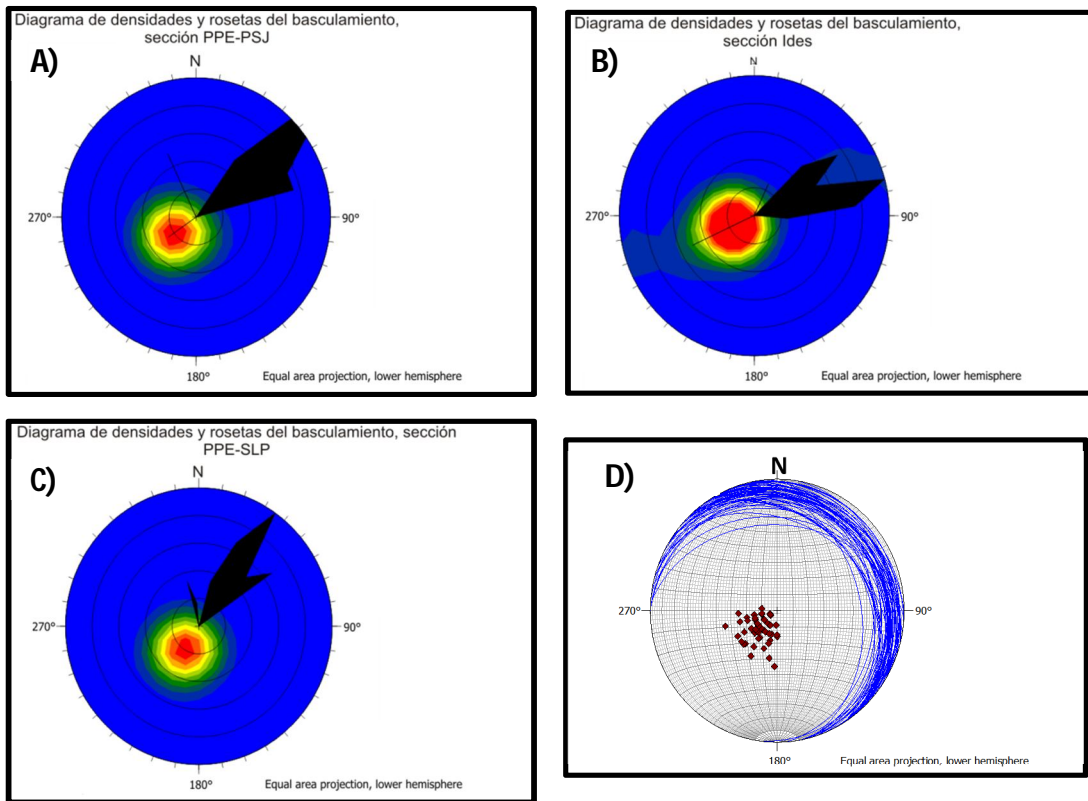


Figura 16.- Lámina de diagramas de densidades y rosetas de los basculamientos observados en las secciones hechas en el trabajo de campo.

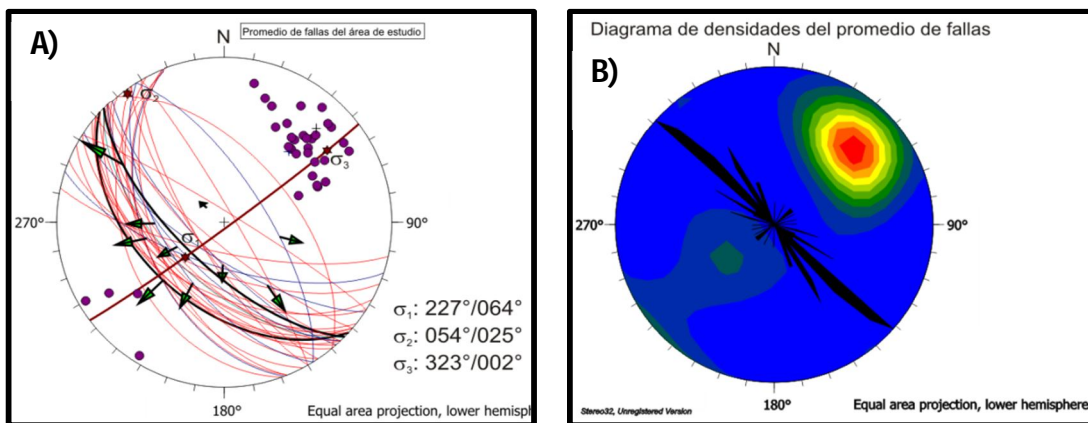


Figura 17.- Lámina de diagramas del promedio de planos y polos (A) y densidades (B) de los datos de las fallas obtenidos en campo.

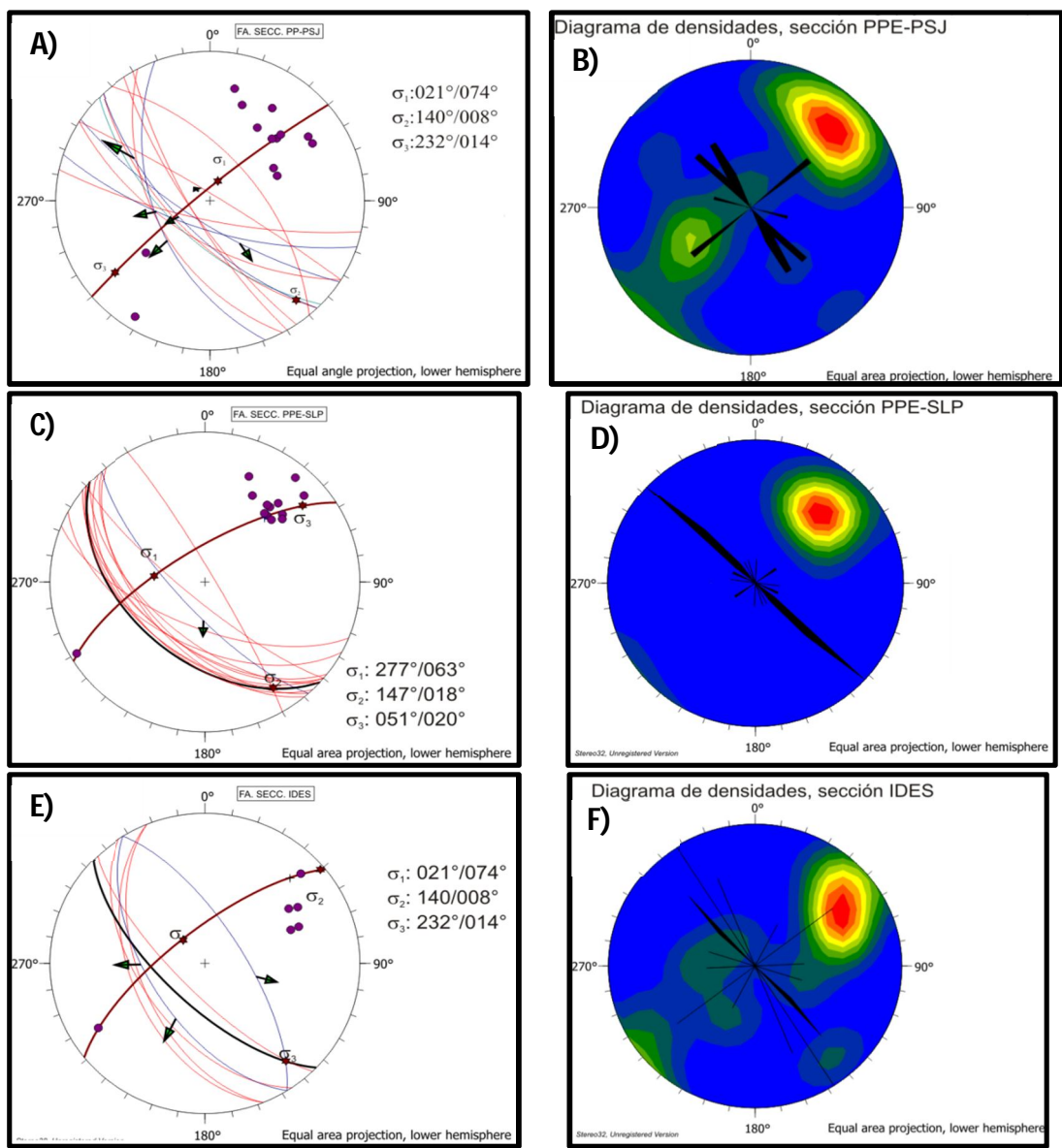


Figura 18.- Lámina de diagramas de planos y polos (A, C y E) y densidades y rosetas (B, D y F) de los datos de las secciones hechas en campo.

II.1.4.- Hidrografía

Según INEGI en los estudios Hidrológicos de San Luis Potosí de 1998 y 2002, dentro de la entidad se tienen varias cuencas principales que son: Cuenca de Matehuala, Cuenca Sierra de Rodríguez, Cuenca Camacho-Gruñidora, Cuenca San Pablo, Cuenca presa de San José-Los Pilares y Cuenca Sierra Madre (Figura 19).

La Cuenca Presa de San José-Los Pilares corresponde al municipio de San Luis Potosí y al área de estudio, se ubica en la porción centro-occidental del estado y zona sureste de la Región Hidrológica 37, cubre una superficie de 17.48% del territorio potosino; limita al norte con la Cuenca de Matehuala, al este con la Cuenca Sierra Madre, al sur y sureste con la Región Hidrológica Pánuco, al oeste y suroeste con la Cuenca San Pablo. En la porción sur se asienta la ciudad de San Luis Potosí, donde son importantes los ríos Paisanos, Mexquitic, Santiago, Española y San Antonio.

El rango de escurrimiento es menor de 10 mm por año y se tiene como infraestructura hidráulica a las presas Álvaro Obregón en el Municipio de Mexquitic de Carmona con una capacidad de 4.9 Mm³, Gonzalo N. Santos (El Peaje) con una capacidad de 8.0 Mm³ y San José, con una capacidad de 7.3 Mm³, cuyas aguas se utilizan como abastecimiento de agua potable y riego. Existen otras presas de menor volumen como son: Presa de San Antonio, San Carlos, Bocas, Potosino y Cañada del Lobo.

II.1.5. Clima y vegetación

II.1.5.1. Clima

Según la Síntesis de Información Geográfica hecha por INEGI del 2001, en San Luis Potosí predomina el clima seco y semiseco ya que se presenta en el 71% de la superficie del estado en la región conocida como El Salado, el 15% está representado por el clima cálido subhúmedo, localizado en la parte de la Sierra Madre Oriental, el 10% está representado por el clima cálido húmedo, el cual se

localiza hacia la Llanura Costera del Golfo, el 2.5% es clima muy seco localizada en la Mesa del Centro, el 1.5% es templado subhúmedo y se localiza en las llanuras que se encuentran entre las sierras, también se presenta clima templado húmedo en un porcentaje muy pequeño del 0.2% hacia el sureste del estado.



Figura 19.- Cuencas Hidrográficas del Estado de San Luis Potosí, tomada de INEGI 2002.

La temperatura media anual del estado es de 21°C, la temperatura mínima promedio es de 8.4°C que se presenta en el mes de enero y la máxima promedio es de 32°C que se presenta en el mes de mayo.

Las lluvias se presentan durante el verano en los meses de junio a septiembre, la precipitación media anual del estado es alrededor de 950 mm anuales.

II.1.5.2. Vegetación

Dentro del área de estudio se encuentran cinco tipos principales de vegetación (Rzedowski, 1965) que son limitados por los factores de altitud, clima, sustrato geológico y suelo. A continuación se transcriben extractos de las descripciones hechas por Rzedowski (Figura 20 y 21):

- *Matorral desértico micrófilo*. Los suelos de este tipo de vegetación son característicamente de origen aluvial, descansando sobre depósitos profundos acumulados en el fondo de los valles o depresiones, o bien sobre depósitos más someros y algo pedregosos de las porciones inferiores de los abanicos aluviales en la base de los cerros. Suelen ser pobres en materia orgánica (2-4%) y de color más bien claro, entre grisáceo, rojizo y castaño.
- Las especies predominantes son: *Prosopis juliflora* (Mezquite), *Larrea divaricata* (Gobernadora), *Agave atrovirens* (Maguey), *Opuntia* (plati opuntia) (nopal), *Yucca filífera* (palma) y *Echino cactus* (Biznaga) (Figura 20 y 21).
- *Encinar arbustivo*. Se presenta en las laderas de los cerros; característico de un clima intermedio árido, requiere temperaturas relativamente bajas; se desarrolla en altitudes superiores a los 1500 m en suelos pedregosos, someros y bien drenados, de color castaño, arenoso y ácidos en riolitas, negros a rojizos (Figura 20, D).
- *Zacatal*. Se desarrolla sobre suelos jóvenes, poco profundos en las laderas de los cerros. Las características edafológicas suelen variar mucho. Las especies predominantes son *Bouteloua sp.* y *Muhlenbergia sp* (Figura 20, C y 21;C).
- *Piñonar*. Se desarrolla sobre suelos someros y bien drenados; se caracteriza por un clima con una precipitación anual de 400 a 700 mm, con 6 a 7 meses de sequía. Las altitudes en que se desarrolla son de 2300 a 2800 m.s.n.m., las que corresponden a una temperatura media anual de 13 y 16° C.

- *Matorral Crasicaule*. Se desarrolla sobre las laderas de los cerros y sobre abanicos aluviales situados en la base de los mismos cerros, las especies predominantes son los nopales y el maguey (Figura 20, C y 21, A y F).

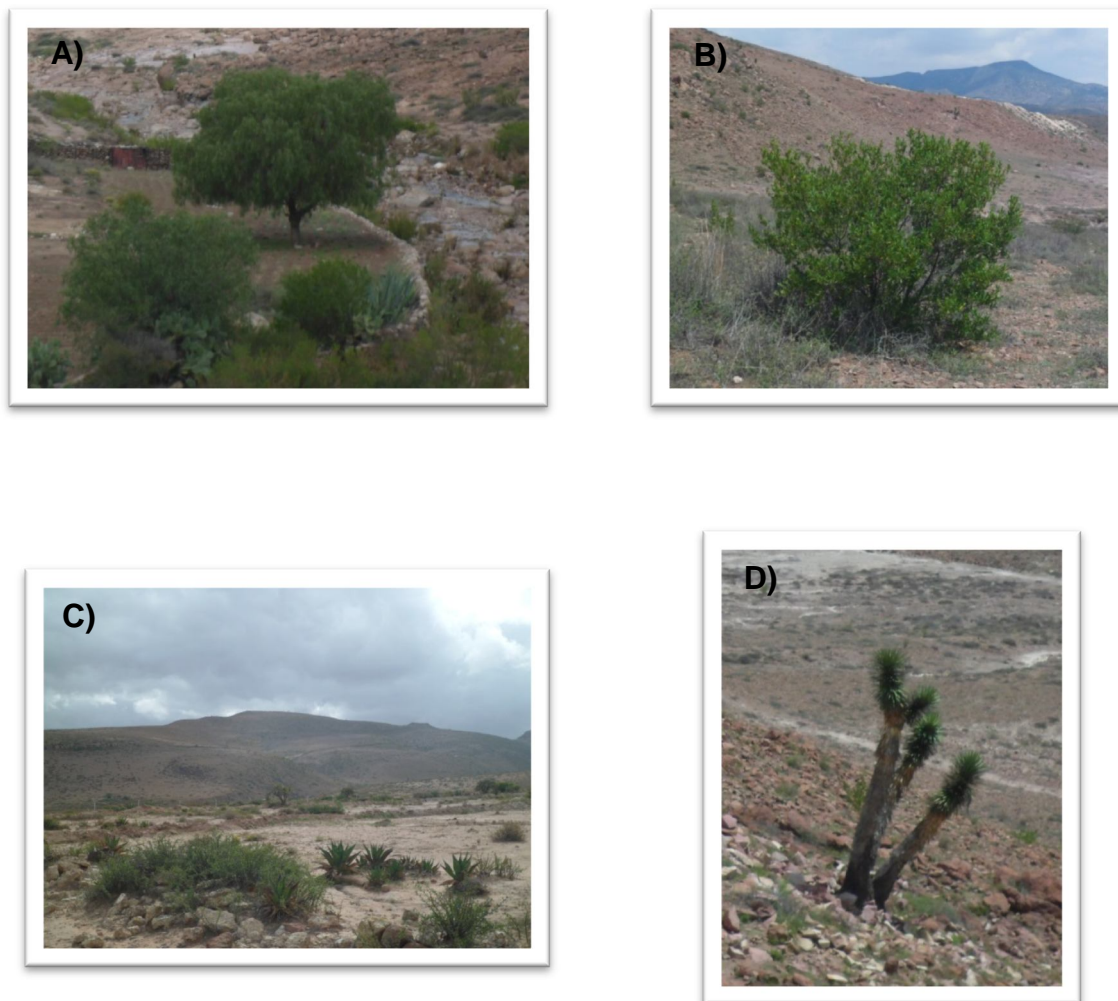


Figura 20.- Lámina de fotografías: A) *Prosopis juliflora* (Mezquite), B) *Larrea divaricata* (Gobernadora), C) *Agave atrovirens* (Maguey), D) *Yucca filifera* (palma).

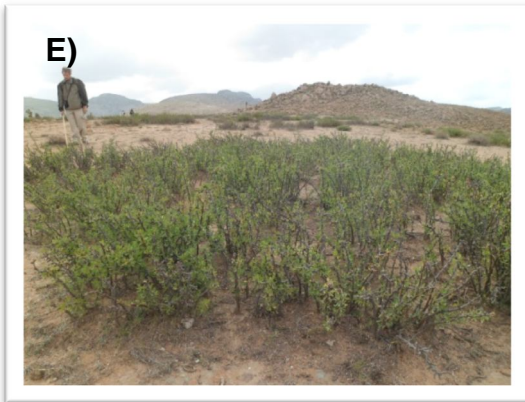
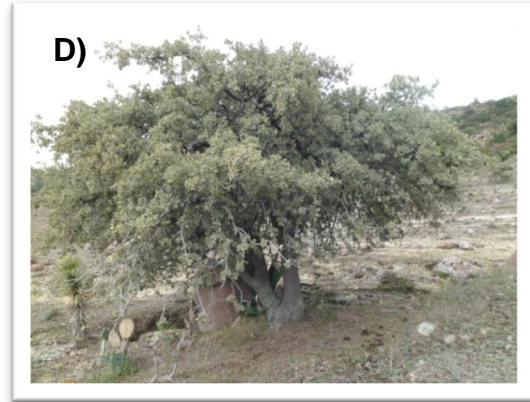


Figura 21.- Lámina de fotografías: A) *Opuntia (plati opuntia) (nopal)*, B) *Echino cactus (Biznaga)*, C) *Zacatal*, D) *Encinar arbustivo*, F) *Matorral Crasicaule*.

CAPÍTULO III. Metodología aplicada

El trabajo se llevó a cabo en tres etapas (Figura 22):

Gabinete:

- Se llevó a cabo el análisis y recopilación de información. Evaluación del análisis geomecánico. Desarrollo del análisis hidrológico y obtención de datos del radio equivalente (r) de las áreas de encharcamiento, aplicación de la optimización para obtener los datos de conductividad hidráulica (K_s) y carga capilar (G). desarrollo de modelo digital de elevación a escala de 10 x 10 m, dibujado de los polígonos de peligros del área de estudio, análisis geomorfológico. Digitalización y creación de los mapas geotécnico y de peligros geomorfológicos.

Campo:

- Levantamiento geotécnico-estructural y evaluación de las condiciones de los macizos rocosos y toma de muestras. Pruebas de permeabilidad y toma de muestras de suelos con el método PDI (Borselli *et al.*, 2013).

Laboratorio:

- Pruebas de resistencia (PLT) de las rocas, uso de correlaciones estadísticas para determinar el RQD de los macizos rocosos, análisis geomecánico Dibujado de las áreas de encharcamiento, análisis granulométrico de las muestras de suelos y determinación de la cantidad de arcillas, análisis hidrológico.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

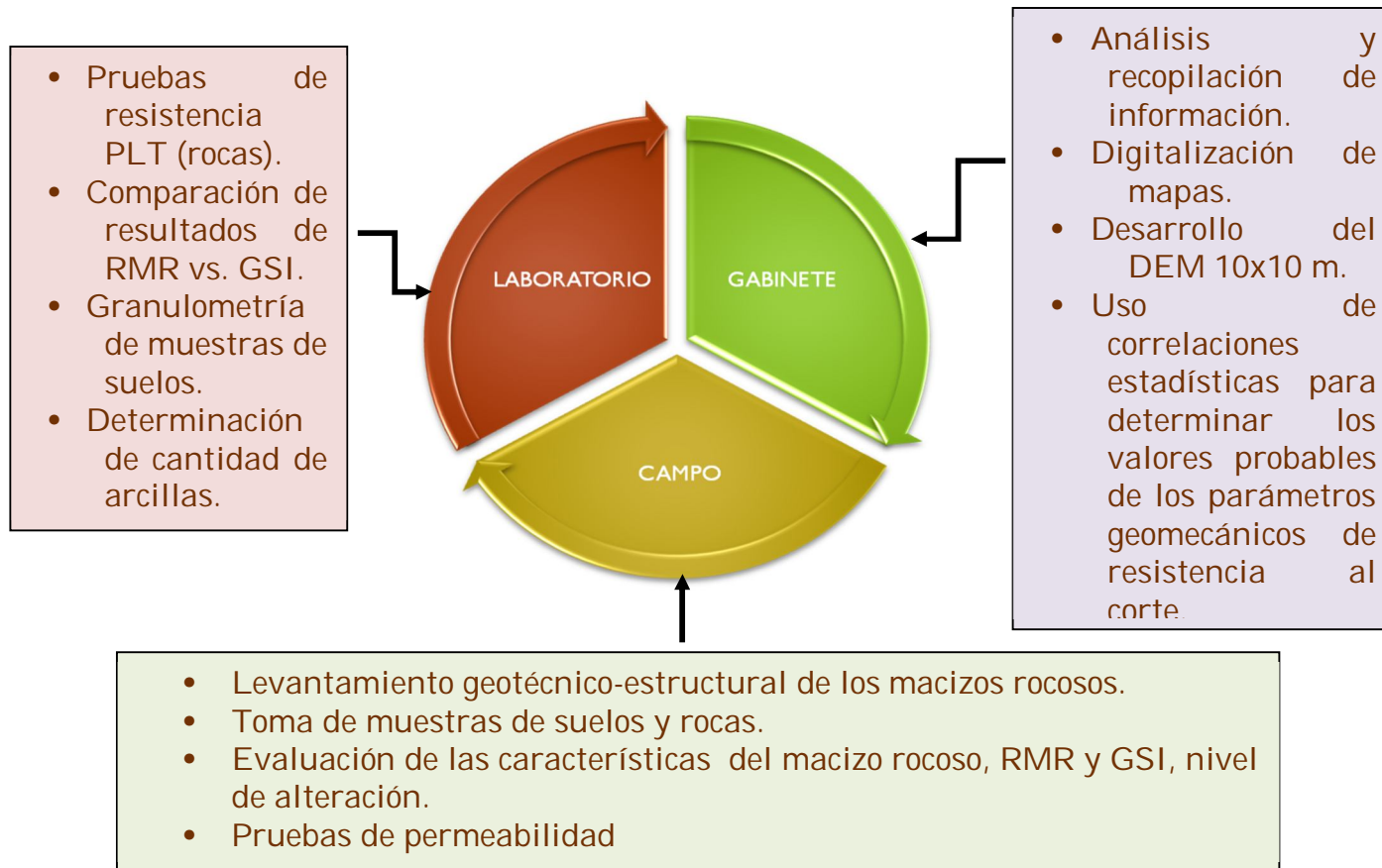


Figura 22.- Imagen de las etapas de la metodología de trabajo, mostrando las principales actividades de cada etapa.

III.1. Análisis geomecánico

Este análisis se llevó a cabo para determinar los parámetros de resistencia al corte de los macizos rocosos y consistió en determinar las propiedades físicas y mecánicas de los macizos rocosos, a través del Índice de Calidad RMR (*rock mass rating*) de Bieniawski (1989), así como el Índice geológico de resistencia GSI, (*geological strength index*) de Hoek (2000), densidad de las unidades volcánicas, todo esto calculado para una profundidad máxima de 4 m (o buscar citas?).

El RMR de Bieniawski (RMR_b), calcula los macizos rocosos en un rango de 0 a 100, siendo el 0, para afloramientos rocosos de mala calidad y 100, para los de muy buena calidad; esta evaluación se basa en los siguientes parámetros:

- Designación de la calidad de la roca (RQD).
- Resistencia de la roca intacta (UCS).
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades (relleno, persistencia y rugosidad).
- Condiciones de humedad (presión del agua).

Los resultados se determinaron con la evaluación de la Tabla 2.

Para determinar el RQD, se tomó y modificó la metodología propuesta por Zhang (2005). En la cual se aplicaron los siguientes pasos (descripción detallada en el Apéndice A):

- a) Determinación del tamaño de fragmentos y/o frecuencia de las discontinuidades:** Por medio de una fotografía escalada de cada afloramiento, medir a lo largo de líneas de escaneo cada fragmento o espaciado de las discontinuidades.

Al tener éstos datos, se vacían en una hoja de *excel*, donde a través del análisis estadístico para saber la media, el tamaño máximo y mínimo de los fragmentos que conforman un macizo rocoso. Determinar la altura

propuesta por Diaconish, mencionada por Hyndman (1995) del tamaño de los fragmentos a través de la Ecuación 1:

Ecuación 1: Altura de Diaconish

$$h = 2(IQ)n^{-1/3}$$

Donde:

- IQ: Rangos intercuartiles
- n: Número de medidas

Al tener ésta altura se creó el histograma donde se graficaron el tamaño de los fragmentos en el eje X y la altura de Diaconish en el eje Y, agregando a este gráfico la curva del porcentaje acumulado (ejemplo Figura 24, de la tabla de datos del sitio 1 y 2).

b) Determinación del espaciado de las discontinuidades (λ): Este procedimiento se hizo por medio de la metodología de Zhang, 2005), donde se aplica la Ecuación 2:

Ecuación 2: Espaciado de las discontinuidades

$$\lambda = \frac{\text{Número de discontinuidades}}{\text{Longitud de medida}} * 100$$

Donde:

- λ : Número de discontinuidades por metro.

El resultado obtenido del espaciado de las discontinuidades se graficó en la Figura 23:

c) Determinación de RQD: Se aplicó la fórmula obtenida de la metodología de Zhang (2005), la cual es, debido a que es un método indirecto por la falta de núcleos de muestras (Ecuación 3):

Ecuación 3: Cálculo de RQD

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$$

El resultado obtenido, situarlo en los rangos de la tabla de valores para el RQD (Tabla 1) y evaluar el índice de calidad de los macizos rocosos.

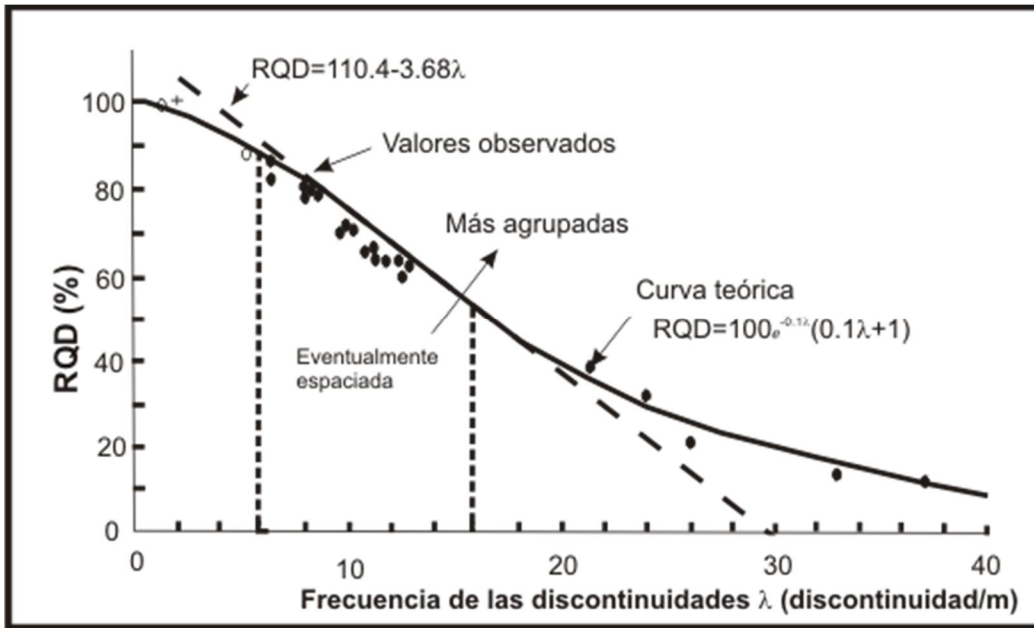


Figura 23.- Imagen de la relación entre RQD y espaciado de las discontinuidades λ , tomada de Zhang (2005).

Tabla 1.- Valores de RQD, tomada de Singh, B., y Goel, R.K., 1999.

S. No.	RQD %	Calidad de la roca
1	<25	Muy pobre
2	25 - 50	Pobre
3	50 - 75	Media
4	75 - 90	Buena
5	90 - 100	Muy buena

Para determinar la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), se aplicó la metodología de Point Load Test (PLT) (Chau y Wong, 1996; Hawkins, 1998; Kahraman, 2001; Fener *et al.*, 2005), en donde se coloca una muestra de roca entre las puntas de un gato hidráulico y se presiona hasta que esta cede a la ruptura y posteriormente se tienden a hacer los cálculos por (ver metodología detallada en el apéndice A.3:

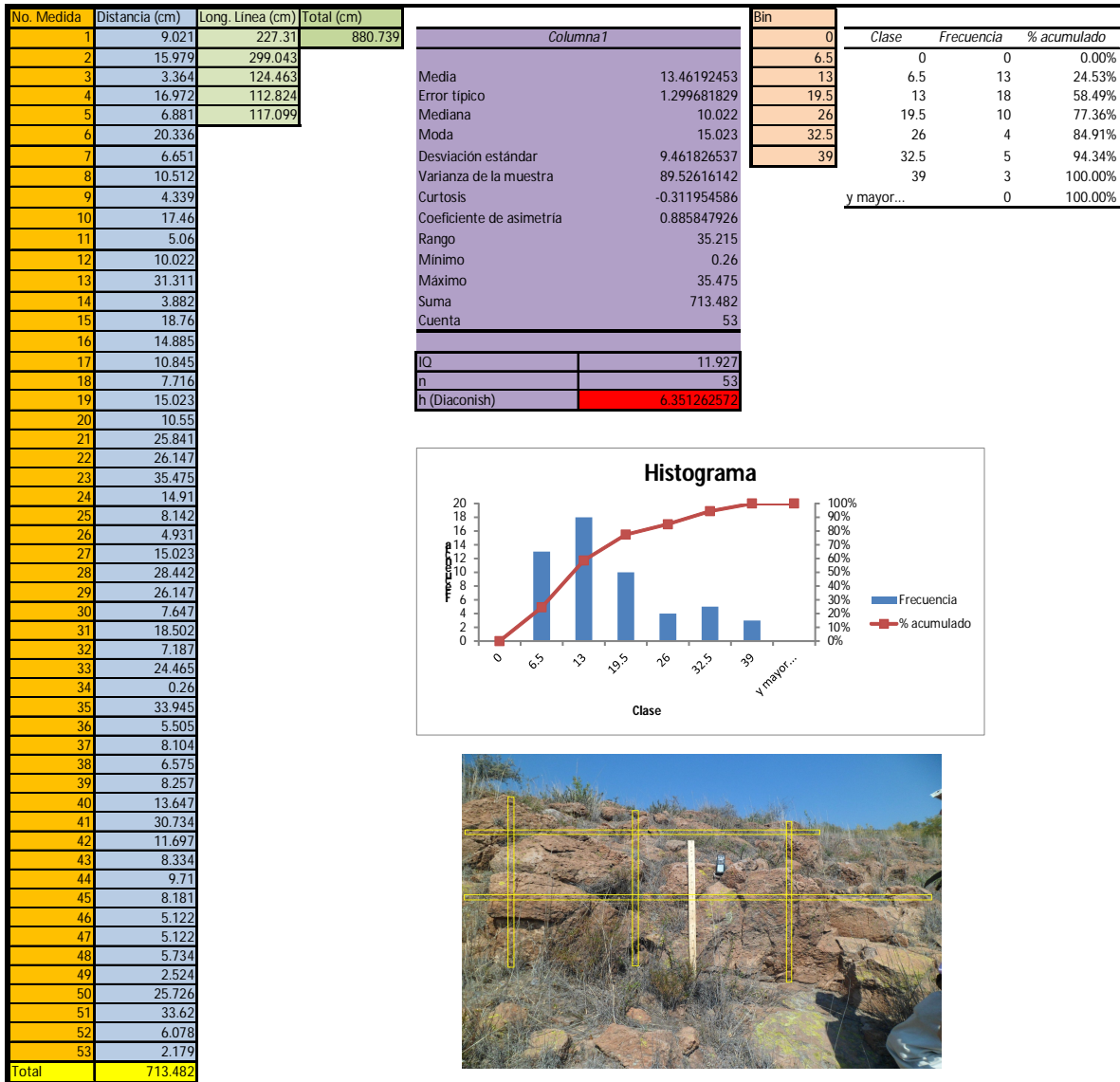


Figura 24.- Ejemplo de tabla de RQD y espaciado de las discontinuidades del sitio 1.

- Diámetro de la muestra D_E .
- Índice de resistencia (I_s).
- Factor de corrección de forma.
- Índice de resistencia medio $I_s(50)$.
- Finalmente éstos valores se correlacionan a determinar el UCS en MPa, a través de la Ecuación 7:

Ecuación 7: Resistencia de la roca a la compresión uniaxial (UCS)

$$UCS (MPa) = I_{S50} \times 18$$

Las condiciones de las discontinuidades y de humedad, fueron los parámetros que se determinaron en campo, a través de la descripción de los afloramientos del área de estudio.

Al tener los datos de cada parámetro, se evaluaron en la Tabla 2, donde al ubicarlos en sus rangos, se suma la puntuación de cada uno, obteniendo como resultado un macizo rocoso de cierta calidad ya sea buena a mala.

De esta tabla de datos, tomada de Bieniawski (1989), Singh y Goel, (1999) García-Vallejo *et al.*, (2002), se hizo el cálculo del ángulo de fricción ϕ , por medio de la fórmula:

El cálculo para el módulo de deformación E (GPa) se hizo a través de la Ecuación 28:

Ecuación 28.- Módulo de elasticidad (GPa)

$$E(GPa) = 2 * RMR - 100 \quad (\text{Singh y Goel, 1999})$$

El cálculo para GSI, se hizo por medio de la Ecuación 29:

Ecuación 29.- Cálculo del Índice de Resistencia de la roca (GSI):

$$GSI = RMR - 5 \quad (\text{Zhang, 2005})$$

El resultado de GSI obtenido de cada muestra se graficará en el diagrama de la Figura 25 propuesto por Hoek (2000).

Los datos de las propiedades físicas y mecánicas de los macizos rocosos, ángulo de fricción interna (ϕ), cohesión (c), densidad y profundidad, se vaciaron en un mapa geotécnico, donde los resultados de éstos parámetros se graficaron en diagramas de cajas a través del software *OriginPro 8 SR 0, v 8.0725 (B725)*, para observar el comportamiento general de éstas propiedades de cada unidad volcánica y así dividir las en unidades geotécnicas.

III.2. Análisis hidrológico

La finalidad de este análisis es predecir en qué manera pueden comportarse los suelos bajo condiciones de lluvia, cuando el suelo llega a su estado de saturación superficial, permitiendo un poco de infiltración pero en superficie llega a generar escorrentía y éstas a su vez pueden crear inundaciones y/o movimiento de masas cuando el suelo sobrepasa el límite plástico.

Es un método por goteo superficial, no invasivo, que se usa en la agricultura para conocer los procesos hidrológicos, donde la información de la velocidad de flujo desde un punto fuente y la entrada de saturación del agua a través de radio r_s , puede usarse para estimar la conductividad hidráulica saturada K_s , la cual es una propiedad que representa la capacidad para permitir el paso del agua a través de los materiales, está basado en la Ecuación de Wooding (Morel *et al.*, 1996; Al-Jabri *et al.*, 2002; Asher 2003; Ekhmaj y Abdulaziz, 2008) (Ecuación 30).

Ecuación 30: Fórmula de Wooding

$$q = \frac{Q}{\pi r_s^2} = K_s + \frac{4 * K_s}{\pi * \alpha} * \frac{1}{r_s}$$

Donde:

Q: Velocidad de descarga en la fuente L3T-1.

Ks: Conductividad hidráulica saturada (LT-1).

Rs: Radio de saturación en el punto estable (L).

A: Constante de las características del suelo, relacionada a las propiedades de absorción del suelo y describe la velocidad de reducción en la conductividad con matriz

Otro parámetro importante es determinar la carga capilar en la interfase saturada (G). También es importante conocer los parámetros de transporte de agua en el suelo a través del contenido de humedad en el suelo en condiciones secas Θ_{ini} y el contenido de humedad $\Theta_{máx}$ en condiciones de máxima saturación, éstas se determinaron a través del TDR, para determinar el promedio del contenido de humedad en el suelo, dada por la Ecuación 16 del Apéndice B.1

Tabla 2.- Parámetros de evaluación de RMR de Bieniawski, tomada de Bieniawski (1989), Singh y Goel, (1999) García-Vallejo *et al.*, (2002),

ROCK MASS RATING (BIENIAWSKI, 1989)							
RMR= (A1+A2+A3+A4+A5)							
A1 - resistencia de la roca intacta							
σ_c (Mpa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
Coeficiente	15	12	7	4	2	1	0
A2 - Indice RQD							
RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
Coeficiente	20	17	13	8	3		
A3 - Spaziatura delle discontinuità "s"							
s (cm)	>200	60-200	20-60	6-20	<6		
Coeficiente	20	15	10	8	5		
A4 - Condiciones de las discontinuidades							
	Muy rugoso No continuo Paredes cerradas sin alterar	Ligeramente rugosas Apertura continua <1mm Paredes ligeramente alteradas	Liegramente rugosas Apertura continua <1mm Pared alterada	Planas o lisas Apertura continua 1-5mm Relleno <5mm	Apertura continua >5mm Relleno >5mm		
Condiciones							
Coeficiente	30	25	20	10	0		
A5 - Condiciones hidráulicas							
Condición	Seca	Húmeda	Mojada	Goteo	Flujo		
Coeficiente	15	10	7	4	0		
RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<=20		
Clase	I	II	III	IV	V		
Descripción	Muy bueno	Bueno	Medio	Malo	Muy malo		
Módulo de deformación E (Gpa)= 2RMR _b - 100							
GSI = RMR-5							

Esta metodología se dividió en 2 etapas:

- Pruebas de campo
- Procesamiento de fotografías y cálculos.

INDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>) Seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI		CONDICIÓN DEL FRENTE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80	70			
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.		60	50		
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			40	30	
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.				20	10

Figura 25.- Estimación de GSI, basado en la observación de campo y resultado de RMR de Bieniawski (1989); tomada de Hoek (1994).

III.2.1 Pruebas en campo

Esta prueba requiere hacerse en las temporadas más secas del año debido a que el contenido de humedad en el suelo es la más baja y las condiciones del clima son propias del lugar, no se recomienda realizar esta prueba después de una lluvia debido a que las condiciones húmedas se han modificado y los valores obtenidos de descarga y saturación del suelo serán muy diferentes a las condiciones normales de contenido de humedad del suelo

Fase I: Antes de comenzar la prueba

En el área que rodea el lugar donde va a hacerse la prueba usamos el TRD, marca *Fieldscout* para determinar el promedio del porcentaje de contenido de humedad en el suelo en condiciones secas hasta los 3 cm de profundidad, este método fue utilizado por Topp *et al.*, (1984), en el cual aplicó una técnica de reflectometría a través del tiempo, para determinar volumétricamente el contenido de agua en el suelo (Figura 82, B).

Fase II: Realización de la prueba

Poner una descarga diferente en cada bomba peristáltica, teniendo una con descarga baja (1.56 l/h), una con descarga media (2.71 l/h) y una con descarga alta (7.71 l/h) y finalmente se hizo una prueba final con las 3 descargas juntas (12.04 l/h); colocar la primer bomba sobre el suelo, encenderla al mismo tiempo que se enciende el cronómetro; a cada 2 minutos se procede tomar una fotografía con la finalidad de que al procesar las áreas de encharcamiento a lo largo del tiempo de duración de una prueba, pueda observarse por medio de una gráfica de área vs. tiempo el punto en el que el suelo llega a su saturación, a través de una asíntota de la Ecuación 10 (ver detalle de aplicación en el Apéndice B.1):

Ecuación 10.- Asíntota

$$\text{Asíntota} = A - B * C^t$$

Donde:

- A (cm²): Área calculada a través del procesamiento de datos en la gráfica.
- B (cm²): Coeficiente donde A-B= área inicial al momento t₀ de la descarga aplicada..
- C: Es la curvatura de la asíntota.
- t (h): tiempo de duración de la descarga.

Se repitió el procedimiento para cada descarga, finalmente se hizo una última prueba juntando las tres descargas siguiendo la misma técnica, esto con la finalidad de tener una mayor cantidad de puntos para comprobar el comportamiento del suelo con la presencia de agua a través del procesamiento de las fotografías en el laboratorio y análisis de las gráficas generadas debido a su comportamiento.

La duración del tiempo para cada bomba depende del estado de estabilidad del charco, es decir cuando éste ya no crece, es que ha llegado a este punto.

Procesamiento de fotografía y cálculos

Este procesamiento consistió en dibujar el área de encharcamiento de cada fotografía tomada a lo largo del tiempo de duración de una prueba, se llevó a cabo por medio del *software ImageJ*, versión 1.45s, este es un programa de procesamiento digital de dominio público (Collins, 2007), el cálculo de éste procesamiento se hizo a través de *excel* (ver detalle de dibujo de áreas y cálculo en el Apéndice B).

Al haber determinado el área de cada fotografía de una prueba, en *excel* se creó una base de datos del tiempo de duración de cada bomba, anotando el área, tiempo de toma de una fotografía, en ésta se crearon columnas donde se anotará el error del área dibujada al determinar el radio equivalente de saturación, el área calculada a través de este error y otra con el porcentaje equivalente de éste.

Al haber calculado el área y el error, se graficaron los valores del área calculada obtenida de la fotografía vs. el tiempo de toma de ésta.

Sobre ésta gráfica (Figura 26), se harán los cálculos correspondientes del área con las variables de la asíntota, descritos en la Ecuación 10, en el Apéndice B.1 se explican con mayor detalle. También con el resultado de éstas variables, se calculará el error mínimo (campo de suma error) procesado a través de *solver* (*Microsoft Office, excel, 2010*) en modo evolucionario, lo que quiere decir buscar que la asíntota intersekte la mayor cantidad de puntos o tenga un mejor acercamiento a éstos en el diagrama área vs tiempo. El resultado de éste error, se tomó para recalculer el área dibujada.

Al haber calculado el área de la asíntota, se creó otra tabla de datos en la que se ocuparon las áreas finales calculadas de cada descarga, donde se compararon por medio de gráficos de radio de saturación ($1/r$) vs densidad de flujo (Al-Jabri *et al.*, 2005) y densidad de flujo calculada vs densidad de flujo el comportamiento de los puntos finales de cada descarga en una prueba (Asher *et*

al., 2003), de modo que al determinar las variables aleatorias K_s y G al determinar el error mínimo (campo suma error de las láminas 9 a 22 del capítulo de resultados), la mayor cantidad de puntos de las descargas finales formen una línea recta a 45° de los vértices del gráfico de área calculada, es decir que con los valores de K_s y G , los puntos de las descargas forman ésta línea, los valores de estos parámetros hidráulicos son correctos (Figuras 33 a 46 de Capítulos de resultados).

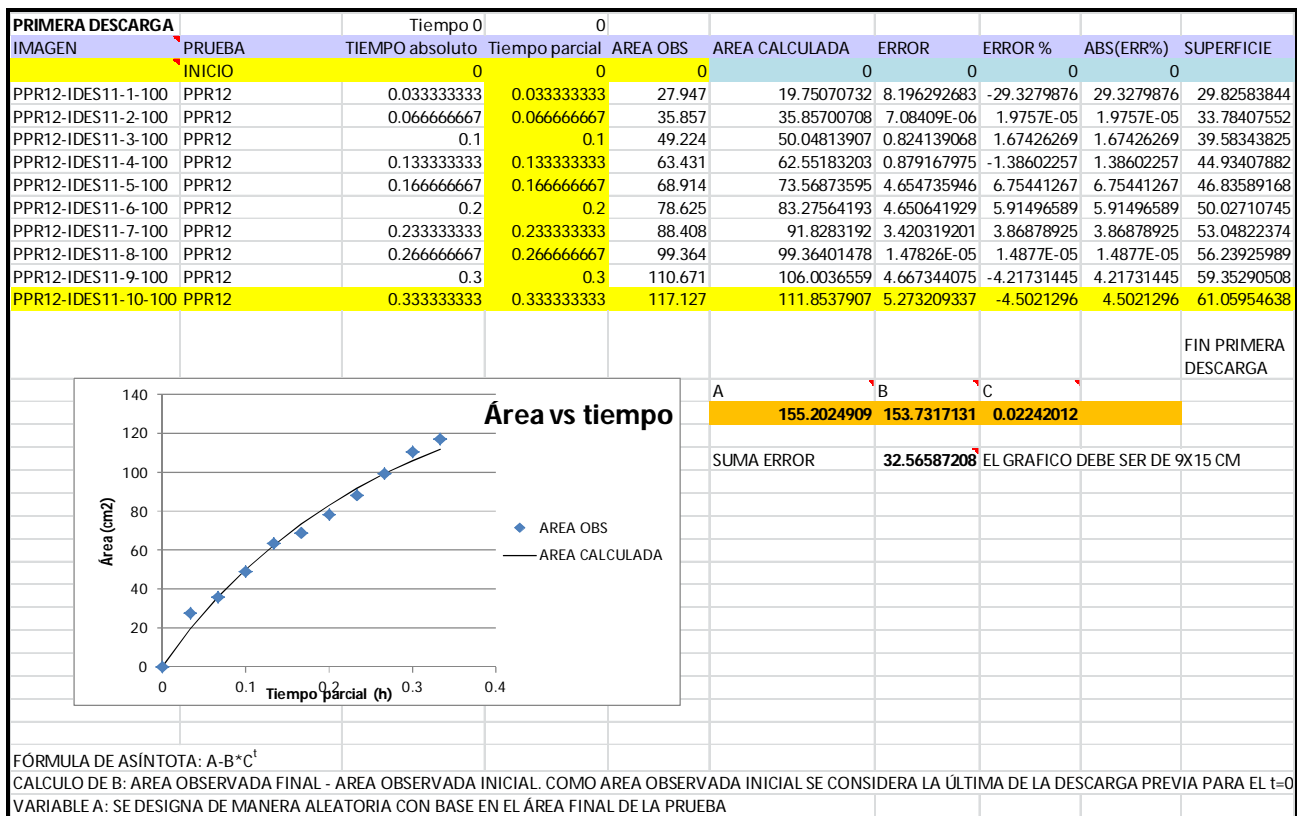


Figura 26.- Ejemplo de tabla de datos de cálculo de asíntota y variables, PPR-12, BOMBA 1.

III.3. Análisis geomorfológico

Conocer las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de las rocas y suelos, así como entender los procesos que han actuado a lo largo del tiempo de la historia geológica del área de estudio modificando el relieve de la superficie

terrestre generando peligros naturales, son elementos y propiedades que deben de determinarse correctamente para la creación de un mapa de peligros geomorfológicos, se han hecho estudios recientes en la determinación de peligros naturales donde se utilizan técnicas de percepción remota, obtención de datos en campo, para la generación de la base de datos con los cuales se generará un modelo digital de elevación a través de SIG para el monitoreo, asesoramiento, manejo y creaciones de mapas de diferentes tipos de éstos peligros (Griffiths y Hearn 1990; Alexander 1991; Carrara *et al.*, 2009).

Unos de los objetivos de este trabajo es la construcción de un mapa de peligros geomorfológicos por medio del *software Arc Map*, versión 9.3, creando una base de datos a través de la información obtenida en la observación de imágenes de satélite tomadas de *Google Earth* para 32 bits, multitemporales en color verdadero, fotointerpretación aérea de escala 1:25 000 en tonos de grises, a través de un estereoscopio "*WILD-HEERBRUG*" modelo ST4-6575 de espejos, y su corroboración en campo, con esta base de datos creada, se digitalizaron los peligros obtenidos generando un mapa en el *software Arc Map Versión 9.3*; para poder evaluar, manejar y predecir con la base de datos creada, se generó un Modelo Digital de Elevación a escala de 10 x 10 m en modelo de sombreado.

El estudio se basó en la clasificación de los peligros encontrados en el área de estudio como unidades geomórficas que pueden ser mapeadas a una escala 1:20,000, ya que estas formas pueden considerarse como un geosistema en varios niveles y cada nivel consiste de elementos diferentes que forman las unidades básicas del paisaje (Figura 81 del Apéndice C.2).

La clasificación de las unidades geomórficas individuales principalmente de origen fluvial, tectónico, erosión pero siempre hay que recordar que las formas del relieve son el resultado de mezclas de procesos que interactúan en el paisaje. El concepto fundamental en el que se basó para el análisis geomorfológico fue (Pavlopoulos *et al.*, 2009):

- *Morfodinámica*: Procesos formadores del paisaje actualmente activos o aquellos que pueden activarse en el futuro.

Sobre éstas imágenes se crearon polígonos de colores diferentes para cada unidad geomórfica que se encontraron, estos colores fueron seleccionados de manera aleatoria como se muestra en la Figura 81 del Apéndice C.2. (más detalle de creación de polígonos y colores en el Apéndice C.2).

Se hizo fotointerpretación de fotografías aéreas, ya que proveen información y exactitud para producir mapas geomorfológicos detallados, se analizaron las formas del relieve y se compararon con los datos obtenidos de las imágenes de satélite, para tener una mejor visión de los cambios en la geomorfología del área de estudio y observar los procesos que han estado activos a través del tiempo.

El trabajo de campo consistió en la corroboración de los procesos que están modificando la superficie de la Sierra de San Miguelito, por medio de la toma de fotografías con una cámara de la marca Sony modelo *Cyber Shot*, geoposicionándola con el uso de un GPS de marca Garmin 12XL, utilizando el *Datum WGS 84*.

La representación del relieve final después de la comparación de las imágenes con las fotografías aéreas y la corroboración de campo, son también analizadas usando la visualización a través de un *software* en 3D un Modelo Digital de Elevación (DEM) a escala 10 x 10 m, que permite una interacción directa con el afloramiento mediante el uso de tallas de color auto-estereoscópicas (Lee y Choi, 2003; Gustavsson *et al.*, 2005; Mora y Keipi, 2006; Mantovani *et al.*, 2009; Pavlopoulos *et al.*, 2009).

Para determinar la correcta interpretación de la base de datos creada por la observación de la imágenes de satélite, fotografías aéreas y tener una buena evaluación de los riesgos geomorfológicos del área de estudio se construyó un Modelo Digital de Elevación (DEM) en una escala 10 x 10 m, para una mayor exactitud de medida, interpretación y entendimiento de los procesos que están

modificando el relieve de la Sierra de San Miguelito, debido a que el conjunto de datos predominantes usados en la representación topográfica y visualización es el DEM, se hizo en una escala de colores de grises o sombreado debido a que esta escala de colores representa la superficie de la tierra como si estuviera iluminada por una fuente de luz remota creando un efecto realístico de la variación topográfica (Povlopoulos *et al.*, 2009); el análisis a través del DEM fue:

- *Drapeado de datos*: Creado a través de las capas GIS, imágenes de satélite, información atribuida sobre un DEM, se hace representando la superficie, cubriendo el tema de cada capa y un ajuste de parámetros.

Para construir este modelo se inició con la base de datos de las curvas de nivel del mapa topográfico, éstos datos fueron filtrados debido a que eran millones de datos; el resultado obtenido se procesó en el *software Landserf versión 2.3*, para crear una imagen ráster, con curvas de nivel a cada 10 m del área de estudio, ya que este programa es un Sistema de Información Geográfica aplicado a la edición, procesamiento y visualización de datos y especialmente adecuado para el manejo de Modelos Digitales de Elevación (DEMs) y otros modelos de la superficie (www.wikipedia.com).

Ésta imagen ráster se exportó al *software Arc map versión 9.3*, para crear a través de éste el DEM a escala de 10 x 10 m (ver más detalle de la formación del DEM en el Apéndice C.3).

En el *software de Arc Map versión 9.3*, se importó cada uno de los polígonos dibujados en *Google* con la información de color correspondiente a las unidades geomórficas se digitalizó cada unidad para transformarla en una capa en este programa y así poder manipularla para el DEM escala de 10 x 10 m, agregando la base de datos obtenida de las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de los macizos rocosos y suelos con la finalidad de interpretar, entender, predecir para crear un mapa geomorfológico enfocado a los peligros naturales que se encuentran en el área de estudio.

Los resultados e interpretación de los polígonos y DEM creados para el área de estudio se vaciaron en un mapa de peligros geomorfológicos, donde se creó una simbología, se tomaron colores, basados de, Dackombe y Gardiner (1983); Gustavsson *et al.* (2005); Hearn y Hart (2011); Knight *et al.* (2011); Otto *et al.* (2011); Pain *et al.* (2011); Verstappen (2011) para diferenciar cada proceso que actúa y peligros que están presentes en el área de estudio.

CAPÍTULO IV: Resultados

IV.1. Propiedades físicas y mecánicas de las rocas

IV.1.1.- RQD

Las unidades volcánicas que se analizaron fueron Riolita San Miguelito, Ignimbrita Cantera (miembro no soldado y miembro soldado), Riolita Panalillo (miembro superior). Los cuales dieron los siguientes resultados que se muestra en el diagrama de cajas (Figura 27):

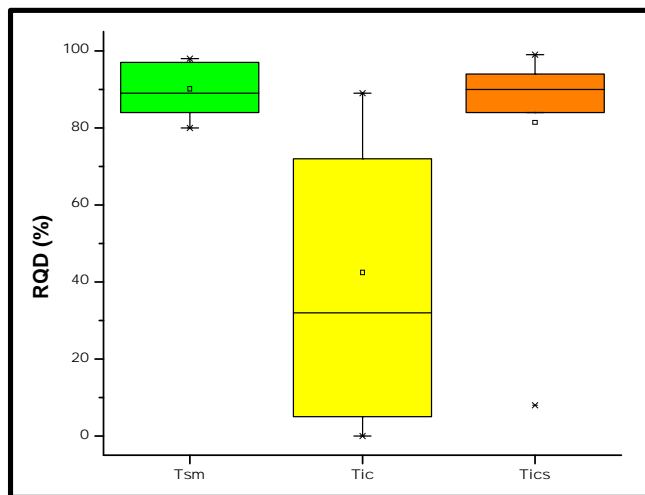


Figura 27.- Diagrama de RQD de las unidades volcánicas del área de estudio.

Donde se observa que en la base de los flujos piroclásticos de la Ignimbrita Cantera (Tic), el Índice de calidad de las rocas de este miembro va de muy pobre a buena calidad.

El miembro soldado de la Ignimbrita Cantera y el miembro central de la Riolita San Miguelito tienen una calidad que va de buena a muy buena, debido a que éstos son cuerpos masivos y que tuvieron la suficiente temperatura para formar juntas de enfriamiento, permitiendo la formación de familias. Hacia el caparazón de la Riolita San Miguelito se tiene una unidad con un RQD de 29 %, debido a que ésta unidad tuvo un enfriamiento menor que el miembro central.

Se tomaron 4 muestras del miembro superior de la Riolita Panalillo dando un resultado de RDQ del 98% es decir una roca de muy buena calidad, debido a que es el miembro soldado de un flujo piroclástico, lo que nos indica que es un cuerpo masivo, que tuvo una mayor temperatura y suficiente tiempo de enfriamiento para poder formar juntas de enfriamiento (Figura 28)



Figura 28.- Fotografía del sitio 4; Ignimbrita Cantera miembro no soldado (Tic) mostrando 2 capas con diferentes propiedades físicas.

IV.1.2.- RMR

Los resultados al haber evaluado (Tabla 3) los parámetros físicos y mecánicos de las unidades volcánicas del área de estudio se muestran en el diagrama de cajas de la Figura 29.

Los resultados que se observaron a través de éstos parámetros fueron:

Riolita San Miguelito, miembro desvitrificado central (Tsm): Los rangos van de 69 a 82, cuya clasificación va de buena a muy buena, la media se encuentra en 75, lo que la clasifica como una roca de buena calidad. La cohesión va de 0.3 - >0.4 MPa y el ángulo de fricción (ϕ) va de 35° a $> 45^\circ$.

Tabla 3.- Parámetros de diseño y propiedades ingenieriles de los macizos rocosos, tomada de Singh y Goel (1999).

S. No.	Parámetros de las Propiedades de los Macizos Rocosos	Clasificación de la Roca (RMR)				
		100 - 81 (I)	80 - 61 (II)	60 - 41 (III)	40- 21 (IV)	< 20 (V)
1	Clasificación del macizo rocoso	Muy buena	Buena	Media	Pobre	Muy pobre
2	Promedio de tiempo de duración	Lapso de 10 años para 15 m	Lapso de 6 meses para 8 m	Lapso de 1 semana para 5 m	Lapso de 10 horas para 2.5 m	Lapso de 30 min para 1 m
3	Cohesión del macizo rocoso (Mpa)	> 0.4	0.3 - 0.4	0.2 - 0.3	0.1 - 0.2	< 0.1
4	Ángulo de fricción interna del macizo rocoso	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	15°

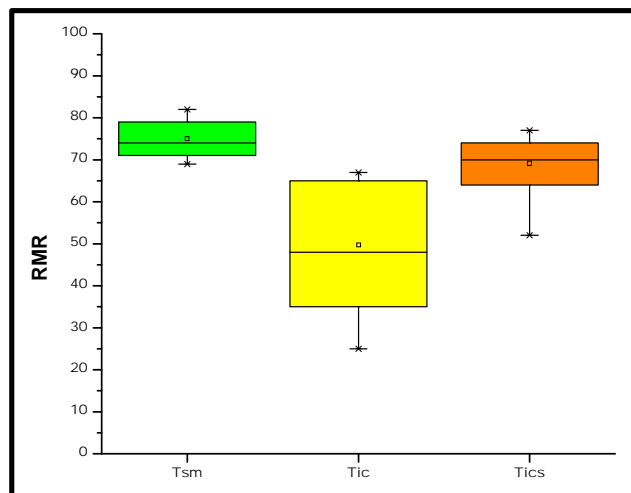


Figura 29.- Diagrama de cajas de RMR (Bieniawski, 1986) de las unidades volcánicas del área de estudio.

Se tomaron muestras del caparazón de esta unidad volcánica, el resultado que se observó fue de 58, clasificándolo como una roca de calidad media, con una

cohesión de 0.2 a 0.3 MPa y ángulo de fricción (ϕ) de 25° a 45°. Se muestreó el votrófido de esta unidad, dando un valor de 54, clasificándolo como una roca de calidad media, con una cohesión de 0.2 a 0.3 MPa y ángulo de fricción (ϕ) de 25° a 45°

Ignimbrita Cantera, miembro no soldado (Tic): Los rangos van de 25 a 67, cuya clasificación va de muy mala a buena calidad, la media se encuentra en 49 lo que la clasifica como una roca de calidad media principalmente. La cohesión va de < 0.1 a 0.4 MPa y el ángulo de fricción (ϕ) va de 15° a 45°.

Ignimbrita Cantera, miembro soldado (Tics): Los rangos van de 52 a 74, cuya clasificación va de media a buena calidad, se pueden observar valores anómalos de 45 (mediana) de una zona de brecha, la media de ésta se encuentra en 71, lo que la clasifica como una roca de buena calidad. La cohesión va de 0.2 a 0.4 MPa y el ángulo de fricción (ϕ) de 25° a 45°.

Riolita Panalillo, miembro superior (Trp): se tomaron 4 muestras, que dio un valor de 79, este la coloca la clasifica como una roca de buena calidad. La cohesión va de 0.3 a 0.4 MPa y el ángulo de fricción (ϕ) va de 35° a 45°.

IV.1.3.- GSI

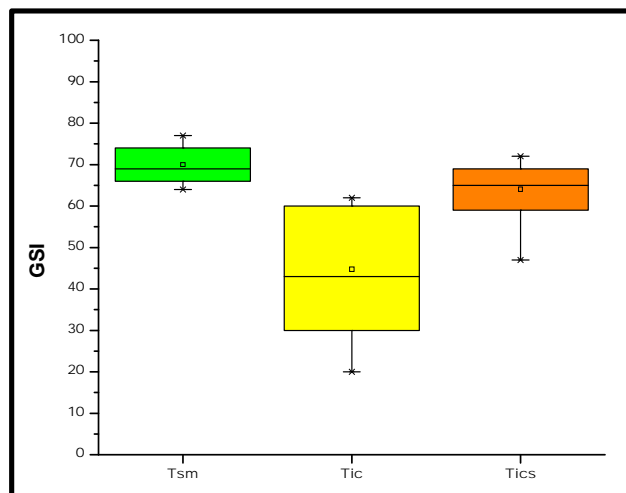


Figura 30.- Diagrama de cajas de GSI de Hoek (1997) de las unidades volcánicas del área de estudio.

Los resultados que dieron las unidades volcánicas a través de esta metodología fueron los siguientes (Figuras 30 y 31):

Riolita San Miguelito, miembro desvitrificado central (Tsm): los rangos van de 64 a 77, es decir macizos rocosos compuestos por bloques con condiciones de las superficies muy buenas. La mayor concentración se encuentra en los valores de 69 a 74 mostrando una media de 73, lo que lo coloca como afloramientos compuesto por bloques cúbicos entrelazados, sin perturbar, formados por 3 familias de discontinuidades y condiciones de la superficie muy buenas, es decir muy rugosas y frescas y con superficies sin alterar.

Se tomaron muestras del caparazón de esta unidad volcánica y dio un resultado de 53, clasificándola como una unidad compuesta de bloques entrelazados, parcialmente perturbado con bloques angulares entrelazados formados por cuatro o más familias de discontinuidades y con condiciones de la superficie buena, rugosa, ligeramente alterada. También se muestreó el vitrófido de esta unidad, cuyo resultado dio 49, clasificando a este miembro compuesto de bloques entrelazados parcialmente perturbado con bloques angulares entrelazados formados por cuatro o más familias de discontinuidades y con condiciones de la superficie como media, suave moderadamente alterada.

Ignimbrita Cantera, miembro no soldado (Tic): Los rangos de ésta va de 20 a 62, con esta información y las descripciones de campo se observa en cuanto a estructura como macizos rocosos desintegrados a macizos rocosos con mucha cantidad de bloques, en cuanto a condiciones de las discontinuidades va de media a muy buena, es decir superficies que van de rugosas a un poco suaves. La mayor cantidad se concentra en los rango de 30 a 60, siendo la media de la distribución de la unidad el 45, lo que coloca principalmente a esta unidad como macizos rocosos con bloques que van de perturbados, foliados o fracturados con bloques angulares formados por la intersección de varias familias de discontinuidades a macizos con mucha cantidad de bloques entrelazados, parcialmente perturbados con bloques angulares multifacetados formados por 4 o más familias de

discontinuidades y con condiciones de la superficie que va de media, fracturas con superficies suaves y/o moderadamente alteradas.

Ignimbrita Cantera, miembro soldado (Tics): Los rangos van de 47 a 72, con esta información y las descripciones de campo se observa que los macizos rocosos tienen mucha cantidad de bloques, con condiciones de las superficies que van de media a muy buenas. La mayor cantidad se concentra en los rangos de 60 a 70 y la media en 65, lo que coloca a esta unidad como afloramientos de bloques entrelazados, parcialmente perturbados, con bloques angulares formados por 4 o más familias de discontinuidades a bloques cúbicos, muy bien entrelazados, sin perturbar, formados por tres familias de discontinuidades, con condiciones de las superficies buenas, es decir rugosas ligeramente alteradas o con manchas de hierro a muy buenas, muy rugosas y frescas, es decir sin alterar.

Riolita Panalillo, miembro superior (Trp): Las cuatro muestras de la Riolita Panalillo dieron un valor de 74, lo que la coloca como macizos rocosos afloramientos compuesto por bloques cúbicos entrelazados, sin perturbar, formados por 3 familias de discontinuidades y condiciones de la superficie muy buenas, es decir muy rugosas y frescas y con superficies sin alterar.

Los resultados se observan en la Tabla 4.

Tabla 4.- Resultados de las propiedades físicas y mecánicas de los macizos rocosos del área de estudio.

UNIDADES	RMR	GSI	c (Mpa)	ϕ (°)	DENSIDAD (g/cm ³)	PROFUNDIDAD (m)
Tsm	69 - 82	64 - 77	35° - > 45°	0.3 - > 0.4	2.4 - 2.6	4
Tico	0 - 67	25 - 62	15° - 45°	< 0.1 - 0.4	1.9 - 2.3	4
Tic	52 - 74	47 - 72	25° - 45°	0.2 - 0.4	1.9 - 2.3	4
Trp	79	74	35° - 45°	0.3 - 0.4	2.4 - 2.6	4

IV.2.- Propiedades hidráulicas de los suelos y rocas

La importancia de conocer estas propiedades radica en cómo se van a comportar los materiales con presencia de una venida de agua cuando el suelo se encuentra en sus condiciones más secas llegando a su estado de saturación superficial, permitiendo un poco de infiltración pero en superficie llega a generar escorrentía y

éstas a su vez pueden crear inundaciones y/o movimiento de masas, éstas áreas de peligro pueden conocerse por medio de los parámetros de conductividad hidráulica (Ks) y carga capilar (G); para conocer estas propiedades se hicieron pruebas de permeabilidad por medio de la Prueba de Infiltración por Goteo PDI (*drip infiltrometer test*) (Borselli *et al.*, 2013) (para mayor detalle ver Apéndice B).

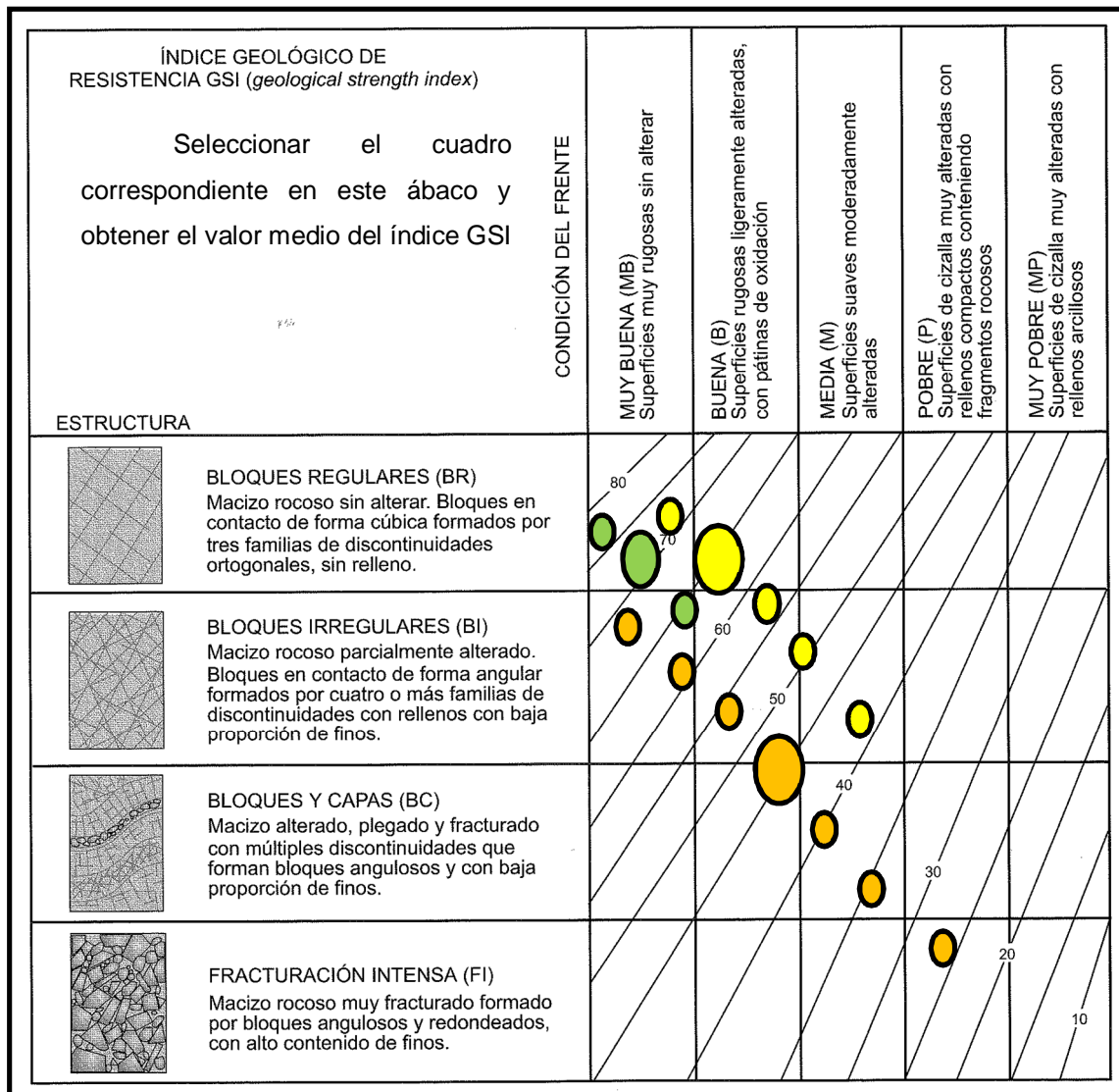


Figura 31.- Resultados de los macizos rocosos en la Clasificación GSI de Hoek, tomada de Hoek (1994), los círculos corresponden a las unidades volcánicas del área de estudio.

Se llevó a cabo en diferentes zonas del área de estudio (Figura 32), sobre el suelo residual desde la cima, pendiente y valle de los cerros para observar cómo se comporta el material en éstas partes; se realizaron en suelo residual que presenta bajo, moderado y alto contenido de gravas; así como también en suelos que presentan baja, moderada y altas etapas de erosión, es decir, desde erosión difusa a erosión encaravada, con la finalidad de observar cómo se comporta el material con éstas características a través de los parámetros de conductividad hidráulica (K_s) y carga capilar (G).

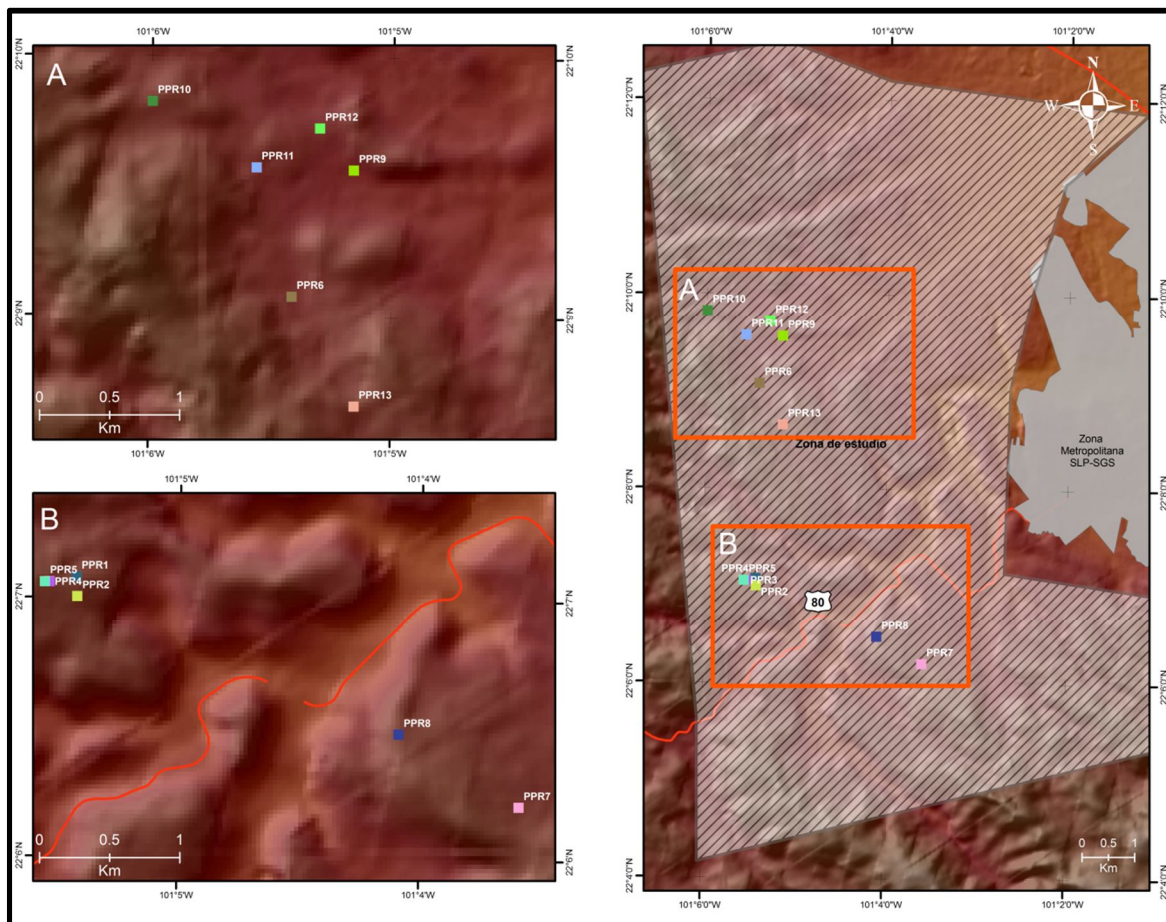


Figura 32.- Ubicación de pruebas de permeabilidad:

A.- Santuario de la Iglesia del Desierto.

B.- Escalerillas y Mesa de los Conejos.

Los resultados obtenidos de ésta metodología fueron:

PPR 1 (Figura 33)

El suelo de la prueba 1 es un suelo color crema a naranja, compuesto por 16.4% de gravas, 46.9% de arenas, 29.7% de limos y 6% de arcilla, hacia la cima del depósito presenta una delgada capa de limos de aproximadamente 1 mm de espesor. En la superficie tiene un contenido de gravas que lo sobreyacen en 15% aproximadamente, de las cuales 2% se encuentran insertadas en él.

La prueba se llevó a cabo en la cima de un cerro, sobre el suelo residual no endurecido que se ubica con coordenadas UTM en X: 284370, Y: 2447370 cerca del poblado de Escalerillas, cuyos resultados de conductividad hidráulica (Ks) fueron de 2.1 mm/h y carga capilar G de 946.5 (mm).

Prueba 2 (Figura 34)

Esta prueba se realizó en un suelo de color crema a naranja, compuesto por 20% gravas, 46.9% arenas, 29.7% limos y 6% arcilla, hacia la cima del depósito presenta una capa fina de limos de 1 mm aproximadamente. En la superficie tiene mayor contenido de gravas que la prueba anterior 20%, aproximadamente, de las cuales 2% se encuentran insertadas en él.

La prueba se llevó a cabo muy cerca de la primera 10 m aproximadamente, con la finalidad de observar el comportamiento de ambos suelos aunque siendo del mismo tipo, diferían del contenido de gravas, se realizó en la cima de un cerro las coordenadas UTM en X: 284375, Y: 2447231 cerca del poblado de Escalerillas, cuyos resultados de conductividad hidráulica (ks) que se obtuvieron fueron de 3.5 mm/h y carga capilar (G) de 1016.3 mm.

Prueba 3 (Figura 35)

Esta prueba se realizó en un suelo de color crema, compuesto por bloques 3% aproximadamente, 16.6% de gravas, 46.9% de arenas, 29.7% de limos y 6% de arcilla, hacia la cima del depósito se presenta una capa fina de limos de 1 mm

de espesor. En la superficie presenta 5% de gravas que lo sobreyacen de las cuales > del 1% se encuentran insertadas en él.

La prueba se llevó a cabo en la cima de un cerro, sobre suelo residual que se encuentra cerca del poblado de Escalerillas, las coordenadas UTM son X: 284179 y Y: 2447337, los resultados de conductividad hidráulica (Ks) fueron de 4.6 mm/h y carga capilar (G) 387.3 mm.

PPR 6 (Figura 36)

Se realizó en un suelo de color crema, cuya cantidad de gravas es de 13.8%, arenas 46.4%, limos 34.8% y arcillas 5%, presenta en superficie una delgada capa de limos de 1 -2 mm de espesor y un contenido de gravas finas de 2 % aproximadamente sobreyaciendo este material, presenta las fases de erosión difusa hasta llegar a formar cárcavas y bajo contenido de vegetación (zacate).

La prueba se llevó a cabo en un valle que se localiza a 300 m del Santuario del Desierto, cuyas coordenadas UTM son X: 288903, Y: 2451817, los resultados de conductividad hidráulica (Ks) fueron de 5.3 mm/h y carga capilar de 650.9 mm.

PPR 7 (Figura 37)

Se realizó en un suelo color crema, cuya cantidad de gravas fue de 16.6%, arenas 26.8%, limos 51.5% y arcillas 5%, presenta aproximadamente 2% de gravas, 4% de arenas gruesas a finas que sobreyacen a la superficie del suelo y moderado a alto endurecimiento; en él se puede observar agrietamiento y erosión difusa a erosión encaravada.

La prueba se realizó en una ladera de 20° de inclinación aproximadamente ubicada en la Mesa de los Conejos, con coordenadas UTM en X: 286749, Y: 2446446, los resultados de conductividad hidráulica (Ks) fueron 3.8 mm/h y 1075.4 mm

PPR 8 (Figura 38)

Se realizó en un suelo residual, color naranja a crema, con un contenido de gravas de 5.8%, arenas 64.6%, limos 25.3% y arcillas 4.3%, presenta una fina

capa de limos en la superficie de 1 mm de espesor, presenta bajo contenido de gravas que sobreyacen la superficie de gravas finas a arenas 1%.

La prueba se llevó a cabo en la cima de un cerro que se ubica en el poblado de Escalerillas cuyas coordenadas UTM son X: 286611, Y: 2446090, los resultados que se obtuvieron de conductividad hidráulica (Ks) fueron 2.6 mm/h y carga capilar (G) 2000 mm.

PPR 9 (Figura 39)

Se realizó sobre un suelo residual color naranja a pardo, con un contenido de gravas 30.7%, arenas 51.2%, limos 15.8% y arcillas 2.2%; presenta un contenido de bloques a gravas finas que sobreyacen la superficie del suelo 30% de las cuales 5% se encuentran insertadas en él, en algunas partes se observa un horizonte con una fina capa endurecida donde se observa erosión en cárcavas.

La prueba se llevó a cabo en una ladera con inclinación de 10° aproximadamente, en la zona del Santuario de la Iglesia del Desierto, cuyas coordenadas UTM son X: 283450, Y: 2452438; los resultados que se obtuvieron de conductividad hidráulica (Ks) fueron 12.7 mm/h y carga capilar (G) 78.3 mm.

PPR 10 (Figura 40)

Se realizó en un suelo residual color crema, con un contenido de gravas de 44%, arenas 36.3%, limos 17.4% y arcillas 1.7%, presenta un contenido de bloques a gravas finas que sobreyacen la superficie del suelo del 35% los cuales 6% se encuentran insertadas en él.

La prueba se llevó a cabo en una ladera con una pendiente de 15° de inclinación aproximadamente en la zona del Santuario de la Iglesia del Desierto cuyas coordenadas UTM son X: 283461, Y: 2452451; los resultados que se obtuvieron de conductividad hidráulica (Ks) fueron 5.7mm/h y carga capilar (G) 1193 mm.

PPR 11 (Figura 41)

Se realizó en suelo residual color crema a pardo, con un contenido de gravas 49.6%, arenas 30.6, limos 16.8% y arcillas 3%, presenta un contenido que va de bloques a gravas finas que sobreyacen la superficie del suelo en 20% de los cuales 4% de este material se encuentra insertado en él.

La prueba se llevó a cabo en una ladera con una pendiente de 10° de inclinación aproximadamente en la zona del Santuario de la Iglesia del Desierto cuyas coordenadas UTM son X: 284200, Y: 2451979; los resultados que se obtuvieron de conductividad hidráulica (Ks) fueron 10.8 mm/h y carga capilar (G) 1019.2 mm.

PPR 12 (Figura 42)

Se realizó en aluvión, color crema, con un contenido de gravas de 3.4%, arenas 60.3%, limos 33.4% y arcillas 2.7%; donde el suelo principalmente es de composición arenosa.

La prueba se realizó en un valle en la zona del Santuario del Desierto cuyas coordenadas UTM son X: 284561, Y: 24452254, los resultados que se obtuvieron de conductividad hidráulica (Ks) fueron 6.4 mm/h y 2000 mm

PPR 13 (Figura 43)

Se realizó en un suelo residual de color crema a pardo, con un contenido de gravas 26.6%, arenas 44.7%, limos 25.8% y arcillas 2.8%, presenta un contenido que va de gravas gruesas finas que sobreyacen la superficie del suelo en 20%, de las cuales 2% se encuentran insertadas en él, también se encuentra materia orgánica dispersa en arbustos de zacatal.

La prueba se llevó a cabo en una ladera con una inclinación de 10° aproximadamente en la zona del Santuario del Desierto cuyas coordenadas UTM son X: 284889, Y: 2450275, los resultados que se obtuvieron de conductividad hidráulica (Ks) fueron 3.3 mm/h y carga capilar (G) 917.7 mm.

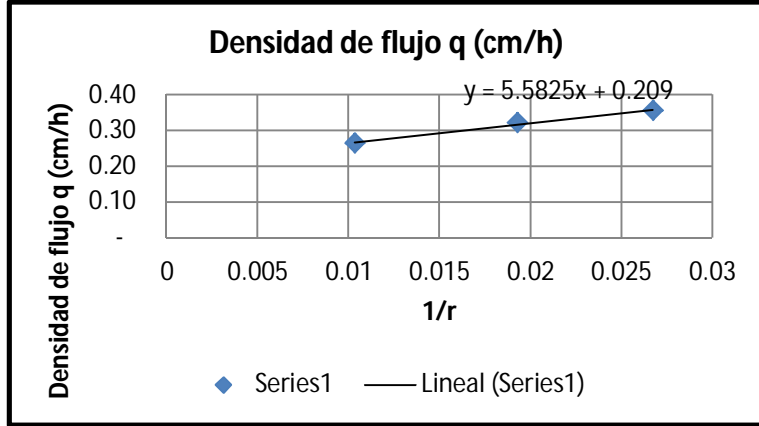


Gráfico 1

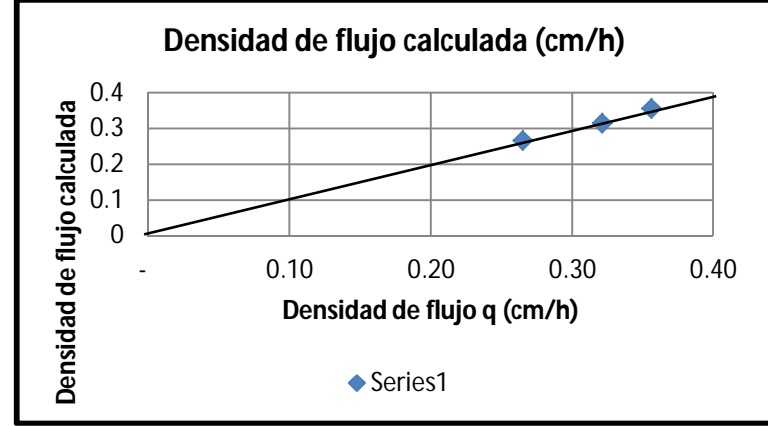


Gráfico 2

FOTO	ÁREA (cm ²)	Q (l/h)	r(mm)	portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Theta ini (v/v)	Theta max (v/v)	Delta theta (v/v)	Densidad de flujo calculada (cm/h)	Error abs.	Ks (mm/h)	G(mm)
PPR1-ESC01-1-100	4,392.98	1.56	373.9423501	1563	37.39423501	0.02674209	0.36	0.05	0.27	0.22	0.355794966	7.521E-12	2.08185704	946.530379
PPR1-ESC01-1-020	8,452.85	2.7	518.7122942	2715	51.87122942	0.01927851	0.32	0.05	0.27	0.22	0.314597977	0.0065956		
PPR1-ESC01-1-003	29,336.70	7.8	966.341581	7765	96.6341581	0.010348308	0.26	0.05	0.27	0.22	0.265305625	0.0006201	suma error	0.00721568

Tabla de resultados PPR-1



Figura 33.- Lámina de gráficos finales de PPR1 y resultados, coordenadas UTM en X: 284370, Y: 2447370.

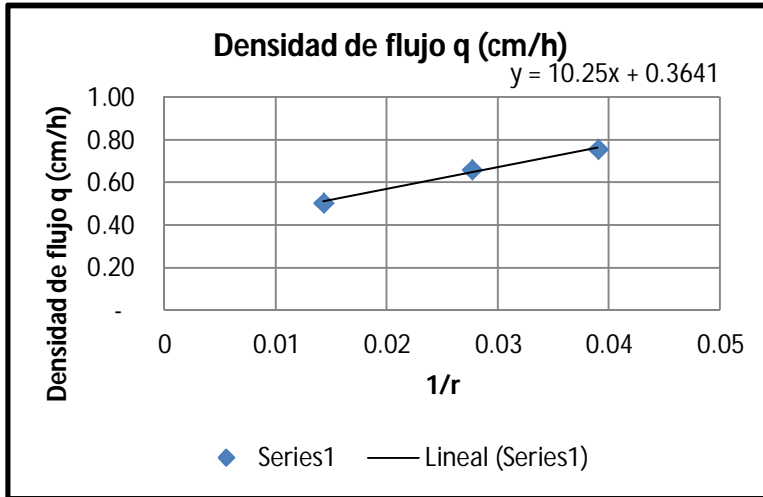


Gráfico 1

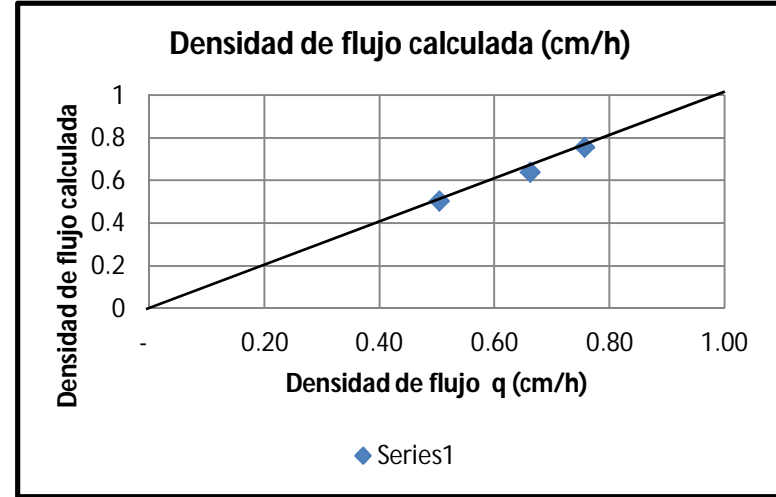


Gráfico 2

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	r(mm)	Portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Theta ini (v/v)	Theta max(v/v)	Delta theta (v/v)	Densidad de flujo calculada (cm/h)	Error abs.	Ks (mm/h)	G(mm)
PPR2-ESC02-6-100	2,067.07	1.562861538	256.5093336	1563	25.65093336	0.038984936	0.76	0.05	0.27	0.22	0.756140953	1.062E-10	3.5839013	1016.30818
PPR2-ESC02-6-020	4,103.78	2.714993318	361.4239556	2715	36.14239556	0.027668338	0.66	0.05	0.27	0.22	0.64068132	0.0209044		
PPR2-ESC02-7-003	15,403.84	7.764535032	700.2280512	7765	70.02280512	0.014281062	0.50	0.05	0.27	0.22	0.50409523	1.18E-08	suma error	0.02090436

Tabla de resultados PPR-2



Figura 34.- Lámina de gráficos finales de PPR2 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 284375, Y: 2447231.

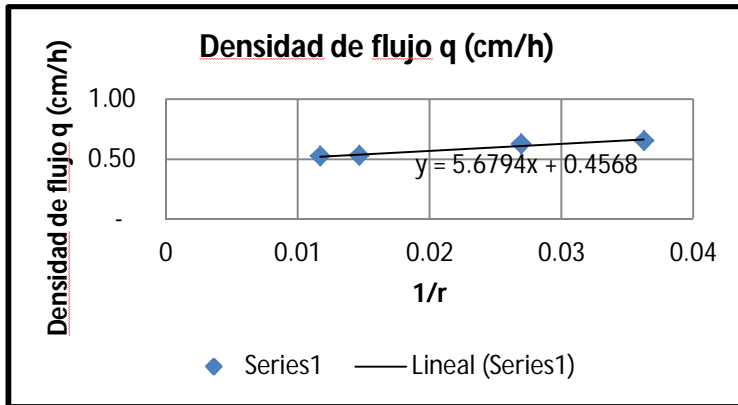


Gráfico 1

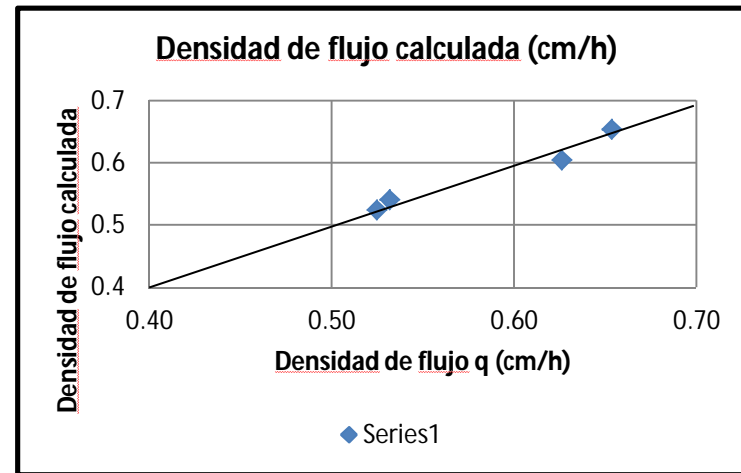


Gráfico 2

Tabla de resultados PPR-3

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	r(mm)	Portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Theta ini (v/v)	Theta max (v/v)	Delta theta (v/v)	Densidad de flujo calculada (cm/h)	Error abs.	Ks (mm/h)	G(mm)
PPR3-ESC03-7-100	2,391.55	1.562861538	275.908595	1563	27.5908595	0.036243887	0.65	0.05	0.28	0.23	0.653550073	3.336E-07	4.6314185	387.345888
PPR3-ESC03-9-020	4,338.01	2.714993318	371.5953431	2715	37.15953431	0.026910994	0.63	0.05	0.28	0.23	0.60451947	0.0213438		
PPR3-ESC03-6-003	14,612.82	7.764535032	682.0120714	7765	68.20120714	0.014662497	0.53	0.05	0.28	0.23	0.540171667	0.0087889	suma error	0.03013322
PPR3-ESC03-6-123	22954.5687	12.04238989	854.7903931	12042	85.47903931	0.011698774	0.52	0.05	0.28	0.23	0.524601672	2.237E-07		



Figura 35.- Lámina de gráficos finales de PPR3 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 284179 y Y: 2447337.

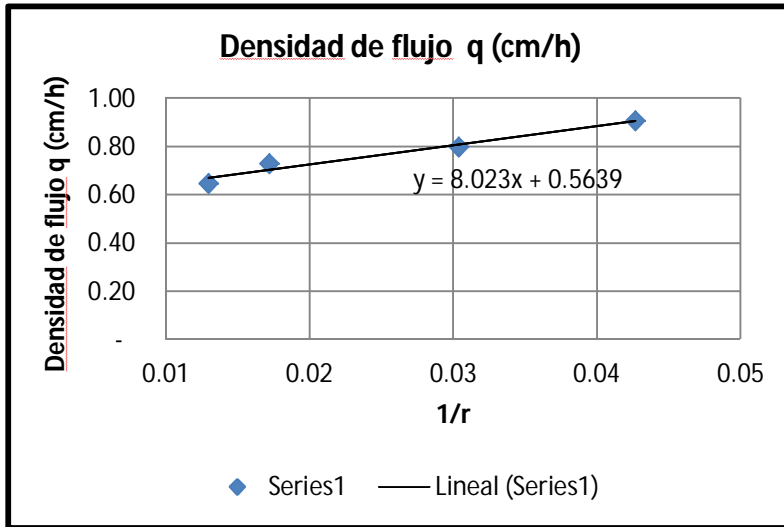


Gráfico 1

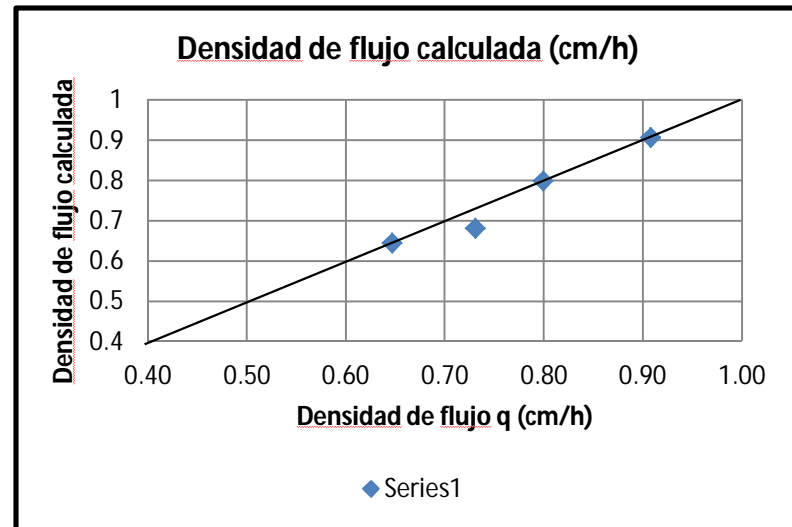


Gráfico 2

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	r(mm)	Portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Theta ini (v/v)	Theta max (v/v)	Delta theta (v/v)	Densidad de flujo calculada (cm/h)	Error abs.	Ks (mm/h)	G(mm)
PPR6-IDES05-6-100	1,722.18	1.562861538	234.1342417	1563	23.41342417	0.04271054	0.91	0.05	0.25	0.2	0.907591664	2.353E-05	5.31402579	650.889629
PPR6-IDES05-6-020	3,396.73	2.714993318	328.8181202	2715	32.88181202	0.030411949	0.80	0.05	0.25	0.2	0.799267215	3.033E-05		
PPR6-IDES05-8-003	10,627.24	7.764535032	581.6146288	7765	58.16146288	0.017193515	0.73	0.05	0.25	0.2	0.682840905	0.0478285	suma error	0.04904082
PPR6-IDES05-7-123	18612.2648	12.04238989	769.7056512	12042	76.97056512	0.012991979	0.65	0.05	0.25	0.2	0.645834305	0.0011584		

Tabla de resultados PPR6

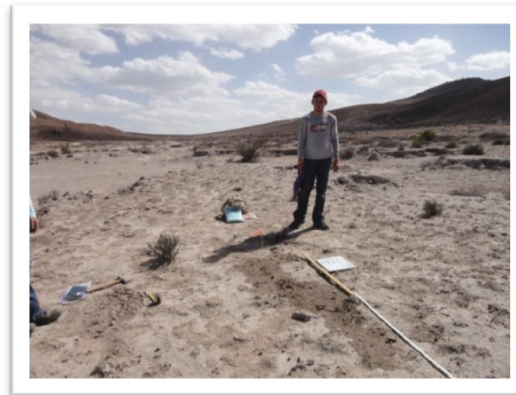


Figura 36.- Lámina de gráficos finales de PPR6 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: son X: 288903, Y: 2451817.

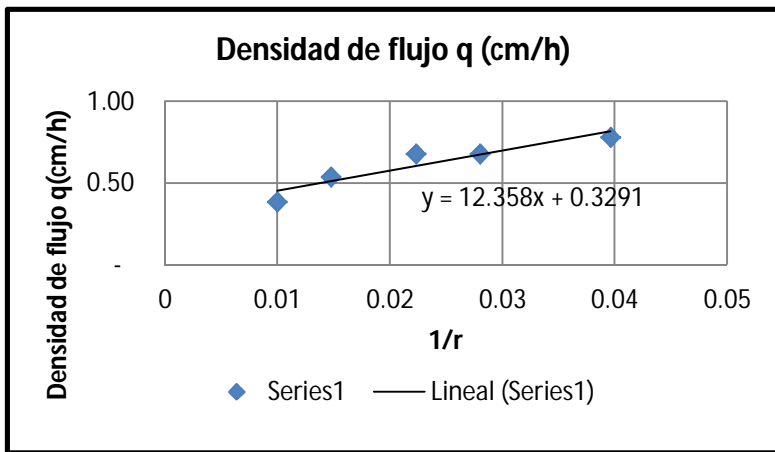


Gráfico 1

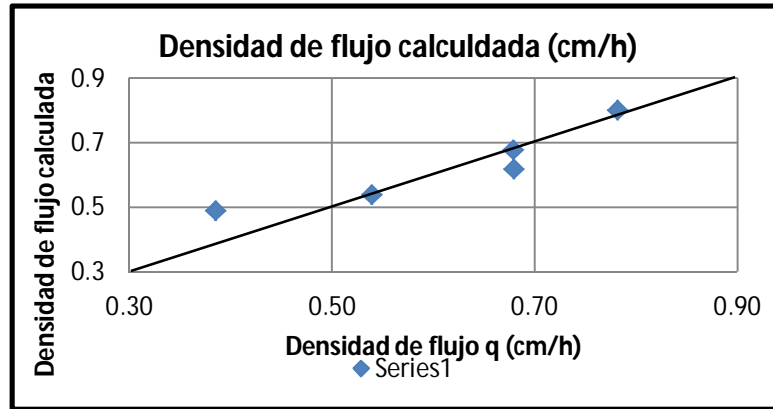


Gráfico 2

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	Portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Theta ini (v/v)	Theta max (v/v)	Delta theta (v/v)	Densidad de flujo calculada (cm/h)	Error abs.	Ks (mm/h)	G(mm)
PPR7-MC06-18-100	2,502.27	1.562861538	1563	28.22225897	0.035433025	0.62	0.05	0.25	0.2	0.624633909	4.648E-09	2.22718557	1999.99932
PPR7-MC06-17-020	5,171.68	2.714993318	2715	40.57337041	0.024646708	0.52	0.05	0.25	0.2	0.502285156	0.0226888		
PPR7-MC06-19-120	14,359.41	3.785813665	3786	67.60727328	0.014791308	0.26	0.05	0.25	0.2	0.390495759	0.126836	suma error	0.27026492
PPR7-MC06-19-003	16030.714	7.764535032	7765	71.43342886	0.013999048	0.48	0.05	0.25	0.2	0.381509187	0.1028735		
PPR7-MC06-19-123	39322.2397	12.04238989	12042	111.8778693	0.008938318	0.31	0.05	0.25	0.2	0.324105536	0.0178666		

Tabla de resultados PPR7.



Figura 37.- Lámina de gráficos finales de PPR7 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 286749, Y: 2446446.

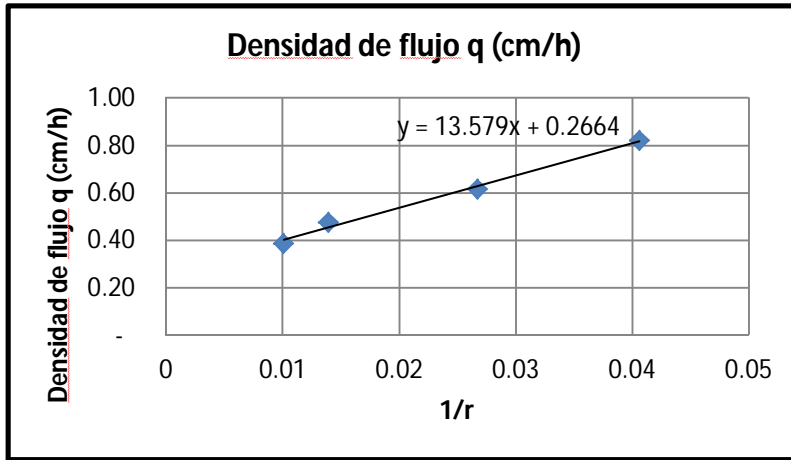


Gráfico 1

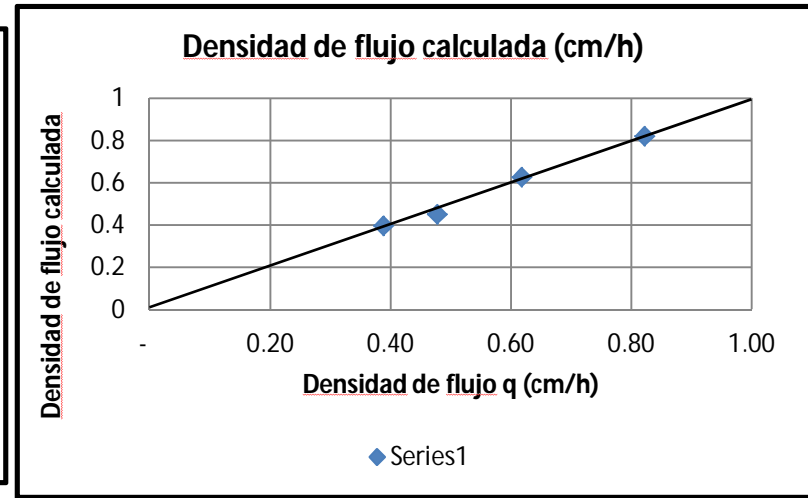


Gráfico 2

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	r(mm)	Portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Theta ini (v/v)	Theta max (v/v)	Delta theta (v/v)	Densidad de flujo calculada (cm/h)	Error abs.	Ks (mm/h)	G(mm)
PPR8-MC07-10-100	1,902.35	1.562861538	246.0763417	1563	24.60763417	0.040637795	0.82	0.04	0.25	0.21	0.821616934	8.513E-12	2.58927923	2000
PPR8-MC07-10-020	4,392.79	2.714993318	373.934328	2715	37.3934328	0.026742664	0.62	0.04	0.25	0.21	0.629218755	0.0111607		
PPR8-MC07-10-003	16,234.68	7.764535032	718.8644201	7765	71.88644201	0.013910829	0.48	0.04	0.25	0.21	0.451543456	0.0267535	suma error	0.04797661
PPR8-MC07-12-123	31019.0629	12.04238989	993.6636449	12042	99.36636449	0.010063768	0.39	0.04	0.25	0.21	0.398275331	0.0100624		

Tabla de resultados PPR8.



Figura 38.- Lámina de gráficos finales de PPR8 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 286611, Y: 2446090.

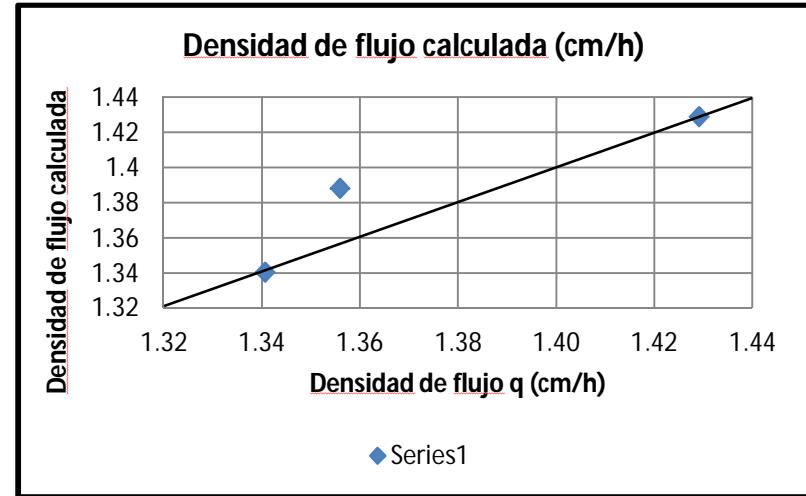
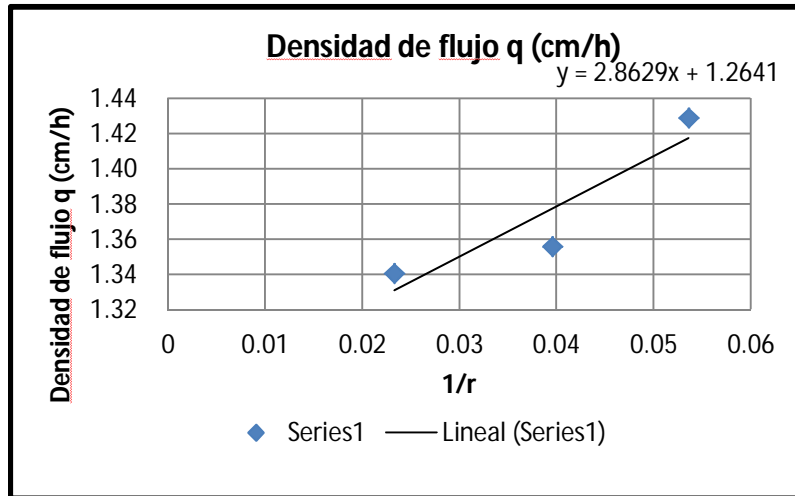


Gráfico 1

Gráfico 2

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	r (mm)	Portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Theta ini (v/v)	Theta max (v/v)	Delta theta (v/v)	Densidad de flujo calculada (cm/h)	Error abs.	Ks (mm/h)	G (mm)
PPR9-IDES08-10-100	559.62	1.562861538	133.466595	1563	13.3466595	0.074925115	2.79	0.03	0.26	0.23	2.792950503	4.528E-06	8.67104255	1012.24332
PPR9-IDES08-10-020	1,469.16	2.714993318	216.2516905	2715	21.6251691	0.046242413	1.85	0.03	0.26	0.23	2.055701397	0.2077058		
PPR9-IDES08-10-003	5,177.03	7.764535032	405.9435152	7765	40.5943515	0.024633969	1.50	0.03	0.26	0.23	1.500286291	0.000393	suma error	0.7000582
PPR9-IDES08-10-123	6217.32576	12.04238989	444.8636033	12042	44.4863603	0.0224788	1.94	0.03	0.26	0.23	1.444890658	0.4919549		

Tabla de resultados PPR9



Figura 39.- Lámina de gráficos finales de PPR9 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 283450, Y: 2452438.

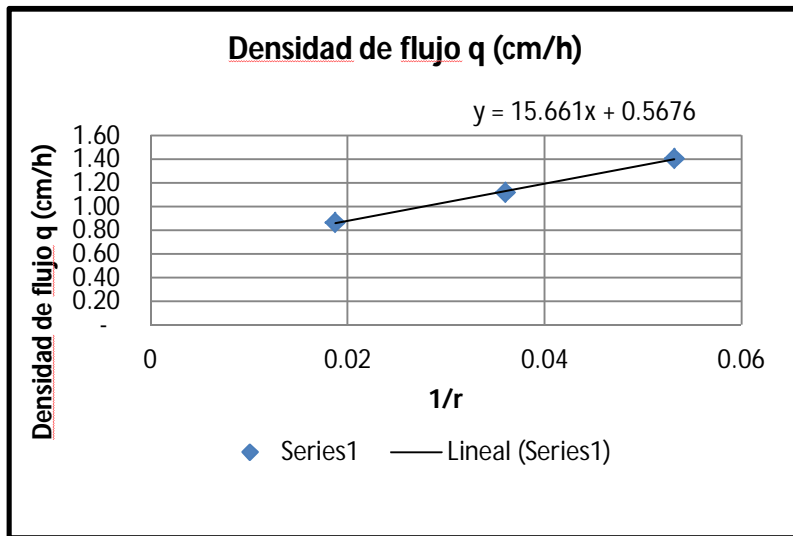


Gráfico 1

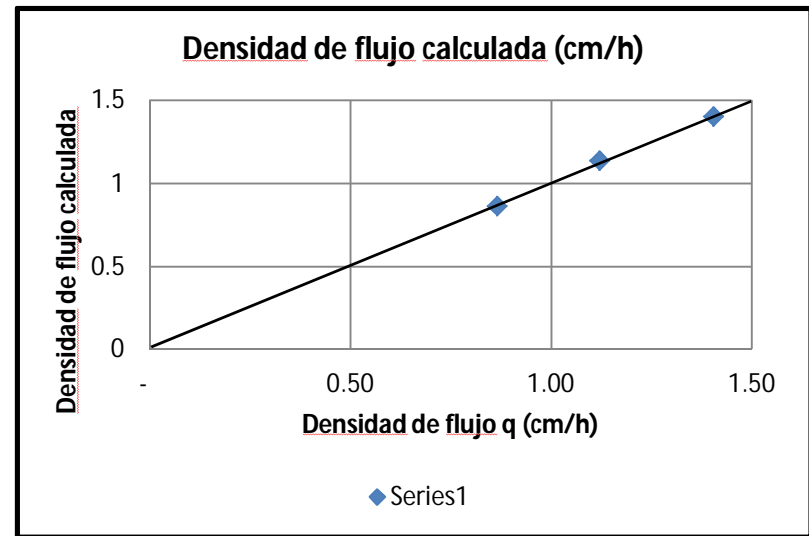


Gráfico 2

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	r(mm)	Portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Theta ini (v/v)	Theta max (v/v)	Delta theta (v/v)	Densidad de flujo calculada (cm/h)	Error Abs.	Ks (mm/h)	G(mm)
PPR10-IDES09-10-100	1,112.30	1.562861538	188.1639067	1563	18.81639067	0.053145155	1.41	0.02	0.2	0.18	1.405194568	1.26E-10	5.72826991	1193.01356
PPR10-IDES09-10-020	2,421.68	2.714993318	277.6408572	2715	27.76408572	0.036017754	1.12	0.02	0.2	0.18	1.136942578	0.0158197		
PPR10-IDES09-10-003	8,966.59	7.764535032	534.242893	7765	53.4242893	0.018718078	0.87	0.02	0.2	0.18	0.865992398	1.489E-09	suma error	0.01581972

Tabla de resultados PPR10

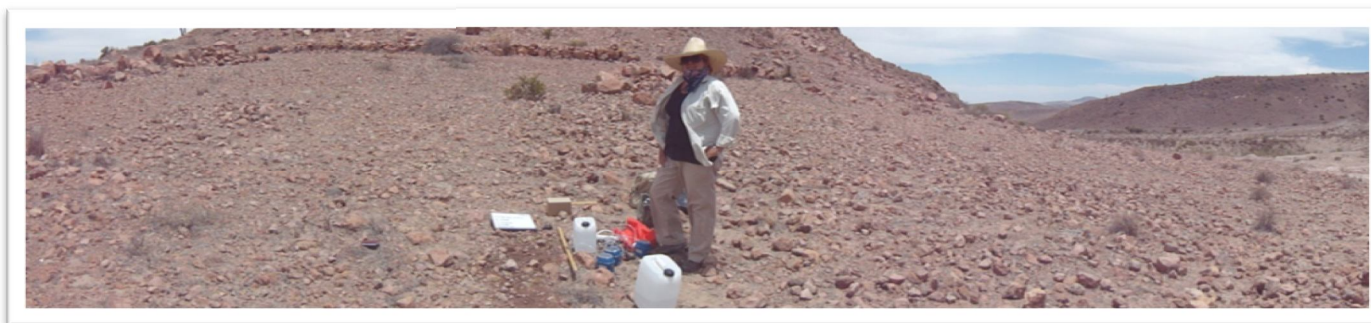


Figura 40.- Lámina de gráficos finales de PPR10 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 283461, Y: 2452451.

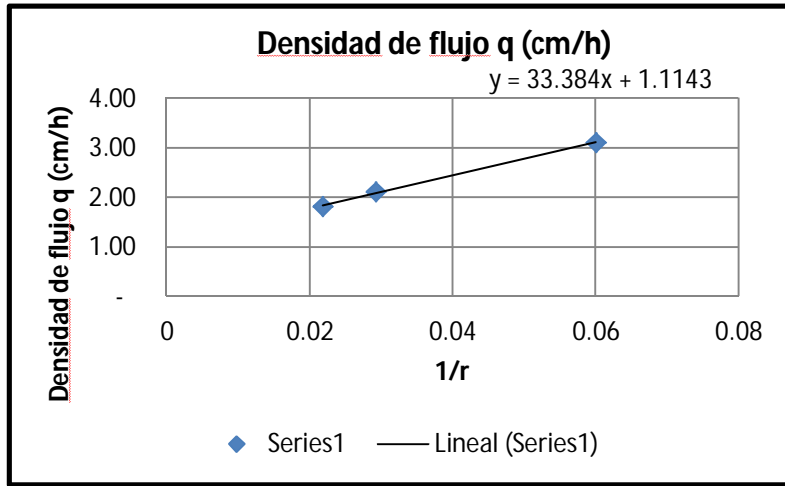


Gráfico 1

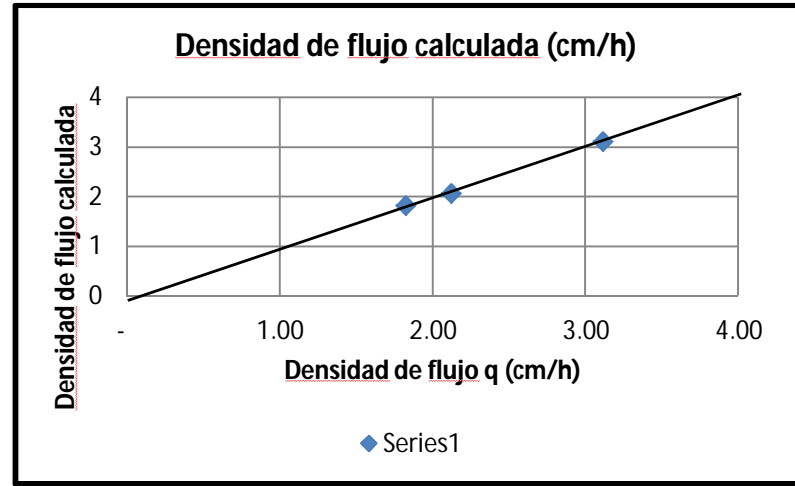


Gráfico 2

Tabla de resultados PPR-11

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	r(mm)	Portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Theta ini (v/v)	Theta max (v/v)	Delta theta (v/v)	Densidad de flujo calculada (cm/h)	Error abs.	Ks (mm/h)	G(mm)
PPR11-IDES10-10-020	872.22	2.714993318	166.6237864	2715	16.66237864	0.060015441	3.11	0.02	0.26	0.24	3.112925448	0.0001631	10.8497835	1019.18069
PPR11-IDES10-10-003	3,667.62	7.764535032	341.678187	7765	34.1678187	0.029267306	2.12	0.02	0.26	0.24	2.073932977	0.0432436	suma error	0.04375957
PPR11-IDES10-10-123	6612.26761	12.04238989	458.7755606	12042	45.87755606	0.021797151	1.82	0.02	0.26	0.24	1.821513277	0.0003529		



Figura 41.- Lámina de gráficos finales de PPR11 y tabla de resultado, coordenadas UTM en X: 284200 y Y: 2451979.

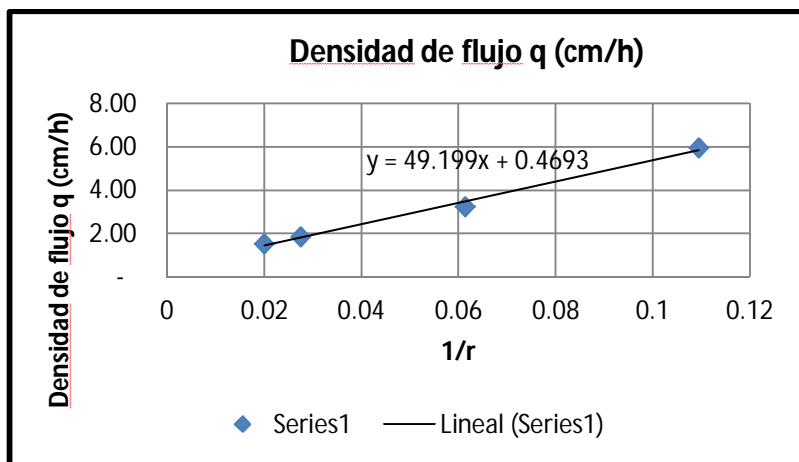


Gráfico 1

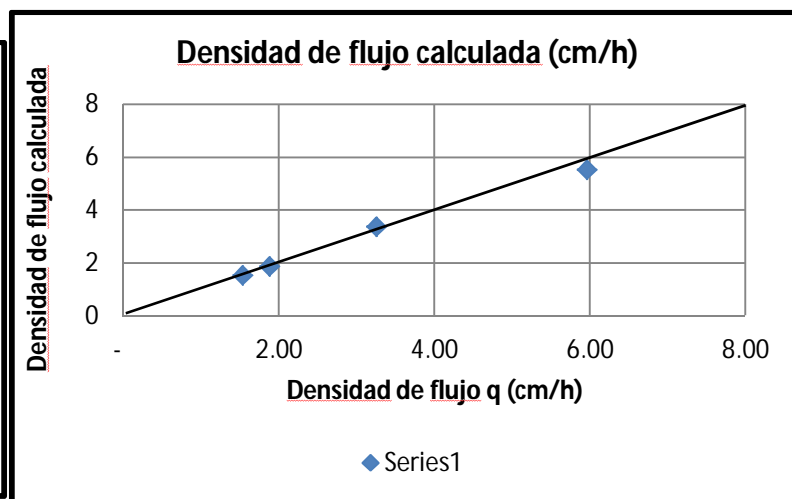


Gráfico 2

Tabla de resultados PPR12.

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	r (mm)	Portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Theta ini (v/v)	Theta max (v/v)	Delta theta (v/v)	Densidad de flujo calculada (cm/h)	Error abs.	Ks (mm/h)	G (mm)
PPR12-IDES11-10-100	262.34	1.562861538	91.38055168	1563	9.138055168	0.109432476	5.96	0.02	0.29	0.27	5.521621324	0.4363932	6.47771769	2000
PPR12-IDES11-10-020	835.05	2.714993318	163.0355285	2715	16.30355285	0.061336324	3.25	0.02	0.29	0.27	3.379538675	0.1282506		
PPR12-IDES11-10-003	4,143.14	7.764535032	363.1531435	7765	36.31531435	0.027536592	1.87	0.02	0.29	0.27	1.87418291	7.424E-09	suma error	0.56889047
PPR12-IDES11-10-123	7846.48014	12.04238989	499.7611631	12042	49.97611631	0.020009558	1.53	0.02	0.29	0.27	1.538947582	0.0042467		



Figura 42.- Lámina de gráficos finales de PPR12 y tabla de resultados, coordenadas UTM en X: 284651, Y: 2452254.

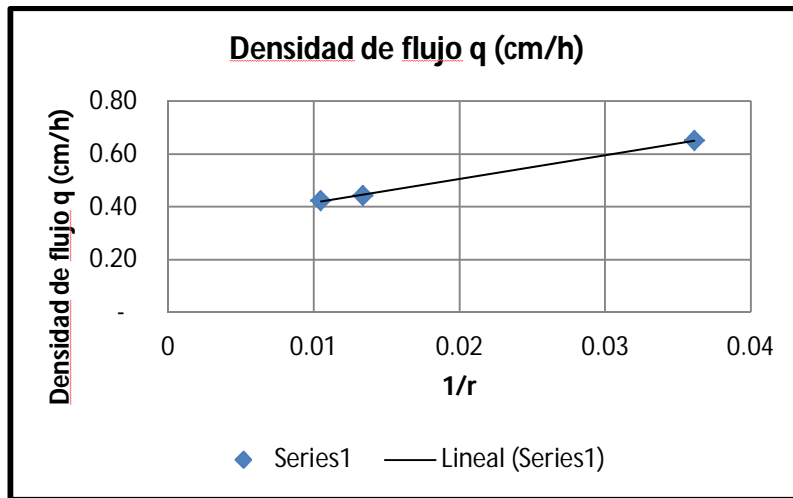


Gráfico 1

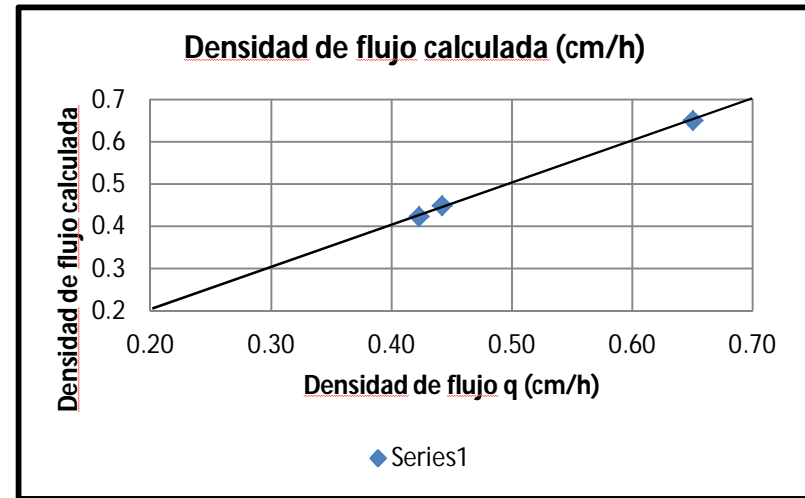


Gráfico 2

Tabla de resultados PPR13

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	r(mm)	Portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Theta ini (v/v)	Theta max (v/v)	Delta theta (v/v)	Densidad de flujo calculada (cm/h)	Error abs.	Ks (mm/h)	G(mm)
PPR13-IDES12-30-100	2.402.26	1.562861538	276.5256036	1563	27.65256036	0.036163017	0.65	0.03	0.26	0.23	0.650636653	1.768E-07	3.29955301	917.732245
PPR13-IDES12-30-003	17.569.83	7.764535032	747.840296	7765	74.7840296	0.013371839	0.44	0.03	0.26	0.23	0.448532228	0.0065815		
PPR13-IDES12-30-123	28459.5452	12.04238989	951.7854065	12042	95.17854065	0.01050657	0.42	0.03	0.26	0.23	0.423123996	2.934E-06	suma error	0.0065846



Figura 43.- Lámina de gráficos finales de PPR13 y tabla de resultados, coordenadas UTM: en X: 284889, Y: 2450275.

En general los resultados obtenidos de conductividad hidráulica (K_s) y carga capilar (G) comparado con los resultados de Vieux (2004), que se muestran en las Tablas 5 y 6, en donde los colores están representando el resultado obtenido de la Tabla 5, es decir para las pruebas PPR1, PPR2, PPR3, PPR6, PPR7, PPR9, PPR11, PPR13, representan un suelo areno-arcilloso-limoso; las pruebas PPR8, PPR10 y PPR12, representan un suelo areno-arcilloso y las pruebas PPR4, PPR4' y PPR5, la conductividad hidráulica demuestra que es una roca muy poco permeable cuyo valor está representando en el campo de las arcillas.

Tabla 5.- Resultados de las pruebas de suelos.

RESULTADOS								
PRUEBA	DELTA Θ	Ks (mm/h)	G (mm)	ESQUELETO = % DE GRAVAS	ARENAS (%)	LIMOS (%)	ARCILLAS (%)	DESCRIPCIÓN
PPR1	0.22	2.1	946.5	16.4	56.2	35.6	8.2	SUELO
PPR2	0.22	3.6	1016.3	20	56.2	35.6	8.2	SUELO
PPR3	0.23	4.6	387.3	16.6	56.2	35.6	8.2	SUELO
PPR4	-	0.17	-	-	-	-	-	ROCAS
PPR4'	-	0.6	-	-	-	-	-	ROCAS
PPR5	-	0.47	-	-	-	-	-	ROCAS
PPR6	0.20	5.3	650.8	13.8	53.8	40.3	5.6	SUELO
PPR7	0.20	3.8	1075.4	16.6	32.1	61.8	6	SUELO
PPR8	0.21	2.6	2000	5.8	68.5	26.9	4.5	SUELO
PPR9	0.23	12.7	78.3	30.7	74	22.8	3.1	SUELO
PPR10	0.18	5.7	1193	44	65.4	31.3	3.1	SUELO
PPR11	0.24	10.8	1019.2	49.6	60.6	33.3	6	SUELO
PPR12	0.27	6.5	2000	3.4	62.5	34.6	2.8	SUELO
PPR13	0.23	3.3	917.3	26.6	60.9	35.1	3.9	SUELO

Se hicieron 3 pruebas en rocas (Figuras 44, 45 y 46) para determinar qué tan impermeables son las unidades volcánicas del área de estudio a través de la conductividad hidráulica (K_s) con solamente 1 descarga de 1.5 l/h, sin tomar en cuenta la carga capilar (G) y los parámetros que determinan a ésta, como el contenido de humedad (Θ), densidad de flujo calculada y el cálculo del porcentaje del error, ya que en éstos materiales se observó que no hay capilaridad debido a la densidad de las rocas. Las pruebas fueron PPR4, PPR4' y PPR5, se llevaron a cabo sobre la Ignimbrita Cantera, en la que dieron los resultados de K_s de 0.17 mm/h, 0.6 mm/h y 0.47, lo que comprueba que son rocas impermeables ya que la

tabla 3 de Vieux (2004), el rango de conductividad hidráulica más bajo es para arcillas y va de 0.01 a .1.

Tabla 6- Tabla de comparaciones de los resultados obtenidos de campo, tomada de Vieux (2004).

CLASE DE SUELO	DELTA θ	Ks (mm/h)	G (mm)
ARENOSO	0.417	117.8	49.5
	(0.345-0.480)	(170-250)	(9.7-254)
LOAM-ARENOSO	0.401	29.9	61.3
	(0.329-0.473)	(50-210)	(13.5-279)
ARENOSO-LOAM	0.412	10.9	110.1
	(0.283-0.541)	(10-100)	(26.7-455)
LOAM	0.434	3.4	88.9
	(0.334-0.534)	(2-25)	(13.3-594)
LIMO-LOAM	0.486	6.5	166.8
	(0.394-0.578)	(.75-30)	(29.2-954)
ARENO-ARCILLO-LOAM	0.330	1.5	218.5
	(0.235-0.425)	(1.5-70)	(44.2-1080)
ARCILLO-LOAM	0.309	1	208.8
	(0.279-0.501)	(.5-4)	(47.9-911)
LIMO-ARCILLO-LOAM	0.432	1	273
	(0.347-0.517)	(.3-20)	(56.7-1320)
ARENO-ARCILLOSO	0.321	0.6	239
	(0.207-0.435)	(.1-10)	(40.8-1400)
LIMO-ARCILLOSO	0.423	0.5	292.2
	(0.334-0.512)	(0.05-0.5)	(61.3-1390)
ARCILLOSO	0.385	0.3	316.3
	(0.269-0.501)	(.00-.1)	(63.9-1560)

Loam: Es un suelo de granos sueltos que tiene una proporción equilibrada de partículas de arena, limo y arcilla, bastante impermeables, tomado de (www.wikipedia.org).

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	r(mm)	Portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Ks (mm/h)
PPR4-ESC04-5-100	85,922.43	1.5	1653.782328	1500	165.3782328	0.006046745	0.02	0.17

Tabla de resultados PPR4



Figura 44.- Lámina de tabla de resultados PPR4, coordenadas UTM en X: 284179, Y: 2447337.

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	r(mm)	Portada medida (cm ³ /h)	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo	Ks (mm/h)
PPR4'-ESC05-11-100	25,206.12	1.5	895.7319121	1500	89.57319121	0.011164055	0.06	0.60

Tabla de resultados PPR-4'



Figura 45.- Lámina de tabla de resultados PPR-4', coordenadas UTM en X: 284179, Y: 2447337.

Foto	Área (cm ²)	Q (l/h)	r(mm)	medida	Radio eq. (cm)	1/r	Densidad de flujo q (cm/h)	Ks (mm/h)
PPR5-ESC06-23-100	32,172.24	1.5	1011.965574	1500	101.1965574	0.009881759	0.05	0.47

Tabla de resultados PPR-5



Figura 46.- Lámina de tabla de resultados PPR-5, coordenadas UTM en X: 284145 y Y: 2447337.

Los suelos que se observan en el área de estudio son principalmente (semarnat, http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/03_suelos/index_suelos.html).

Litsoles: Es un suelo joven, con poca vegetación, aparece en escarpes y afloramientos, de hasta 25 cm de espesor.

Regosoles del tipo calcárico: Resultado del depósito reciente de rocas y arenas acarreadas por el agua, en climas semiáridos a áridos desarrollan una capa conocida como *ócrica* entre los 20 a 50 cm de profundidad que se vuelve dura y costrosa impidiendo la penetración del agua al subsuelo lo cual favorece la escorrentía y erosión.

La composición general de los suelos del área de estudio en cuanto a la granulometría corresponden a suelos arenolimosos con grava y arcillas.

En el perfil del suelo (Figura 47) pueden observarse los horizontes A siendo muy delgado hasta 25 cm de espesor, el horizonte B aparece en las laderas y valles, puede tener hasta 12 m de espesor, en él se observa la erosión que va de laminar a encarcavada, el horizonte C donde se ve encuentra fracturado por el intemperismo mecánico; horizonte D o roca madre.



Figura 47.- Fotografía mostrando el horizonte de suelos del área de estudio.

IV.3. Geomorfología

Es una rama de la geología que se encarga de estudiar las formas del relieve terrestre, estructura, origen, historia del desarrollo y dinámica actual; derivadas de los procesos de la superficie terrestre ya sean endógenos, es decir por fenómenos que se llevan a cabo en el interior de la Tierra y se ven reflejados en la superficie terrestre como el vulcanismo, terremotos, etc, siendo los creadores del relieve; también algunas formas del terreno se derivan de procesos exógenos que es un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que actúan en la transformación de la superficie terrestre como el intemperismo, erosión, etc.

Los procesos endógenos y exógenos que están actuando en el área de estudio son:

IV.3.1. Procesos endógenos

IV.3.1.1. Vulcanismo

Los procesos que dieron origen a la Sierra de San Miguelito, quedando actualmente inactivos, son los de origen volcánico consistiendo entre los 31 a 25 Ma en la expulsión de lavas de composición riodacítica a riolítica que formaron domos exógenos y piroclásticos de gran volumen. Entre los 22 y 20 Ma se traslaparon eventos restringidos de vulcanismo intraplaca de composición basáltica. El último ocurrió de forma intermitente con generación de lavas basaníticas.

La expulsión de lavas y el enfriamiento de éstas muestra un perfil general de formación comenzando desde la base al contacto con el material de la superficie, la lava sufre un enfriamiento rápido que generalmente forma un vitrófido de menor temperatura y dureza, hacia la parte central se genera un cuerpo masivo que al acercarse a la superficie se concentra la formación de juntas por enfriamiento, éstas son superficies planas que no se encuentran rellenas pero

llegan a tener algunos centímetros de separación que permiten la meteorización química y el termoclastismo.

La expulsión de productos piroclásticos produjo perfiles de formación diferentes al de las lavas, siendo el general la base un flujo de ceniza sin soldar, éste representa un cuerpo de baja dureza que fue compactado por el miembro superior, con gran contenido de pómez y líticos; siguiendo un cuerpo que en algunos lugares llega a estar parcialmente soldado y hacia la superficie forma un cuerpo bien soldado que también permite la formación de juntas de enfriamiento, que llegan a tener centímetros de separación y que permiten la meteorización química y el termoclastismo (Figura 48).

La construcción de domos permitió que en superficie se formara foliación, es decir un fracturamiento muy delgado, llegando a formar lajamiento que sigue la topografía del mismo.



Figura 48.- Fotografía mostrando el basculamiento y fracturamiento columnar del miembro soldado de la Ignimbrita Cantera (Tics)

IV.3.1.2. Tectónico

El siguiente proceso que dio origen a las formas del relieve del área de estudio se debe a la tectónica extensional del Terciario medio que consiste de una serie de fallas con rumbo general de N 40° W con inclinaciones de 65° - 45° principalmente hacia el SW, de gran extensión; con fallas en tipo lístrico que bascularon regionalmente la secuencia estratigráfica 15° – 35° hacia el NE (Figura 49).

Ésta actividad tectónica generó que las rocas de las unidades volcánicas dejaran de ser horizontales y fueran basculadas creando saltos de fallas y la formación de redes de drenaje de tipo rectangular principalmente.

En cuanto al peligro generado por sismos, se tienen registros testimonios históricos que en su mayoría son escuetos e imprecisos y descripciones orales de la población. Las evidencias recientes son los sismos regionales canalizados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) y la sismicidad registrada en el 2001, a partir de monitoreos sísmicos temporales realizados por el Centro de Geociencias de la UNAM; donde los principales episodios sísmicos recientes ocurrieron principalmente en los municipios de Cerritos, Villa Hidalgo, San Ciro de Acosta, Lagunillas, Santa Catarina, Tamasopo y Aquismón, teniendo una escala de hasta 4.3 en el sureste del Municipio de Cárdenas Gómez-González *et al.*, (2008) y una actividad importante y en ocasiones de gran duración, lo que la convierte en una de las regiones más activas de la Sierra Madre Oriental. Las localizaciones epicentrales, obtenidas a partir de los monitoreos sísmicos realizados, muestran una sismicidad que se incrementa de oeste a este. De esta forma el nivel más alto de sismicidad en el Estado se localiza en la zona Media, alrededor del límite oeste de la Sierra Madre Oriental. La variabilidad de su distribución espacial y temporal parece estar asociada con las variaciones fisiográficas de San Luis Potosí. La definición de las zonas activas aún es imprecisa, principalmente por el desconocimiento geográfico de las estructuras sismogénicas. Los monitoreos sísmicos con estaciones permanentes y temporales, junto con los estudios geológicos y estructurales ayudarán a definir mejor las características sismotectónicas en esta parte del Estado. Actualmente se ha documentado

actividad sísmica en áreas donde no se habían reportado movimientos telúricos, siendo uno de los casos el del estado de San Luis Potosí, lo cual ha llamado la atención de investigadores y dependencias responsables de la protección específica, varios de los epicentros coinciden con la ubicación espacial de algunas fallas, ello confirma que la zona no está exenta de sismicidad, sin embargo, para identificar las estructuras con mayor probabilidad de movimiento se requieren períodos de observación más largos, con arreglos de estaciones más densos y grandes (www.agendasanluis.com/eventos/en-san-luis-potosi-si-tiembla-se-registro-un-sismo-este-domingo/).

A esta actividad sísmica también pueden asociarse peligros secundarios que se generan a partir de un sismo pequeño, en el área de estudio se puede relacionar a peligro de caídas y volcadura de bloques, flujos de detritos.

IV.3.2. Procesos exógenos

Los procesos exógenos que han actuado modificando el relieve de la Sierra de San Miguelito desde su formación a la actualidad son los de tipo fluvial, de intemperismo, de erosión de suelos, eólica y movimientos de masa principalmente.

IV.3.2.1. Meteorización

Es el fenómeno fundamental en la evolución del modelado y precursor del ciclo geológico de erosión, transporte y sedimentación.

La alteración de las rocas en el clima semidesértico de San Luis Potosí es el resultado de las variaciones diarias y estacionales de temperatura y humedad relativa, por lo tanto la meteorización física es mayor que la química y biológica (Gutiérrez-Elorza, 2008).

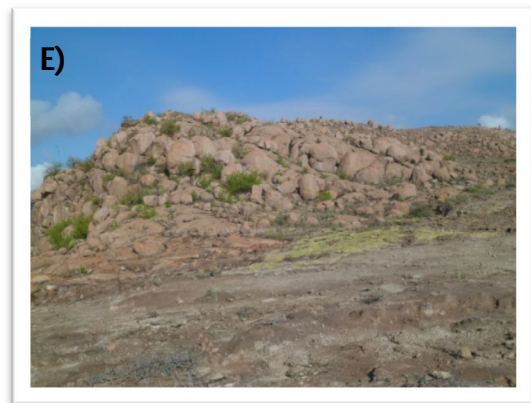
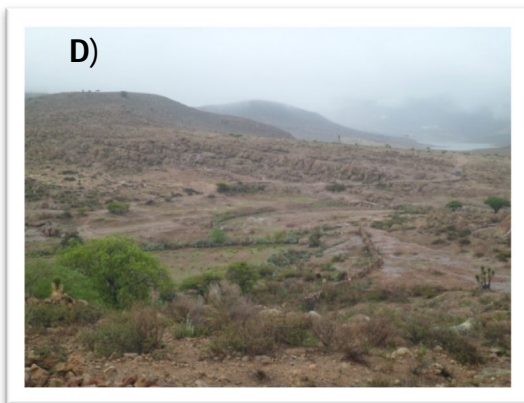
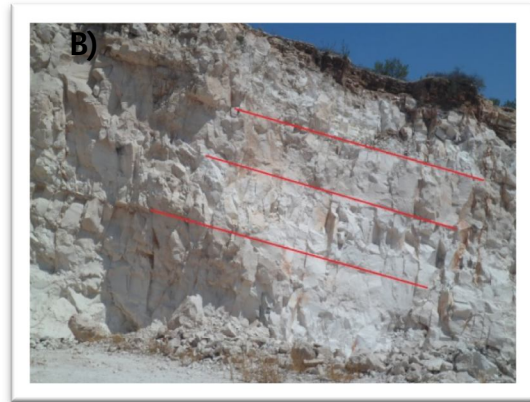
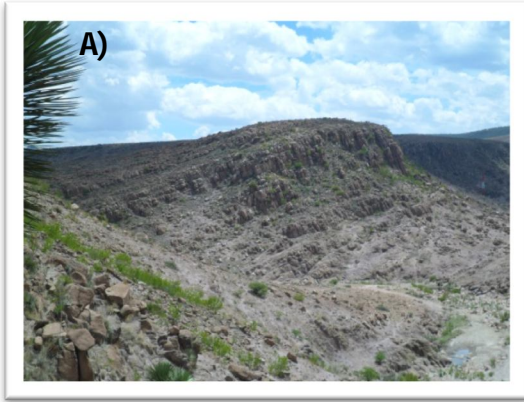


Figura 49.- Lámina de fotografía mostrando los basculamientos en el área de estudio; A), B), C) y E) Localidad de Escalerillas, D) Presa del Peaje, S.L.P.

IV.3.2.1.1. Meteorización física

Es un proceso mecánico que desintegra las rocas, debido al clima y a los cambios de temperatura, (Lobeck, 1939). Los procesos de meteorización física que están actuando en el área de estudio son:

- **Lajamiento**

La foliación de flujo desarrollada por el emplazamiento de algunos domos exógenos de lava en la Riolita San Miguelito ha generado el diaclasamiento en la zona de éstos domos) (Figura 50).



Figura 50.- Fotografía mostrando lajamiento e hidroclastismo en la Riolita San Miguelito (Tsm), ubicada en la Cañada del Lobo.

- **Termoclastismo**

Las variaciones de temperatura que experimentan los afloramientos de las unidades volcánicas que se encuentran en la Sierra de San Miguelito, dan lugar a dilataciones que producen esfuerzos compresivos en el interior de las rocas y contracción de esfuerzos tensionales, esto produce la formación de microfisuras y disgregación granular. Esto se debe a que las rocas son malas conductoras de calor y existe una importante diferencia de temperatura entre la superficie y el interior de los materiales. A este caso se le llama por meteorización insolación (Gutiérrez-Elorza, 2008). (Figura 51). Este proceso actúa fácilmente en las

esquinas de los bloques de las unidades volcánicas que se encuentran en el área de estudio, erosionándolos rápidamente de éstas partes y causando que los bloques vayan dejando de tener formas angulosas hasta ser redondeados y éstos al perder la angulosidad pueden deslizarse con la escorrentía, porque pierden la fricción que hay en los materiales.

- **Hidroclastismo**

Se produce cuando los materiales están sometidos a ciclos de humedecimiento y secado; se manifiesta por una descamación superficial y fracturación de la roca, preferente a los planos de fisibilidad existente. (Figura 51).

IV.3.2.1.2.- Meteorización química

Debido a que las unidades volcánicas que conforman el área de estudio, éstas al entrar en contacto con la atmósfera se vuelven inestables debido que se formaron a mayor presión y temperatura. Los procesos de meteorización química que están actuando en la Sierra de San Miguelito son: hidratación, hidrólisis, oxidación disolución.

IV.3.2.2- Erosión fluvial

Son los relacionados a la hidrosfera, donde el agua es uno de los factores más importantes que modifican o generan el relieve y su rol se vuelve más o menos evidente dependiendo del incremento o disminución de su capacidad de transferencia o erosión. El sistema fluvial cambia con el tiempo, debido a la actividad de los procesos erosivos y de sedimentación; también responde a los cambios climáticos, modificaciones del nivel de base y actividad antrópica (Pavlopoulos *et al.*, 2009).

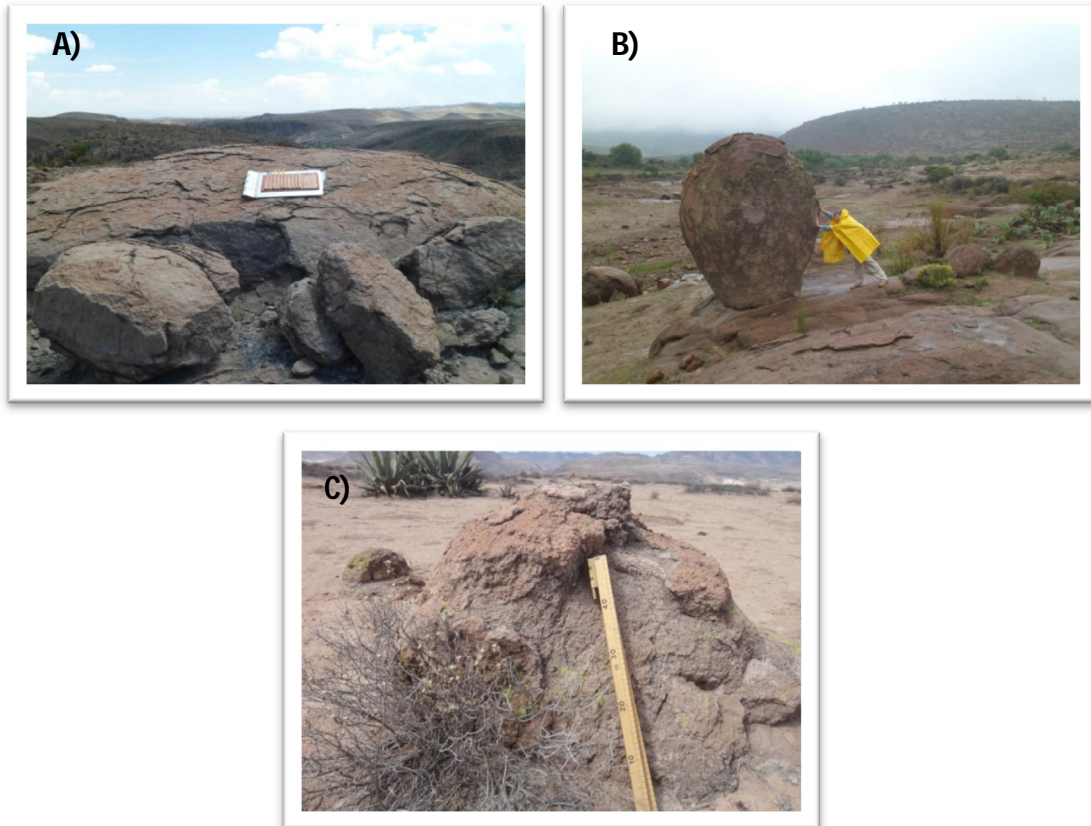


Figura 51.- Lámina de fotografías mostrando termoclastismo en el miembro soldado de la Ignimbrita Cantera, A) y C), comunidad de Escalerillas, C) Mesa de los Conejos, S.L.P.

La erosión fluvial se lleva a cabo por procesos de corrosión es decir cualquier proceso químico que resulta de la meteorización del lecho y de las paredes del curso fluvial, corrosión se refiere al desgaste mecánico por impacto entre partículas transportadas y la erosión mecánica del cauce y finalmente por cavitación que se produce solo a velocidades tales como en la base de las cascadas (Gutiérrez-Elorza, 2008). La velocidad de erosión especialmente la de sentido vertical se produce cuando la carga desgasta el lecho, movilizándolo partículas del tamaño de arena y gravas, depende de factores como son:

- a) Velocidad de la corriente.
- b) Volumen del agua.
- c) Naturaleza y abundancia de la erosión principal.

d) Vulnerabilidad de las rocas.

Los ríos principales del área de estudio son los arroyos Las Calabacitas, Las Escobas, El Potosino y Escalerillas, los cuales algunos de ellos abastecen de agua a las Presas San José, Potosino, Gonzalo N. Santos (El Peaje) y Cañada del Lobo; presentan una red de drenaje bien desarrollada, la erosión es más activa horizontalmente generando valles con forma de U, las corrientes fluviales han formado meandros, que llegan a estar trenzados en algunas partes a lo largo del curso fluvial (arroyo Las Calabacitas); también presentan llanuras de inundación en las que se observan barras; terrazas aluviales y hacia donde desembocan éstas corrientes muestran la formación de abanicos aluviales.

Los brazos que abastecen de agua a los ríos principales forman valles en forma de V en zonas donde hay afloramientos rocosos, en zonas donde hay suelos forman valles en forma de U debido a que la erosión es más intensa en sentido vertical, formando barrancos, éstos son creados en áreas con gran cantidad de discontinuidades y fallamiento, en éstas zonas se observa erosión donde se puede observar cárcavas y paredes inestables donde se dan movimientos de masa transportando bloques, arenas y arcillas (Figura 53).

Las principales redes de drenaje se determinó que es de tipo rectangular ya que el escurrimiento corre a través de las fracturas, combinado con el de tipo dendrítico donde hay una intensa erosión de suelos, comenzando a desarrollarse como erosión difusa hasta crear un pequeño cauce, llegando a formar cárcavas en zonas donde afloran los suelos residuales (Figura 52).

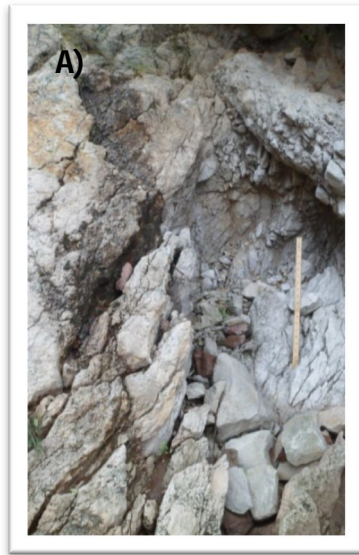


Figura 52.- Lámina de fotografías A) y B) Escorrentía a través de fisuras, C) testigo de erosión, y D) formación de cárcava.



Figura 53.- Fotografía mostrando erosión remontante en el área del Santuario de la Iglesia del Desierto.

CAPÍTULO V. Análisis de factores de peligro y discusiones

Una de las metas fue la construcción de un mapa de peligros geomorfológicos, que se muestra en el Anexo 3, basado en la observación de imágenes de satélite, fotografías aéreas, trabajo de campo y construcción de un Modelo Digital de Elevación con escala de 10 x 10 m (Figura 54) a través de esto analizar los procesos que están modificando el relieve del área de estudio y por medio de las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos y suelos que forman la Sierra de San Miguelito predecir las zonas que correrán un mayor peligro.

Los peligros naturales se encuentran asociados a procesos geológico-geomorfológicos e hidrometeorológicos y en la medida que se tenga un mayor conocimiento de éstos, se pueden prevenir y mitigar sus efectos sobre el medio ambiente y la actividad humana

Movimiento de masas

Se define como cualquier movimiento de material ladera abajo del terreno, para clasificar el tipo de movimiento depende de tres factores que son http://en.wikipedia.org/wiki/Landslide_classification:

- a) Tipo de movimiento: son caída y volcadura de bloques, deslizamiento de bloques, extensión lateral, flujo, avalanchas y reptación.
- b) Tipo de material: rocas, suelos, tierra, lodo y detritos.
- c) Velocidad de movimiento: va de un movimiento lento (1cm/año) a uno rápido (> 5 km/hora).

En el área de estudio, la formación de bloques proviene del enfriamiento de las unidades volcánicas en el área de estudio, debido al proceso de termoclastismo y disolución los bloques comienzan a redondearse y disminuir los

puntos de estabilidad que hay entre las rocas, provocando que pierdan cohesión y facilitando que caigan o rueden.

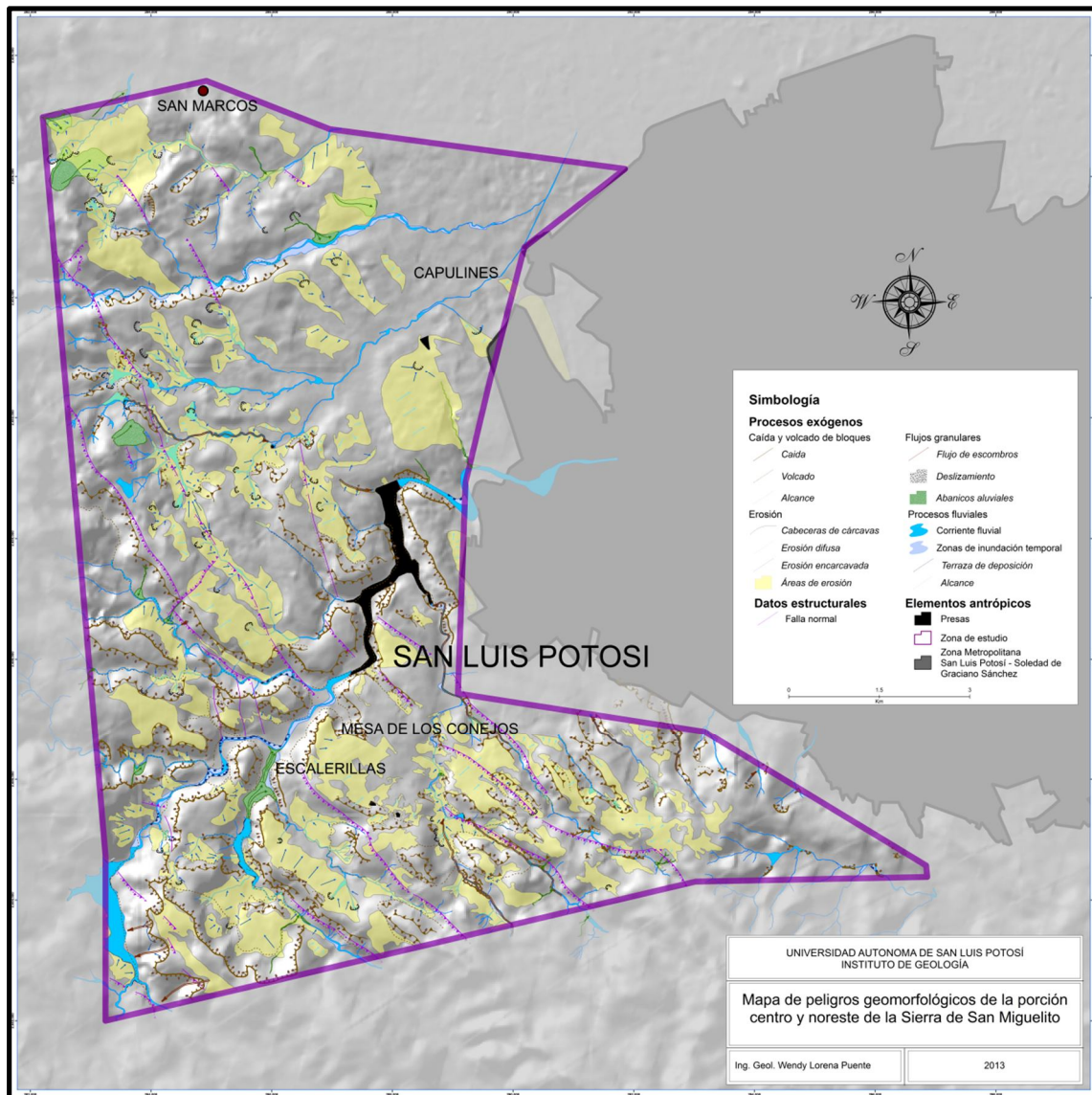


Figura 54.- Modelo digital de elevación para verificar los peligros observados en el área de estudio.

La conductividad hidráulica (K_s) promedio de 6.1 mm/h de 1128.41 mm indica que los suelos del área de estudio son suelos que favorecen la escorrentía y la erosión de suelo.

Los peligros por movimiento de masas que se han generado por los procesos exógenos que modifican el relieve del área de estudio son:

Caída de rocas



Es el movimiento de una masa de rocas que se desprende de un talud abrupto a través de un plano de corte pequeño, los materiales caen por caída libre, saltación o rotación (Gutiérrez Elorza, 2008), dependiendo del grado de inclinación de la ladera que va de 45 a 90° (Figuras 55 y 56).

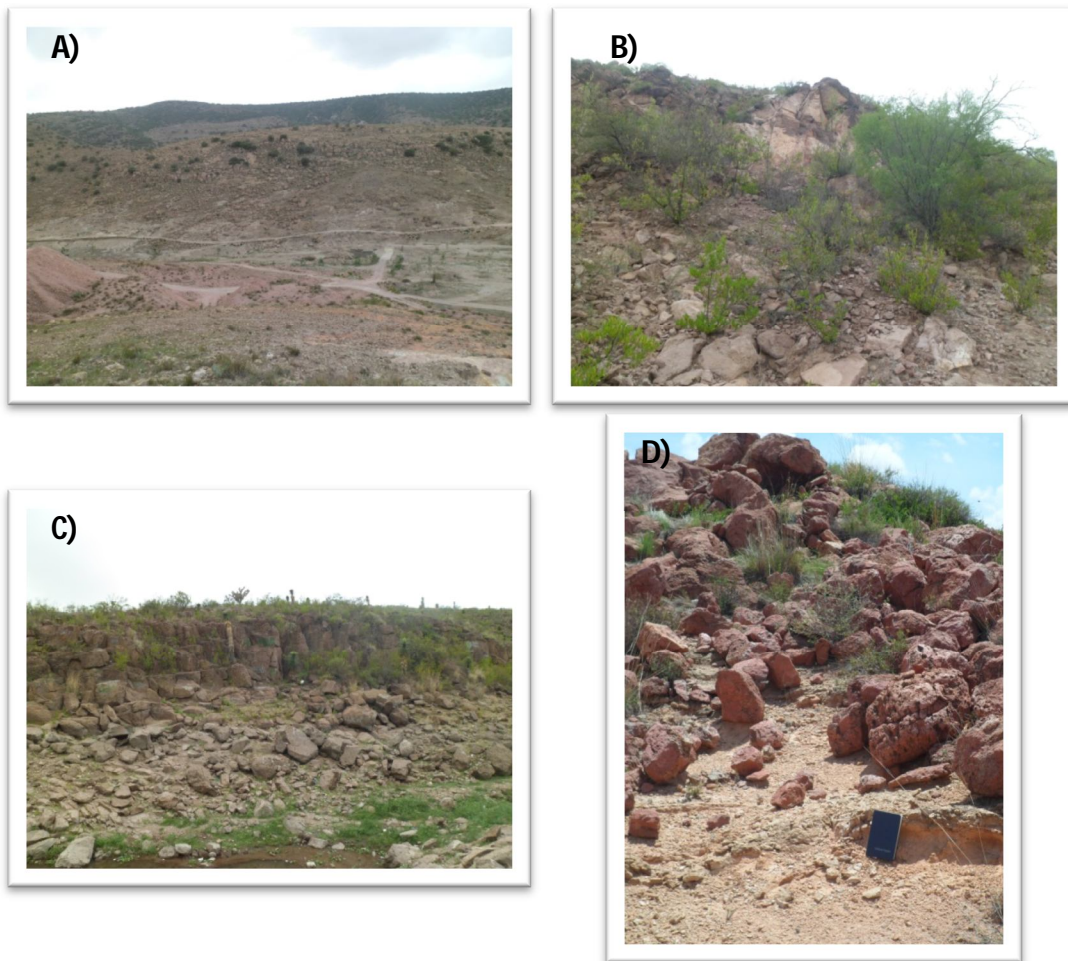


Figura 55.- Lámina mostrando caída de bloques, A) Presa el Potosino, B) y C) Presa de San José, D) Santuario del Desierto.

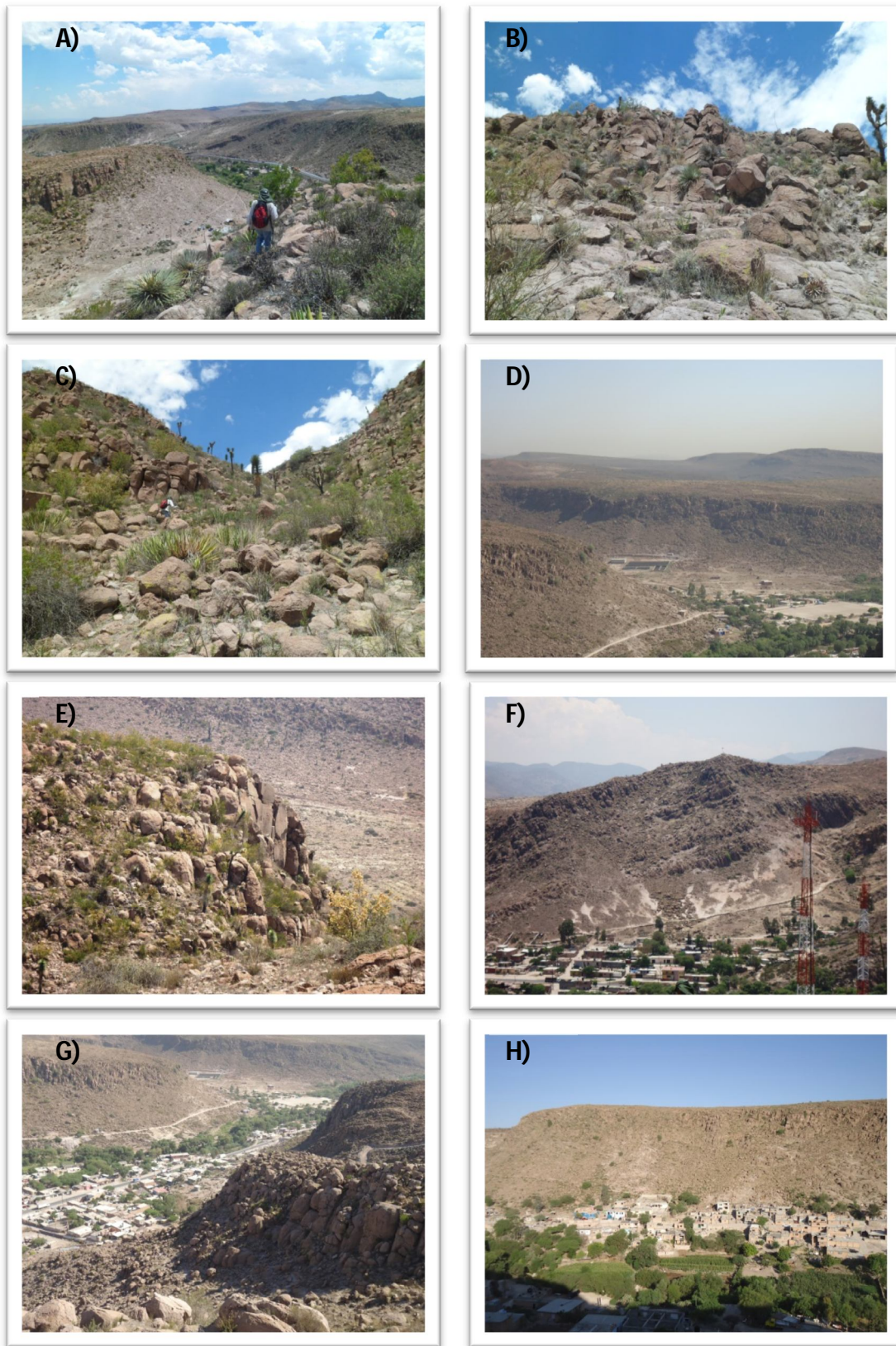


Figura 56.- Lámina mostrando caída bloques en la comunidad de Escalerillas.

Debido al enfriamiento de las lavas y los cuerpos soldados de los productos piroclásticos que conforman las unidades volcánicas del área de estudio, formaron paredes verticales de estructuras columnares de decenas de metros de espesor, permitiendo que bloques de material caigan, salten y rueden pendiente abajo.

Vuelcos



Debido al basculamiento entre 15° - 35° de las unidades volcánicas generando zonas con volcadura de bloques ladera afuera, este movimiento ocurre en torno a un punto por debajo del centro de gravedad de la masa desplazada (Gutiérrez Elorza, 2008), (Figura 57).

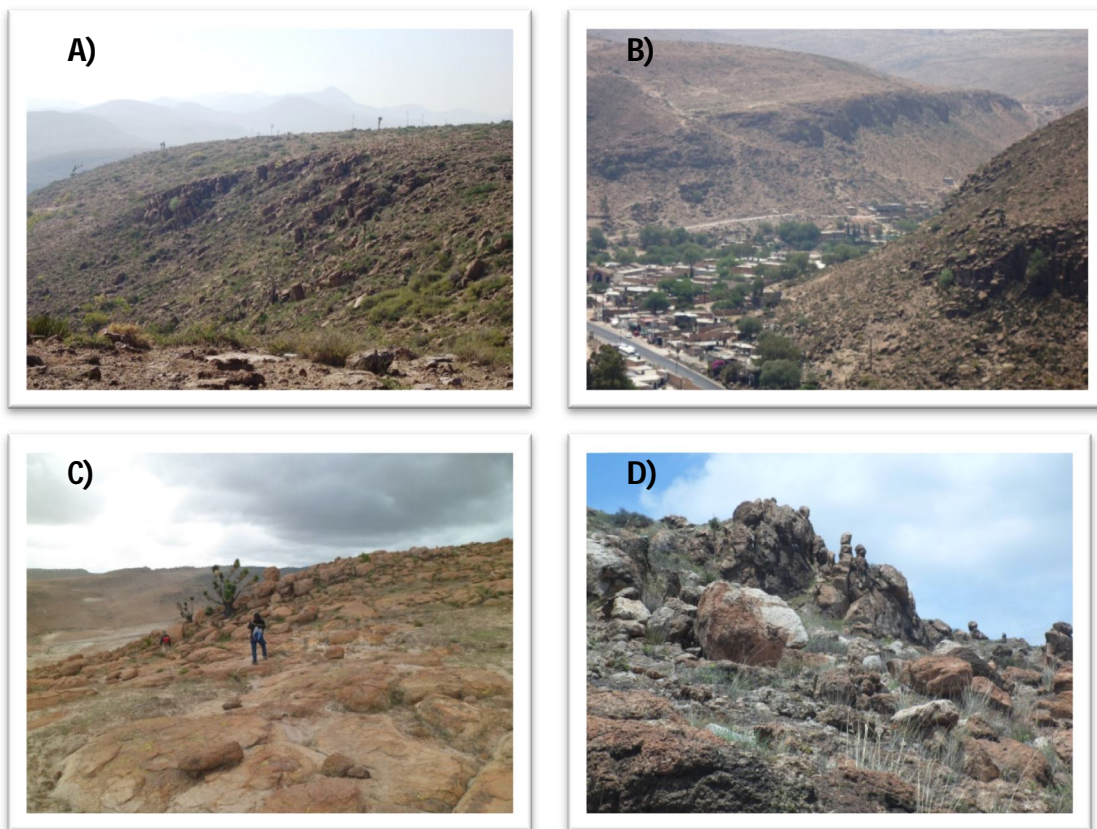


Figura 57.- Lámina mostrando volcadura de bloques en A) y B) comunidad de Escalerillas, C) Presa el Potosino y D) Santuario de la Iglesia del Desierto.

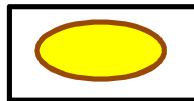
Flujos de escombros



Es un flujo de velocidad moderada (1km/hr) con alto contenido de agua, contiene una porción significativa de material grueso, que va de bloques, 20 a 80% de arenas y el resto arcillas. Son los formadores de los abanicos aluviales en climas semiáridos (Nilsen, 1992; Stanistreet, McCarthy, 1993); su formación se debe a las tormentas que se generan en el periodo de lluvias en San Luis Potosí, la vegetación se encuentra muy esparcida, la producción de sedimentos es alta, el flujo superficial es mayor que la velocidad de infiltración generando escorrentía, proporcionando el aumento de la velocidad en el transporte y la inclinación de la pendiente (Figura 58).

Los flujos de escombros tienen una forma alargada, dejando la mayoría de los bloques más grandes en las zonas proximales. Viajan desde decenas de metros hasta algunos kilómetros.

Peligro de erosión de suelos



La erosión de suelos que actúa en la Sierra de San Miguelito, es principalmente por acción del agua de lluvia y la escasa vegetación ya que el impacto de las gotas de lluvia golpean directamente al suelo generando una acción dispersante, provocando que las partículas de éstos se pongan en suspensión y sean transportadas por la escorrentía, debido a que el agua no se infiltra, solamente fluye superficialmente a una velocidad para el flujo laminar desde 1.5 a 4.0 cm/s (Young y Wiersma, 1973) hasta 30cm/s (Ellison, 1947a), con una fuerza hidráulica que es capaz de arrancar el material del suelo y está poco tiempo en contacto con el (Kirkby y Morgan, 1984).

Esta erosión se da en las partes donde aflora el suelo residual y el endurecido. Ocurre de manera difusa y laminar formando canales superficiales, desarrollándose hasta el grado que no pueden ser eliminados por las operaciones normales de labranza formando cárcavas que en algunos sitios llegan a tener una

profundidad de hasta 15 m principalmente hacia la zona del Santuario del Desierto (Figura 58), a través de éstos canales se da la máxima pérdida de suelo, debido al desprendimiento inducido por el flujo, la inestabilidad de la ladera de la pendiente y de las paredes, hacia la cabeza de éstas es notoria la erosión remontante (Piest *et al.*, 1976); también se dan los movimientos en masa observando flujos de escombros en la base de algunos de éstos, cerca de la zona del Santuario del Desierto (Figura 58, A, B y D).

La formación de cárcavas ocurre cuando la velocidad del flujo del agua aumenta a velocidades superiores a 30 cm/seg y el flujo se vuelve turbulento (Ellison, 1947a), depende de los factores del suelo, velocidad y profundidad del flujo hídrico, siendo de 0.6-1.0 m/s en una cárcava erosionada (Kar y Ba Badyopadhyay, 1974; Foster, 1978).

Factores que influyen en la erosión del suelo:

- a) Los suelos erosionables tienen un bajo contenido de arcilla.
- b) Los suelos pedregosos, son menos susceptibles a la erosión, ya que no permiten el impacto directo de las gotas de lluvia y dejan que haya una mayor infiltración a través de los bordes de las piedras (Lamb *et al.*, 1950).
- c) El perfil del suelo, determina la severidad de la erosión, los suelos que afloran en el área de estudio prácticamente han desarrollado el horizonte A como una capa muy delgada, de hasta 20 cm de espesor, el horizonte C de hasta 40 cm y el horizonte D para los litosoles que se encuentran en los escarpes y afloramientos (Figura 47), en la Zona del Santuario del Desierto, Mesa de los Conejos, se encuentran los regosoles donde se puede apreciar el horizonte B de hasta 16 m aproximadamente con la capa ócrica, en los cuales se observa el suelo endurecido y donde ocurre principalmente la erosión de manera más extrema, ocasionando que las cárcavas tengan una mayor profundidad llegando a ser de hasta 15 m (Figura 59).
- d) Humedad inicial del suelo: el suelo que ya está húmedo cuando la lluvia cae sobre él, alcanza rápidamente su tasa de infiltración final (Kirkby y Morgan, 1984).

e) Pendiente: a mayor pendiente el suelo se esparce cuesta abajo (Ellison, 1944); la longitud de la pendiente; a mayor longitud de la pendiente, la erosión es más grave (Musgrave, 1954, Wischmeier y Smith, 1965); forma de la pendiente, los suelos erosionados se acumulan en los fondos de los valles, donde el relieve es ondulado, en las pendientes largas dan lugar a laderas cortas de valle.

Peligro de inundación en el curso fluvial

Se presenta principalmente en las llanuras de inundación que se encuentran a lo largo del curso fluvial ya que algunas áreas de futuro desarrollo de urbanización se ubican cerca de éstas zonas.

Debido a los parámetros de contenido de humedad en el suelo $\Delta \theta$ 0.330, Conductividad Hidráulica (Ks) 6.1 mm/h promedio, Carga Capilar (G) 1109 mm promedio y granulometría $\approx 35\%$ arenas, $\approx 25\%$ limos, 15% gravas, $< 5\%$ arcillas; en suelos cuando ocurren las primeras lluvias o después de una tormenta, indican que el agua que cae comenzará a escurrir ya que la infiltración del agua es muy poca, debido a que el suelo se satura rápidamente provocando una rápida escorrentía en las cimas de los cerros hasta el curso fluvial donde el material que arrastra es depositado en las zonas bajas de éste y en algunos lugares llegan a crear zonas de inundación naturales que se llenan rápidamente cuando ocurren tormentas.

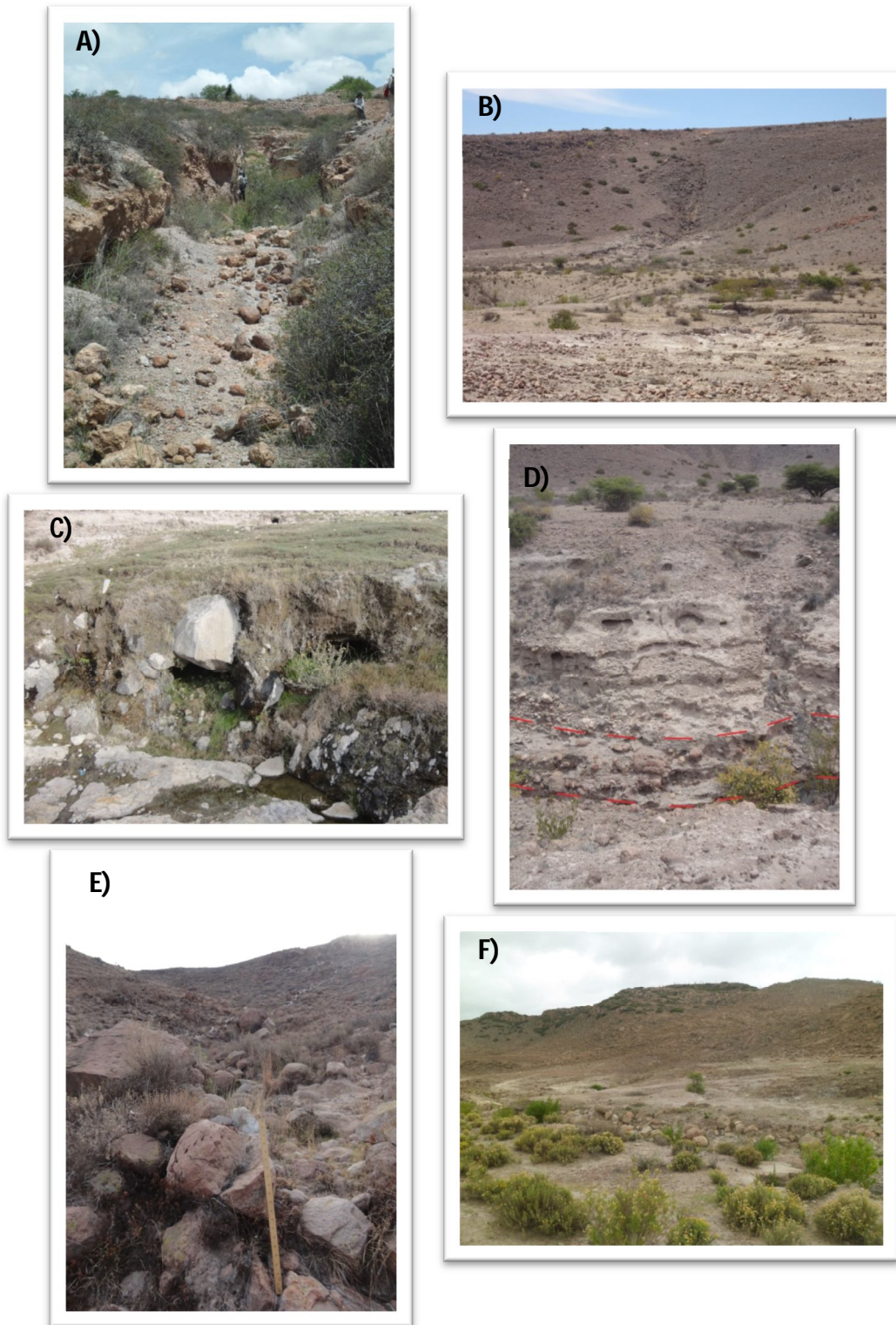


Figura 58.- Lámina de fotografías mostrando flujos de escombros en el área de estudio A), B) y D) Santuario de la Iglesia del Desierto, C) y E) San Luis Potosí y F) Mesa de los Conejos.



Figura 59.- Lámina de fotografías mostrando erosión de suelos en el área de estudio A), C), E) y F) Santuario de la Iglesia del Desierto, B) Presa de San José, D) Mesa de los Conejos-S.L.P.

Discusiones

A través de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, se determinó la calidad de los macizos rocosos, dureza y comportamiento mecánico, es decir parámetros que fueron utilizados para determinar la estabilidad de estas unidades volcánicas y asociarlas a peligros geomorfológicos.

Las unidades caracterizadas como buena a muy buena calidad en cuanto al RMR y GSI, también generan peligros como caída y volcadura de bloques.

Los bloques formados por las unidades volcánicas de la Riolita San Miguelito y el miembro soldado de la Ignimbrita Cantera debido al basculamiento de 15° a 35° ha generado que estas unidades volcánicas se encuentren inestables y puedan generar movimientos de masa con una lluvia torrencial o un sismo pequeño.

Las zonas con mayor peligro generado por estos movimientos de masa son la localidad de Escalerillas, Mesa de los Conejos y Cañada del Lobo ya que éste tipo de peligro se observa en los afloramientos de los escarpes de estas unidades.

El modelo hidráulico aplicado con el método de regresión lineal para encontrar los valores apropiados conductividad hidráulica dieron un valor promedio de conductividad hidráulica (K_s) de 6.1 y carga capilar (G) 1128.41, resultados que presentaron el mínimo error en la optimización de los valores de las áreas de encharcamiento para cada descarga, indicando que los materiales que conforman la Sierra de San Miguelito son muy poco permeables, este valor aumenta con el porcentaje del contenido de rocas.

La conductividad hidráulica (K_s) promedio de las rocas, con un valor de 0.5 mm/h lo que corrobora que la mayoría de las rocas del área de estudio son poco permeables.

El método de PDI, es económico y confiable para determinar los valores de conductividad hidráulica (K_s) y carga capilar (G) ya que es muy sensible a las condiciones físicas del suelo ya que en suelos residuales con muy poco contenido de materia gravas, permite un poco de infiltración, con costras no permiten la infiltración del agua por lo que el agua escurre superficialmente, en suelos pedregosos ya sea en superficie o en el subsuelo el contenido de rocas aumenta la conductividad hidráulica (K_s) y reduce la carga capilar (G) (Tabla 7).

Tabla 7.- Contenido de gravas y conductividad hidráulica (K_s).

RESULTADOS			
PRUEBA	K_s (mm/h)	ESQUELETO = % DE GRAVAS	DESCRIPCIÓN
PPR1	2.1	16.4	SUELO
PPR2	3.6	20	SUELO
PPR3	4.6	16.6	SUELO
PPR4	0.17	-	ROCAS
PPR4'	0.6	-	ROCAS
PPR5	0.47	-	ROCAS
PPR6	5.3	13.8	SUELO
PPR7	3.8	16.6	SUELO
PPR8	2.6	5.8	SUELO
PPR9	12.7	30.7	SUELO
PPR10	5.7	44	SUELO
PPR11	10.8	49.6	SUELO
PPR12	6.5	3.4	SUELO
PPR13	3.3	26.6	SUELO

La materia orgánica disminuye la escorrentía ya que representan zonas de captación permitiendo la humedad por capilaridad e infiltración, después de un tiempo comenzaba la saturación hasta que se excedía permitiendo el flujo de agua a través de ésta materia orgánica.

Es importante tener el conocimiento previo sobre los procesos geomorfológicos que modifican el relieve ya que al tomarlos en cuenta junto con las condiciones físicas, mecánicas e hidráulicas de los materiales, pueden ayudar

a mejorar el diseño, planificación y toma de decisiones en la construcción de infraestructura.

Los procesos que están modificando el relieve del área de estudio son principalmente los exógenos, pero también hay que tomar en cuenta que pueden desencadenarse con la actividad sísmica, principalmente caída y volcadura de bloques, así como flujos de escombros.

Se ha comprobado a partir del 2001 por medio del Servicio Sismológico Nacional (SSN), a partir de monitoreos sísmicos temporales que San Luis Potosí a presentado movimiento sísmico, cuyos eventos recientes ocurrieron principalmente en los municipios de Cerritos, Villa Hidalgo, San Ciró de Acosta, Lagunillas, Santa Catarina, Tamasopo y Aquismón teniendo una actividad importante y en ocasiones de gran duración, lo que la convierte en una de las regiones más activas de la Sierra Madre Oriental.

Conclusiones

Propiedades físicas y mecánicas de las rocas asociadas a peligros

Uno de los objetivos de este trabajo fue comprobar que las unidades volcánicas del área de estudio pudieran dividirse en unidades geotécnicas con base en los resultados de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, es decir en los parámetros de RMR, GSI, cohesión y ángulo de fricción (ϕ), por medio de éstos parámetros se determinó que sí pudieron dividirse en unidades geotécnicas, siendo las siguientes:

Riolita San Miguelito: El miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito es la unidad que tiene los valores más altos clasificándola como una unidad de buena calidad, compuesta por bloques y las condiciones de los afloramientos van de buena a muy buena, también en los diagramas de RMR y GSI se observa que no tiene una amplia distribución a lo largo de la puntuación de ésta clasificación, por lo que se determinó que su comportamiento es similar en los demás afloramientos del área de estudio.

Se tomaron muestras del caparazón, dieron resultados de valores de RMR 63 y 58, GSI de 58 y 53 con una cohesión de 0.29 MPa y un ángulo de fricción ϕ de 34°. También se muestreó el vitrificado de esta misma unidad y dio como resultado de RMR y GSI de 54 y 49, cohesión de 0.27 MPa y ángulo ϕ de 32°; ambos miembros se clasifican como calidad buena, por lo que puede determinarse que el comportamiento es similar en los afloramientos del área de estudio.

Ignimbrita Cantera: Se tomaron muestras de la base de los flujos piroclásticos (Tic), esta unidad tuvo valores del sistema RMR de 25 a 67, con una media de 50, GSI de 20-62, teniendo una media de 45 una cohesión de 0.2-0.3 MPa y un ángulo de fricción (ϕ) de 25°-35° clasificando a este macizo rocoso como una roca de calidad media con tendencia a calidad pobre.

El miembro soldado de esta unidad (Tics), dio resultados del sistema RMR de 52-74 y la media de 70, GSI de 47-72 con una media de 65, una cohesión de 0.3-0.4 y ángulo de fricción (ϕ) de 35°-45°, clasificándolo como un macizo rocoso de calidad buena.

Cada miembro de esta unidad, con base en los resultados del sistema RMR y GSI también puede dividirse en 2 unidades geotécnicas ya que ambos miembros tienen 2 comportamientos diferentes. En el caso de Tic los resultados muy bajos de ambos sistemas se debe zonas de moderada alteración y alto fracturamiento debido a la cercanía de zonas de falla, también se debe a la posición estratigráfica donde se tomaron las muestras (Figura 60).

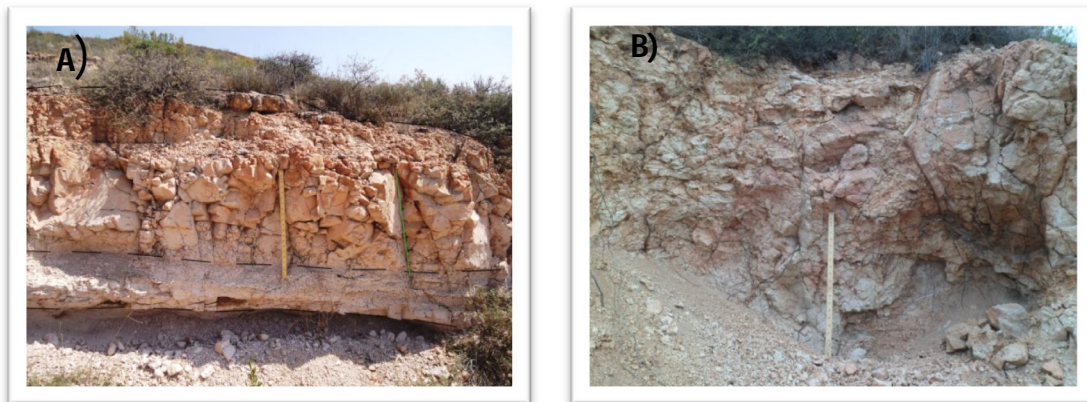


Figura 60.- Lámina de fotografías A) fracturamiento debido al acomodo del depósito de los flujos piroclásticos, Escalerillas y B) Afloramiento cerca de zona de falla, Presa de San José.

Se tomaron cuatro muestras de la Riolita Panalillo (Tlp), cuyo valor del sistema de RMR fue de 79 y GSI de 74, clasificando a este afloramiento como un macizo rocoso de buena calidad, pero se recomienda tomar más muestras y descripciones de campo de esta unidad para poder determinar valores más precisos de esta unidad volcánica.

El cambio de las zonas de fracturamiento en los flujos piroclásticos y flujos de lava se debe a los perfiles de temperatura en el depósito de éstas unidades. En el caso de los flujos piroclásticos hacia la base se tienen las rocas con menor

calidad en el sistema RMR y GSI ya que en éstas zonas se encuentra una mayor cantidad de líticos casi soportados por una matriz delgada de cenizas (Figura 60, A).

En zonas donde el fracturamiento es bajo, con mayor temperatura, se observó que los cuerpos tuvieron un enfriamiento lento que provocó la formación de juntas de enfriamiento con un mayor separación, formando solamente de 2 a 3 familias de discontinuidades permitiendo la creación de columnas y grandes bloques en estas unidades volcánicas y aumentando la calidad de los macizos rocosos (Figura 61).



Figura 61.- Fotografía mostrando columnas de la Ignimbrita Cantera en la Presa del Peaje, S.L.P.

El basculamiento de la tectónica extensional fue de 15° - 35° , los ángulos de fricción (ϕ) de la unidades volcánicas va de $< 25^{\circ}$ (Tic), 35° - 45° (Tic, Tics, Trp y Tsm), por lo que los bloques erosionados de éstos afloramientos se encuentran inestables y han formado zonas con peligro de caída y volcadura de bloques, los cuales en

temporada de lluvias intensas son los aportadores de bloques a los flujos de escombros.

La foliación de flujo en zonas donde se emplazaron domos exógenos de la Riolita San Miguelito, se observó lajamiento, que puede generar movimiento de extensión lateral en zonas escarpadas con una pendiente mayor a 20°.

La Sierra de San Miguelito se encuentra dentro de una etapa de madurez temprana del ciclo geomorfológico ya que las formas del relieve son superficies que van de abruptas donde llegan a observarse barrancos con pendientes muy inclinadas a laderas suaves con pendientes moderadas, cuyos valles tienen forma de V, llegando ser en forma de U en zonas donde se encuentran los ríos principales. Las redes de drenaje son de tercer orden en las cuales los brazos de primer y segundo orden van de forma recta a ligeramente curva en los cuales algunos de ellos se observan flujos de escombros principalmente en los de segundo orden, en los de tercer orden el curso fluvial ya ha creado meandros que son más anchos en las curvas llegando a apreciarse planicies de inundación y pequeñas barras, en algunas áreas éstos llegan a estar trenzados ; hacia donde desembocan éstos se pueden observar abanicos aluviales.

La meteorización física y química son las que actúan principalmente en los afloramientos de los macizos rocosos en los que se puede apreciar el lajamiento, termoclastismo, hidroclastismo y procesos químicos que descomponen la roca generando suelos residuales como la hidratación, hidrólisis, oxidación, soliflucción.

Propiedades hidráulicas asociadas a peligros

La conductividad hidráulica (K_s) y carga capilar (G) se determinaron por medio de un método por goteo no invasivo, en el que se aplicó una técnica de tiempo vs. área de encharcamiento, obtenido a través de una curva asintótica simple para cada descarga (Ecuaciones y detalles en el Apéndice B), al haber obtenido los valores de las áreas y determinar el radio equivalente, se aplicó un análisis de regresión para estimar el valor máximo de este radio en estado estable apropiado

para cada área, para lograr esto se llevó a cabo una optimización de los valores de la curva asintótica y así poder encontrar los valores de la conductividad hidráulica (K_s) y carga capilar (G).

Se hicieron 13 pruebas de permeabilidad que se designaron con las claves PPR1, PPR2, PPR3, PPR4, PPR5, PPR6, PPR7, PPR8, PPR9, PPR10, PPR11, PPR12, PPR13, las cuales se aplicaron en suelos residuales, rocas, suelos con una costra y suelos pedregosos, donde a través del modelo aplicado se estimó que los valores obtenidos de las áreas corresponden a suelos areno-arcillo-*loam* y suelos areno-arcillosos.

Se encontraron diferencias en cuanto a los valores obtenidos de conductividad hidráulica (K_s) y carga capilar (G), donde se observan suelos residuales con poco a moderado contenido de rocas en la cubierta, los valores de K_s 2.1 a 10.9 y G van de 946.5 a 1019.2 debido a que el agua no tiene obstáculos que detengan o retrasen su curso, esto se observa en las pruebas PPR1, PPR2, PPR7, PPR10, PPR11 y PPR13.

En las pruebas PPR8 y PPR12, la carga capilar (G) arrojó como resultados un valor de 2000, esto se debe a que son suelos con una costra compactada en la superficie principalmente de limos y arcillas, facilitando aún más la escorrentía y deteniendo la infiltración.

En las pruebas PPR9, PPR3 se observó que hay poco contenido de suelo y se encuentra muy cercano el horizonte C, por lo que las rocas disminuyen la capacidad que tiene el agua de fluir y representan obstáculos para el curso del agua.

El contenido de rocas en la superficie representan un obstáculo para la erosión por el impacto de las gotas de lluvia y como ejercen un peso sobre el suelo, representan un obstáculo ya que el agua se retiene en éstos lugares hasta que el exceso de saturación permite el paso del agua.

Los valores obtenidos de conductividad hidráulica (K_s) en promedio es de 6.1 mm/h y carga capilar (G) 1128.41 lo que indican que las unidades volcánicas

que afloran en el área de estudio y los suelos, favorecen la escorrentía generando zonas de inundación y movimiento de masas que se dan en mayor grado en áreas donde los ríos han formado cárcavas generando flujos de escombros, cuyo aporte de material fino proviene de la erosión del suelo y bases de los flujos piroclásticos, el material grueso como gravas y bloques proviene de unidades volcánicas y de la erosión de éstas.

Se tienen archivos y testimonios históricos de sismos que han ocurrido en la ciudad de San Luis Potosí, en su mayoría imprecisos en los que no se tiene una escala registrada; pero en la actividad registrada a partir del 2001 por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) a través de monitoreos sísmicos temporales llevados a cabo por el Centro de Geociencias de la UNAM, se ha observado que los eventos sísmicos recientes ocurrieron principalmente en los municipios de Cerritos, Villa Hidalgo, San Ciro de Acosta, Lagunillas, Santa Catarina, Tamasopo y Aquismón teniendo una actividad importante y en ocasiones de gran duración, lo que la convierte en una de las regiones más activas de la Sierra Madre Oriental.

Recomendaciones

- Hacer estudios más detallados sobre cada peligro observado en el área de estudio y evaluar el riesgo para las poblaciones que se encuentran viviendo cerca de éstos, principalmente de:
 - Caída y volcadura de bloques.
 - Erosión de suelo.
 - Generación de escorrentía e inundación con nuevos parámetros de la capacidad de infiltración (K_s y G).
 - Flujos de escombros.
- Hacer más pruebas de permeabilidad a través de la metodología propuesta en este estudio para determinar con mayor precisión los parámetros de infiltración (K_s y G).
- Hacer estudios detallados sobre la erodibilidad de suelo.

- Ampliar este tipo de estudio desde la Cañada del Lobo a la Zona Industrial, principalmente hacia las futuras áreas de desarrollo urbano y construcción de infraestructura.
- Para poder evaluar con mayor exactitud el peligro sísmico y ubicar las estructuras sismogénicas, se recomienda instalar redes de monitoreo temporales y permanentes.

Bibliografía

- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, Á.F., Reyes-Zaragoza, M.A., Orozco-Esquivel, M.T., Ojeda-García, Á.C. y Vasallo-Morales, L.F., 2001, *Estratigrafía y deformación de la región San Miguel de Allende-Querétaro*: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 18, p. 129-148.
- Alexander, D., 1991, *Applied geomorphology and the impact of natural hazards on the built environment*: Natural Hazards, 4, p. 57-80.
- Al-Jabri, S.A., Horton R. y Janes, D.B., *A point source method for rapid simultaneous estimation of soil hydraulic and chemical transport properties*: Soil Sci. Soc. Am. J. 66, p. 12-18.
- Aranda-Gómez, J.J., Henry, C.D., Luhr, J. y McDowell, F.W., 2003, *Cenozoic volcanic-tectonic development of northwestern Mexico- a transect across the Sierra Madre Occidental volcanic field and observations on extension-related magmatism in the southern Basin and Range and Gulf of California tectonic provinces*, en *Geologic transects across Cordilleran Mexico*, Guidebook for field trips 99th Annual Meeting of the Cordilleran Section of the Geological Society of America, Mexico, D.F., March 25-30, 2003: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Centro de Geociencias, Publicación Especial 1, p. 71-121.
- Aranda-Gómez, J. J., Henry, C.D. y Luhr, J., 2000. *Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la Provincia Tectónica de Cuencas y Sierras, México*: Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana, LIII, p. 59-71.
- Asher, B.J., Yano, T. y Shainberg, I., 2003, *Dripper discharge rates and the hydraulic properties of the soils*: Irrigation and Drainage Systems, 17, p. 325-339.
- Barton, N.R., Lien, R. y Lunde, J., (1974), *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*: Rock Mechanics and Rock Engineering (Springer) 6 (4): p. 189-236.
- Bearman, R.A., 1999, *The use of the point load test for the rapid estimation of Mode I fracture toughness*: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36, p. 257-263.
- Bieniawski, Z.T., 1989, *Engineering rock mass classifications*: Wiley, New York, 251 p.
- Borselli, L., Puente-Castillo, W.L. y Ortiz-Rodríguez, A.J., 2013: *Metodología portable drip infiltrometer (PDI), para la medición (no destructiva) en sitio, de parámetros hidráulicos del suelo: saturated conductivity (Ks) y net capillary drive*: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Presentación UGM 2013, 24 diapositivas.

- Capra, L., Lugo-Hubp, J. y Dávila-Hernández, N., 2003, *Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento*: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, V. 20, núm. 2, p. 95-106.
- Carrara, A., Guzetti, F., Cardinali, M. y Reichenbach, P., 1999, *Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard*: Natural Hazards, 20, p. 117-135.
- Carrillo-Bravo, J., 1971, *La Plataforma de Valles - San Luis Potosí*: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana de Geólogos Petroleros, 23 (1), p. 21-46.
- Carrillo-Bravo, J., 1982, *Exploración petrolera de la Cuenca Mesozóica del Centro de México*: Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, XXXIV (1), p. 21 – 46.
- Cas, R.A.F., y Wright, J.V., 1988, *Volcanic successions modern and ancient*: Unwind Hymand Ltd, 528 p.
- Chau, K.T. y Wong, R.H.C., 1996, *Uniaxial compressive strength and point load strength*: International Journal of Rock Mechanics and Mining. Sciences and Geomechanic Abstract., Vol. 33, No. 2, p. 183-188.
- Clague, J.J., 1982, *The role of geomorphology in the identification and evaluation of natural hazards*: in R. G. Craig and J. L. Crafts (eds.), Applied Geomorphology, Unwin-Hyman, Winchester, Mass., p. 17-43.
- Collins, T.J., 2007, *Imagery for microscopy*: Bio Techniques, 43 (1 Suppl), p. 25-30.
- Controls Italy, 2011, *Digital rock strength index apparatus, model 45-D0550/E, instruction manual*: Controls Italy, manual, 34p
- Dackombe, R.V. y Gardiner, V., 1983, *Geomorphological field manual*: George Allen and Unwin (Publishers) Ltd., 254 p.
- Diagrama de cajas*, en línea, 1 diciembre 2013, (2 diciembre 2013), http://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_caja
- Durgin, P.B., 1977, *Landslides and weathering of granitic rocks*: Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, Vol. III, p. 127-131.
- Ekhmaj, A.I. y Abdulaziz, A.M., 2008, *Trickle irrigation as a simple tool to estimate saturated hydraulic conductivity*: Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12.
- Ellison, W.D., 1944, *Studies of raindrop erosion*: Agricultural Engineering, 25, p. 131-136.
- Ellison, W.D., 1947a, *Soil erosion studies. III some effects of soil erosion on infiltration and surface runoff*: Agricultural. Engineering, 28, p 245-248.

En San Luis sí tiembla, en línea, 25 de noviembre 2013, (7 de enero 2014).
<http://www.agendasanluis.com/eventos/en-san-luis-potosi-si-tiembla-se-registro-un-sismo-este-domingo/>

Fener, M., Kahraman, S., Bigil, A. y Gunaydin, O., 2005, *A comparative evaluation of indirect methods to estimate the compressive strength of rocks*: Rock Mechanics and Rock Engineering, 38 (4), p. 329-343.

Feng, Q., Fardin, N., Jing, L. y Stephansson, O., 2003, *A new method for in-situ non-contact roughness measurement of large rock fracture surfaces*: Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer, 36 (1), p. 3-25.

Fink, J.H., y Manley, C.R., 1987, *Origin and pumiceous and glassy textures in rhyolite flows and domes*: Geological Society of America, Special Paper 212, p. 77-88.

Fookes, P.G., Lee, E.M. y Griffiths, J.S., 2007, *Engineering geomorphology, theory and practice*: Springer-Verlag, Acta Geotechnica, 3, 247p.

Foster, S., 1978, *An example of gullying on arable land in the Yorkshire Wolds*: Naturalist, 103, p. 157-161.

Gómez-González, J.M., Barboza-Gudiño, R., Luque-Vergara, N.A. y Figueroa-Soto, A.G., 2008, *Segundo reporte sobre la sismicidad en los Municipios de Landa de Matamoros y Jalpan de Serra, Querétaro*: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, 16 p.

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, L., 2002, *Ingeniería geológica*: Pearson Educación, 744 p.

Griffiths, J. S. y Hearn, G.J., 1990, *Engineering geomorphology: a UK perspective*: Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 42, p. 39-44.

Gustavsson, M., Kolstrup, E. y Seijmonsbergen, A.C., 2005, *A new symbol and GIS base detailed geomorphological mapping system: renewal of scientific discipline for understanding landscape development*: Elsevier B.V., Geomorphology, 77, p. 90-111.

Gutiérrez-Elorza, M., 2008, *Geomorfología*: Pearson-Prentice Hall, 920 p.

Hawkins, A.B., 1998, *Aspects of rock strength*: Bulletin of Engineering Geology Environments., Vol 57, p. 17-30.

Hearn, G.J. y Hart, A.B., 2011, *Geomorphological contributions to landslide risk assessment: theory and practice*: Developments in Earth Surface Processes, Vol. 15, p. 107-143.

Heiken, G. y Wohletz, K., 1987, *Tephra deposits associated with silicic domes and lava flows*: Geological Society of America, Special Paper 212, p. 55-76.

Henry, C. D. y Aranda-Gómez, J. J., 1992, *The real southern Basin and Range: mid-to late Cenozoic extension in Mexico*: Geology, 20, p. 701-704.

- Hoek, E., 2000, Rock Engineering. <http://www.rocsience.com>.
- Hyndman, R.J., 1995, *The problem with Sturges' Rule for constructing histograms*: Department of Econometrics and Business Statistics, Monash University, Clayton, Victoria, Australia, 3168, 2 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1998, *Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí*, ISBN 970-13-1916-8, 151 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2001, *Síntesis de Información Geográfica del Estado de San Luis Potosí*, Edición 2002, 112 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2002, *Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí*, Estudio Hidrológico del estado de San Luis Potosí.
- Iqbaluddin, S.U.D. y Akram J., 1997, *Geomorphology and landscape evolution of Bharatpur District, Rajasthan*: Journal of the Indian Society of Remote Sensing, Vol. 25, No. 3, p. 177-186.
- Kahraman, S., 2001, *Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rocks*: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38, p. 981-994.
- Kar, A. y Bandyopadhyay, M.K., 1974, *Mechanism of rills in an investigation in micro geomorphology*: Geographical Review of India, 36, p. 204-215.
- Keller, E. A. y Printer, N., 1996, *Active tectonics. earthquakes, uplift and landscape*: Prentice Hall. New Jersey, 338 p.
- Keller, E. y Blodgett, R., 2006, *Riesgos naturales, procesos de la tierra como riesgos, desastres y catástrofes*: Pearson-Prentice Hall, 1era Edición, 422 p.
- Kirkby, M.J. y Morgan, R.P.C., 1984, *Erosión de suelos*: Ed. Limusa, 375 p.
- Knight, J., Mitchell, W.A. y Rose, J., 2011, *Geomorphological field mapping*: Developments in Earth Surface Processes, Vol. 15., p. 151-181.
- Kohno, M. y Maeda, H., 2012, *Relationship between point load Strength and uniaxial compressive strength of hidrotermally altered soft rocks*: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 50, 147-157 p.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M. y Aranda-Gómez, J.J., 1982, *Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de San Luis Potosí*: Universidad Autónoma de San Luis Potosí: Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 85, 205 p.
- Labarthe-Hernández, G. y Aguillón-Robles, A., 1985, *Cartografía Geológica 1:50,000 Hoja Presa de San Bartolo, Gto.*: Universidad Autónoma de San Luis Potosí: Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 104, 51 p.

- Labarthe-Hernández, G. y Jiménez-López, L.S., 1991, *Cartografía Geológica 1:50,000 de las Hojas Cerritos de Bernal, Santo Domingo, El Estribo y La Herradura, Estado de San Luis Potosí*: Universidad Autónoma de San Luis Potosí: Instituto de Geología, Folleto Técnico No. 113, 52 p.
- Labarthe-Hernández, G. y Jiménez-López, L., 1992, *Características físicas y estructura de lavas e ignimbritas riolíticas en la Sierra de San Miguelito, San Luis Potosí*: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico No. 114, 31 p.
- Labarthe-Hernández y G., Jiménez-López, L., 1993, *Geología del Domo Cerro Grande, Sierra de San Miguelito, S.L.P.*: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico No. 117. 22 p.
- Labarthe-Hernández, G. y Jiménez-López, L.S., 1994, *Geología de la porción sureste de la Sierra de San Miguelito, S.L.P.*: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Folleto Técnico, 120, 33 p.
- Lamb, J., Carleton, E.A. y Free, G.R., 1950, *Effect of past management and erosion of soil on fertilizer efficiency*: Soil Science., 70, p. 385-392.
- Landslide classification*, en línea, 30 de mayo del 2013, (noviembre 2013), http://en.wikipedia.org/wiki/Landslide_classification
- Larsen M., Wieczorek G., Eaton L., Morgan B. y Torres-Sierra H., 2002, *Peligros naturales en los abanicos aluviales: el desastre ocasionado por flujos detríticos e inundaciones repentinas en Venezuela*: USGS, reporte, 4p. http://pubs.usgs.gov/fs/fs-0103-01/fs_103_01-508-SP.pdf
- Lee, S. y Chou, U., 2003, *Development of GIS-based geological hazard information system and its application for landslide analysis in Korea*: Geosciences Journal, Vol. 7, No. 3, p. 243-252.
- Lee, S. y Tu Dan, N., 2005, *Probabilistic landslide susceptibility mapping in the Lai Chau province of Vietnam: focus on the relationship between tectonic fractures and landslides*: Environmental Geology, 48, p. 778-787.
- Lee, S. y Pradhan, B., 2007, *Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia*: J. Earth Sys. Sci., 115, No. 6, p. 661-672.
- Li, C., 2001, *A Method for graphically presenting the deformation modulus of jointed rock masses*: Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer, 34 (1), p. 67-75.
- Lobeck, A. K., 1939, *Geomorphology*: McGraw-Hill Book Company, Inc., 731p.
- Luhr, J.F., y Carmichael, I.S.E., 1990, *Vigilancia de la actividad eruptiva cíclica: Segunda Reunión Nacional "Volcán de Colima"*, Resúmenes, p.8.
- Mantovani, F., Gracia, F.J., Cosmo, P.D. y Suma, A., 2009, *A new approach to landslide geomorphological mapping using the open source software in the Olvera area (Cadiz, Spain)*: Springer-Verlag, Landslides, 7, p. 69-74.

- McDowell, F. W. y Clabaugh, S. E., 1979, *Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico*: Geological Society of America, Special Paper, 180, p. 113-124.
- Mora, S. y Keipi, K., 2006, *Disaster risk management in development projects: models and checklists*: Bull. Eng. Geol. Env., 65, p. 155-165.
- Morel, H.J., Meyer P.D., Nachabe, M., Touma, J., Van Genuchten, M.T. y Lenhard, R.J., 1996, *Parameter equivalence for the Brooks-Corey and van Genuchten soils characteristics: Preserving the effective capillary drive*: Water Resources Research, Vol. 32, no. 5, p. 1251-1258.
- Musgrave, G.W., 1954, *Estimating land erosion—sheet erosion*: Int. Assoc. Scient. Hidrol. Pub., 1, p 207-215.
- Nason, G. C. y Knighton, D., 1996, *Anabranching rivers: their cause, character and classifications*: Earth Surface Processes and Landforms, 21, p. 211-239.
- Nieto-Samaniego, A, F, Alanis-Álvarez, S, A, Camprubí Í.C.A., 2005, *La Mesa Central de México: estratigrafía, estructural y evolución tectónica cenozoica*: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Tomo LVII, Núm. 3, p. 285-318
- Oh, H.J., Lee, S., Chotikasathien, W., Kim, C.H. y Kwon, J.H., 2009, *Predictive landslide susceptibility mapping using spatial information in the Pechabun area of Thailand*: Environmental Geology, 57, p. 641-651.
- Otto, J.C., Gustavsson, M. y Geilhausen, M., 2011, *Cartography: Design, symbolization and visualization of geomorphological maps*: Developments in Earth Surface Processes, Vol. 15, p. 254-293.
- Pain, C.F., Clarke J.D.A. y Wong, V.N.L, 2011, *Applied geomorphic mapping for land management in the River Murray Corridor, SE Australia*: Developments in Earth Surface Processes, 2011, Vol. 15, p. 489-504.
- Park, C.C., 1981, *Man, river system and environments impacts*: Progress In Physical Geography, 5, p. 1-31.
- Pavlopoulos K., Evelpidou, K. y Vassilopoulos, A., 2009, *Mapping geomorphological environments*: Springer-Verlag, N. 2009927029, 236 p.
- Philip, J.R., 1992, *What happens near a quasi-linear point source?*: Water Resour. Res., 28, p. 47-52.
- Piest, R.F., Beer, C.E. y Spomer, R.G., 1976, *Entrenchment of drainage systems in Western Iowa and Northwestern Missouri*: Proceedings of the Third Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, PB-245-100, Water Resources Council, Washington, D.C., p. 5-48-5-60.
- Raisz, E., 1959, *Landforms of Mexico, scale ca. 1:3 000 000*: Cambridge, Massachusetts, U.S. Office of Naval Research, Geography Branch, 1 map.
- Ramírez-Velázquez, E., 2010, *Análisis estructural de los basculamientos de la Ignimbrita Cantera en la porción suroriente de la Sierra de San Miguelito*,

- S.L.P. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Trabajo Recepcional, 70 p.
- Ramos-Hinojosa, P., *Hoja semilogarítmica en excel, mecánica de suelos I (granulometría)*, en línea, 3 de diciembre del 2010, (agosto 2013), <http://www.youtube.com/watch?v=zE6QqD1GcvE>
- Rzedowski, J., 1965, *Vegetación del Estado de San Luis Potosí: Acta Científica Potosina*, Vol. V, No. 1 y 2, 250 p.
- Dirección General de Estadística e Información Ambiental, SEMARNAT, *Capítulo 3. Suelos*, en línea, contactodgeia@semarnat.gob.mx, http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/03_suelos/index_suelos.html
- Shani, U. y Or, D., 1995, *In situ method for estimating subsurface unsaturated hydraulic conductivity*. Water Resources Research, Vol. 31, No. 8, p. 1863-1870.
- Silva-Romo, G., 1996, *Estudio de la estratigrafía y estructuras tectónicas de la Sierra de Salinas, Edos. de S.L.P. y Zac.:* Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, División de Estudios de Posgrado, Tesis de Maestría, 139 p.
- Singh, B. y Goel, R.K., 1999, *Rock mass clasification a practical approach in civil engineering*: Elsevier Science Ltd., 267 p.
- Stewart, J. H., 1978, *Basin and Range structure in Western North America, a review*, Geological Society of America, Mem.
- Stewart, J. H., 1998, *Regional characteristics, tilt domain, and extensional history of the later Cenozoic Basin and Range Province, western North America*, en Faulds J. E. and Stewart, J. H., (eds.), *Accommodation Zones and Transfer Zones: the regional segmentation of the Basin and Range Province*: Geological Society of America, Special Paper, 323, p. 47-74.
- Schumm, S.A., 1956b, *Sinuosity of alluvial rivers of the great plains*: Bulletin of the Geological Society of America, 74, p. 1089-1100.
- Torres-Aguilera, J. M., Rodríguez-Ríos, R., 2005, *Hipótesis preliminares sobre el origen del vulcanismo bimodal en el Campo Volcánico de San Luis Potosí*: XV Congreso Nacional de Geoquímica, Actas INAGEQ, vol. 11, No. 1.
- Torres-Hernández, J. R., 2009, *Origen y emplazamiento de las Ignimbritas Cantera y Panalillo del Campo Volcánico de San Luis Potosí*: Universidad Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica [Tesis Doctoral] 203 p.
- Tristán-González, M., 1986, *Estratigrafía y tectónica del Graben de Villa de Reyes, en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato, México*: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 107, p. 91.

- Tristán-González, M., Labarthe-Hernández, G., Aguirre-Díaz, G. J. y Aguillón-Robles, A., 2008, *Tectono-Volcanic control at fissure type events for the 28 Ma Panalillo Ignimbrite in the Villa de Reyes Graben, San Luis Potosí, México*: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 3 (012026), 6 p.
- Tristán-González, M., Aguillon-Robles, A., Barboza-Gudiño, J.R., Torres-Hernández, J.R., Bellom-Herve, López-Doncel, R. y Labarthe-Hernández, G., 2009, *Geocronología y Distribución espacial del vulcanismo en el campo Volcánico de San Luis Potosí*: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, V. 61, p. 17-34.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Bailey, W.G. y Zebchuk, W.D., 1984, *The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe*: Can. J. Soil Sci, 64, p. 313-321.
- Verstappen, H.T., 2011, *Old and new trends in geomorphological and landform mapping*: Developments in Earth Surface Processes, Vol. 15, p. 13-36.
- Warrick, A. y Broadbridge, P., 1992, *Sorptivity and Macroscopic Capillary Length Relationships*: Water Resources Research, Vol. 2, No. 2, p. 427-431.
- Wischmeier, W.H. y Smith D.D., *Predicting rainfall-erosion losses from Cropland East of the Rocky Mountains*: Agricultural Handbook, No. 282, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Washington, D. C., 47 p.
- Wooding, R. A., 1968, *Steady infiltration from a shallow circular pond*: Water Resour. Res., 4, p. 1259-1273.
- Wright, J.V. y Walker, G.P.L., 1977, *The ignimbrite source problem: significance of a co-ignimbrite lag-fall deposit*: Geology, vol. 5, p. 729-732.
- Young, R.A. y Wiersma, J.L., 1973, *The role of surface properties on flow and erosion processes on debris covered slopes in arid area*: Catena, 1, p.1-18.
- Zhang, L., 2005, *Engineering properties of rocks*: Elsevier Engineering Books Series, Vol. 4, p. 61-68.

Apéndices técnicos

Apéndice A: Propiedades físicas y mecánicas de las rocas

A.1.- Determinación del tamaño de los fragmentos y distribución de las discontinuidades

Este trabajo se realizó en dos fases, la primera en campo donde se necesitan paredes verticales mayores a 1 m de altura, se hace una descripción del afloramiento incluyendo número de familias, distancia de separación y condiciones de las discontinuidades, rugosidad, grado de alteración, etc. Se hace la siguiente metodología:

1. Sobre el afloramiento se pone una escala numérica conocida.
2. Identificar las familias de discontinuidades.
3. Medir el ángulo α (ángulo entre la línea de medición y la dirección de la familia) de las familias de discontinuidades, es decir aquellas discontinuidades que no son perpendiculares al lente de la cámara (Figura 62).
4. Tocar las separaciones de las familias para sentir la rugosidad entre éstas, basado en Bieniawsky (1986).
5. Tomar una fotografía aproximadamente a 3 m del afloramiento.
6. Tomar muestras que representen las condiciones del afloramiento.

La segunda parte consiste del procesamiento de las fotografía en gabinete, para lo cual se necesitará:

- *ImageJ, versión 1.47h*
- *Microsoft office, excel*
- Fotografías tomadas en campo

Procesamiento de fotografía por medio del software ImageJ

Se realizará el siguiente procedimiento:

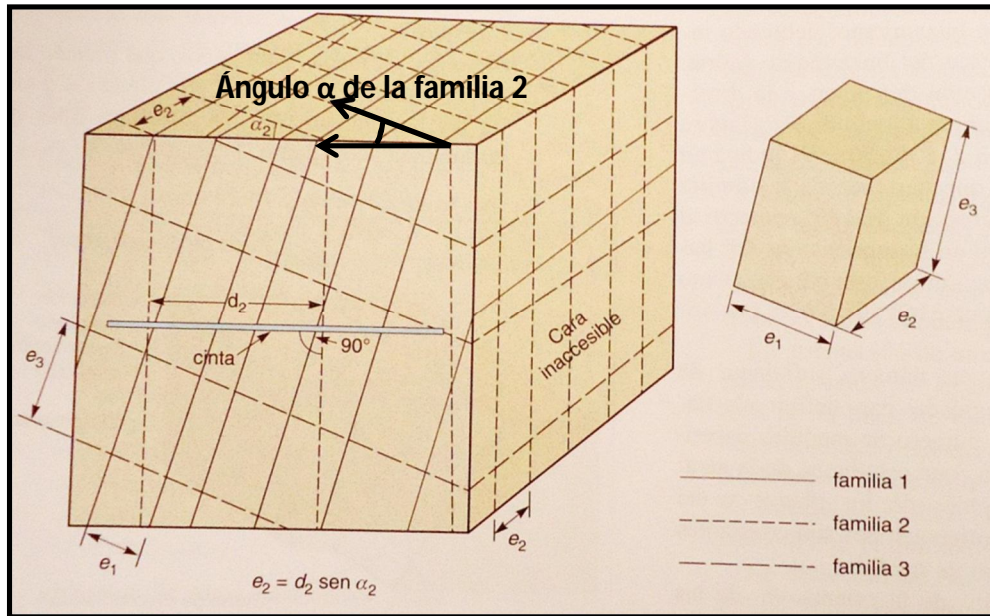


Figura 62.- Imagen mostrando el ángulo α para una familia de discontinuidades, tomada de González de Vallejo *et al.*, (2002).

A las fotografías tomadas en campo se crearán rectángulos (líneas de escaneo) sobre los que se basará la línea de medida en ImageJ. Al tener éstos dibujados sobre la fotografía se hará lo siguiente:

1. Abrir el software *ImageJ*, versión 1.47h (Figura 63)

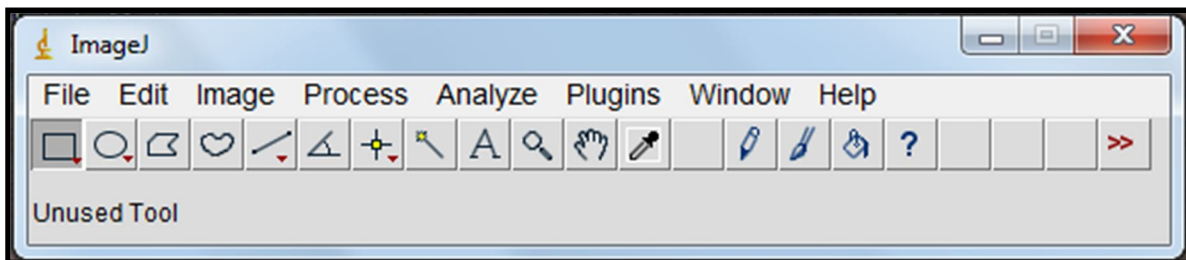


Figura 63.- Imagen del Software *ImageJ*, tomada de Image J, versión 1.47h.

2. Para cargar la fotografía con las líneas de escaneo en el programa, nos vamos al menú, *file*, damos click en la opción *open*; buscamos la ubicación de las fotografías y damos un click sobre la fotografía que se quiere abrir en el programa y finalmente escogemos la opción abrir.

3. Escalar la fotografía a la medida que se tiene de referencia en la fotografía; para hacer este paso nos vamos a menú y escogemos el comando de línea; en la fotografía sobre la escala de la medida de referencia dibujamos una línea que abarque la medida de referencia; después volvemos al menú, en el comando *analyse*, damos click en la opción *set scale*. Sale un recuadro con varias opciones, de las cuales se modificará *known distance*, donde se pondrá la distancia de la línea dibujada sobre la escala de referencia; en la opción de *unit of length* se pondrá las unidades de medida, en este caso son cm y damos click en el cuadro que aparece en *global*. Repetimos 3 medidas para asegurarnos que la imagen este bien escalada.
4. Seleccionamos en comando línea del *software* y sobre los recuadros de los macizos rocosos dibujados en las fotografías comenzamos a dibujar líneas con la distancia una fractura y fractura o si es una macizo muy fracturado, la línea será del tamaño de cada uno de los fragmentos. Estas líneas se dibujarán a lo largo de cada rectángulo dibujado en la fotografía. Se determinó la distancia de cada línea dibujada sobre los rectángulos de la foto, apretando los botones *Ctrl+m*, creándose una lista de todas las medidas para cada macizo rocoso.

Procesamiento de los datos obtenidos del software ImageJ en excel

1. Medir la longitud de cada línea de escaneo y crear una columna en *excel*, donde se anotaran y sumarán éstas para cada afloramiento.
2. Al haber medido la distancias entre las discontinuidades o tamaños de fragmentos de unidades muy fracturadas de cada línea de escaneo en la fotografía, se copia la lista creada en *ImageJ* y se pega en el *software excel*, dejando solamente dos columnas, correspondiendo la primer columna al número de medida y la segunda a la distancia.
3. Al haber creado las columnas en *excel*, ir al menú, comando datos, seleccionar la opción análisis de datos, seleccionar la opción estadística descriptiva, poner como rango de entrada la columna 2, que corresponde a las distancias medidas de la líneas; en opciones de salida, seleccionar la opción rango de salida, sobre la hoja *Excel* damos click en el lugar donde quiera mostrarse la tabla de estadística, aceptar.
4. Para determinar el tamaño de bin, se utilizó la metodología de la regla de *Diaconish*, mencionada por Hyndman, (1995), en la que

través de la relación entre los rangos intercuartiles IQ, es decir los rangos intercuartiles y el número de medidas hechas, nos darán a conocer la amplitud de la clase (Ecuación 1):

Ecuación 1: Cálculo de altura de Diaconish

$$h = 2(IQ)n^{-1/3}$$

Donde:

- IQ: Rangos intercuartiles
 - n: Número de medidas
5. Se crea una columna en *excel* con la amplitud de la clase, hasta llegar al tamaño máximo de los fragmentos en el macizo rocoso. Es decir si la amplitud fue de 3 y el máximo del análisis estadístico es 10, entonces las columnas serán 3, 6, 9, 12.
 6. En el menú de *excel*, dar click en el comando datos, seleccionar la opción análisis de datos, escoger la opción histograma, presionar aceptar; en el rango de entrada poner los datos de las distancias tomadas en *ImageJ* arrastrando desde el primer dato hasta el último. El rango de clase será la columna creada de la amplitud de la clase, arrastrando desde el primer dato hasta el último. Seleccionar la opción de rango de salida, escogiendo el lugar donde quiera ponerse la gráfica. Finalmente dar click a las opciones de porcentaje acumulado y crear gráfico. Seleccionar la opción aceptar.

Se creará un histograma en el que la clase será la amplitud de los bins para cada macizo rocoso y la frecuencia serán las distancias entre los fragmentos y/o discontinuidades de cada sitio (Figuras 64 a 75).

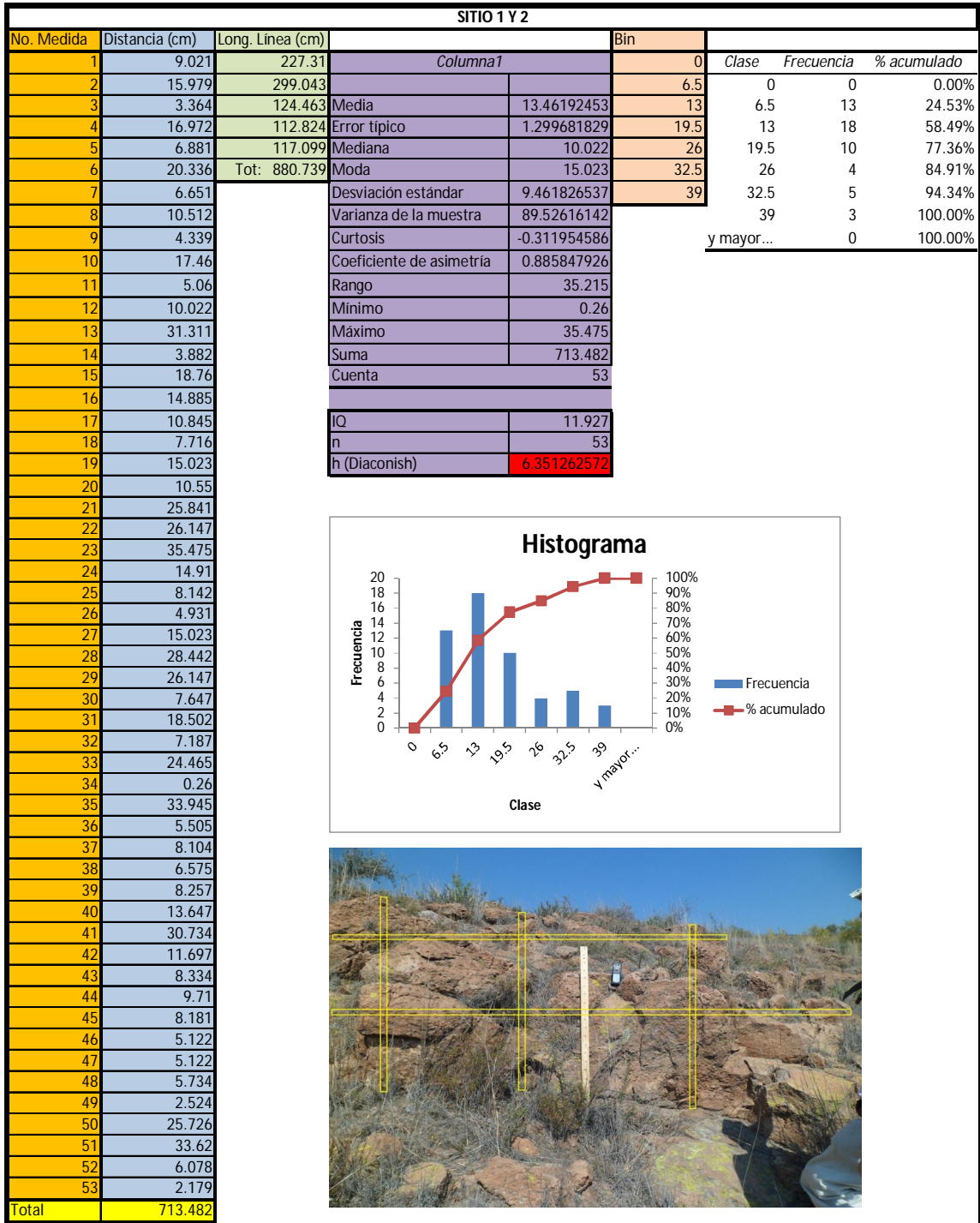


Figura 64.- Histograma de los Sitios 1 y 2.

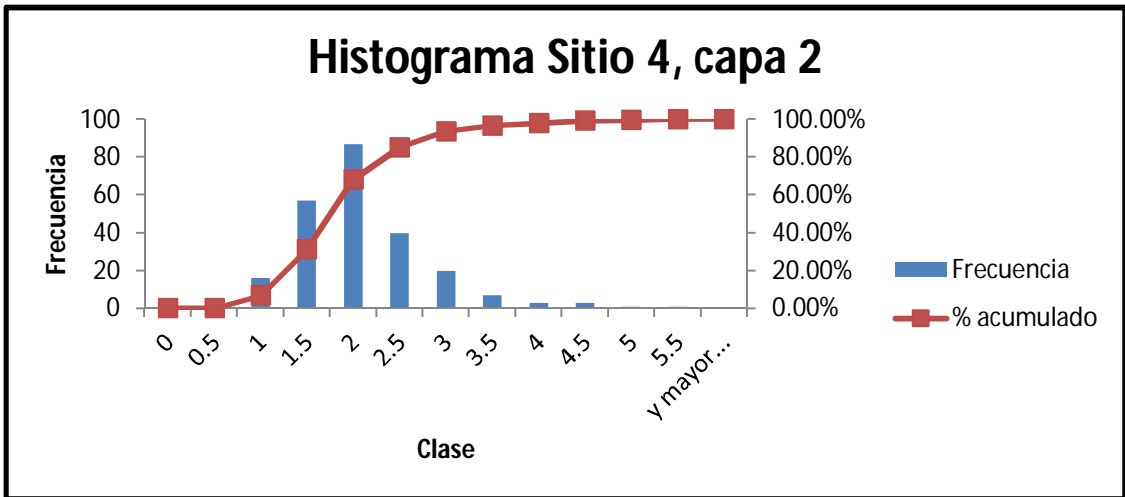
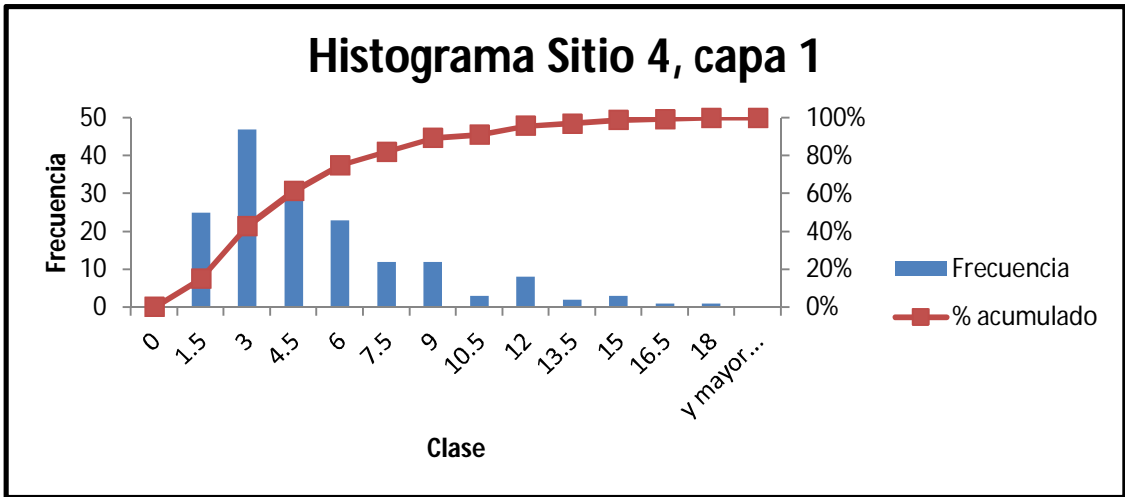
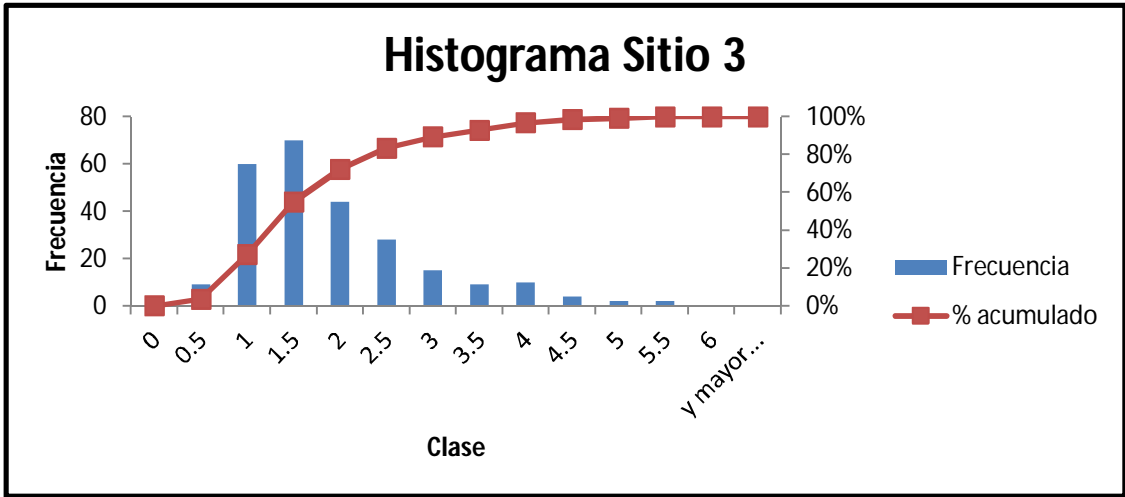


Figura 65.- Láminas de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.

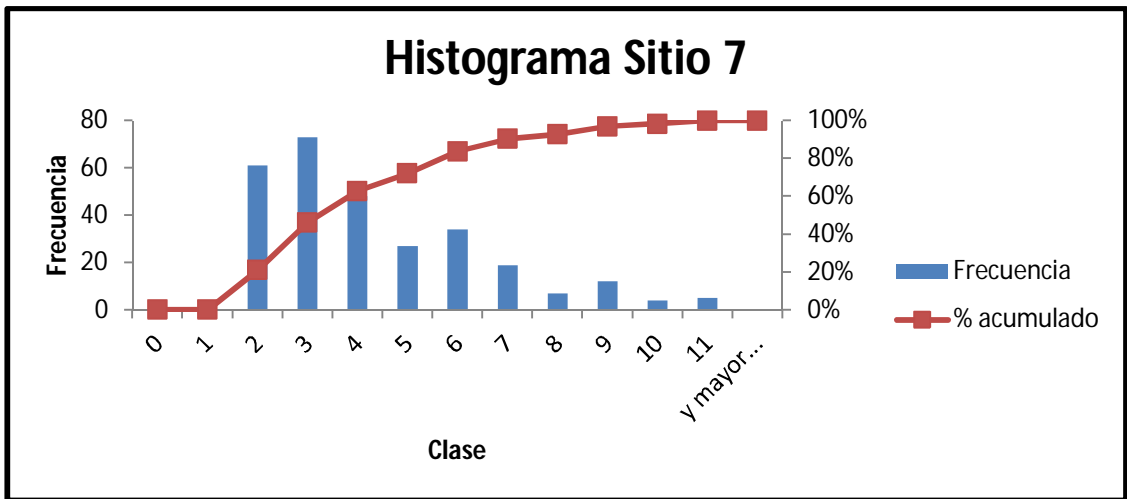
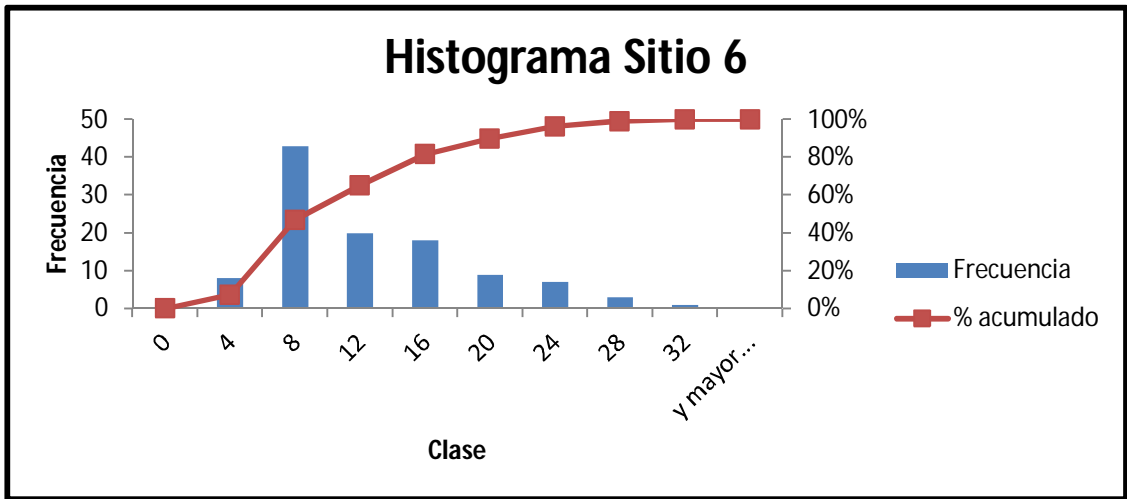
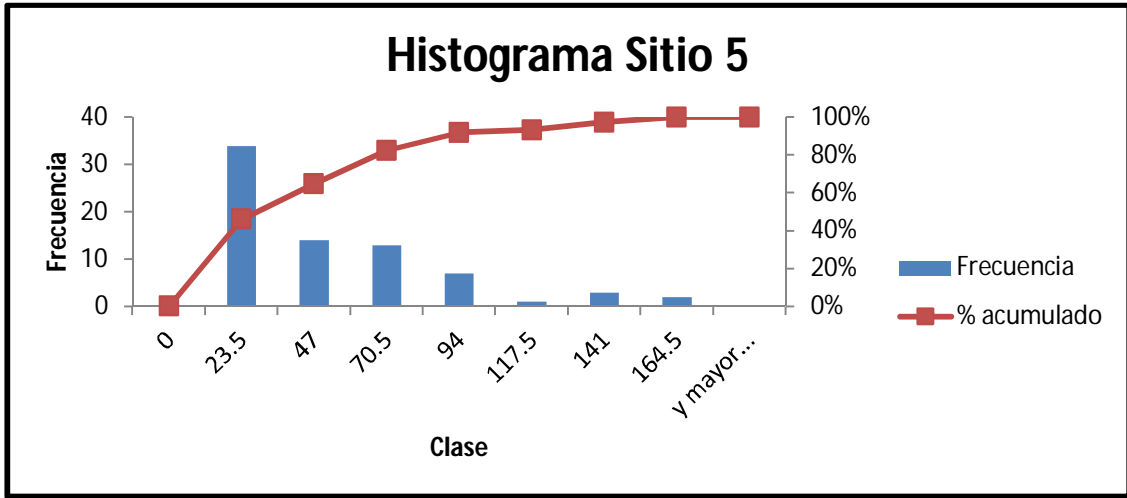


Figura 66.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.

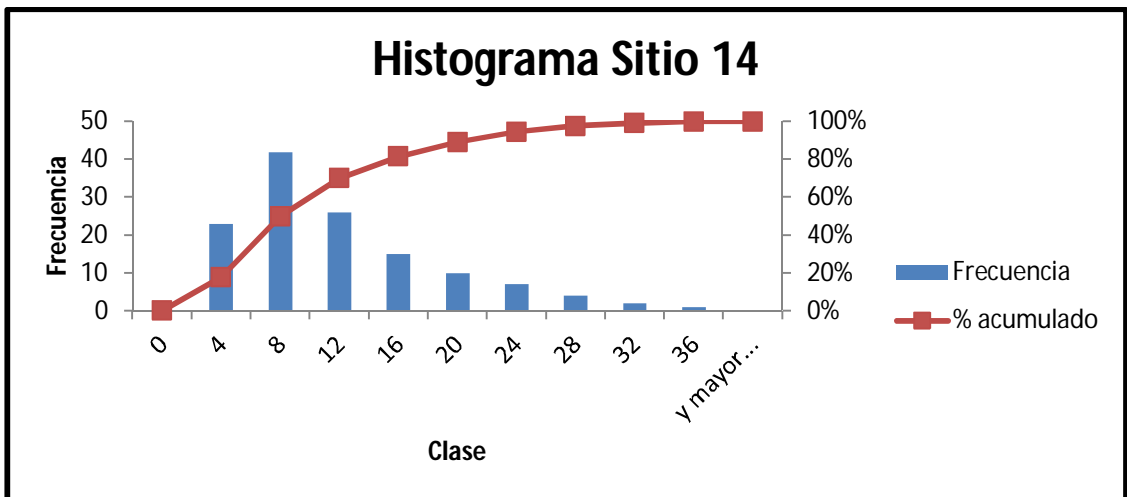
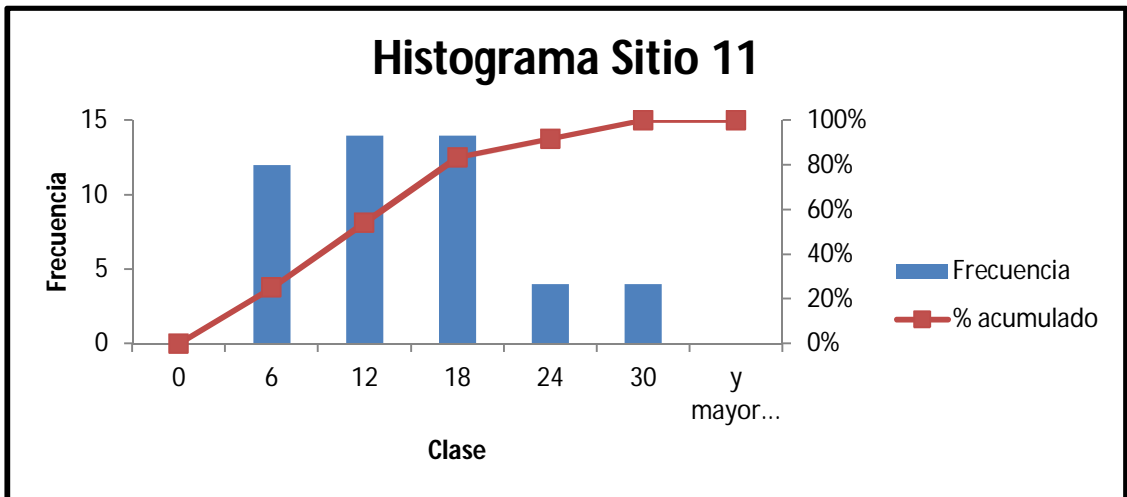
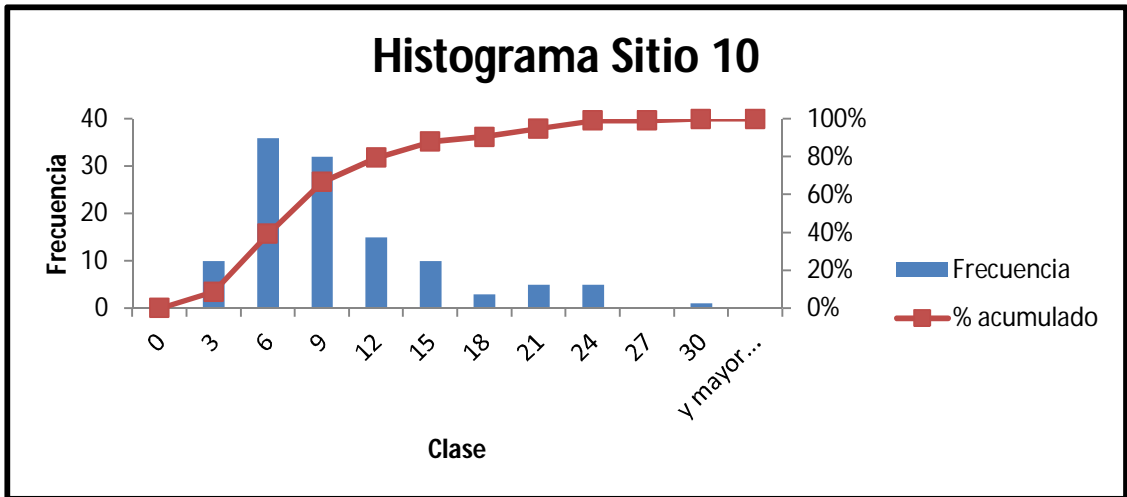


Figura 67.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.

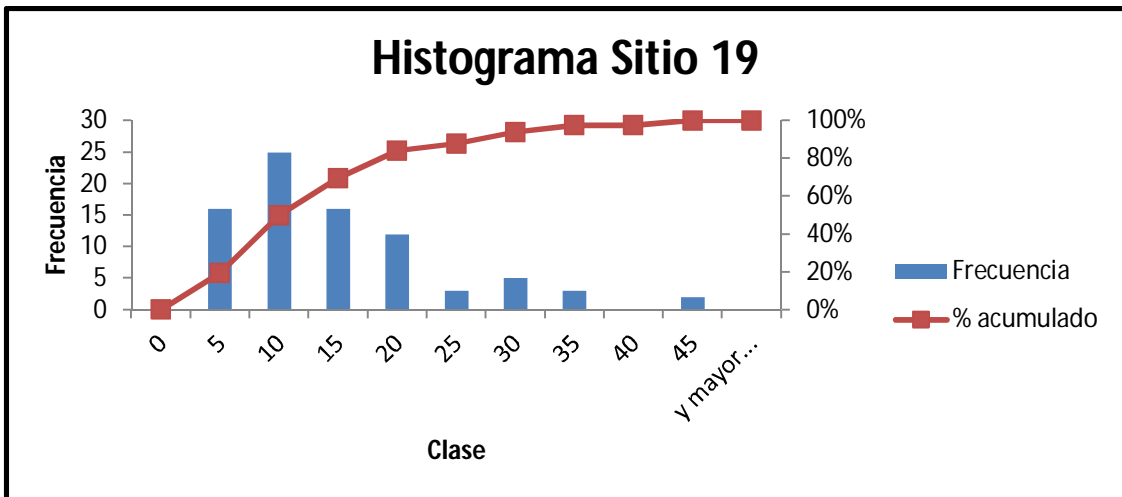
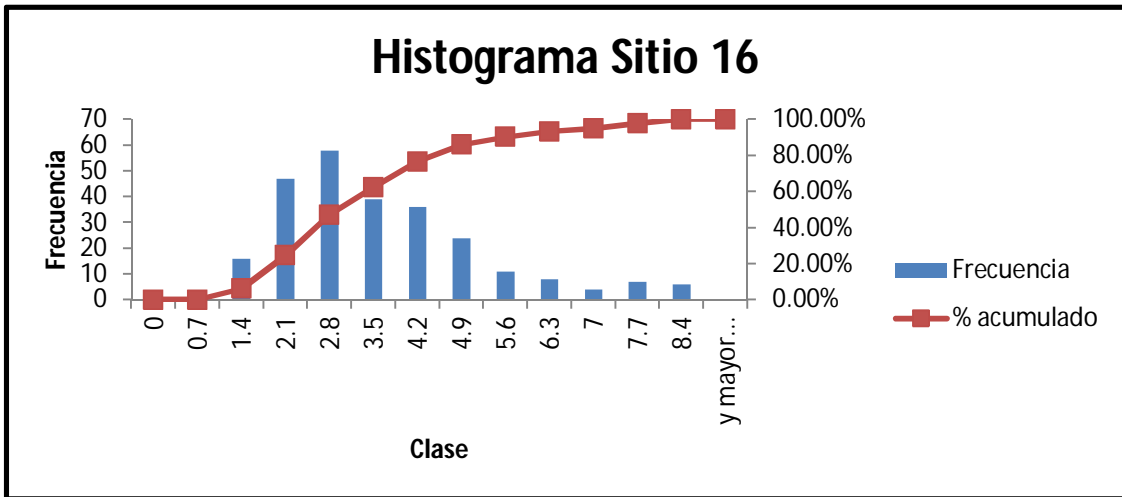
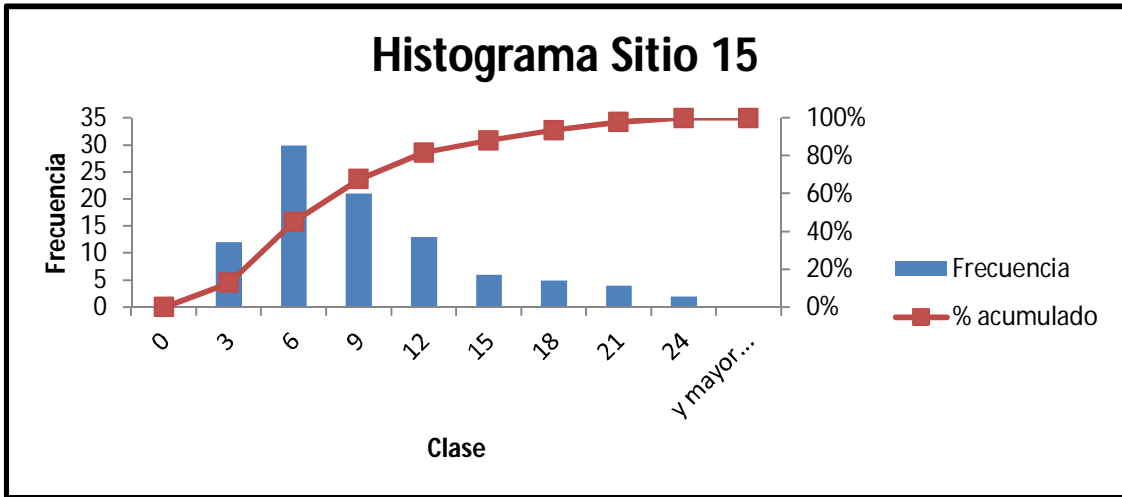


Figura 68.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.

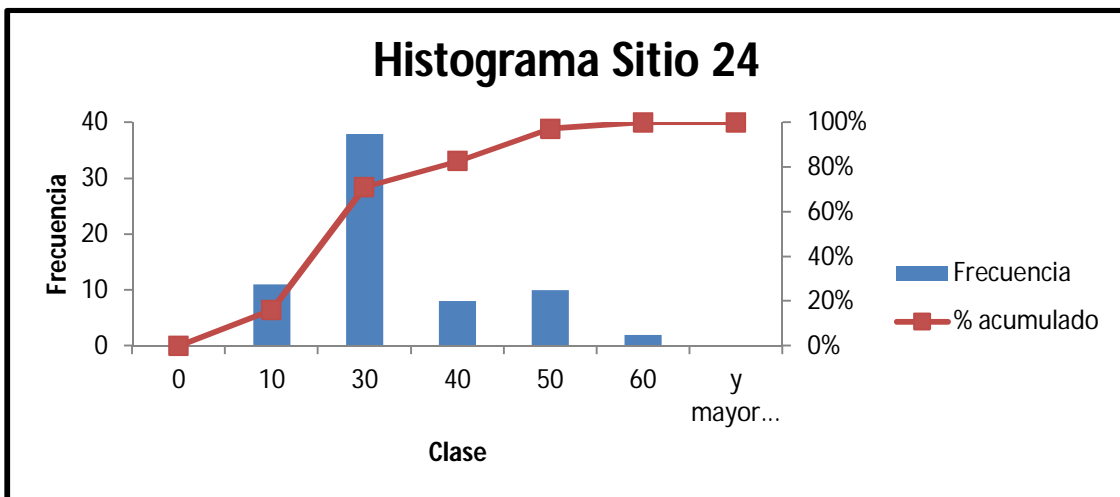
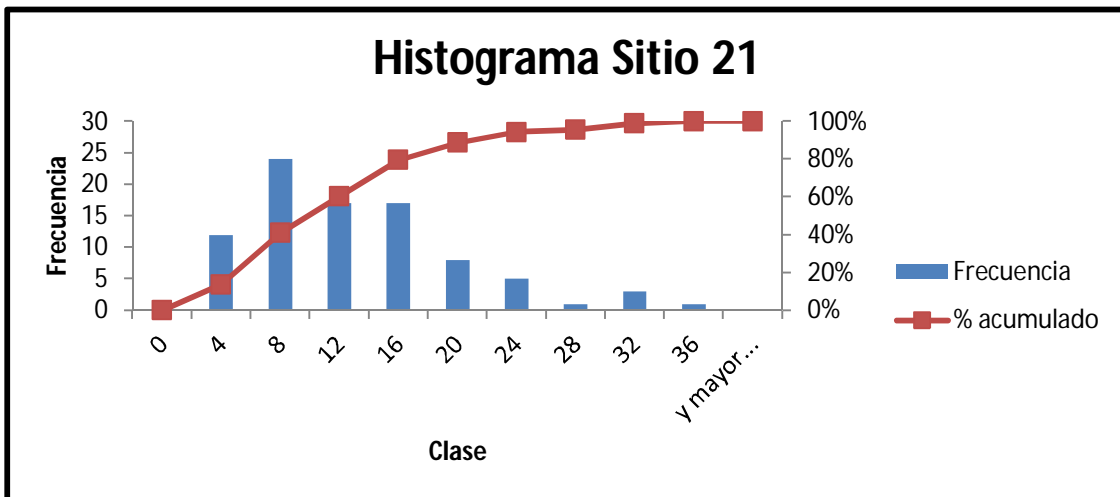
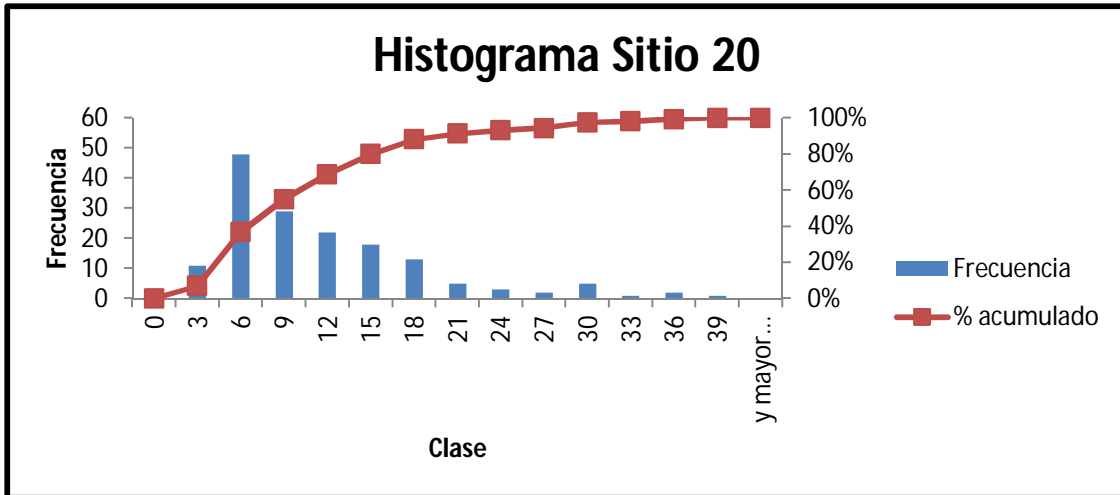


Figura 69.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.

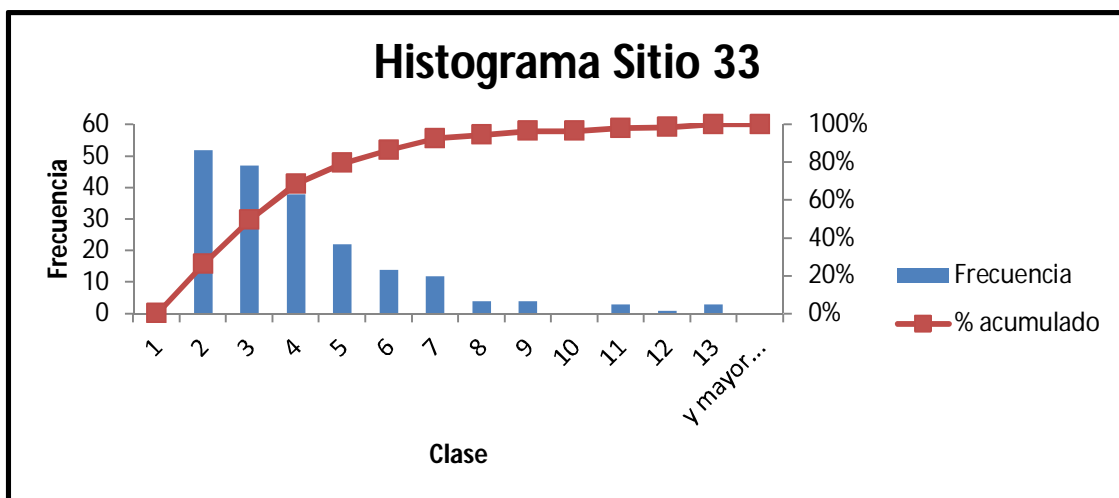
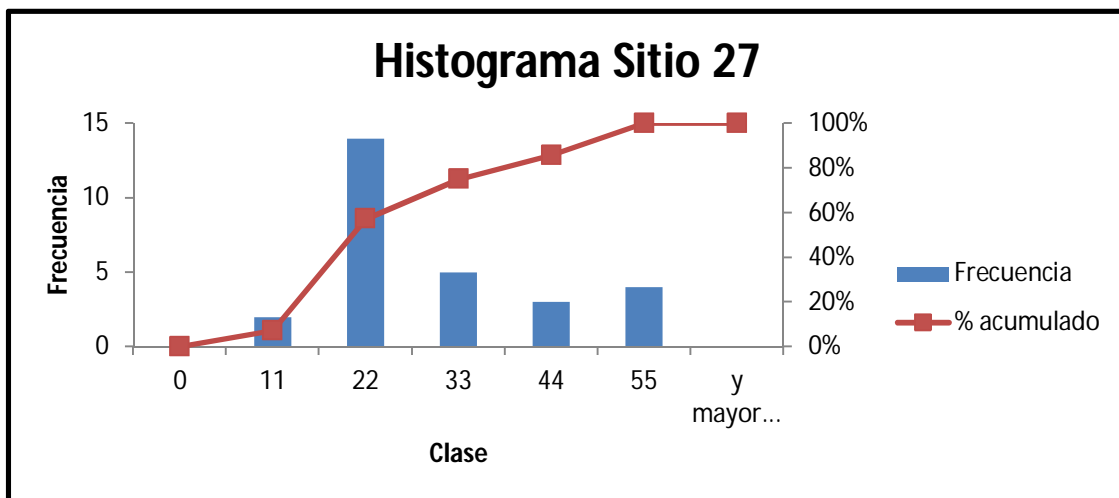
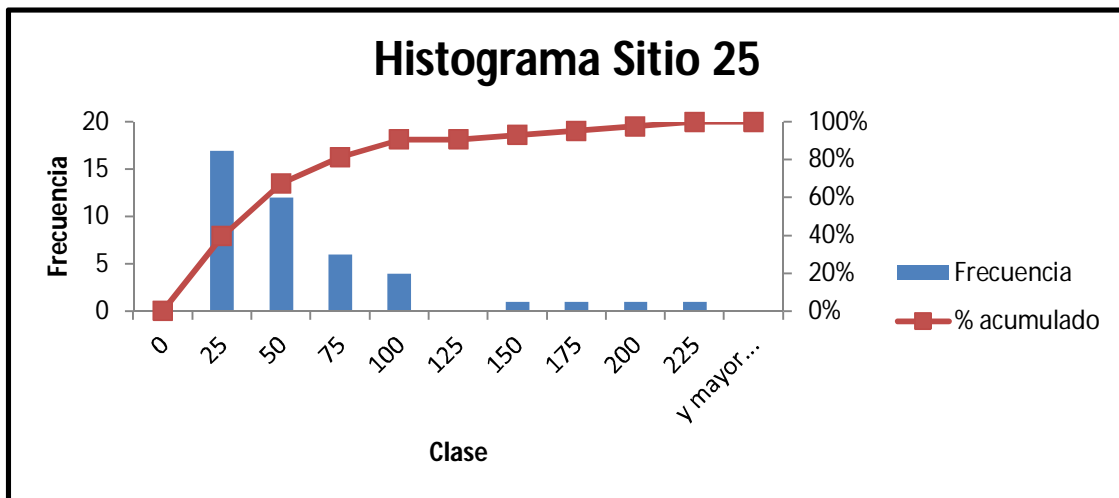


Figura 70.- Lámina de histogramas de los sitios de muestreo en el área de estudio.

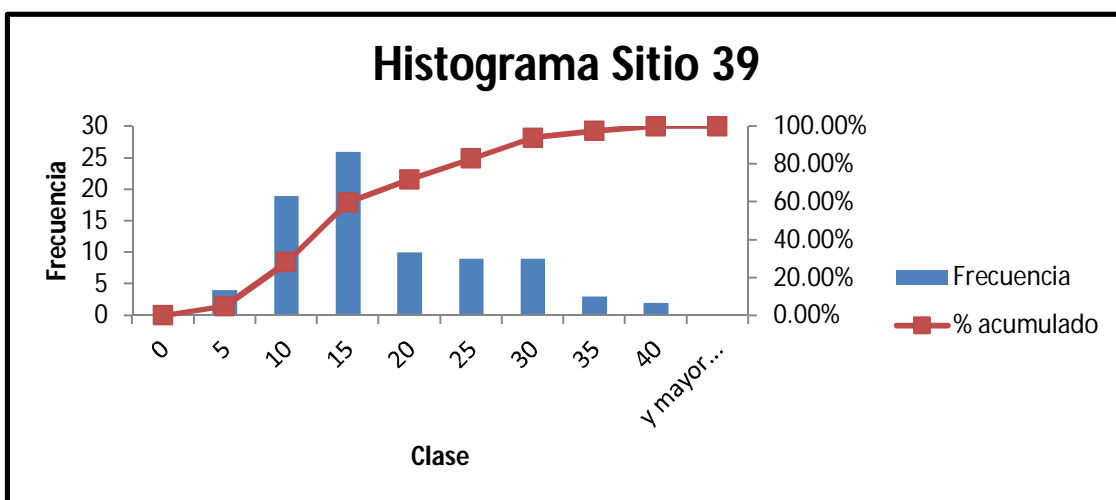
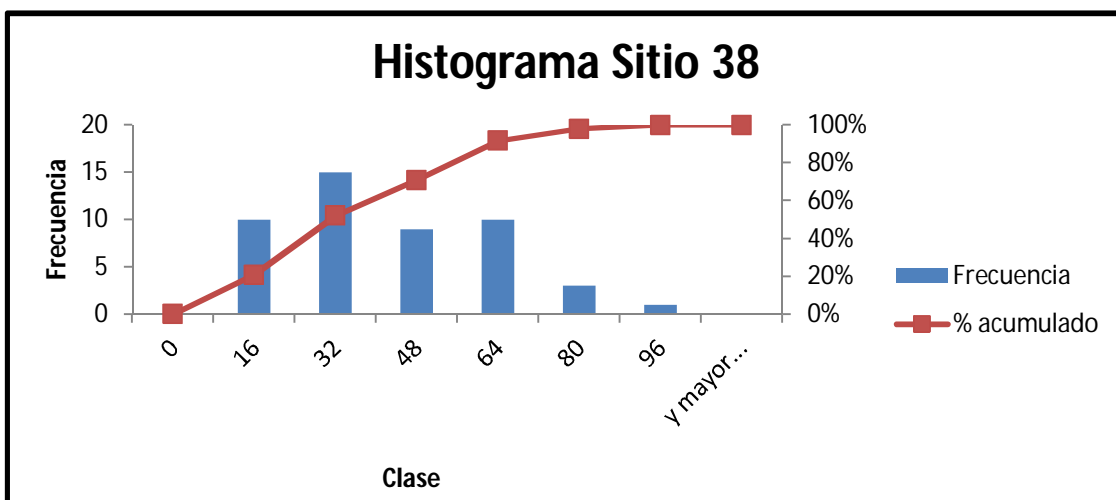
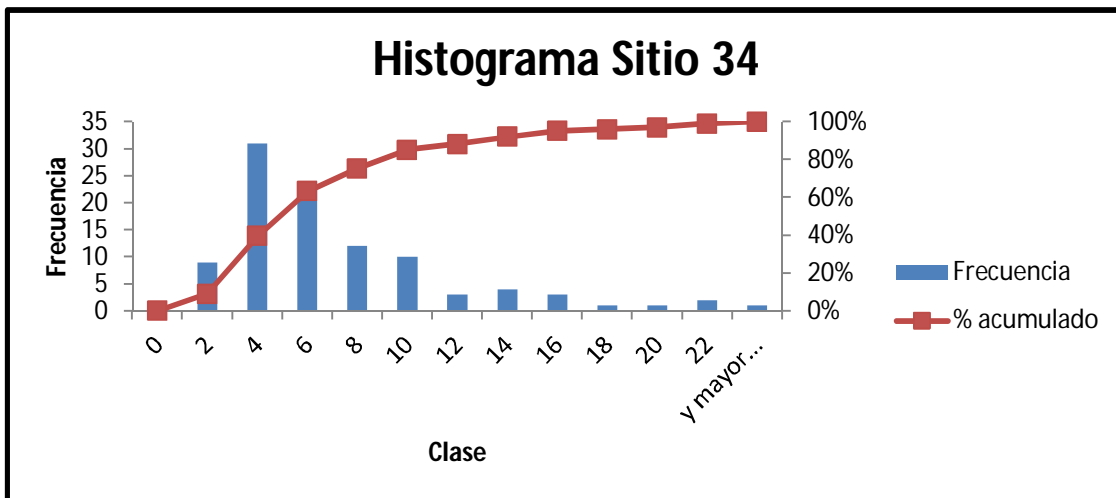


Figura 71.- Láminas de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.

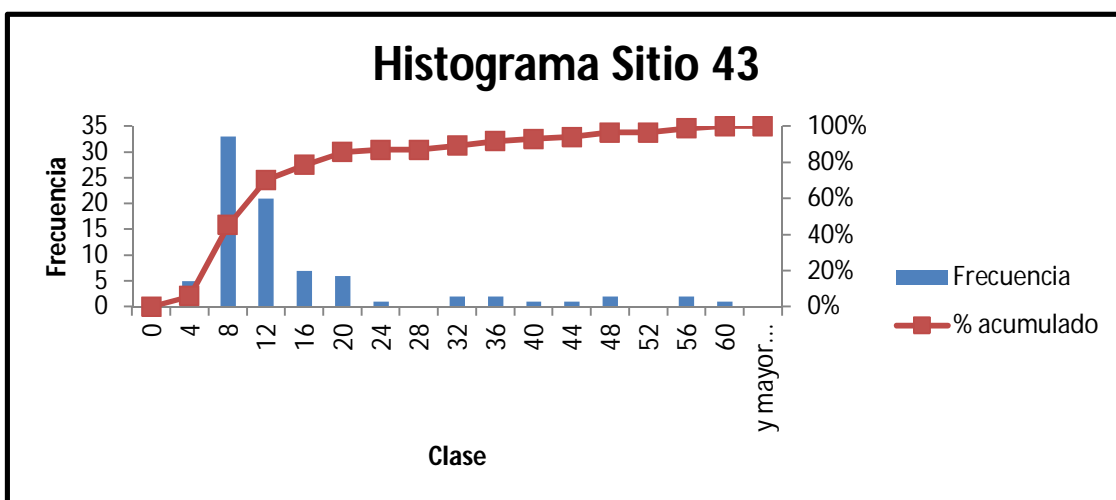
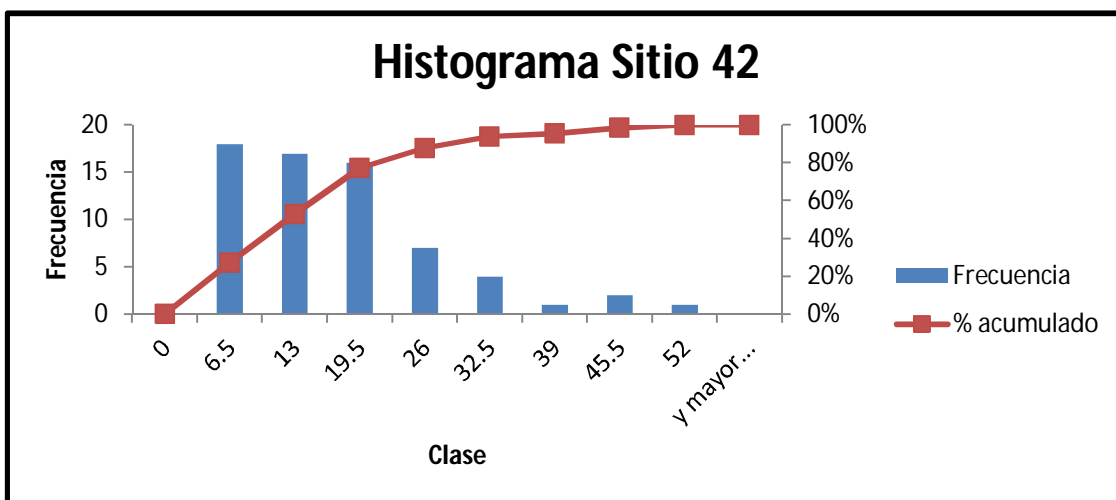
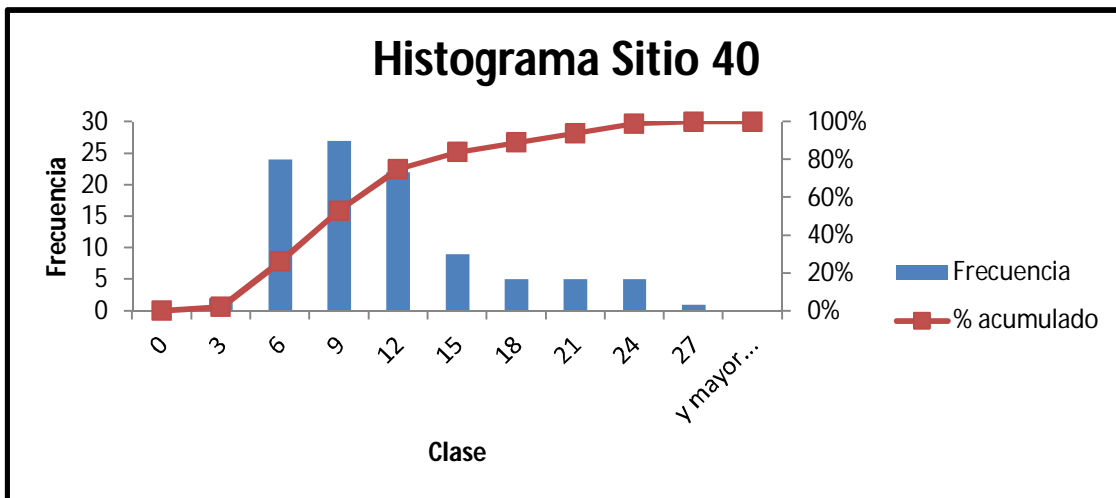


Figura 72.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.

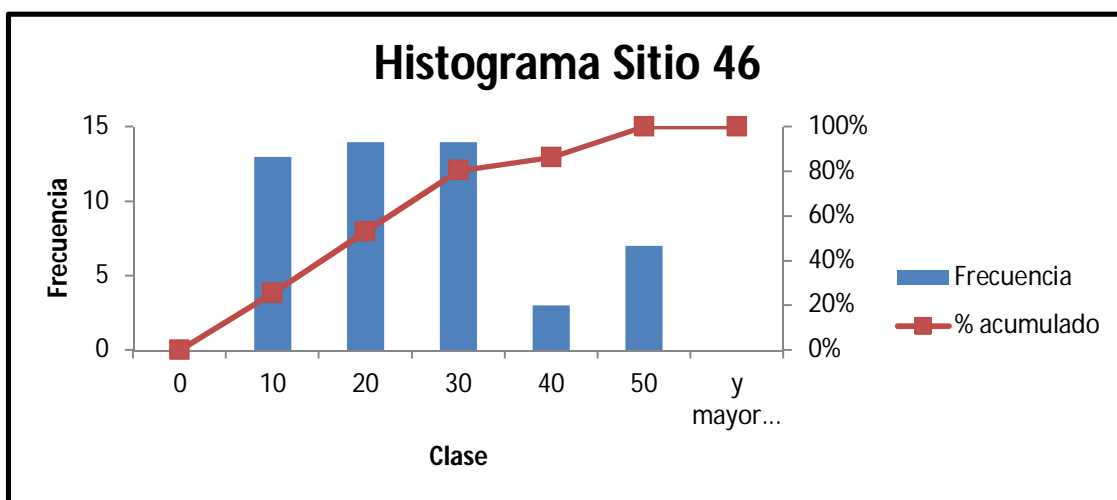
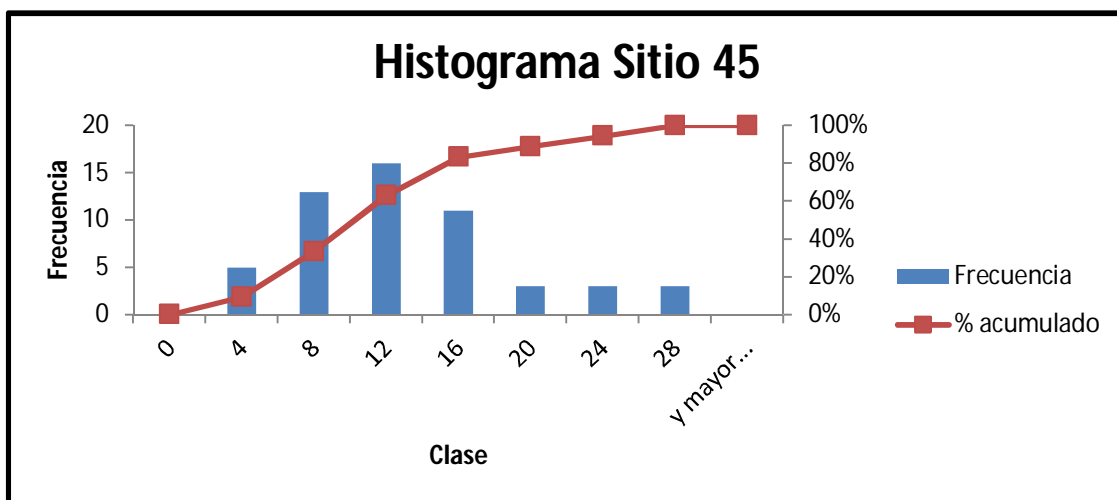
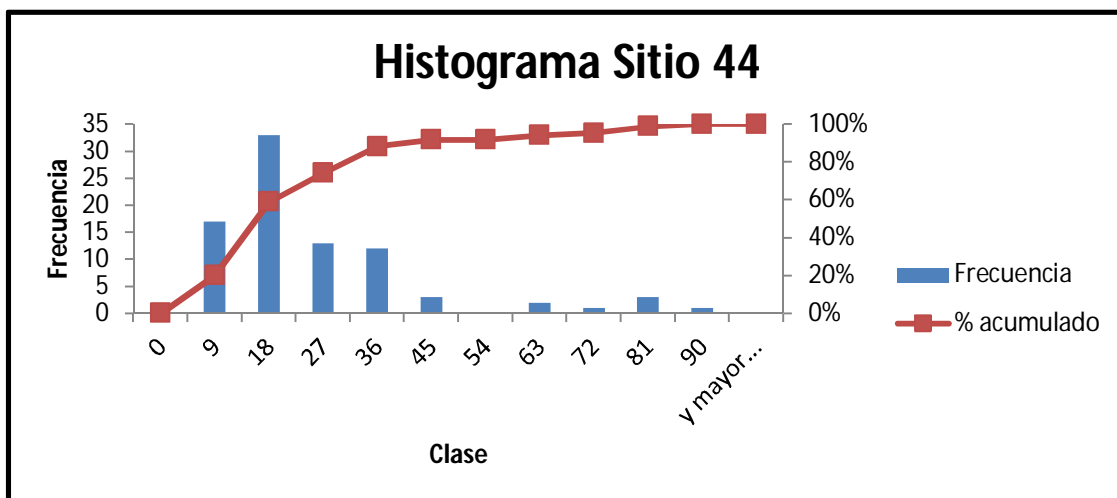


Figura 73.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.

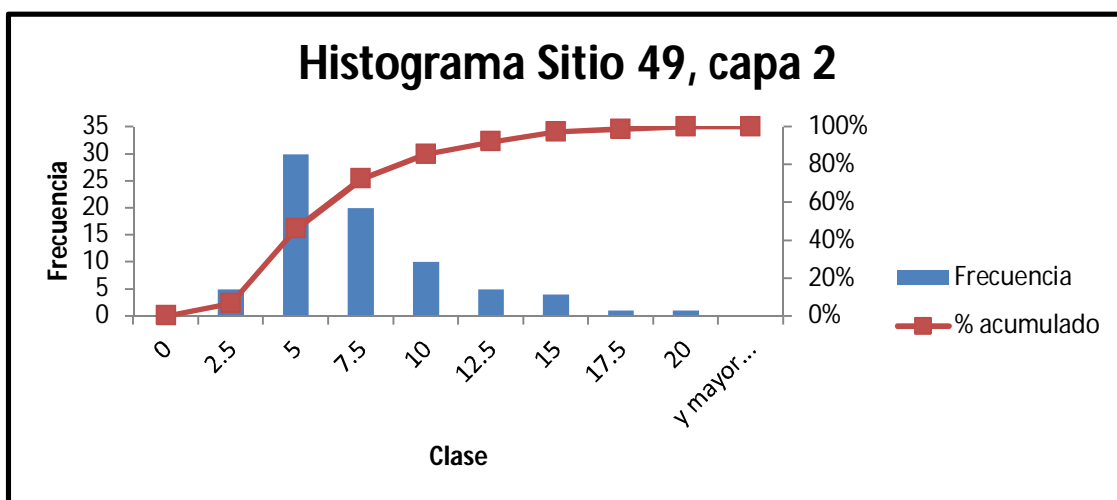
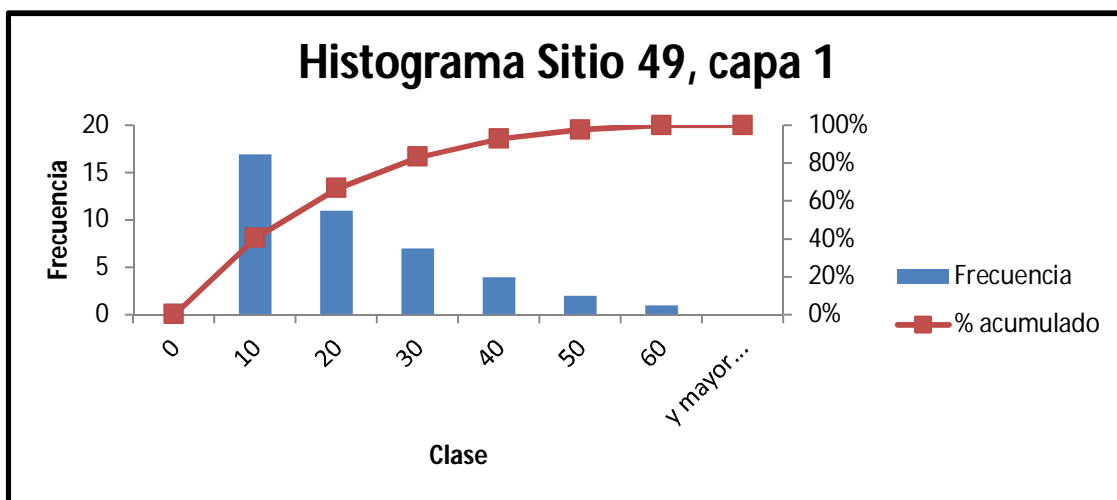
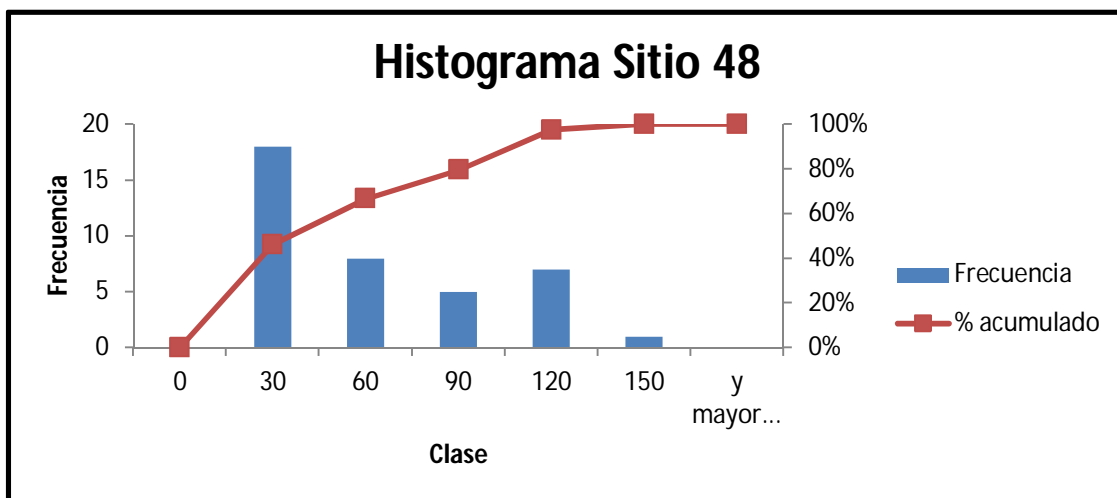


Figura 74.- Lámina de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.

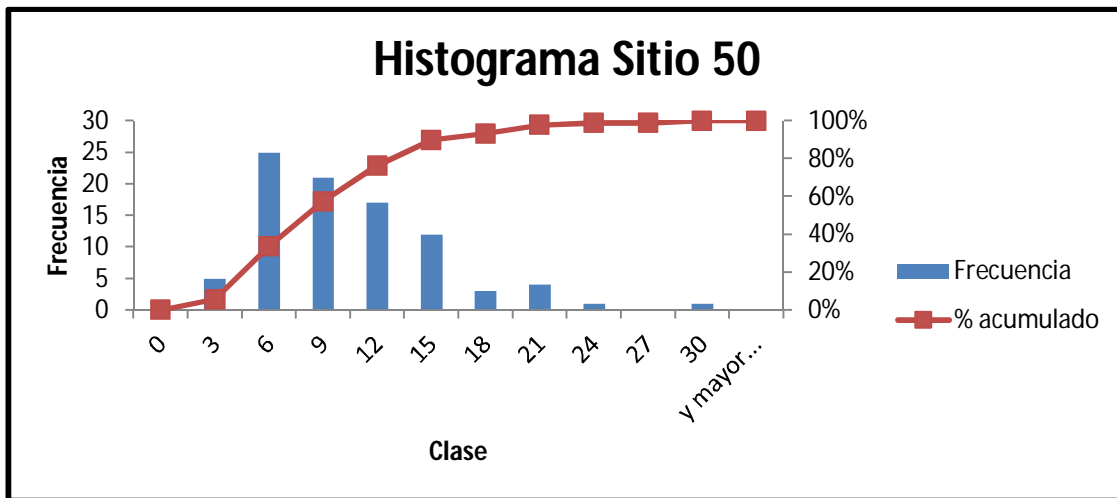


Figura 75.- Figura de histogramas de los sitios muestreados en el área de estudio.

A.2.- Cálculo de RQD

Para determinar el *RQD* de cada macizo rocoso, en la base de datos, se ocupó la longitud de las líneas de escaneo, crear una columna en la que se determine el espaciado de las discontinuidades, a través de la metodología y fórmulas propuestas por Zhang (2006) (Ecuación 2):

Ecuación 2: Cálculo de espaciado de las discontinuidades

$$\lambda = \frac{\text{Número de discontinuidades}}{\text{Longitud de medida}} * 100$$

Donde:

- λ : Número de discontinuidades por metro.

Finalmente para determinar el *RQD*, se aplicó la Ecuación 3:

Ecuación 3: Cálculo de RQD

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$$

El resultado se graficará en la Figura 76 y el resultado obtenido, será el porcentaje correspondiente al *RQD* de cada afloramiento:

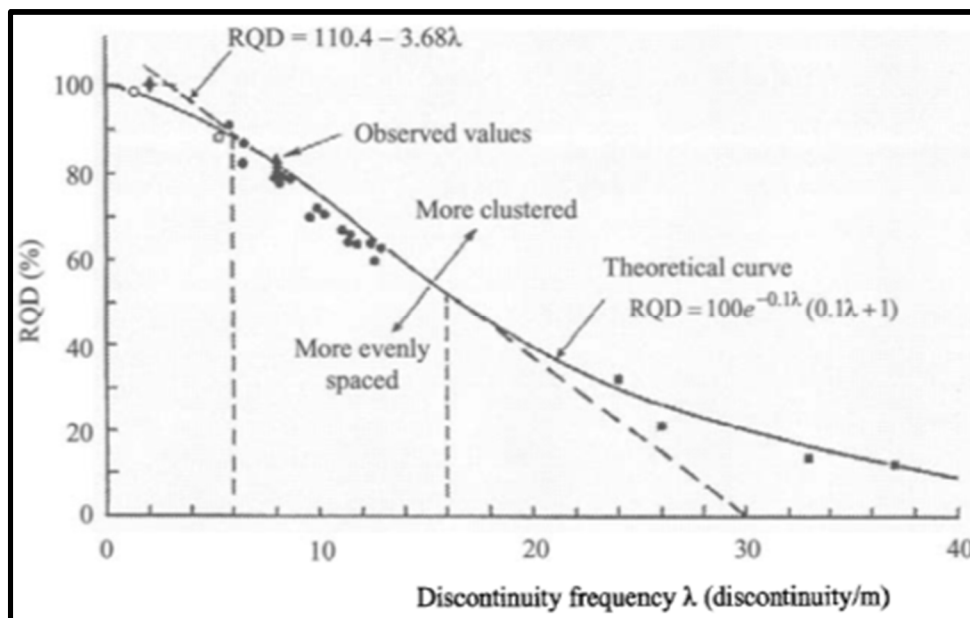


Figura 76.- Imagen mostrando la relación entre *RQD* y espaciado de las discontinuidades λ , tomada de Zhang, L., 2005.

A.3.- Point load test (PLT)

Material

- Muestras de roca.
- Aparato digital para medir el índice de resistencia de las rocas marca Controls, mod. 45-D0550/E (Figura 77).

Estas pruebas se llevaron a cabo con la metodología propuesta por (Chau y Wong, 1996; Hawkins, 1998; Kahraman, 2001; Fener *et al.*, 2005), Se aplicó el siguiente proceso:

Preparación de muestras

En una mesa de trabajo colocar las muestras a las que se aplicará presión hasta el punto de ruptura y etiquetarlas con el nombre de la muestra, para evitar errores al momento de pasar los datos (Figura 77, B y C).

Las muestras según el manual de operación (Controls, 2011) debe de medirse largo, ancho y alto de cada muestra, éstas deben de llegar a un tamaño máximo de largo 9 cm, ancho 9 cm y alto 5 cm. Para muestras que pasan éstos límites deben de cortarse hasta llegar a estos límites (Figura 77, D, E y F).

Se asemejó las muestras a una forma geométrica y se hicieron de 2 a 4 repeticiones por muestra, con la finalidad de corroborar la información.

Se creó una base de datos en la que por columnas se apuntaron los datos que se tomaron en cuenta para determinar la resistencia a la compresión, éstos fueron litología, forma, largo (W_1), ancho (W_2) alto (W_3), penetración final, resistencia (KN), para posteriormente hacer los respectivos cálculos del Índice de resistencia a la compresión uniaxial (UCS).

Al haber creado la base de datos y asemejado las muestras a una forma geométrica, tomar una muestra, acomodarla entre las dos puntas del PLT por el alto de la muestra (W_3).

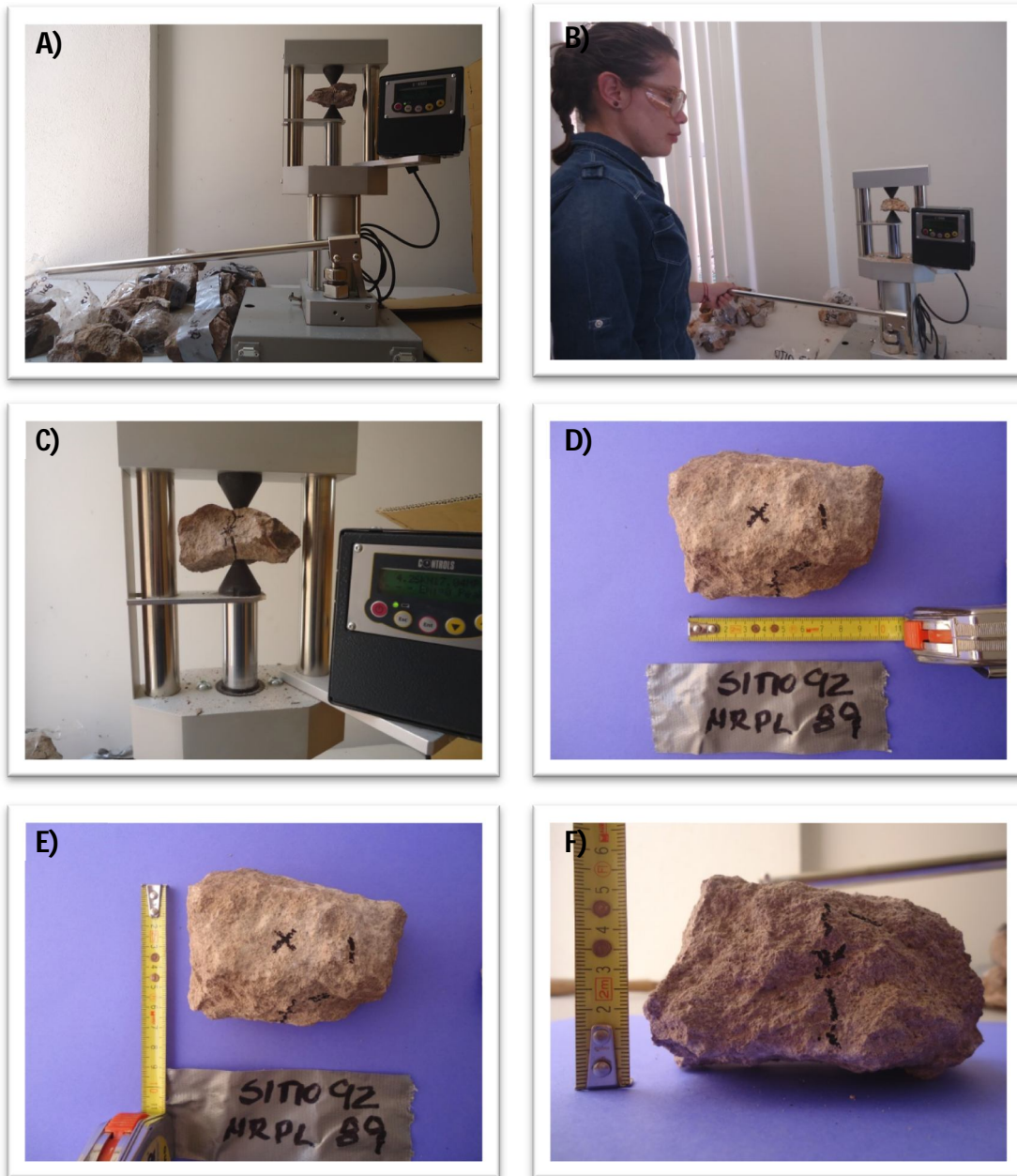


Figura 77.- Lámina de fotografías: A) Aparato digital para medir el índice de resistencia a la compresión, B) y C) secuencia de presión de muestras hasta llegar a la fractura de éstas, D), E) y F) preparación de muestras midiendo largo (W1), ancho (W2) y alto (W3).

Tabla 8.- Datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM).

TSM									
NOMBRE	SITIO	LITOLOGÍA	FORMA	W1 (cm)	W2 (cm)	D (cm)	PEN. INI (cm)	PEN. FIN. (cm)	RESISTENCIA (KN)
MRPL-045	21	TSM	REC	5.5	4.3	3.5	3.5	3.05	7.44
	21	TSM	REC	7.5	4.5	4.7	4.7	4.3	7.37
MRPL-046	21	TSM	REC	6	4.5	3.5	3.5	3.1	6.65
	21	TSM	CUAD	6.5	6	5.5	5.5	4.7	5.14
MRPL-073	38	TSM	REC	6.3	4.5	4	3.7	3.4	4.19
	38	TSM	REC	8	4	4.5	4.5	4.3	2.96
MRPL-074	38	TSM	REC	6	5	2.9	2.9	2.6	1.31
	38	TSM	CUAD	5	5	2.7	2.7	2.5	4.38
MRPL-075	38	TSM	CUAD	4	4	2.8	2.7	1.9	2.67
	38	TSM	REC	6	5.5	4	4	3.6	6.75
MRPL-076	38	TSM	REC	7.5	4.2	3.5	3.5	3.2	5.41
	38	TSM	REC	6	4.5	4.5	4.5	4.3	3.36
MRPL-077	39	TSM	REC	8.5	4	4.1	4.1	3.7	4.18
	39	TSM	REC	7	5	3.8	3.8	3.4	6.25
MRPL-078	39	TSM	CUAD	7	6.8	4	4	3.5	5.46
	39	TSM	REC	7	5.8	2.7	2.7	2.2	3.7
	39	TSM	REC	8	5.5	4.7	4.7	3.8	8.05
MRPL-079	39	TSM	CUAD	4.5	4.5	4	3.6	3	3.53
	39	TSM	REC	6	4.5	4	4	3.8	4.92
	39	TSM	REC	6	4.5	4	4	3.9	3.83
	39	TSM	CUAD	4	4	4	3	2.6	3.05
	39	TSM	REC	8	6.5	4.5	4.2	3.7	8.86
MRPL-080	39	TSM	REC	8	5.5	4	4	3.2	6.65
	39	TSM	CUAD	7	7	4.7	4.2	3.3	11.03
	39	TSM	REC	6	4.2	3.3	3.3	3	6.95
MRPL-086	42	TSM	REC	7	5	4.4	4.4	2.9	9.8
	42	TSM	REC	9	5.5	4	3.4	3.1	8.65
	42	TSM	REC	5	4	4	4	3.7	8.04
	42	TSM	REC	6	4.2	3.5	3.5	3.1	5.26
MRPL-087	42	TSM	REC	8	6	4.5	4.5	4.1	12.76
	42	TSM	REC	7	5	4.3	4.3	3.9	11.94
	42	TSM	REC	5.5	4.2	3.5	3.5	3.3	6.96
	42	TSM	REC	5.5	4	3	2.8	2.5	3.53
MRPL-088	42	TSM	REC	7.8	5	5	5	4.1	2.53
	42	TSM	REC	7	6	3.9	3.9	3.4	2.52
	42	TSM	REC	7	4.5	4.1	4.1	3.7	4.23
	42	TSM	REC	6	4.2	4	3.9	3.7	6.13
	42	TSM	REC	4.7	3.7	2.9	2.9	2.7	3.75
	42	TSM	CUAD	3.5	4	3.5	3.4	2.8	3.26
MRPL-089	42	TSM	REC	8.2	5.5	5	4.5	4.2	7.87
	42	TSM	REC	6.5	5.5	4	3.9	3.6	4.26
	42	TSM	CUAD	5	4.2	3.5	3.3	3	2.2

Tabla 8.- (Continuación) de datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM).

TSM									
NOMBRE	SITIO	LITOLOGÍA	FORMA	W1 (cm)	W2 (cm)	D (cm)	PEN. INI (cm)	PEN. FIN. (cm)	RESISTENCIA (KN)
	42	TSM	CUAD	5	4.2	3.5	3.5	3	4.56
MRPL-090	43	TSM	REC	8.5	5	4.5	4.5	3.6	17.8
	43	TSM	REC	7.5	5.5	4	3.7	2.7	11.32
	43	TSM	REC	6	4.5	3.5	3.5	3	8.14
MRPL-091	43	TSM	REC	7.5	6.5	5	4.8	4	6.79
	43	TSM	REC	9	6.5	4	4	3.3	17.86
MRPL-092	43	TSM	REC	6.4	6	5	5	4.7	5.4
	43	TSM	REC	6	5	4.9	4.9	4.6	9.49
	43	TSM	REC	5	4	3	3	2.4	4.3
	43	TSM	REC	5.5	5	3.5	3.5	3.2	4.6
MRPL-093	43	TSM	REC	7.5	5.2	3.8	3.8	3	12.99
	43	TSM	REC	8.2	5	4.5	4.5	3.7	6.34
MRPL-094	44	TSM	REC	8	5.5	4.4	4.4	3.9	15.22
	44	TSM	REC	8.5	5	4.8	4.5	4.2	8.97
	44	TSM	CUAD	5	4.5	3	3	2.8	11.89
MRPL-095	44	TSM	REC	6	4.8	4.3	4.3	3.8	5.36
	44	TSM	REC	7	3	4	4	3.6	6.1
	44	TSM	REC	7.5	5	3.2	3.2	2.9	4.1
MRPL-096	44	TSM	REC	7.5	6	3.8	3.8	3	9.61
	44	TSM	REC	6	4	4.1	4.1	4	2.94
	44	TSM	CUAD	8	7.5	4.8	4.5	4.2	11.57
	44	TSM	REC	7.5	4.5	3.5	3.5	3.1	6.81
MRPL-097	44	TSM	REC	6	4.3	4.8	4.8	4.6	1.98
	44	TSM	REC	8.5	5.2	4.6	4.6	4.4	4.65
	44	TSM	REC	5.7	3	3	2.7	2.3	5.21
MRPL-098	45	TSM	REC	4.5	3	2.2	2.2	2	2.68
	45	TSM	CUAD	4	3.7	3.5	3.4	3.1	4.03
	45	TSM	REC	4.5	3.5	2.6	2.6	2.4	5.34
MRPL-099	45	TSM	REC	5.2	4	3.8	3.5	3.35	7.86
	45	TSM	REC	6	4.1	4.4	4.3	3.8	10.33
	45	TSM	REC	7	6.3	3.4	3.4	3.2	8.41
	45	TSM	REC	5.5	3.3	2.8	2.5	2.3	2.63
	45	TSM	REC	4.8	3.3	3	2.6	2.5	1.15
	45	TSM	REC	6	3.5	2.3	2.2	2.1	2.05
	45	TSM	REC	4	3	2.2	2.2	2.1	1.54
MRPL-100	45	TSM	CUAD	5	5	4.5	4.4	4.2	2.96
	45	TSM	REC	8.4	4.3	3.6	3.6	3.4	1.58
	45	TSM	REC	6	4.7	3	2.7	2.5	1.92
	45	TSM	REC	4.7	3.5	3.8	3.8	3.6	1.62
MRPL-101	45	TSM	REC	7.5	4.5	3.8	3.8	3.5	6.72
	45	TSM	REC	8.5	4.8	4	3.9	3.7	7.19
	45	TSM	REC	4.5	3.6	4	3.8	3.6	1.88

Tabla 8.- (Continuación) de datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM).

TSM									
NOMBRE	SITIO	LITOLOGÍA	FORMA	W1 (cm)	W2 (cm)	D (cm)	PEN. INI (cm)	PEN. FIN. (cm)	RESISTENCIA (KN)
	45	TSM	CUAD	4.5	4.5	3.8	3.5	3.2	12.31
	45	TSM	REC	5.5	4.3	2.5	2.4	2.4	8.66
MRPL-102	46	TSM	CUAD	5	4.5	5	4.8	4.6	14.71
	46	TSM	CUAD	5	4.5	2.9	2.8	2.5	13.89
MRPL-103	46	TSM	CUAD	4	3.5	2.8	2.8	2.6	11.53
MRPL-104	46	TSM	CUAD	7	7	4	3.8	3.6	15.23
	46	TSM	REC	5.5	3.7	2.8	2.6	2.4	13.2
MRPL-105	46	TSM	REC	8	5.3	2.8	2.8	2.6	14.37
	46	TSM	REC	6.8	4	2.2	2.2	2	9.69
	46	TSM	REC	5	3.7	2.8	2.8	2.5	12.6
	46	TSM	REC	6	3.5	2.4	2.4	2.3	6.91
	46	TSM	REC	6	3	2.3	2.1	1.95	5.63
	46	TSM	REC	4.8	4	3	3	2.8	14.4
MRPL-107	48	TSM	REC	4	3	2.8	2.6	2.3	0.57
	48	TSM	CUAD	5.8	5.5	4.3	4.3	4.1	10.94
	48	TSM	REC	4	3	3.8	3.5	3.4	5.23
	48	TSM	REC	5.8	4.5	2.8	2.8	2.6	7.39
	48	TSM	CUAD	5	4.5	4.5	4.5	4.2	5.91
	48	TSM	REC	7.5	4.5	2.3	2.3	2.2	2.77
	48	TSM	REC	3.5	2.8	2.3	2.2	2	4.04
	48	TSM	CUAD	4.3	4.3	2.6	2.6	2.5	4
	48	TSM	REC	4.5	4.3	2.1	2.1	1.95	5.7
MRPL-108	48	TSM	CUAD	3.5	3.5	3.4	3.4	3.3	1.59
	48	TSM	CUAD	6	6	3	2.9	2.8	3.22
	48	TSM	CUAD	5	4.5	3.5	3	2.9	2.21
	48	TSM	REC	5.3	3.3	2.7	2.5	2.3	4.26
MRPL-109	48	TSM	CUAD	6	6	4.4	4.4	3.7	2.35
MRPL-110	48	TSM	REC	5	4	2.1	2.1	2	1.78
	48	TSM	REC	5.2	4.8	3.2	3.2	3.1	3.14
MRPL-116	50	TSM	REC	7.5	6	4.7	4.7	4.4	12.27
	50	TSM	REC	8.5	5	4.8	4.7	4.5	15.77
	50	TSM	CUAD	5	4.3	3	3	2.85	7.02
	50	TSM	REC	4.3	3.3	4.1	4.1	3.8	9.14
	50	TSM	CUAD	5.5	5	4.5	4.4	4	7.59
	50	TSM	REC	5.5	4	4.4	4.4	4.1	9.55
	50	TSM	CUAD	4.3	4.2	3	2.8	2.65	8.06
MRPL-117	50	TSM	CUAD	6	5.5	2.4	2.4	2.2	8.04
	50	TSM	REC	5	4.3	2.7	2.7	2.5	9.61
	50	TSM	REC	5	3.5	2.1	2.1	2	7.29
	50	TSM	REC	5.5	3	2.5	2.5	2.35	7.22
MRPL-118	50	TSM	CUAD	4.8	4.8	3.8	3.8	3.5	3.98
	50	TSM	REC	5	4	2.9	2.9	2.8	1.53

Tabla 8.- (Continuación) de datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM).

TSM									
NOMBRE	SITIO	LITOLOGÍA	FORMA	W1 (cm)	W2 (cm)	D (cm)	PEN. INI (cm)	PEN. FIN. (cm)	RESISTENCIA (KN)
	50	TSM	REC	6.5	5.5	4.8	4.8	4.5	6.05
	50	TSM	CUAD	5	5	3.5	3.5	2.8	3.15
	50	TSM	CUAD	5	4.8	3	2.9	2.6	4.08
MRPL-119	50	TSM	CUAD	5.3	5	3	3	2.7	7.3
	50	TSM	REC	6.8	5	4	3.9	3.4	12.38
	50	TSM	REC	5	4.2	3.4	3.2	3.05	7.61
	50	TSM	REC	5	2.5	2.4	2.4	2.2	7.16
MRPL-120	50	TSM	REC	8	5.4	4.7	4.5	4.4	4
	50	TSM	CUAD	7	7	4	4	3.65	7.13
	50	TSM	CUAD	4	4.2	3.2	3.2	3	7.96
	50	TSM	REC	5.5	4.5	3.3	3.3	2.9	7.81

Tabla 9.- Datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del caparazón de la Riolita San Miguelito (TSMC).

TSMC									
NOMBRE	SITIO	LITOLOGÍA	FORMA	W1 (cm)	W2 (cm)	D (cm)	PEN. INI (cm)	PEN. FIN. (cm)	RESISTENCIA (KN)
MRPL-065	34	TSMC (CAPARAZÓN)	REC	8.8	5.5	2.4	2.4	2.2	1.6
	34	TSMC (CAPARAZÓN)	REC	8.8	4	2.8	2.8	2.7	1.4
MRPL-066	34	TSMC (CAPARAZÓN)	CUAD	5	4.5	3.4	3.4	3.3	2.79
	34	TSMC (CAPARAZÓN)	REC	7	5.5	2.8	2.5	2.4	2.4
MRPL-067	34	TSMC (CAPARAZÓN)	REC	4	5	6.1	6.1	5	3.22
	34	TSMC (CAPARAZÓN)	CUAD	6.5	6.5	3.7	3.7	3.5	1.86
MRPL-068	34	TSMC (CAPARAZÓN)	REC	5.2	4.5	4.5	4.4	4.1	1.36

Tabla 10.- Datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del vitrificado de la Riolita San Miguelito (TSMB).

TSMB									
NOMBRE	SITIO	LITOLOGÍA	FORMA	W1 (cm)	W2 (cm)	D (cm)	PEN. INI (cm)	PEN. FIN. (cm)	RESISTENCIA (KN)
MRPL-081	40	VIT. TSM	REC	6.5	5.5	3.8	3.8	3.6	2.74
	40	VIT. TSM	REC	7	6	3	2.8	2.4	3.74
	40	VIT. TSM	CUAD	5.4	5.2	4.4	3.8	3.6	0.58
	40	VIT. TSM	CUAD	5.4	5.2	3.4	3.4	3.1	0.56
MRPL-082	40	VIT. TSM	CUAD	4.5	4.3	3.2	3.2	3	0.6
	40	VIT. TSM	REC	5.5	4	4.3	3.8	3.7	1.14
	40	VIT. TSM	REC	6	4.3	2.5	2.5	2.4	0.69
	40	VIT. TSM	REC	8	4.5	4.7	4.7	4.3	0.94
	40	VIT. TSM	REC	7	4.5	4	4	3.7	2.31
MRPL-083	40	VIT. TSM	REC	9	4.5	4.8	4.4	4.2	1.06
	40	VIT. TSM	REC	7.5	5.5	4.2	4.2	4	5.12
	40	VIT. TSM	REC	10	5	4.5	4.5	4.3	4.82

Tabla 11.- Datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del miembro no soldado de la Ignimbrita Cantera (TIC).

TIC										
NOMBRE	SITIO	LITOLOGIA	FORMA	W1	W2	D	PEN. INI	PEN. FIN.	RESISTENCIA (KN)	
MRPL-001	1	TIC	REC	8.5	5	4.7				2.27
MRPL-002	2	TIC	REC	8.5	4.5	4	4	3		3.15
	2	TIC	CUAD	7	6	5.5	5.5	5.4		4.28
MRPL-003	2	TIC	REC	7.5	3.5	3.7	3.7	3.1		2.76
	2	TIC	REC	7	6	3.8	3.8	3.5		2.41
MRPL-004	2	TIC	REC	6.5	5	3.5	3.5	2.6		2.28
	2	TIC	REC	7.5	5	3.7	3.7	3.6		3.03
MRPL-005	3	TIC	REC	8.5	6.5	3.7	3.7	3.2		2.98
	3	TIC	REC	5.5	4.5	2.3	2.3	1.9		1.01
MRPL-006	3	TIC	REC	8	6.5	4.2	4.2	3.3		3.97
	3	TIC	REC	6	5.5	4.2	4.2	3.8		2.54
MRPL-007	3	TIC	REC	6.5	5	3.6	3.6	3.4		0.62
	3	TIC	REC	7	4.5	3.4	3.4	3		2.47
	4	TIC	REC	7	7	4.8	4.8	4.3		1.8
MRPL-009	4	TIC	REC	9	6	2.7	2.7	2.4		3.1
	4	TIC	REC	7	5	5	5	4.7		3.57
	4	TIC	REC	7	5	5	5	4.7		2.92
	10	TIC	CUAD	7	7	3.7	3.7	3.4		9.75
MRPL-023	10	TIC	REC	8	5.3	4	3.9	3.6		11.8
MRPL-028	14	TIC	REC	9	4.9	2.7	2.5	2.3		0.82
	14	TIC	REC	8	5	4.6	4.6	4.4		3.79
MRPL-029	14	TIC	REC	8	4.4	3.9	3.7	3.2		3.27
	14	TIC	REC	7	5.5	4.6	4.6	4.4		2.42
MRPL-030	14	TIC	REC	8.5	5.5	4.8	4.8	4.4		0.86
	14	TIC	REC	5.8	4.3	4.2	4.2	3.8		1.55
MRPL-034	16	TIC	REC	7.5	5.9	3.4	3.4	3.3		1.04
	16	TIC	REC	6	5	3.9	3.9	3.7		0.45
MRPL-035	16	TIC	REC	6.6	3.7	3.8	3.8	3.5		0.48
	16	TIC	REC	8.5	5.5	3	3	2.5		0.45
	16	TIC	REC	5.7	4.5	3.7	3.7	3.6		0.6
MRPL-042	20	TIC	CUAD	5	5	3.3	3.3	3.1		2.35
	20	TIC	REC	5.5	5	3.2	3.2	2.9		8.97
MRPL-043	20	TIC	REC	6	5.5	4.5	4.4	4.1		3.88
	20	TIC	CUAD	4.5	4.5	5.4	5.3	5		7.08
MRPL-044	20	TIC	CUAD	4.8	4.5	3	2.9	2.7		4.25
	20	TIC	REC	4	4.4	4.7	4.7	4.6		3.26
MRPL-062	33	TIC	REC	6	5.5	5	5	4.7		4.15
	33	TIC	CUAD	5.5	5.5	3.5	3.3	3.2		3.31
MRPL-063	33	TIC	REC	5.5	4.5	3.8	3.5	3.2		1.17
	33	TIC	CUAD	6.5	6.5	4	3.6	3.4		0.63
MRPL-064	33	TIC	REC	4.5	2.8	4.5	4.4	4.2		1.61
MRPL-111	49	TIC	CUAD	5.3	5.2	4.5	4.4	4.1		2.19
	49	TIC	REC	7.5	4.7	3.3	3.3	3.1		2.23
	49	TIC	REC	6.5	5.5	1.7	1.7	1.6		2.41
	49	TIC	REC	6.7	4.5	2.6	2.4	2.2		2.31
	49	TIC	REC	4.7	4	3.2	3.1	2.9		1.94
	49	TIC	REC	7.5	4.7	3.3	3.3	2.9		2.62
	49	TIC	REC	6	3.9	1.9	1.8	1.6		1.7
MRPL-112	49	TIC	REC	7	5	3.3	3.3	3		2.09
	49	TIC	CUAD	5	5	3	2.7	2.5		4.19
	49	TIC	CUAD	4.5	4.5	3.8	3.8	3.5		1.57
	49	TIC	REC	5.5	4.3	2.1	2.1	1.95		2.92
	49	TIC	REC	6.5	4.2	4	4	3.7		5.2
	49	TIC	REC	7	3	2.2	2.2	2		2.57
	49	TIC	REC	5.5	4.2	2	1.9	1.7		2.72
MRPL-022	10	TIC	REC	5.5	5	4	3.9	3.5		17.52
MRPL-008	4	TIC	REC	5.5	5	3	3	2.7		0.06
MRPL-031	15	TIC	REC	6.5	4.8	3.8	3.8	3.3		1.29
	15	TIC	REC	8	5.5	4.5	4.5	3.7		1.73
	15	TIC	REC	8	5.5	4.5	4.5	3.7		1.84
MRPL-032	15	TIC	CUAD	4.5	4.5	3.5	3.5	3.2		0.84
	15	TIC	CUAD	5.5	5.5	4.8	4.4	4.2		1.39
MRPL-033	15	TIC	REC	7	5.5	3	2.8	2.6		1.39
	15	TIC	REC	7.2	6.1	3.2	2.8	2.7		0.3

Tabla 12.- Datos obtenidos a través del aparato para medir el índice de resistencia del miembro soldado de la Ignimbrita Cantera (TICS).

TICS									
NOMBRE	SITIO	LITOLOGÍA	FORMA	W1 (cm)	W2 (cm)	D (cm)	PEN. INI (cm)	PEN. FIN. (cm)	RESISTENCIA (KN)
MRPL-010	5	TICS	REC	8	7	4	4	3.2	11.04
MRPL-011	5	TICS	REC	8.5	6	3.9	3.9	3.4	9.65
MRPL-012	5	TICS	REC	8	6.5	3.6	3.6	3.1	7.77
MRPL-013	5	TICS	REC	7	5.7	3.5	3.5	3.1	3.2
MRPL-014	6	TICS	REC	8	7	4.4	4.4	4.1	5.37
	6	TICS	REC	8	6.8	4.9	4.9	4.6	5.43
MRPL-015	6	TICS	CUAD	5	5	4.5	4.2	3.4	7.8
	6	TICS	REC	7.5	5	4.8	4.8	4.5	9.73
MRPL-016	6	TICS	REC	5.5	4.5	4	3.7	3.4	1.47
	6	TICS	REC	7	4.5	4	3.5	3.1	6.85
MRPL-017	6	TICS	CUAD	6.5	6.5	4.8	4.6	4.3	2.99
MRPL-018	7	TICS	REC	8.5	6.5	5	4.6	4.1	7.92
	7	TICS	REC	9	5.5	3.7	3.7	3	7.26
MRPL-019	7	TICS	REC	7	4.5	4.4	4.4	4	3.81
	7	TICS	REC	8.5	5.2	4.7	4.7	4.2	6.46
MRPL-024	11	TICS	REC	7.5	7	3.5	3.3	3.1	5.16
MRPL-025	11	TICS	REC	6.5	5	4.1	4.1	4	7.71
	11	TICS	REC	8	7	4.9	4.9	4.7	10.77
MRPL-039	19	TICS	REC	8.5	5	3.5	3.5	3.2	4.05
	19	TICS	REC	8	7.5	3.5	3.5	2.9	14.16
MRPL-040	19	TICS	CUAD	4.5	4.5	2.5	2.5	2.2	6.78
	19	TICS	REC	5	5.5	2.5	2.3	2	5.83
MRPL-041	19	TICS	REC	7.5	6.5	4.1	4.1	3.75	15.23
	19	TICS	REC	5	3	4	3.8	3.4	10.61
MRPL-049	24	TICS	REC	6.7	4.3	4.3	3.8	3.6	2.33
MRPL-050	24	TICS	REC	6.4	5.5	3.2	3.2	2.8	0.74
	24	TICS	REC	5.5	4.5	4.6	4.6	4.4	0.98
MRPL-051	25	TICS	REC	8.5	4	3.5	3.5	3.3	2.16
MRPL-052	25	TICS	REC	6.5	5	3.7	3.7	3.5	4.24
	25	TICS	REC	6	4.5	3.7	3.5	3.3	1.39
MRPL-057	29	TICS	REC	6	5	3.5	3.5	3.1	10.45
MRPL-058	29	TICS	CUAD	5	5	3.5	3.5	3.4	2.63
	29	TICS	REC	6.5	5	3	3	2.7	3.14
MRPL-113	49	TICS	CUAD	6	5.6	2.9	2.9	2.65	3.92
	49	TICS	CUAD	4.5	4.5	5.1	5.1	5	3.5
	49	TICS	CUAD	3.7	3.4	2.2	2.2	2.1	1.15
	49	TICS	REC	6	3.2	2	2	1.9	2.75
MRPL-114	49	TICS	REC	6.5	5	4.7	4.7	4.6	2.91
	49	TICS	REC	5.5	5	4.8	4.8	4.7	5.67
	49	TICS	REC	5	4.3	3.4	3.4	3.3	3.28
	49	TICS	REC	5.4	3.3	4.6	4.6	4.5	2.93
	49	TICS	REC	5	4	2.9	2.9	2.7	3.85
MRPL-115	49	TICS	REC	6.5	5	3.1	3.1	3	2.06
	49	TICS	CUAD	5.3	5	4	4	3.7	5.64
	49	TICS	CUAD	4.5	4.5	3.3	3.3	3.1	4.61
	49	TICS	REC	4.5	4	3	3	2.9	7.53
	49	TICS	REC	4.5	3.5	2.3	2.3	2.1	3.41
	11	TICS	REC	7.5	4	3.3	3.3	2.9	15.2

Al momento de detener la muestra con las dos puntas, medir el ancho de la muestra con la regla del PLT.

Presionar la muestra hasta que se rompa y tomar la medida de la resistencia de pico en KN del manómetro digital.

Cálculos

1. Determinar el área de cada muestra, a través de los siguientes pasos:
2. Determinar el diámetro de cada muestra (D_E), a través de la Ecuación 4:

Ecuación 4: cálculo del diámetro de la muestra

$$D_E = \sqrt{4 \cdot A / \pi}$$

3. Determinar el índice de resistencia del punto de carga (I_s) en MPa, con la Ecuación 5:

Ecuación 5: Cálculo del índice de resistencia del punto de carga

$$I_s = \frac{P \cdot 1000}{D_E^2}$$

Donde:

- P: Resistencia de pico
- D_E : Diámetro equivalente del núcleo en mm

4. Determinar el factor de corrección de la forma con la Ecuación 6:

Ecuación 6: Cálculo del factor de corrección

$$F = \left(\frac{D_E}{50} \right)^{0.45}$$

5. Aplicar el valor obtenido del factor de corrección de la forma al índice de resistencia obtenido ($I_{s(50)}$), a través de la Ecuación 7:

Ecuación 7: Cálculo de la corrección de forma al índice de resistencia obtenido

$$I_{s(50)} = F \times I_s$$

6. Finalmente correlacionar el $I_{s(50)}$ obtenido con la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de la metodología (Chau y Wong, 1996; Hawkins, 1998; Kahraman, 2001; Fener *et al.*, 2005) por medio de la Ecuación 8:

Ecuación 8: Cálculo del índice de resistencia a la compresión uniaxial (UCS)

$$UCS (MPa) = Is_{50} \times 18 \quad (\text{Kohno y Maeda, 2012})$$

Tabla 13.- Datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM).

TSM								
NOMBRE	SITIO	AREA(MM^2)	DE(mm2)	De (mm)	Is	F	Is(50)	UCS(Mpa)
MRPL-045	21	1715	2183.605819	46.72906825	3.407208359	0.970013331	3.305037529	59.49067552
	21	2820	3590.535516	59.92107739	2.052618604	1.084861568	2.226807037	40.08252666
MRPL-046	21	1837.5	2339.577663	48.36918093	2.842393353	0.985188714	2.800293852	50.40528933
	21	3437.5	4376.760935	66.15709286	1.174384454	1.134286815	1.332088801	23.97759843
MRPL-073	38	2160	2750.197417	52.44232467	1.523526993	1.021692884	1.556576688	28.01838038
	38	2700	3437.746771	58.63230143	0.861029098	1.074298877	0.925002593	16.65004667
MRPL-074	38	1595	2030.817074	45.0645878	0.645060561	0.9543099	0.615587679	11.08057823
	38	1350	1718.873385	41.45929794	2.548180708	0.919164775	2.342197947	42.15956305
MRPL-075	38	1120	1426.02829	37.76278976	1.872333122	0.881337663	1.650157699	29.70283858
	38	2300	2928.450953	54.1151638	2.304972871	1.036232091	2.388486858	42.99276344
MRPL-076	38	2047.5	2606.957968	51.05837804	2.07521566	1.009470553	2.094869099	37.70764378
	38	2362.5	3008.028424	54.84549594	1.117010721	1.042502088	1.16448601	20.96074817
MRPL-077	39	2562.5	3262.676333	57.11984185	1.281156809	1.061738697	1.360253761	24.4845677
	39	2280	2902.986162	53.87936676	2.152955492	1.034197814	2.226581862	40.07847352
MRPL-078	39	2760	3514.141143	59.28019183	1.553722454	1.079624716	1.677437162	30.19386892
	39	1728	2200.157933	46.90584114	1.681697456	0.971662889	1.634043009	29.41277415
	39	3172.5	4039.352456	63.55590024	1.992893685	1.113996026	2.220075646	39.96136162
MRPL-079	39	1800	2291.831181	47.87307365	1.540253065	0.980628675	1.510416322	27.18749379
	39	2100	2673.803044	51.70882946	1.840075697	1.015237418	1.8681137	33.6260466
	39	2100	2673.803044	51.70882946	1.43241665	1.015237418	1.454242982	26.17637368
	39	1600	2037.183272	45.13516668	1.497165249	0.954982187	1.429766144	25.73579058
	39	3262.5	4153.944015	64.45109785	2.132912713	1.12102976	2.391058626	43.03905528
MRPL-080	39	2700	3437.746771	58.63230143	1.934406588	1.074298877	2.078130824	37.40635484
	39	3290	4188.958102	64.72216083	2.633112992	1.123148941	2.957378067	53.2328052
	39	1683	2142.862154	46.29105911	3.243325749	0.965911198	3.132764659	56.38976386
MRPL-086	42	2640	3361.352398	57.97717135	2.915493182	1.06888051	3.11631384	56.09364912
	42	2900	3692.39468	60.7650778	2.342653143	1.091711347	2.557501018	46.03501832
	42	1800	2291.831181	47.87307365	3.508111797	0.980628675	3.440155022	61.92279039
	42	1785	2272.732587	47.6731852	2.314394588	0.978784029	2.26529246	40.77526428
MRPL-087	42	3150	4010.704566	63.33012368	3.181485894	1.112213467	3.538491456	63.69284621
	42	2580	3284.958025	57.31455335	3.63474964	1.063365849	3.865068638	69.57123549
	42	1697.5	2161.324127	46.49004331	3.22024814	0.9677774	3.116483371	56.09670068
	42	1425	1814.366351	42.59537946	1.945582819	0.93041482	1.810199087	32.58358357
MRPL-088	42	3200	4074.366543	63.83076486	0.620955423	1.116161453	0.693086507	12.47555713
	42	2535	3227.662246	56.81251839	0.780750837	1.059164257	0.82694338	14.88498085
	42	2357.5	3001.662227	54.78742763	1.409219186	1.042005251	1.468413792	26.43144825
	42	2040	2597.408671	50.96477873	2.360044481	1.008637388	2.380429101	42.84772381
	42	1218	1550.805765	39.38027127	2.418097794	0.898129403	2.171764728	39.0917651
	42	1312.5	1671.126902	40.87941906	1.950779438	0.913357123	1.781758295	32.07164931
MRPL-089	42	3425	4360.845441	66.03669768	1.804695926	1.133357451	2.045365575	36.81658035
	42	2400	3055.774907	55.27906392	1.39408174	1.046202622	1.458491972	26.25285549
	42	1610	2049.915667	45.27599438	1.073214882	0.95632189	1.026338884	18.47409991
	42	1610	2049.915667	45.27599438	2.224481755	0.95632189	2.127320596	38.29177073
MRPL-090	43	3037.5	3867.465117	62.1889469	4.602497879	1.10314967	5.077244015	91.39039226
	43	2600	3310.422816	57.53627392	3.419502773	1.065215011	3.642505685	65.56510233
	43	1837.5	2339.577663	48.36918093	3.479260435	0.985188714	3.427728113	61.69910604
MRPL-091	43	3500	4456.338407	66.75581178	1.523672437	1.138894734	1.735302514	31.23544526
	43	3100	3947.042589	62.82549314	4.524906838	1.108216612	5.014576925	90.26238466
MRPL-092	43	3100	3947.042589	62.82549314	1.36811293	1.108216612	1.516165476	27.29097856
	43	2695	3431.380573	58.5779871	2.765650676	1.073850931	2.969896552	53.45813794
	43	1350	1718.873385	41.45929794	2.501638595	0.919164775	2.299418076	41.38952537
	43	1837.5	2339.577663	48.36918093	1.966166831	0.985188714	1.937045371	34.86681668

Tabla 13.- (Continuación) de datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM).

TSM								
NOMBRE	SITIO	AREA(MM^2)	DE(mm2)	De (mm)	Is	F	Is(50)	UCS(Mpa)
MRPL-093	43	2413	3072.327021	55.42857586	4.228065538	1.047475014	4.428793007	79.71827413
	43	2970	3781.521448	61.49407653	1.676573857	1.09758579	1.840183642	33.12330555
MRPL-094	44	2970	3781.521448	61.49407653	4.024835033	1.09758579	4.41760174	79.51683131
	44	3240	4125.296125	64.22846818	2.17438936	1.119285563	2.433762618	43.80772713
	44	1425	1814.366351	42.59537946	6.553252044	0.93041482	6.097242819	109.7503707
MRPL-095	44	2322	2956.462223	54.3733595	1.812977673	1.038454023	1.882693958	33.88849124
	44	2000	2546.479089	50.46265044	2.395464398	1.004153309	2.405413502	43.29744304
	44	2000	2546.479089	50.46265044	1.610066235	1.004153309	1.616753338	29.10156008
MRPL-096	44	2565	3265.859432	57.1476984	2.942563879	1.061971674	3.124919488	56.24855079
	44	2050	2610.141067	51.0895397	1.126375903	1.009747749	1.137355532	20.47239957
	44	3720	4736.451106	68.82187956	2.442757191	1.154623616	2.820465142	50.76837255
	44	2100	2673.803044	51.70882946	2.546934044	1.015237418	2.585742748	46.54336939
MRPL-097	44	2472	3147.448155	56.10212255	0.629081053	1.053183823	0.662537989	11.92568379
	44	3151	4011.977805	63.34017529	1.159029343	1.112292901	1.28918011	23.20524199
	44	1305	1661.577606	40.76245338	3.135574277	0.912180197	2.860208763	51.48375773
MRPL-098	45	825	1050.422624	32.41022407	2.551354034	0.822754778	2.099138722	37.784497
	45	1347.5	1715.690287	41.42089191	2.348908793	0.918781515	2.158133979	38.84641161
	45	1040	1324.169127	36.38913473	4.032717493	0.866763822	3.495413628	62.91744531
MRPL-099	45	1748	2225.622724	47.17650606	3.531595861	0.974181989	3.440417081	61.92750746
	45	2222	2829.138268	53.18964437	3.651288491	1.028219147	3.75432474	67.57784532
	45	2261	2878.794611	53.65439973	2.92136159	1.0322524	3.015582512	54.28048522
	45	1232	1568.631119	39.60594803	1.676621079	0.900441876	1.50969983	27.17459693
	45	1215	1546.986047	39.3317435	0.743380978	0.897631196	0.667281956	12.0110752
	45	1092.5	1391.014203	37.2963028	1.473744837	0.876421656	1.29162189	23.24919403
	45	770	980.3944494	31.31125116	1.570796327	0.810081451	1.272472968	22.90451342
MRPL-100	45	2250	2864.788976	53.52372348	1.033234917	1.03112031	1.065389508	19.17701115
	45	2286	2910.625599	53.95021408	0.542838626	1.034809544	0.561734591	10.11122263
	45	1605	2043.549469	45.20563537	0.939541728	0.955652847	0.897875728	16.1617631
	45	1558	1983.707211	44.53882812	0.816652776	0.949283543	0.77523504	13.95423072
MRPL-101	45	2280	2902.986162	53.87936676	2.314857745	1.034197814	2.394020819	43.09237473
	45	2660	3386.817189	58.19636749	2.122937141	1.070697141	2.273022727	40.91440909
	45	1620	2062.648062	45.4163854	0.91144972	0.95765516	0.872854528	15.7113815
	45	1710	2177.239621	46.66090035	5.653948182	0.969376304	5.480803394	98.6544611
	45	1225	1559.718442	39.49327085	5.552284159	0.8992882	4.993103626	89.87586526
MRPL-102	46	2375	3023.943919	54.99039842	4.864508204	1.043740626	5.077284836	91.39112704
	46	1377.5	1753.887473	41.87943974	7.919550265	0.923344755	7.312475197	131.6245535
MRPL-103	46	1050	1336.901522	36.56366396	8.624419832	0.868632085	7.491447781	134.8460601
MRPL-104	46	2800	3565.070725	59.70821321	4.27200501	1.083125628	4.627118109	83.28812596
	46	1288	1639.932534	40.49608047	8.049111612	0.909492965	7.320610383	131.7709869
MRPL-105	46	1862	2370.772032	48.69057437	6.061316653	0.988129129	5.989363544	107.8085438
	46	1188	1512.608579	38.89226889	6.406151686	0.893103875	5.721358897	102.9844602
	46	1218	1550.805765	39.38027127	8.124808587	0.898129403	7.297129486	131.3483308
	46	1140	1451.493081	38.0984656	4.760615183	0.884854505	4.212451791	75.82413224
	46	1035	1317.802929	36.30155546	4.272262473	0.865824465	3.699029372	66.5825287
	46	1320	1680.676199	40.99605102	8.567979964	0.914528848	7.835664843	141.0419672
MRPL-107	48	980	1247.774754	35.32385531	0.456813217	0.855252085	0.390690457	7.032428223
	48	2429.5	3093.335474	55.61776222	3.536635484	1.049082344	3.710221844	66.78399319
	48	1330	1693.408594	41.15104609	3.088445409	0.916083148	2.829272792	50.922691026
	48	1442	1836.011424	42.84870387	4.025029423	0.932900785	3.754953106	67.58915592

Tabla 13.- (Continuación) de datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro desvitrificado central de la Riolita San Miguelito (TSM).

TSM								
NOMBRE	SITIO	AREA(MM^2)	DE(mm2)	De (mm)	Is	F	Is(50)	UCS(Mpa)
	48	2137.5	2721.549527	52.16847254	2.171557027	1.019288566	2.213443248	39.84197847
	48	1380	1757.070572	41.91742563	1.576487618	0.923721536	1.456235564	26.21224016
	48	724.5	922.4620502	30.37206035	4.379583962	0.79905544	3.499530389	62.991547
	48	1118	1423.481811	37.72905791	2.810011318	0.880983309	2.47557307	44.56031526
	48	924	1176.473339	34.29975713	4.84498867	0.844003929	4.089189473	73.60541051
MRPL-108	48	1190	1515.155058	38.92499272	1.049397546	0.893441952	0.937575792	16.87636425
	48	1800	2291.831181	47.87307365	1.404990048	0.980628675	1.377773529	24.79992352
	48	1662.5	2116.760743	46.0082682	1.044048085	0.963251396	1.005680775	18.10225395
	48	1161	1478.231111	38.44777122	2.881822718	0.888496097	2.560488236	46.08878826
MRPL-109	48	2640	3361.352398	57.97717135	0.699123365	1.06888051	0.747279339	13.45102811
MRPL-110	48	945	1203.21137	34.68733731	1.479374318	0.848282352	1.254927126	22.58868826
	48	1600	2037.183272	45.13516668	1.541343896	0.954982187	1.471955964	26.49520736
MRPL-116	50	3172.5	4039.352456	63.55590024	3.037615592	1.113996026	3.383891699	60.91005057
	50	3240	4125.296125	64.22846818	3.822755876	1.119285563	4.278755462	77.01759831
	50	1395	1776.169165	42.14462202	3.952326242	0.925971183	3.659740207	65.87532373
	50	1558	1983.707211	44.53882812	4.607534797	0.949283543	4.373856955	78.72942519
	50	2362.5	3008.028424	54.84549594	2.523247433	1.042502088	2.630490718	47.34883293
	50	2090	2661.070648	51.58556628	3.588781082	1.014147651	3.639553904	65.51197028
	50	1275	1623.38042	40.29119531	4.96494839	0.907419413	4.505290555	81.09522999
MRPL-117	50	1380	1757.070572	41.91742563	4.575797995	0.923721536	4.226763154	76.08173677
	50	1255.5	1598.552248	39.98189901	6.011689646	0.904278148	5.436239578	97.8523124
	50	892.5	1136.366294	33.71003254	6.415184999	0.837442747	5.372350145	96.70230261
	50	1062.5	1352.817016	36.7806609	5.33701152	0.87094812	4.648260149	83.66868267
MRPL-118	50	1824	2322.38893	48.19117066	1.713752571	0.98355548	1.685570733	30.34027319
	50	1305	1661.577606	40.76245338	0.92081164	0.912180197	0.839946143	15.11903058
	50	2880	3666.929889	60.55518053	1.649881559	1.090012766	1.798391962	32.37105531
	50	1750	2228.169203	47.20348719	1.413716694	0.974432669	1.377571731	24.79629116
	50	1470	1871.662131	43.26271063	2.179880617	0.936946245	2.042430959	36.76375726
MRPL-119	50	1545	1967.155097	44.35262221	3.710942779	0.94749556	3.516101807	63.28983252
	50	2360	3004.845326	54.81646947	4.1200124	1.042253772	4.294098463	77.29377233
	50	1564	1991.346648	44.62450726	3.821534542	0.950104868	3.630858571	65.35545428
	50	900	1145.91559	33.85137501	6.248278722	0.839021016	5.242437163	94.36386893
MRPL-120	50	3149	4009.431326	63.32007049	0.997647715	1.112134013	1.109517957	19.97132322
	50	2800	3565.070725	59.70821321	1.999960323	1.083125628	2.166208281	38.99174905
	50	1312	1670.490283	40.87163176	4.765068125	0.913278823	4.351835811	78.33304461
	50	1650	2100.845249	45.83497844	3.717551307	0.961617066	3.57486078	64.34749404

Tabla 14.- Datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del caparazón de la Riolita San Miguelito (TSMC).

TSMC								
NOMBRE	SITIO	AREA(MM^2)	DE(mm2)	De (mm)	Is	F	Is(50)	UCS(Mpa)
MRPL-065	34	1716	2184.879059	46.7426899	0.73230598	0.970140563	0.710439736	12.78791524
	34	1792	2281.645264	47.76657057	0.613592315	0.979646353	0.601103474	10.81986253
MRPL-066	34	1615	2056.281865	45.34624422	1.35681788	0.956989325	1.298460227	23.37228408
	34	1750	2228.169203	47.20348719	1.077117481	0.974432669	1.049578462	18.89241231
MRPL-067	34	2745	3495.04255	59.11888489	0.921304949	1.078301733	0.993444724	17.88200503
	34	2405	3062.141105	55.33661631	0.607418122	1.046692634	0.635780074	11.44404134
MRPL-068	34	2182.5	2778.845306	52.71475416	0.489411914	1.024077871	0.501195911	9.021526392

Tabla 15.- Datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del vitrificado de la Riolita San Miguelito (TSMB).

TSMB								
NOMBRE	SITIO	AREA(MM^2)	DE(mm2)	De (mm)	Is	F	Is(50)	UCS(Mpa)
MRPL-081	40	2280	2902.986162	53.87936676	0.943855688	1.034197814	0.976133489	17.57040279
	40	1950	2482.817112	49.82787485	1.506353401	0.998449405	1.504017656	27.0723178
	40	2332	2969.194618	54.49031674	0.195339166	1.039458602	0.203046976	3.654845573
	40	1802	2294.37766	47.89966242	0.244074901	0.980873726	0.239406658	4.309319837
MRPL-082	40	1408	1792.721279	42.34053943	0.334686717	0.927905763	0.310557734	5.59003921
	40	2042.5	2600.59177	50.99599759	0.438361766	1.008915373	0.442269924	7.960858635
	40	1287.5	1639.295914	40.48821945	0.420912414	0.909413513	0.382783437	6.890101866
	40	2937.5	3740.141163	61.15669352	0.251327412	1.094871867	0.275171313	4.953083637
	40	2300	2928.450953	54.1151638	0.788812938	1.036232091	0.81739328	14.71307904
MRPL-083	40	3240	4125.296125	64.22846818	0.256951251	1.119285563	0.287601826	5.176832861
	40	2730	3475.943957	58.95713661	1.472981171	1.076973136	1.586361151	28.55450071
	40	3375	4297.183463	65.55290584	1.121664933	1.129613502	1.267047852	22.80686134

Tabla 16.- Datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro no soldado de la Ignimbrita Canterra (TIC).

TIC							
NOMBRE	AREA(MM^2)	DE(mm2)	De (mm)	Is	F	Is(50)	UCS(Mpa)
MRPL-001	3172.5	4039.35246	63.5559002	0.56197126	1.11399603	0.62603375	11.2686076
MRPL-002	2600	3310.42282	57.5362739	0.95154008	1.06521501	1.01359478	18.244706
	3575	4551.83137	67.4672615	0.94028088	1.14434081	1.07600178	19.368032
MRPL-003	2035	2591.04247	50.9022836	1.06520832	1.00808062	1.07381587	19.3286856
	2470	3144.90168	56.0794229	0.76631967	1.05299204	0.80692851	14.5247132
MRPL-004	2012.5	2562.39458	50.6201006	0.8897927	1.00556199	0.89474172	16.105351
	2312.5	2944.36645	54.2620166	1.02908386	1.03749656	1.06767097	19.2180775
MRPL-005	2775	3533.23974	59.441061	0.84341857	1.08094214	0.91168667	16.4103601
	1150	1464.22548	38.2651993	0.68978447	0.88659502	0.61155948	11.0080707
MRPL-006	3045	3877.01441	62.265676	1.02398381	1.10376194	1.13023436	20.3442186
	2415	3074.8735	55.4515419	0.82605024	1.04767029	0.8654283	15.5777094
MRPL-007	2070	2635.60586	51.3381521	0.23524003	1.01195594	0.23805254	4.2849458
	1955	2489.18331	49.8917158	0.99229333	0.99902486	0.99132571	17.8438628
	3360	4278.08487	65.4070705	0.42074902	1.12848194	0.47480766	8.54653797
MRPL-009	2025	2578.31008	50.7770625	1.20233793	1.00696391	1.2107109	21.7927963
	3000	3819.71863	61.8038723	0.93462381	1.1000706	1.02815218	18.5067392
	3000	3819.71863	61.8038723	0.76445421	1.1000706	0.8409536	15.1371648
	2590	3297.69042	57.4255206	2.95661471	1.06429181	3.14670083	56.6406149
MRPL-023	2660	3386.81719	58.1963675	3.48409712	1.07069714	3.73041282	67.1474308
MRPL-028	1876.5	2389.23401	48.8797914	0.34320623	0.98985528	0.3397245	6.11504099
	2990	3806.98624	61.7007799	0.99553814	1.09924448	1.0943398	19.6981164
MRPL-029	2418	3078.69322	55.4859732	1.06213896	1.04796298	1.11308231	20.0354815
	2875	3660.56369	60.5025924	0.66110037	1.08958669	0.72032616	12.9658709
MRPL-030	3360	4278.08487	65.4070705	0.20102453	1.12848194	0.22685255	4.08334592
	2121	2700.54107	51.9667305	0.57395905	1.0175129	0.58401074	10.5121934
MRPL-034	2278	2900.43968	53.8557303	0.35856633	1.03399363	0.3707553	6.67359532
	2145	2731.09882	52.259916	0.16476885	1.02009218	0.16807941	3.02542938
MRPL-035	1957	2491.72979	49.9172294	0.19263726	0.99925473	0.19249369	3.46488647
	2100	2673.80304	51.7088295	0.16829961	1.01523742	0.17086406	3.07555304
	1887	2402.60302	49.0163546	0.24972915	0.9910988	0.24750626	4.45511264
MRPL-042	1650	2100.84525	45.8349784	1.11859738	0.96161707	1.07566233	19.361922
	1680	2139.04244	46.2497831	4.19346519	0.96552353	4.04888933	72.8800079

Tabla 16.- (continuación) de datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro no soldado de la Ignimbrita Cantera (TIC).

TIC							
NOMBRE	AREA(MM^2)	DE(mm2)	De (mm)	Is	F	Is(50)	UCS(Mpa)
MRPL-043	2587.5	3294.50732	57.3977989	1.17771783	1.06406058	1.25316312	22.5569361
	2430	3093.97209	55.6234851	2.28832057	1.04913092	2.40074787	43.2134616
MRPL-044	1395	1776.16916	42.144622	2.3927901	0.92597118	2.21565468	39.8817843
	1974	2513.37486	50.1335702	1.2970608	1.00120125	1.29861889	23.37514
MRPL-062	2875	3660.56369	60.5025924	1.13370517	1.08958669	1.23527007	22.2348613
	1925	2450.98612	49.507435	1.35047684	0.99555484	1.34447376	24.2005277
MRPL-063	1900	2419.15513	49.1849076	0.48363992	0.992631	0.48007598	8.64136764
	2600	3310.42282	57.5362739	0.19030802	1.06521501	0.20271896	3.64894121
MRPL-064	1642.5	2091.29595	45.7306894	0.76985756	0.96063186	0.7395497	13.3118946
MRPL-111	2362.5	3008.02842	54.8454959	0.72805163	1.04250209	0.75899535	13.6619162
	2013	2563.0312	50.6263884	0.87006354	1.0056182	0.87495173	15.7491311
	1020	1298.70434	36.0375406	1.85569566	0.86298513	1.60143776	28.8258798
	1456	1853.83678	43.0562049	1.24606439	0.93493105	1.16498429	20.9697173
	1392	1772.34945	42.0992808	1.09459227	0.92552276	1.01307006	18.235261
	2013	2563.0312	50.6263884	1.02222712	1.0056182	1.02797019	18.5034635
	940.5	1197.48179	34.6046499	1.4196458	0.8473718	1.20296781	21.6534206
MRPL-112	1980	2521.0143	50.2097032	0.82903139	1.00188516	0.83059425	14.9506965
	1500	1909.85932	43.7019372	2.19387887	0.94121493	2.06491155	37.1684079
	1710	2177.23962	46.6609004	0.72109656	0.9693763	0.69901392	12.5822505
	1029	1310.16349	36.1961806	2.22872948	0.86469258	1.92716585	34.6889854
	2140	2724.73263	52.1989715	1.90844414	1.01955668	1.94576696	35.0238053
	1100	1400.5635	37.4241032	1.83497571	0.87777181	1.61068995	28.9924191
	970	1235.04236	35.1431694	2.20235361	0.85328068	1.8792258	33.8260644
MRPL-022	2100	2673.80304	51.7088295	6.55246468	1.01523742	6.65230732	119.741532
MRPL-008	1575	2005.35228	44.7811599	0.02991993	0.95160431	0.02847193	0.51249482
MRPL-031	2147	2733.6453	52.284274	0.47189736	1.0203061	0.48147976	8.66663561
	3037.5	3867.46512	62.1889469	0.44732142	1.10314967	0.49346248	8.88232464
	3037.5	3867.46512	62.1889469	0.47576383	1.10314967	0.52483871	9.44709673
MRPL-032	1575	2005.35228	44.7811599	0.41887902	0.95160431	0.39860708	7.17492746
	2640	3361.3524	57.9771714	0.41352403	1.06888051	0.44200778	7.95614003
MRPL-033	1875	2387.32415	48.8602512	0.58224184	0.98967719	0.57623147	10.3721664
	2128	2709.45375	52.0524135	0.11072343	1.01826752	0.11274607	2.02942921

Tabla 17.- Datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro superior de la Riolita Panalillo (TRP).

TRP							
NOMBRE	AREA(MM^2)	DE(mm2)	De (mm)	Is	F	Is(50)	UCS(Mpa)
MRPL-054	2200	2801.126998	52.92567428	3.191572537	1.02591972	3.274297204	58.93734967
	2029.5	2584.039656	50.83345017	3.064968443	1.00746696	3.087854439	55.5813799
MRPL-055	1942.5	2473.267816	49.7319597	1.859887543	0.997584071	1.855394187	33.39709536
	1748	2225.622724	47.17650606	2.785737193	0.974181989	2.713815	48.84867001

Tabla 18.- Datos obtenidos a través del cálculo del índice de resistencia del miembro soldado de la Ignimbrita Cantera (TICS).

TICS								
NOMBRE	SITIO	AREA(MM^2)	DE(mm2)	De (mm)	Is	F	Is(50)	UCS(Mpa)
MRPL-010	5	3000	3819.718634	61.80387232	2.890265241	1.100070597	3.179495811	57.23092459
MRPL-011	5	2827.5	3600.084813	60.00070677	2.680492406	1.085510085	2.90970154	52.37462772
MRPL-012	5	2610	3323.155212	57.64681441	2.33813936	1.066135461	2.492773285	44.86991913
MRPL-013	5	2222.5	2829.774888	53.19562847	1.130832001	1.028271202	1.162801981	20.93043566
MRPL-014	6	3300	4201.690498	64.82044814	1.278057011	1.123916148	1.436428914	25.85572045
	6	3626	4616.766589	67.94679234	1.176147829	1.147993766	1.350210375	24.30378676
MRPL-015	6	2250	2864.788976	53.52372348	2.722713633	1.03112031	2.807445326	50.53401587
	6	3000	3819.718634	61.80387232	2.547308043	1.100070597	2.802218681	50.433973626
MRPL-016	6	2000	2546.479089	50.46265044	0.57726765	1.004153309	0.579665221	10.43397398
	6	2300	2928.450953	54.1151638	2.339120617	1.036232091	2.423871848	43.62969327
MRPL-017	6	3120	3972.50738	63.0278302	0.75267324	1.109821307	0.835332799	15.03599038
MRPL-018	7	3750	4774.648293	69.09882989	1.658760921	1.156712184	1.918708967	34.53676141
	7	2682.5	3415.465079	58.44198045	2.125625598	1.072728241	2.280218609	41.04393495
MRPL-019	7	2530	3221.296048	56.75646261	1.182753756	1.058693854	1.252174133	22.53913439
	7	3219.5	4099.194714	64.02495384	1.575919284	1.117688214	1.76138641	31.70495539
MRPL-024	11	2537.5	3230.845345	56.84052555	1.597105231	1.059399189	1.691971986	30.45549576
MRPL-025	11	2357.5	3001.662227	54.78742763	2.568576814	1.042005251	2.676470528	48.17646951
	11	3675	4679.155327	68.40435167	2.301697475	1.151466154	2.65032674	47.70588131
MRPL-039	19	2362.5	3008.028424	54.84549594	1.346396852	1.042502088	1.403621529	25.26518753
	19	2712.5	3453.662265	58.76786762	4.099995574	1.075415936	4.409200578	79.3656104
MRPL-040	19	1125	1432.394488	37.84698783	4.73332931	0.882221408	4.175847644	75.1652576
	19	1312.5	1671.126902	40.87941906	3.488663842	0.913357123	3.186395969	57.35812744
MRPL-041	19	2870	3654.197493	60.44995859	4.167809766	1.089160046	4.539411876	81.70941376
	19	1600	2037.183272	45.13516668	5.208171571	0.954982187	4.973711077	89.52679938
MRPL-049	24	2365	3011.211523	54.87450704	0.773774935	1.042750201	0.806853969	14.52337144
MRPL-050	24	1904	2424.248093	49.23665396	0.305249286	0.993100812	0.303143314	5.456579654
	24	2300	2928.450953	54.1151638	0.334647913	1.036232091	0.346772907	6.241912322
MRPL-051	25	2187.5	2785.211504	52.77510307	0.775524586	1.024605278	0.794606584	14.30291852
MRPL-052	25	2127.5	2708.817131	52.04629796	1.565258854	1.01821368	1.593767979	28.68782362
	25	1942.5	2473.267816	49.7319597	0.562009497	0.997584071	0.560651722	10.09173099
MRPL-057	29	1925	2450.986124	49.50743503	4.26359003	0.995554844	4.244637707	76.40347873
MRPL-058	29	1750	2228.169203	47.20348719	1.18034124	0.974432669	1.150163064	20.70293516
	29	1725	2196.338215	46.86510658	1.429652309	0.971283077	1.388597094	24.9947477
MRPL-113	49	1682	2141.588914	46.27730453	1.830416647	0.965782035	1.767783515	31.82010327
	49	2295	2922.084755	54.05631097	1.197774977	1.035724811	1.240565261	22.33017471
	49	781	994.4000844	31.53410986	1.156476169	0.812670991	0.939834634	16.91702341
	49	920	1171.380381	34.22543471	2.347657554	0.843180465	1.979498987	35.63098176
MRPL-114	49	2702.5	3440.92987	58.65943973	0.84570163	1.074522609	0.908725522	16.35705939
	49	2520	3208.563653	56.64418463	1.767145868	1.057750883	1.869200101	33.64560182
	49	1581	2012.99172	44.86637628	1.629415545	0.952418769	1.551885948	27.93394706
	49	2001	2547.752329	50.47526453	1.150033293	1.004266254	1.154939627	20.78891329
	49	1305	1661.577606	40.76245338	2.317075041	0.912180197	2.113589969	38.04461944
MRPL-115	49	1782.5	2269.549488	47.63978892	0.907669126	0.978475421	0.88813193	15.98637474
	49	2060	2622.873462	51.21399674	2.150313418	1.010853919	2.173652747	39.12574944
	49	1485	1890.760724	43.48287851	2.438172076	0.939088942	2.289660436	41.21388785
	49	1275	1623.38042	40.29119531	4.638469153	0.907419413	4.209036958	75.76266524
	49	920	1171.380381	34.22543471	2.911095367	0.843180465	2.454578743	44.18241738
	11	1897.5	2415.972036	49.15253845	6.291463549	0.992336981	6.243251943	112.378535

A.4.- Creación del diagrama de cajas (Box plot)

Será creado a través del *software OriginPro 8 SR 0, v 8.0725 (B725)* donde se tomará el resultado de *UCS* obtenido para cada unidad volcánica, por medio de los siguientes pasos:

1. Crear un libro de datos para cada unidad volcánica.
2. Dejar el eje A(X) libre de datos.
3. En el eje B(Y), poner en la fila *Log name* el nombre de la unidad volcánica, en la fila *units* poner las unidades de *UCS* y en las siguientes filas poner los resultados obtenidos.
4. Dar click en el ícono de gráfico de cajas o *box chart* para cada libro.
5. En la gráfica donde se quieran unir los otros diagramas creados se da doble click y posteriormente se da un click en la gráfica que se quiera agregar y posteriormente volver a dar click en el ícono de gráfico de cajas.

Nota: Los diagramas de cajas finales se observan en las Figuras 27, 29 y 30 del Capítulo 4 de resultados.

Lectura del diagrama de cajas (Box Plot)

Es un diagrama basado en cuartiles, que suministra información sobre los valores máximo y mínimo, los cuartiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de los valores atípicos y la simetría de la distribución mediante el cual se visualiza un conjunto de datos. Está compuesto por un rectángulo “la caja” y dos brazos “bigotes” (www.wikipedia.org) (Figura 78).

A.5.- Cálculo de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas por el método de Bieniawski (1989) y GSI de Hoek (1997)

Se aplicó la metodología propuesta por Bieniawski, (1989), donde se ocuparon los datos obtenidos de RQD, la resistencia de la roca intacta (UCS) y los datos obtenidos de campo, esta información se procesó en una hoja creada en *excel* y automáticamente da los resultados de GSI de Hoek, cohesión, ángulo de fricción y

módulo de elasticidad (Tabla 2 y del Capítulo III de metodología), (Tabla 19 y Figuras 79 a 81)

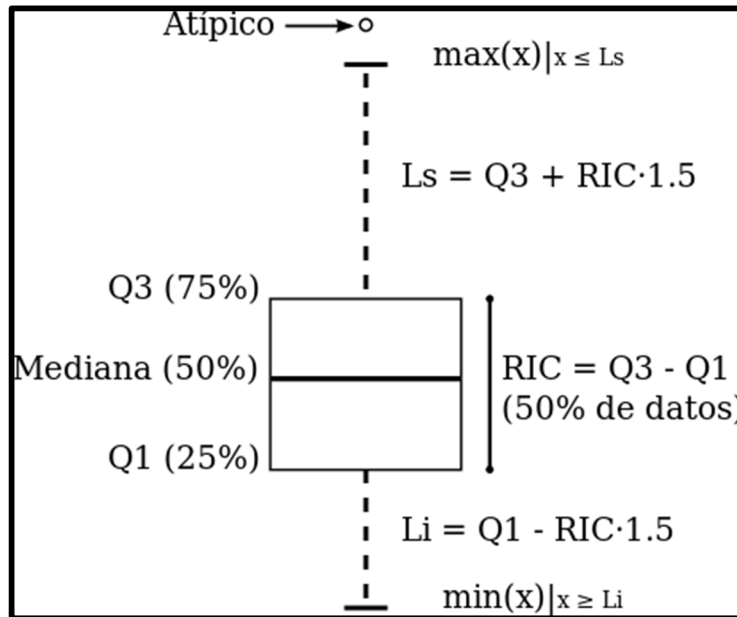


Figura 78.- Componentes del diagrama de cajas (*box plot*), tomada de (www.wikipedia.org).

Se creó un diagrama de cajas de cada uno de los parámetros, siguiendo la metodología descrita en creación de diagrama de cajas para UCS, los cuales pueden observarse en el Capítulo de IV de resultados.

Tabla 19.- Resultados sitio 1 y 2.

ROCK MASS RATING (BIENIAWSKI, 1989)									
RMR= (A1+A2+A3+A4+A5)									
A1 - resistencia de la roca intacta							Familia	Valor	
σ_c (Mpa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1	16.86545327	2
Coefficiente	15	12	7	4	2	1	0		
A2 - Indice RQD									
RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25			89	17
Coefficiente	20	17	13	8	3				
A3 - Spaziatura delle discontinuità "s"									
s (cm)	>200	60-200	20-60	6-20	<6			6.02	8
Coefficiente	20	15	10	8	5				
A4 - Condiciones de las discontinuidades									
	Muy rugoso No continuo Paredes cerradas sin alterar	Ligeramente rugosas Apertura continua <1mm Paredes ligeramente alteradas	Ligeramente rugosas Apertura continua <1mm Pared alterada	Planas o lisas Apertura continua 1-5mm Relleno <5mm	Apertura continua >5mm Relleno >5mm		Leggermente scabre Continue Apertura<1mm Pareti leggermente alterate		25
Condiciones									
Coefficiente	30	25	20	10	0				
A5 - Condiciones hidráulicas									
Condición	Seca	Húmeda	Mojada	Goteo	Flujo				
Coefficiente	15	10	7	4	0				
RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<=20				
Clase	I	II	III	IV	V				
Descripción	Muy bueno	Bueno	Medio	Malo	Muy malo				
Módulo de deformación E (Gpa)= 2RMR ₀ - 100							"C" (MPa)	0.335	
GSI = RMR-5							Φ (°)	38.5	
							E (MPa)	34000	
							GSI 1	62	
							RESULTADOS		
							RMR 1	67	

RESULTADOS, SITIO 3	
RMR 1	45
"C" (MPa)	0.225
Φ (°)	27.5
E (MPa)	-10000
GSI 1	40

A)

RESULTADOS SITIO 4, CAPA 1	
RMR 1	35
"C" (MPa)	0.175
Φ (°)	22.5
E (MPa)	-30000
GSI 1	30

B)

RESULTADOS, SITIO 4 CAPA 2	
RMR 1	25
"C" (MPa)	0.125
Φ (°)	17.5
E (MPa)	-50000
GSI 1	20

c)

RESULTADOS, SITIO 5	
RMR 1	64
"C" (MPa)	0.32
Φ (°)	37
E (MPa)	28000
GSI 1	59

D)

RESULTADOS, SITIO 6	
RMR 1	69
"C" (MPa)	0.345
Φ (°)	39.5
E (MPa)	38000
GSI 1	64

E)

RESULTADOS, SITIO 7	
RMR 1	52
"C" (MPa)	0.26
Φ (°)	31
E (MPa)	4000
GSI 1	47

F)

RESULTADOS, SITIO 10	
RMR 1	57
"C" (MPa)	0.285
Φ (°)	33.5
E (MPa)	14000
GSI 1	52

G)

RESULTADOS, SITIO 11	
RMR 1	74
"C" (MPa)	0.37
Φ (°)	42
E (MPa)	48000
GSI 1	69

H)

RESULTADOS, SITIO 14	
RMR 1	48
"C" (MPa)	0.24
Φ (°)	29
E (MPa)	-4000
GSI 1	43

I)

Figura 79.- Lámina de resultados obtenidos por medio del RMR (Bieniawski, 1989) y GSI (Hoek, 2000) de las unidades volcánicas del área de estudio.

RESULTADOS, SITIO 44	
RMR 1	79
"C" (MPa)	0.395
Φ (°)	44.5
E (MPa)	58000
GSI 1	74

R)

RESULTADOS, SITIO 45	
RMR 1	69
"C" (MPa)	0.345
Φ (°)	39.5
E (MPa)	38000
GSI 1	64

S)

RESULTADOS, SITIO 46	
RMR 1	82
"C" (MPa)	0.41
Φ (°)	46
E (MPa)	64000
GSI 1	77

T)

RESULTADOS, SITIO 48	
RMR 1	79
"C" (MPa)	0.395
Φ (°)	44.5
E (MPa)	58000
GSI 1	74

U)

RESULTADOS, SITIO 49, CAPA 1	
RMR 1	75
"C" (MPa)	0.375
Φ (°)	42.5
E (MPa)	50000
GSI 1	70

V)

RESULTADOS, SITIO 49, CAPA 2	
RMR 1	58
"C" (MPa)	0.29
Φ (°)	34
E (MPa)	16000
GSI 1	53

X)

RESULTADOS, SITIO 50	
RMR 1	72
"C" (MPa)	0.36
Φ (°)	41
E (MPa)	44000
GSI 1	67

Y)

Figura 81.- Lámina de resultados obtenidos por medio del RMR (Bieniawski, 1989) y GSI (Hoek, 2000) de las unidades volcánicas del área de estudio.

A.6.- Cálculo de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas por medio del GSI propuesto por Hoek (2000)

A la puntuación final del RMR de Bieniawski (1989), se restarán 5 puntos y se graficarán en las tablas propuestas por este autor: (Figuras 80, 81 y 82).

Apéndice B: Propiedades hidráulicas de las rocas y suelos

B.1.- Pruebas de permeabilidad

Se aplicó la metodología propuesta por Borselli *et al.*, (2013) donde se aplicó el siguiente procedimiento:

Material (Figura 82):

- 1 TDR marca
- 1 cronómetro, marca *casio*.
- 1 escala numérica de 100 cm.
- 1 galón de 3 lt para simular que es la carga constante.
- 1 galón de 5 lt para abastecer de agua el recipiente de carga constante.
- 3 bombas peristálticas, marca *SEKO*.
- 1 generador de electricidad marca *YAMAHA*, para generar corriente para trabajar las bombas peristálticas.
- Agua para hacer la prueba.
- 1 pizarrón y su marcador para poner los datos de la prueba.
- 1 cámara fotográfica, marca *SONY*, modelo DSC-W570

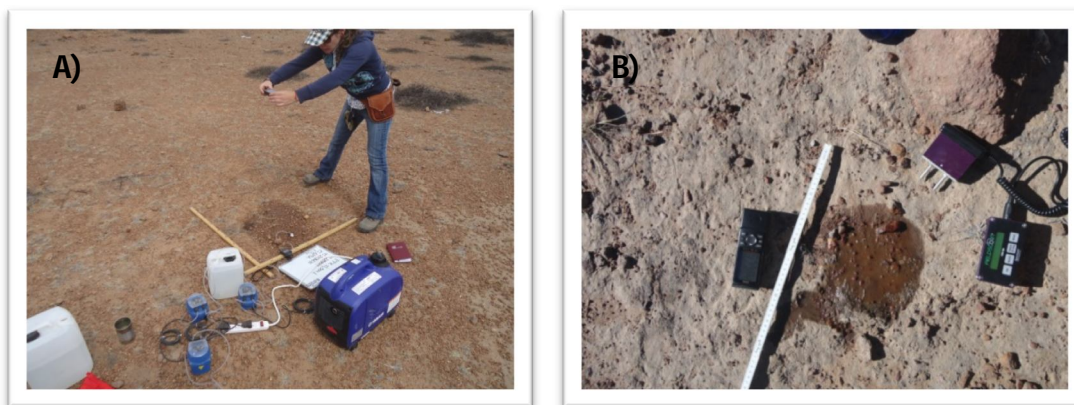


Figura 82.- Lámina de fotografías mostrando A) Material de campo en las pruebas de permeabilidad, B) TDR y área de encharcamiento.

Pruebas en campo

Esta prueba es más conveniente realizarla en las temporadas más secas del año debido a que el contenido de humedad en el suelo es la más baja. No se recomienda realizar esta prueba después de una lluvia debido a que las

condiciones húmedas se han modificado y los valores obtenidos de descarga y saturación del suelo serán muy diferentes a las condiciones normales de contenido de humedad del suelo.

Antes de comenzar la prueba

En el área que rodea el lugar donde va a hacerse la prueba usamos el TRD, marca *Fieldscout* para determinar el promedio del porcentaje de contenido de humedad en el suelo en condiciones secas hasta los 3 cm de profundidad, este método fue utilizado por Topp *et al.*, 1984.

En el lugar donde va a realizarse la prueba, no puede hacerse ningún tipo de actividad al igual que no puede ser pisado, para no interrumpir las condiciones naturales del suelo.

Poner una descarga diferente en cada bomba peristáltica, teniendo una con descarga baja (1.56 l/h), una con descarga media (2.51 l/h) y una con descarga alta (7.71 l/h) y finalmente hacemos una prueba final con las 3 descargas juntas (12.04 l/h); meter los 3 succionadores de agua en el recipiente de carga constante hasta que el agua salga por la boca de cada bomba, para sacar el aire contenido dentro de las mangueras y disminuir el tiempo transcurrido que tomaría para cada bomba en el cambio de éstas; después los sacamos; acomodamos el material cerca donde va a llevarse a cabo la prueba; la secuencia mencionada de las bombas es la secuencia que se va a seguir a lo largo de la prueba; en el pizarrón ponemos el nombre de la prueba, ubicación del lugar y la fecha; acomodamos la escala numérica de modo que pueda verse a través de la cámara.

Realización de la prueba

Acomodar la boca de la bomba y encenderla, al mismo tiempo que se inicia el conteo del cronómetro; a cada 2 minutos se procede tomar una fotografía con la finalidad de que al procesar la información de la misma permita observar a través

de una secuencia rápida de fotos la manera en cómo crece el charco a lo largo del tiempo de la prueba, al igual que con un diagrama de área vs. tiempo determinar el punto en el que el suelo llega a su saturación.

La duración del tiempo para cada bomba depende del estado de estabilidad del charco, es decir cuando observamos que el charco ya no crece, tomar una fotografía del área final formada por el charco a lo largo del tiempo, anotar los datos del tiempo en la libreta de campo, los datos obtenidos serán procesados para determinar el área de la descarga (Morel *et al.*, 1996; Al-Jabri *et al.*, 2002 Asher, 2003 y Ekhmaj y Abdulaziz, 2008). Después proceder a poner la bomba con carga media y siguiendo el procedimiento anterior, es decir tomando una fotografía a cada 2 minutos, hasta que el charco haya llegado a su estabilidad; después poner la bomba con una descarga alta siguiendo la misma metodología, finalmente se hace una última prueba juntando las tres descargas siguiendo la misma técnica, esto lo hacemos con la finalidad de tener una mayor cantidad de puntos para comprobar el comportamiento del suelo con la presencia de agua a través del procesamiento de las fotografías en el laboratorio y análisis de las gráficas generadas debido a su comportamiento.

Procesamiento de fotografías

Antes de comenzar el procesamiento de imágenes, crear una base de datos general en *excel* de cada prueba llevada a cabo en campo, en la cual también se agregará una columna donde se anotarán las áreas de las fotografías tomadas a cada dos minutos.

Este procesamiento se llevó a cabo por medio del *software ImageJ*, versión 1.45s y se hará en todas las fotografías tomadas a cada 2 minutos, incluyendo las áreas finales de cada charco, siguiendo los pasos:

1. Abrir la fotografía en este programa.
2. Calibrar la imagen, metodología mencionada en el paso 3 de procesamiento de imágenes en *ImageJ* para determinar el tamaño de fragmentos y distribución de las discontinuidades.

3. Seleccionar el comando *polygon* y dibujar el área de encharcamiento hasta cerrar el polígono.
4. Dar *CTRL+m* para que observe el resultado del área de encharcamiento y anótarlo en la base de datos.

Procesamiento de los resultados obtenidos de las áreas de las fotografías

Este procesamiento se llevó a cabo en *excel* graficando el resultado obtenido de las áreas procesadas en *ImageJ*, contra el tiempo de duración de cada descarga hasta el encharcamiento estable. Se tomó una base de datos tomada de Borselli *et al.*, (2013) y modificada para cada descarga tomando en cuenta:

1. Tiempo absoluto que corresponde al tiempo total (hr) de cada fotografía tomada en el tiempo correspondiente.
2. Tiempo 0, el cual al inicio de cada descarga su valor será cero para que la gráfica obtenida de la duración de la descarga comience en cero, siendo para las siguientes descargas de una prueba el tiempo absoluto del fin de la descarga anterior.
3. Tiempo parcial, que se obtiene por medio de la Ecuación 9:

Ecuación 9: Cálculo del tiempo parcial

$$\mathbf{T_{tiempo\ parcial\ (hr)} = T_{tiempo\ absoluto(hr)} - T_{tiempo\ 0(hr)}}$$

4. Agregar una columna llamada área observada, ésta es el área obtenida del dibujo hecho en *ImageJ*.
5. Agregar una columna llamada área calculada, en la cual el resultado obtenido se obtendrá por medio del procesamiento del cálculo del área de la asíntota
6. Agregar una columna que se llamará error, el cual corresponde a la diferencia obtenida del área dibujada y el área calculada, se calcula por medio la suma del error correspondiente a las variables A, B y C, de la asíntota
7. Agregar una columna en la que se calcule el porcentaje del error.
8. Agregar una columna que corresponda al valor absoluto del error expresado en porcentaje.
9. Agregar una columna que se llame superficie, que se obtiene con el cálculo del radio equivalente en mm, por medio de la Ecuación 10:

Ecuación 10: Cálculo del radio equivalente

$$\mathbf{r(mm) = \left(\frac{\text{área}}{\pi}\right)^{0.5} * 10}$$

10. Al haber tenido éstas columnas, graficar en un diagrama de dispersión el tiempo parcial en el eje X y el área observada y calculada en el eje Y.
11. Crear 3 campos donde se aplicará la fórmula de la asíntota de la Ecuación 11:

Ecuación 11: Asíntota

$$A - B * C^t$$

Que serán A, B, C; designado a la variable A de manera aleatoria con base en el área final de cada prueba; B se calcula por medio de la Ecuación 12:

Ecuación 12: Cálculo del campo B de la ecuación de la asíntota

$$\text{Área observada final}(cm) - \text{Área observada inicial}(cm)$$

Tomando en cuenta al cambiar la descarga en cada prueba que el área observada inicial se considera la última descarga previa el $t=0$.; la variable C corresponde a la curvatura de la asíntota. Estos datos se designan de manera aleatoria hasta encontrar el error mínimo, especificado en el siguiente punto.

12. Crear un campo que se llama suma error, donde se calculará el error mínimo de las variables A, B y C de la asíntota. Éste se procesa al poner valores aleatorios en los campos de la asíntota.
13. Para procurar que la asíntota sea más exacta es decir intersekte los puntos de los gráficos o pase más cerca de ellos, en el campo A, B y C se buscarán los resultados aleatorios más bajos; cuando se haya encontrado éstos en el campo de suma error aplicar *Solver* de *Microsoft Office, excel* en el modo evolucionario, para encontrar el error mínimo.

Este procedimiento se seguirá para descarga en cada prueba realizada en campo, tomando en cuenta en las descargas 2, 3 y 4 los valores de cada columna obtenidos en el fin de cada descarga. Se generará una base de datos para cada prueba.

Procesamiento de los resultados de las áreas finales para cada descarga

Este procedimiento se tomó una base de datos propuesta por (Asher *et al.*, 2003; Al- Jabri *et al.*, 2005), por medio de los siguientes pasos:

1. Se ocuparán las áreas finales de cada descarga obtenidas del procesamiento de los polígonos dibujados en *ImageJ*.
2. En la base de datos creada para con las descargas para cada prueba, generar una pestaña adicional una base de datos en la que se ponga el nombre de la prueba y las descargas correspondientes a esta.
3. La columna del tiempo de descarga según bomba, corresponde al tiempo (h) que tardó cada descarga al llenar un recipiente cilíndrico con un volumen de 0.33862 lt.
4. La columna del tiempo total (h), corresponde al tiempo final cuando el charco llegó a su estado estable.
5. La columna de área (cm²), corresponde al área del fin de la descarga de cada prueba obtenida de la variable A del cálculo de la asíntota.
6. La columna de descarga Q (l/h), se obtiene de la Ecuación 13:

Ecuación 13: Cálculo de la descarga

$$\text{volumen del cilindro} / \text{tiempo de descarga según bomba}$$

7. El radio equivalente se toma de la columna de superficie, descrita en el paso 8 del procesamiento de los resultados obtenidos de las áreas de las fotografías.
8. La columna de portada medida, corresponde a la descarga del paso 6 de éste procedimiento multiplicando el valor por 1000 para que sea una descarga de cm³/h.
9. La columna de radio equivalente corresponde al paso 8 del procesamiento de los resultados obtenidos de las áreas de las fotografías, haciendo la conversión para obtener el valor en cm.
10. La columna de 1/r, se obtiene de la Ecuación 14:

Ecuación 14: Cálculo de 1/r

$$\frac{1}{r} = 1 / \text{radio equivalente (cm)}$$

11. La columna de densidad de flujo q (cm/h), se obtiene por medio de la Ecuación 15:

Ecuación 15: Cálculo de la densidad de flujo q

$$q = \text{portada medida } \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{h}} \right) / \text{área (cm}^2)$$

12. Las columnas Θ_{ini} corresponde al valor obtenido por medio del *TDR* antes de iniciar la prueba (condiciones secas) y Θ_{final} , al resultado obtenido del charco al haber terminado la prueba (condiciones húmedas)

13. El valor de la columna delta Θ , se obtiene por medio de la Ecuación 16:

Ecuación 16: Cálculo del contenido de humedad del suelo (Delta Θ)

$$\mathbf{Delta \theta = \theta_{final} - \theta_{ini}}$$

14. El valor de la columna de densidad de flujo calculada (DFC) se obtiene a través de la Ecuación 17:

Ecuación 17: Fórmula de la densidad de flujo calculada

$$\mathbf{DFC \left(\frac{cm}{h} \right) = (Ks/10) + ((4 * (Ks/10 * G * \mathbf{delta \theta} / 10)) / (PI() * \mathbf{radio eq}))}$$

Donde:

- Ks: Conductividad hidráulica (mm/h).
- G: Carga capilar (mm).

15. El resultado correspondiente al valor absoluto, se obtiene a través de la Ecuación 18:

Ecuación 18: Cálculo del porcentaje absoluto del error

$$\mathbf{ABS \ error = \ densidad \ de \ flujo \ q \left(\frac{cm}{h} \right) - DFC \left(\frac{cm}{h} \right)}$$

16. Crear una columna que corresponda al porcentaje del error, obtenido en el paso anterior.

17. Crear una columna que corresponda a la sumatoria del error, sumando los valores de la columna del error absoluto Error (abs).

18. Al haber terminado de llenar las columnas, en los campos de Ks y G poner valores aleatorios correspondientes a un suelo volcánico en un clima semidesértico propuesto por Vieux, (2004) hasta que en el campo de la suma del error sea mínimo, al haber llegado a este punto en este campo aplicar la función *solver de Microsoft Office, excel*, con la opción de mínimo y en modo evolucionario.

19. Crear un diagrama de dispersión en el que se grafiquen los resultados obtenidos de $1/r$ para el eje X y los valores de la densidad de flujo q, en el eje Y. Para observar el comportamiento del encharcamiento.

20. Al haber creado este diagrama crear otro del mismo tipo al paso anterior en el que se grafiquen los valores obtenidos de la densidad

de flujo calculada en el eje X contra la densidad de flujo q . En este punto los valores buscados aleatorios de K_s y G del paso 18 de este procedimiento se buscarán hasta que los puntos de las descargas tengan un comportamiento lineal a 45° entre los vértices X y Y.

Nota: los resultados obtenidos pueden observarse en las Figuras 33 a 46 del apartado de pruebas de permeabilidad del Capítulo 4 de resultados.

B.2.- Análisis granulométrico de suelos

Material:

- Báscula de precisión.
- Bolsas pequeñas de muestreo con cierre de tipo *zip-lock*.
- Marcador de aceite
- Horno.
- Charolas.
- Tamices con mallas en tamaño -4 a >4 phi.
- Brocha.
- Cartulinas.
- Hoja o base de datos.
- *Ro-tap*

Procedimiento

Para determinar la cantidad de arcillas de éstos, se hizo un análisis granulométrico de cada una de las muestras obtenidas en campo; que va desde -4ϕ para el tamaño más grande de granos en las muestras, hasta los granos más finos que pasan el tamaño 4ϕ (limos y arcillas) (Figura 83, A).

Para los granos más finos, es decir los del tamiz del fondo, se aplicará el método de las pipetas descrito por Smith, (1981) y Gee, (1986) para determinar el porcentaje del contenido de arcilla y limos que se encuentran en cada muestra de suelo.

1. Este análisis, se inicia pesando las charolas (W_1) donde se colocarán las muestras, anotando el peso obtenido de cada recipiente en una base de datos para su posterior cálculo.
2. Secar las muestras en el horno a 35°C durante 24 horas, con la finalidad de que los granos que se encuentran unidos por capilaridad se separen completamente y lleguen al tamaño del tamiz que les corresponde.
3. Al sacar las muestras del horno, pesar cada muestra (W_2) y anotarlo en la base de datos.
4. Acomodar los tamices en tamaño decreciente, es decir de -4ϕ a $>4 \phi$.
5. Vaciar la muestra en los tamices y cribarlos por 1 minuto.
6. Al haber vaciado el material, observar la cantidad de bolsas de muestreo que se requerirán para cada tamiz, pesar cada una de ellas y anotarlo en la base de datos, etiquetarlas con el tamaño de cada malla.
7. Poner una cartulina donde se vaciará el material de cada tamiz.
8. Tomar la malla a partir del diámetro mayor y en forma decreciente, cribarlo sobre la cartulina, sin pasar los bordes de ésta, hasta que ya no caiga material de la mall (Figura 83, A).
9. El material que pasó por el tamiz al haber sido cribado, devolverlo a la torre de tamices desde el de mayor tamaño.
10. Limpiar el tamiz ocupado sobre la torre de tamices con una brocha, para tratar de recuperar tanto material como se pueda.
11. El material retenido en el tamiz, vaciarlo en la cartulina y después vaciarlo a la bolsa de muestreo, con la etiqueta correspondiente a esa malla.
12. Pesar la bolsa de muestreo con el material y anotar el dato obtenido en la base de datos (Figura 83, B).
13. Cuando se llegue al tamiz no. 3ϕ , acomodar la torre de tamices en el ro-tap, por 5 minutos para que cribe los tamices y los granos lleguen al tamaño de la malla que les corresponde.
14. Para cada tamiz, se seguirán los pasos 4 al 12, hasta que la muestra se termine.

Por cada muestra se seguirán los pasos 1 al 13.



Figura 83.- Lámina de fotografías: A) Tamizado de muestras y B) separación y pesado de muestras por tamaño de grano.

Cálculo de datos obtenidos

Crear una base de datos en *excel*, donde se anotarán los datos obtenidos del material retenido en el tamiz, acomodando por filas el nombre de la muestra, peso de la charola, peso de la muestra después de secarse, peso total de la muestra, número de malla, apertura de la malla en mm, el peso retenido en cada una de éstas, peso de las bolsas por cada malla, peso neto de la muestra, porcentaje retenido en cada malla, porcentaje acumulado del retenido de cada malla y el porcentaje acumulado del pasante de cada malla; ejemplo:

Para el cálculo total de la muestra se utilizó la *Ecuación 19*.

Ecuación 19: Cálculo del total de la muestra

$$W_{mt} = W_{ms} - W_{ch}$$

Donde:

- W_{mt} : Peso de la muestra total (gr).
- W_{ms} : Peso de la muestra después de secarse (gr)
- W_{ch} : Peso de la charola (gr)

El peso retenido en cada malla se anotará en el número de cada tamiz y apertura en mm.

Cálculo del peso neto del material retenido en cada tamiz, se hará restando el peso retenido en cada malla menos el peso de la bolsa, según lo muestra la

Ecuación 0:

Ecuación 20. Peso neto del material retenido en cada tamiz

$$W_n = W_{ret} - W_{bol}$$

Donde:

- W_n : Peso neto del material retenido en la malla (gr).
- W_{ret} : Peso retenido en la malla con bolsa (gr).
- W_{bol} : Peso de la bolsa (gr).

Para determinar el peso neto total de la muestra por cada malla; se hace una sumatoria del peso neto de cada tamiz, tal como se muestra en la Ecuación 21:

Ecuación 21. Peso neto total de la muestra por cada malla

$$W_{nt} = W_{n-5} + W_{n-4} + W_{n-3} + W_{n-2} + W_{n-1} + W_{n0} + W_{n1} + W_{n2} + W_{n3} + W_{n4} + W_{fondo}$$

Donde:

- W_{nt} : Peso neto total de la muestra por cada malla (gr).

El cálculo de la pérdida durante el proceso de tamizado se calcula por medio de la resta del peso de la muestra total (W_{mt}) menos el peso total de la muestra por cada malla (W_{nt}) (Ecuación 22).

Ecuación 22. Cálculo de pérdida de muestra en gr

$$Pédida (gr) = W_{mt} - W_{nt}$$

El cálculo del porcentaje parcial retenido en cada tamiz ($W_{\%Rx}$) se calculó con base en la Ecuación 23:

Ecuación 23. Cálculo del porcentaje parcial retenido por cada tamiz ($W_{\%R}$)

$$W_{\%Rx} = \left[\frac{W_{NTx}}{W_{MT}} \right] * 100$$

Donde:

- $W_{\%Rx}$: Porcentaje parcial de muestra retenida por el tamiz x
- W_{MT} : peso neto de la muestra ya tamizada (en gr)
- W_{NTx} : peso neto de la muestra retenida en cada tamiz (en gr)

Con base en el porcentaje parcial retenido ($W_{\%Rx}$) se calculó el porcentaje acumulado retenido ($W_{\%ARx}$) partiendo del tamiz de mayor apertura; el cálculo se resume con la *Ecuación 24*.

Ecuación 24. Cálculo del porcentaje acumulado retenido ($W_{\%AR}$)

$$W_{\%ARx} = W_{\%Rx} + W_{\%Rsup}$$

Donde:

- $W_{\%ARx}$: Porcentaje acumulado retenido para en el tamiz x
- $W_{\%Rx}$: porcentaje de muestra retenida por el tamiz x
- $W_{\%Rsup}$: suma de los porcentajes de muestras retenidas por los tamices previos al tamiz x

Con los datos previos, se calculó el porcentaje acumulado del material que logra pasar de un tamiz a otro ($W_{\%AP}$) o material pasante por medio de la aplicación de *Ecuación 25*.

Ecuación 25. Cálculo de porcentaje acumulado de material pasante ($W_{\%AP}$)

$$W_{\%APx} = 100 - W_{\%ARx}$$

Donde:

- $W_{\%APx}$: porcentaje acumulado de material pasante para el tamiz x
- $W_{\%ARx}$: Porcentaje acumulado retenido para en el tamiz x

Para el material contenido en la base de los tamices (W_{Base}), fueron calculados los porcentajes de limos y arcillas por medio del método de pipeta que será descrito con posterioridad. Para dichos valores también se calculó el porcentaje parcial retenido ($W_{\%RBase}$), el porcentaje acumulado retenido ($W_{\%ARBase}$) y el porcentaje acumulado de material pasante ($W_{\%APBase}$).

Creación de la curva granulométrica

Se usa una hoja semilogarítmica, en donde los datos del eje X será la apertura en mm de cada malla y los datos del eje Y será el porcentaje acumulado del pasante (%ap).

Se graficarán los resultados obtenidos de del porcentaje acumulado del pasante (%ap) y se obtendrá una curva granulométrica.

Si esta curva se crea en una hoja *excel*, se harán los siguientes pasos:

1. Se insertará y escogerá un gráfico de tipo de dispersión, XY.
2. Al haber escogido el gráfico, sobre el diagrama se da click derecho, seleccionar datos y ahí aparece un recuadro llamado seleccionar origen de datos, en la opción agregar se da click y aparece tres opciones:
3. Nombre de la serie: Ahí se pone el nombre que se le quiera dar al gráfico.
4. Valores X de la serie: Se selecciona la opción de *browse* y se escogen los datos de apertura de la malla, se da enter.
5. Valores de la serie Y: Se selecciona la opción de *browse* y se escogen los datos del porcentaje acumulado del pasante (%ap), dar enter.
6. Al haber seleccionado el nombre, los valores de X y Y, se da click en la opción aceptar. Al haber hecho esto sale un gráfico.
7. Para dar el formato logarítmico, se selecciona el eje X y se da click derecho, se escoge la opción dar formato al eje, sale un recuadro con varias opciones y escogemos opciones del eje; en la opción “mínima” damos click en “fija” y ponemos la numeración a partir de 0.001; en la opción “máxima” damos click en “fija” y ponemos 100; escogemos la opción “escala logarítmica” y nos fijamos que este en base a 10; después en ese mismo recuadro nos vamos a la opción “número”, en “categoría” escogemos la opción de general y dar *enter*.
8. Para dar formato al eje Y, seleccionamos el eje, damos click derecho, en “opciones del eje”, en la opción “mínima” damos click en “fija” y ponemos el valor de 0; en la opción “máxima” damos click en “fija” ponemos el valor de 100; en la opción “etiquetas del eje damos click y escogemos la opción de alto. En el menú general del recuadro, damos click en la opción de “número”, en “categoría” escogemos la opción de “general” y damos *enter*.
9. Para poner las líneas de división secundarias, nos vamos al menú principal de la página de *excel* y escogemos en diseños de gráfico la opción del diseño 10. Ya seleccionado y terminado el gráfico, en las opciones de “título del eje” ponemos el nombre de los dos ejes. Quedando el gráfico de la curva granulométrica (Figura 84). (ver tutorial en www.youtube.com/watch?v=zE6QqD1GcvE).

Tabla 20.- Resultados del pasante de las muestras de suelos para la construcción de las curvas granulométricas.

NOMBRE	PASANTE											
		19	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.0625	0.0039	> 0.0039
MSG-020	100	100	97.3859712	94.1884006	91.3093962	78.2422294	55.0762177	35.417411	29.5998571	17.0894367	4.27235917	0
MSG-021	100	100	92.3342845	83.368086	77.7875329	69.4907814	64.1352063	59.2844601	56.5737489	33.5272169	5.02908253	0
MSG-026	100	100	100	99.871541	98.0249425	87.6465236	73.0503666	52.4326928	45.0998234	23.1279773	4.62559547	0
MSG-027	100	100	98.8664216	95.6556373	93.2230392	84.1237745	70.1531863	48.6029412	39.877451	16.8443627	5.89552697	0
MSG-037	100	100	88.2122671	66.642034	55.0859813	40.3563083	31.5524576	25.6665801	23.683317	15.4946174	2.32419262	0
MSG-038	100	100	98.156362	96.5927419	95.0806452	89.3615591	79.3055556	63.3333333	55.8982975	30.2688172	6.05376344	0
MSG-047	100	100	97.3020552	93.6522558	89.8591665	78.3345615	60.9248342	39.9901744	32.0703349	14.2819127	3.57047818	0
MSG-048	100	100	96.9493038	92.4169471	89.0632262	79.3961815	61.9936421	38.3112417	30.0998308	10.864271	1.62964065	0
MSG-053	100	100	98.9036449	95.9248686	92.6123592	83.118889	66.4156772	42.8750707	34.1718037	16.0688428	2.41032643	0
MSG-056	100	100	98.9647693	93.7146707	89.5721046	73.8776785	51.7681083	30.223807	23.5194558	10.3358749	2.06717497	0
MSG-059	100	100	98.6408432	94.6922725	92.3394465	85.61056	66.5317844	35.7884088	26.4293173	11.1604229	2.79010573	0
MSG-060	100	95.8589015	86.4906072	79.9439069	77.3312502	68.0627188	46.9092346	24.5303618	17.4697888	7.24127546	1.08619132	0
MSG-061	91.4485087	78.6561621	65.8458075	59.3157006	56.2521103	48.2093416	34.9915588	21.773776	17.3190771	8.5042206	1.27563309	0
MSG-069	100	100	99.0367296	95.2521732	89.0144099	72.2198293	54.0860678	32.9332759	25.7733573	10.0693085	3.52425797	0
MSG-070	79.8367316	30.2701792	13.8778109	10.9663165	9.94027224	8.25516299	6.74605404	4.66026325	3.90009174	1.52221536	0.25370256	0
MSG-071	100	100	89.2604948	83.5791577	79.8909454	70.3266557	57.6786954	42.6007146	36.6230335	19.6162769	6.86569691	0
MSG-072	100	100	90.5296027	86.2175932	82.3246641	73.2671844	62.2765931	46.8096471	39.7982662	20.0973746	5.02434364	0
MSG-085	85.9363795	76.4750595	62.5075295	54.7184694	49.9182514	39.8402318	29.3004044	16.6250753	12.983679	6.25878438	0.62587844	0
MSG-106	100	100	99.5018179	93.9309188	89.3738638	76.3214935	58.6334079	36.54384	29.6234792	13.7253531	2.74507062	0
MSG-121	100	98.0908315	83.0712906	69.2736175	62.6723867	50.9433538	39.1289699	23.0672477	18.0225506	7.31773056	2.19531917	0
MSG-122	93.6368141	76.2479421	62.3163851	55.5072487	53.9264421	50.3971996	41.5405271	24.7494526	19.1662804	7.01852533	1.75463133	0
MSG-123	100	73.8821487	56.1737212	50.4004918	47.6757011	42.6003942	36.24496	24.5628944	19.8275083	8.67882908	3.03759018	0
MSG-124	100	100	99.3180873	96.5197505	94.2848233	86.4802495	66.4324324	41.7276507	36.1642412	18.2577963	2.73866944	0
MSG-125	100	96.7212779	86.038262	73.3601263	70.4053805	64.6968361	54.2742316	35.8608952	28.6595993	11.4109373	2.85273432	0

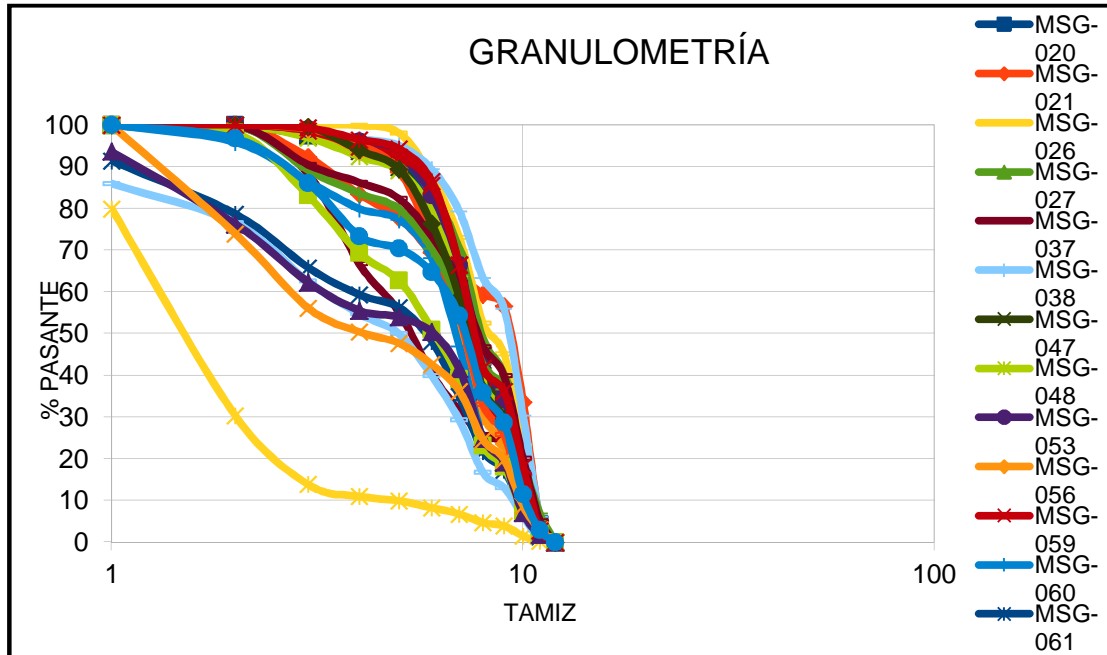


Figura 84.- Curvas granulométricas de las muestras de suelos del área de estudio.

B.3.- Análisis de finos

Las muestras de suelo fueron analizadas en el sentido granulométrico y se estimó el porcentaje en componentes finos. El total de la muestra que pasó el tamiz 4ϕ (W_{Base} : partículas inferiores a 0.063 mm) fue estudiada con base en el método de pipeta descrito por Smit (1981) y Gee *et al* (1986) con procedimiento siguiente:

1. Se realizó una solución de 50 gm de *calgon* ($Na_6P_6O_{12}$) en 1000 ml de agua (solución de 5% de hexametáfosfato de sodio). Esta solución actúa como dispersante y separa los agregados en las partículas de arcilla.
2. En un envase de vidrio convencional se agregaron 100 ml de *calgon* y 10 gr de muestra de suelo de W_{Base} (con partículas inferiores a 0.063 mm: MS_{Base}).
3. Se agitaron de manera mecánica por 5 minutos para garantizar la distribución uniforme de la muestra en el dispersante.
4. Fueron colocados los envases previamente agitados en un vibrador ultrasónico por 30 minutos para garantizar que los agregados de arcilla fueran separados.

5. En tanto los envases de vidrio se mantenían en el agitador ultrasónico se llenó una probeta graduada con 1000 ml de agua destilada (Prob).
6. Una vez que se cumple la agitación ultrasónica el contenido de los frascos con dispersante y muestra se vacían en las probetas con agua destilada
7. El contenido de la probeta se agita por 5 minutos y de manera posterior se deja reposar para que se asienten las partículas de la muestra por un lapso de 3 horas con 51 minutos (Smith, 1981, Gee and Bauder, 1986, Jackson, 2005) para una temperatura promedio de 23°C.
8. Una vez diferenciadas las partículas de suelo en la probeta por medio de la gravedad, se toma una muestra de 20 ml por medio de una pipeta graduada a una profundidad de 5 cm (Pipet) y se coloca en un frasco de vidrio previamente lavado, secado y pesado.
9. El frasco con los 20 ml se coloca en un horno a una temperatura de 105°C por un periodo de 18 hrs para que el agua se evapore y sólo queden los restos de la arcilla.
10. El frasco con los restos de arcilla es pesado y la diferencia entre el valor previo del mismo frasco proporciona la masa de arcilla contenida en el envase (DMA). Este valor es aplicado en la Ecuación 26 para obtener la masa de arcilla en la muestra de suelo.

Ecuación 26: Masa de arcillas en muestra (MA_m):

$$MA_m = DMA * \left(\frac{\text{Prob}}{\text{Pipet}} \right)$$

Donde:

- DMA: diferencia de peso en gramos del envase donde se colocaron los 20 ml de solución extraída a 5 cm de profundidad de la probeta (paso 8) antes de la aplicación de la muestra y una vez que es extraído del horno de secado.
- Prob: 1000 ml de agua destilada en la probeta donde se diluye el dispersante con la muestra de suelo
- Pipet: 20 ml de muestra que se obtiene por medio de una pipeta

El valor obtenido en la masa de arcilla contenida en muestra (MA_m) corresponde a la proporción de arcillas en una muestra de 10 mg que de manera previa se diluyó en el dispersante y después en 1000 ml de agua destilada en una probeta. Con base en la Ecuación 27, se obtiene el factor de multiplicación (F) que permitirá el cálculo del total de arcillas en la muestra de suelo.

Ecuación 27. Factor de multiplicación (F)

$$F = \frac{TMS_{<4\phi}}{MS_{<4\phi}}$$

Donde:

- $TMS_{<4\phi}$: Peso total en gramos de la muestra tamizada de suelo con partículas menores a 0.063 mm (limos y arcillas)
- $MS_{<4\phi}$: Peso en gramos de la muestra de suelo con partículas menores a 0.063 mm que fue disuelta en el dispersante (paso 2)

El valor de F fue multiplicado por MA_m y el producto dividido entre el peso total de la muestra de suelo recolectada en campo para determinar el total de arcillas según la aplicación de la Ecuación 28.

Ecuación 28. Total porcentual de arcillas en muestra de suelo (T%Ams)

$$T\%Ams = \frac{F * MA_m}{TMS}$$

Donde:

- F: Factor de multiplicación obtenido con la relación del peso neto de las muestras sin bolsa/peso de la muestra de finos para dilución.
- MA_m : Masa de arcillas en muestra, obtenido por medio de la relación de la diferencia de peso (masa de la muestra colectada)/cantidad de agua destilada*muestra recolectada para horno.
- TMS: peso total en gramos de la muestra de suelo recolectada en campo

El valor porcentual obtenido en la ecuación anterior, fue multiplicado por el valor de W_{fondo} para determinar el peso en gramos correspondiente a la arcilla retenida en la base de los tamices y también restado al $W_{\%RFondo}$ para determinar el porcentaje de arcillas en la muestra de suelo.

Tabla 21.- Resultado de contenido de arenas, limos, arcillas y esqueleto (gravas) de las muestras de suelo del área de estudio.

NOMBRE	% ARENAS	% LIMOS	% ARCILLAS	SUMA DE PORCENTAJES DE ARENAS + LIMOS + ARCILLAS	% GRAVAS (ESQUELETO)
MSG-020	68.5737767	26.8902516	4.535971678	100	5.811599381
MSG-021	32.1398012	61.8278154	6.032383334	100	16.63191396
MSG-026	54.8421673	40.5262876	4.631545099	100	0.128459027
MSG-027	58.3114471	35.5252706	6.163282301	100	4.344362745
MSG-037	64.4618935	32.050529	3.487577547	100	33.35796601
MSG-038	42.1299195	51.6027737	6.267306756	100	3.407258065
MSG-047	65.7559398	30.4315753	3.812484973	100	6.347744207
MSG-048	67.4303991	30.806244	1.763356936	100	7.583052927
MSG-053	64.3764916	33.1107852	2.512723195	100	4.075131356
MSG-056	74.9031229	22.8910592	2.205817889	100	6.285329302
MSG-059	72.0892565	24.9642457	2.946497803	100	5.307727451
MSG-060	78.1474418	20.4938664	1.358691813	100	20.05609306
MSG-061	70.8018671	27.0475504	2.150582521	100	40.68429938
MSG-069	72.9419745	23.3581016	3.699923948	100	4.747826768
MSG-070	64.4357179	33.250811	2.31347106	100	89.03368346
MSG-071	56.1816193	35.6037766	8.214604101	100	16.42084229
MSG-072	53.8397389	40.3327456	5.827515547	100	13.78240684
MSG-085	76.2718528	22.5843315	1.143815689	100	45.28153056
MSG-106	68.4624833	28.6150811	2.922435611	100	6.069081247
MSG-121	73.983529	22.8474159	3.169055184	100	30.72638246
MSG-122	65.4706712	31.3682437	3.161085035	100	44.49275131
MSG-123	60.6600897	33.3130045	6.02690583	100	49.5995082
MSG-124	62.531771	34.6308103	2.837418688	100	3.48024948
MSG-125	60.9330016	35.1783269	3.888671493	100	26.63987369

Apéndice C: Análisis geomorfológico

C.1.- Creación del modelo digital de elevación (MDE)

Material

- Base de datos de curvas de nivel del mapa topográfico del área de estudio.
- *Landserf* versión 2.3.
- *Arc map* versión 9.3.

Procedimiento

1. Cargar la base de datos de las curvas de nivel en el *software Landserf*.
2. Crear un filtro de datos al 50%, debido a la cantidad de datos.
3. En *Landserf* abrir la carpeta con los datos obtenidos del filtro, saldrá la imagen *raster* y guardarla como *.asc* (Figura 85).
4. En *Arc map*, elegir la opción *a new empty map*, al haber creado esta carpeta nueva, elegir la opción *add data*, buscar la imagen *raster* guardada como *.asc* en *Landserf*, oprimir *add* verificar que *Z* tenga un valor de 1.
5. Al haber creado el modelo, dar doble click sobre la hoja del modelo; se abrirá el menú de opciones; en *symbology*, seleccionamos la escala de colores de grises; en *Z* ponemos el valor 1, para que pueda observarse una escala vertical. Guardarlo.

C.2.- Creación de polígonos con base en las imágenes de satélite

Se dibujaron polígonos sobre imágenes de satélite, tomadas de *Google Earth* de 32 bits, multitemporales para cada peligro observado en el área de estudio, algunos de ellos fueron tomados del mapa de riesgos de S.L.P., publicado por Protección Civil del Gobierno del Estado en el 2012.

Se eligieron colores de manera aleatoria para diferenciar cada peligro observado en el área de estudio, los cuales fueron (Figura 86):

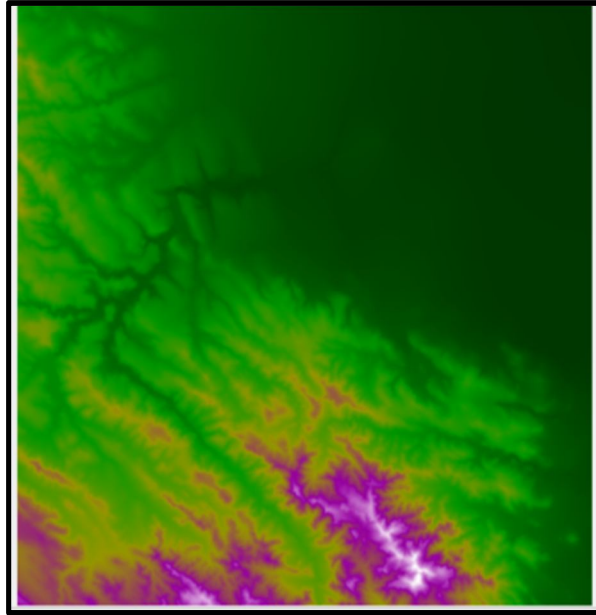


Figura 85.- Imagen ráster del área de estudio.

- **Amarillo:** Es el color que se utilizó para marcar los procesos de erosión del suelo residual por efecto de la escorrentía de la lluvia llegando a generar cárcavas.
- **Azul:** Es el color que se utilizó para marcar los flujos de escombros que han sido generados por las fuertes lluvias y pequeños movimientos tectónicos.
- **Naranja:** Es el color que se utilizó para marcar el drenaje de los ríos de la Sierra de San Miguelito.
- **Negro:** Es el color que se utilizó para marcar las presas que se encuentran en la Sierra de San Miguelito y que abastecen de agua potable a una parte de la población del estado de San Luis Potosí y algunas localidades.
- **Rojo:** Es el color que se utilizó para marcar zonas de caída de bloques de los afloramientos de las rocas volcánicas de la Sierra de San Miguelito.
- **Rojo carmín:** Es el color que se utilizó para marcar los lugares que se encuentran en peligro causado por la volcadura de bloques debido los afloramientos de las rocas volcánicas de la Sierra de San Miguelito.
- **Rosa:** Es el color que se utilizó para marcar zonas que se encuentran en peligro generado por inundación del drenaje de los ríos de la Sierra de San Miguelito.
- **Verde:** Es el color que se utilizó para marcar los abanicos aluviales generados por las lluvias en la Sierra de San Miguelito.

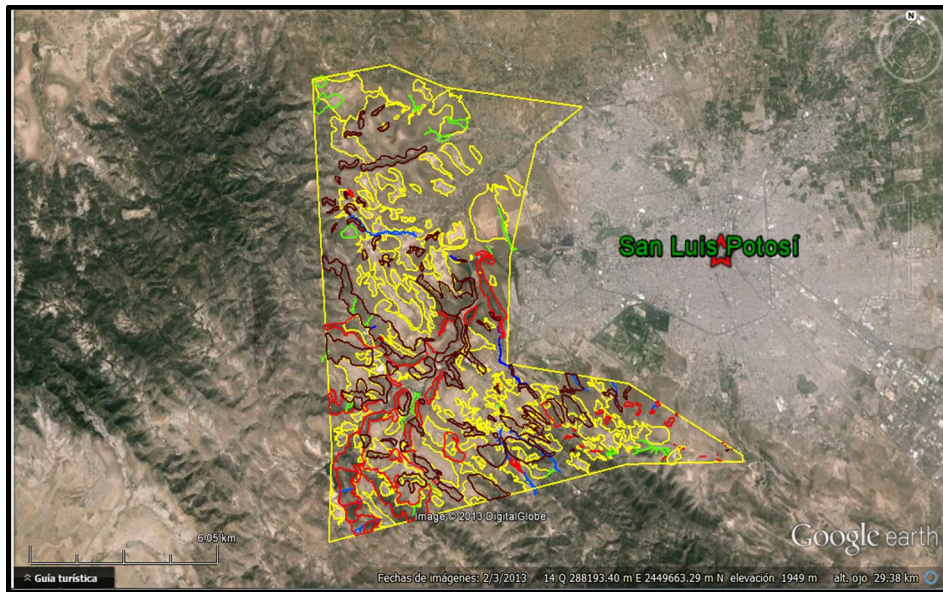


Figura 86.- Peligros observados en el área de estudio.

Para crear polígonos:

1. Abrir el programa *Google Earth*, en el menú principal, seleccionar herramientas, dar click en opciones, aparece una ventana en la que se busca la opción terreno, en exagerar la elevación ponemos 0.01, para que la vista sea solamente aérea y los polígonos tengan una mayor precisión y no se muevan conforme al relieve.
2. Al encontrar un peligro observado, en el menú secundario escogemos la opción polígono
3. Poner nombre que identifique ese peligro, en la pestaña estilo color, seleccionar el espesor de la línea de contorno y el color; en la opción área, escogemos la opción contorno.

Esta metodología se seguirá para cada peligro observado.

C.3.- Creación del modelo de pendientes

Material

- *Arc map*, versión 9.3.

Procedimiento

En el *software Arc map*, en el menú principal, dar click en la opción *spatial analyst*, escoger la opción *surface analysis*, escoger la opción *slope*.

Nota: En este menú, verificar que en *layer* se encuentre la capa sobre la que se creará el modelo de pendientes.