



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil

“Modelación y caracterización física 3D, mediante prospección geofísica del deslizamiento de Trigales Altos, Cuenca-Ecuador”

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Civil

Autor:

Leonardo Xavier Palacios Guzmán
C.I. 0104626841

Director:

Ing. Benigno Alfredo Vázquez López MSc.
C.I. 0101815892

Cuenca – Ecuador
2019



RESUMEN

En Azuay-Ecuador, la ciudadela Trigales Altos se ha catalogado como una zona susceptible a fenómenos de inestabilidad de ladera. Estudios recientes (Gestión de Riegos, 2015; Tecnosuelos, 2006) han identificado un deslizamiento activo en la zona que afecta a un relleno sin drenaje, ubicado sobre suelos expansivos, dañando viviendas, vías, redes de agua potable y alcantarillado. El presente trabajo propuso analizar la estabilidad del talud mediante la caracterización física y geotécnica de los estratos del subsuelo del deslizamiento. Se propuso la evaluación conjunta con los métodos de resistividad eléctrica, sísmica de refracción y análisis multicanal de ondas superficiales (MASW), a fin de obtener información más completa y de mayor fiabilidad de las condiciones físicas y geotécnicas del terreno. Los resultados indican que el tipo de suelo existente en la zona es tipo D según la clasificación de la NEC 2015, presentando valores V_{s30} entre 266 y 313 m/s, lo que explica sus deficientes propiedades geotécnicas. Se identificó que el plano de falla se halla entre los 9 y 12 metros de profundidad, debido a un cambio litológico entre suelo fino arcilloso perteneciente a la formación geológica Santa Rosa y suelo arenolimoso con clastos centimétricos propio de la terraza fluvio-glacial que aflora en la zona. Se encontró que los estratos del subsuelo se encuentran distribuidos verticalmente, dando lugar a franjas de debilidad geotécnica. Se concluye que, el suelo de la zona carece de capacidades portantes para el soporte de construcciones antrópicas.

Palabras clave: Geofísica. Caracterización 3D. Deslizamiento. Resistividad eléctrica.



ABSTRACT

In Azuay-Ecuador, the Trigales Altos citadel has been listed as an area susceptible to hillside instability phenomena. Recent studies (Gestión de Riegos, 2015; Tecnosuelos, 2006) have identified an active landslide in the area that affects a landfill without drainage, located on expansive soils, damaging homes, roads, drinking water networks and sewerage. The present work proposed to analyze the stability of the slope by means of the physical and geotechnical characterization of the subsoil strata of the landslide. The joint evaluation with the methods of electrical resistance, refraction seismic and multichannel surface wave analysis (MASW) is proposed, in order to obtain more complete and greater information on the automation of the physical and geotechnical conditions of the terrain. The results indicate that the type of soil existing in the area is type D according to the NEC 2015 classification, presenting V_{s30} values between 266 and 313 m/s, which explains its poor geotechnical properties. It was identified that the fault plane is between 9 and 12 meters deep, due to a lithological change between fine clay soil belonging to the Santa Rosa geological formation and sandy-silty soil with centimetric clasts typical of the fluvial-glacier terrace that emerges in the area. It was found that the subsoil strata are distributed vertically which causes deformation, giving rise to strips of geotechnical weakness. In conclusion, the area's soil lacks carrying capacities for the support of anthropic constructions.

Keywords: Geophysics. 3D characterization. Slippage. Electrical resistivity.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN 2

ABSTRACT 3

ÍNDICE GENERAL 4

ÍNDICE DE FIGURAS 9

ÍNDICE DE TABLAS 14

CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO UNIVERSITARIO 15

CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL 16

DEDICATORIA 17

AGRADECIMIENTOS 18

CAPÍTULO I 19

1 GENERALIDADES 19

 1.1. INTRODUCCIÓN 19

 1.2. OBJETIVOS 21

 1.2.1 Objetivo General 21

 1.2.2 Objetivos específicos 21

 1.3. ANTECEDENTES 21

CAPITULO II 23

2 MARCO TEORICO 23

 2.1. TALUD 23

 2.2. PARTES DE UN TALUD 23

 2.3. DESLIZAMIENTO 24

 2.4. PARTES DE UN DESLIZAMIENTO 24

 2.5. CLASIFICACIÓN DE MOVIMIENTOS DE LADERA 26

 2.5.1 DERRUMBES Y CAIDA DE BLOQUES 27

 2.5.2 AVALANCHAS DE ROCAS / DE DETRITOS 27

 2.5.3 VOLCAMIENTO 27

 2.5.4 REPTACIÓN 28

 2.5.5 DESLIZAMIENTO 28

 2.5.6 FLUJOS O COLADAS 29

 2.6. ESTABILIDAD DE TALUD 30

 2.7. METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD 30

 2.8. FACTOR DE SEGURIDAD (F.S.) 31

 2.9. METODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE 32

 2.9.1 Método del talud infinito 33



2.9.2 Método Ordinario o de Fellenius	34
2.9.3 Método de Bishop	35
2.9.4 Método de Janbú	35
2.10. COMPARACIÓN DE LOS DIVERSOS MÉTODOS.....	36
2.11. ENSAYOS GEOFISICOS.....	37
2.12. METODOS SÍSMICOS.....	37
2.13. ONDAS SISMICAS.....	38
2.14. ONDAS SÍSMICAS DE CUERPO	38
2.14.1 Ondas Primarias (P).....	38
2.14.2 Ondas Secundarias (S).....	39
2.15. ONDAS SÍSMICAS DE SUPERFICIE	39
2.15.1 Ondas Love (L)	40
2.15.2 Ondas Rayleigh.....	40
2.16. VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (VS).....	40
2.17. PRINCIPIOS Y LEYES QUE RIGEN LAS ONDAS	41
2.17.1 Principio de Huygens	41
2.17.2 Principio de Fermat.....	42
2.17.3 Principio de Snell	42
2.18. FACTORES QUE AFECTAN LA PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS	42
2.19. PARAMETROS DINAMICOS DEL SUBSUELO.....	43
2.20. BASE TEÓRICA PARA LA EXPRESIÓN EMPÍRICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CARGA ADMISIBLE Q_a	44
2.21. COEFICIENTE DE BALASTO	46
2.22. PARAMETROS QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE LAS ONDAS	47
2.23. METODOS SÍSMICOS NO INVASIVOS	47
2.23.1 SISMICA DE REFRACCIÓN.....	48
2.24. ONDAS SUPERFICIALES (RAYLEIGH).....	49
2.24.1 METODO MASW	50
2.24.2 METODO REMI (REFRACCION MICROTREMOR).....	51
2.24.3 METODO ESAC.....	52
2.25. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	52
2.25.1 RESISTIVIDAD APARENTE	52
CAPÍTULO III.....	53
3 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	53
3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	53
3.2. CLIMA	55
3.3. HIDROLOGÍA.....	55
3.4. GEOLOGÍA LOCAL.....	56



3.4.1 FORMACION SANTA ROSA	57
3.4.2 TERRAZA FLUVIO-GLACIAR.....	58
3.4.3 DEPOSITO COLUVIAL	59
3.4.4 SUELO ORGÁNICO	60
3.5. SISMICIDAD.....	60
3.6. ACCIONES ANTRÓPICAS	62
3.7. EDIFICACIONES EN MAL ESTADO.....	62
CAPÍTULO IV	63
4 METODOLOGÍA	63
4.1. SÍSMICA DE REFRACCIÓN.....	63
4.1.1 Procedimiento	63
4.1.2 Equipo	63
4.1.3 Preparación del equipo	63
4.1.4 Tendidos sísmicos	63
4.1.5 Apoyo topográfico	64
4.1.6 Trabajo de campo	64
4.1.7 Análisis de resultados	64
4.2. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	65
4.2.1 Procedimiento	65
4.2.2 Equipo	65
4.2.3 Tendidos eléctricos	65
4.2.4 Apoyo topográfico	65
4.2.5 Trabajo de campo	65
4.2.6 Análisis de Resultados.....	65
4.3. ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)	66
4.3.1 Procedimiento	66
4.3.2 Equipo	66
4.3.3 Preparación del equipo	66
4.3.4 Tendidos sísmicos	66
4.3.5 Apoyo topográfico	66
4.3.6 Trabajo de campo	67
4.3.7 Análisis de resultados	67
CAPÍTULO V	67
5 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA.....	67
5.1. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	67
5.1.1 Línea eléctrica LE-1	69
5.1.2 Línea eléctrica LE-2	71



5.1.3 Línea eléctrica LE-3	72
5.1.4 Línea eléctrica LE-4	74
5.1.5 Línea eléctrica LE-5	75
5.1.6 Línea eléctrica LE-6	77
5.1.7 Línea eléctrica LE-7	78
5.1.8 Línea eléctrica LE-8	80
5.2. SÍSMICA DE REFRACCIÓN	81
5.3. ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)	83
5.4. CÁLCULO DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DÍNAMICOS	85
5.4.1 Síntesis de parámetros geotécnicos dinámicos	85
CAPÍTULO VI	87
6 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN	87
6.1. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	87
6.1.1 Perfil eléctrico LE-1	87
6.1.2 Perfil eléctrico LE-2	87
6.1.3 Perfil eléctrico LE-3	88
6.1.4 Perfil eléctrico LE-4	88
6.1.5 Perfil eléctrico LE-5	89
6.1.6 Perfil eléctrico LE-6	89
6.1.7 Perfil eléctrico LE-7	90
6.1.8 Perfil eléctrico LE-8	90
6.2. SÍSMICA DE REFRACCIÓN	91
6.2.1 Perfil sísmico LS1-1	91
6.2.2 Perfil sísmico LS1-2	91
6.2.3 Perfil sísmico LS-2	92
6.2.4 Perfil sísmico LMS-1	92
6.2.5 Perfil sísmico LMS-2	93
6.2.1 Perfil sísmico LMS-3	93
6.2.2 Perfil sísmico LMS-4	94
6.2.3 Perfil sísmico LMS-5	94
6.2.4 Perfil sísmico LMS-6	95
6.2.5 Perfil sísmico LMS-7	95
6.2.6 Perfil sísmico LMS-8	96
6.2.7 Perfil sísmico LMS-9	96
6.2.8 Perfil sísmico LMS-10	97
6.3. ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES MASW	97
6.3.1 Perfil MASW LM-1	97



6.3.2 Perfil MASW LM-2.....	98
6.3.3 Perfil MASW LM-3.....	99
6.3.4 Perfil MASW LM-4.....	99
6.3.5 Perfil MASW LM-5.....	100
6.3.6 Perfil MASW LM-6.....	100
6.3.7 Perfil MASW LM-7.....	101
6.3.8 Perfil MASW LM-8.....	101
6.3.9 Perfil MASW LM-9.....	102
6.3.10 Perfil MASW LM-10.....	102
6.4. ASPECTOS SÍSMICOS	103
6.4.1 Tipo de perfiles de suelos para el diseño sísmico.....	103
6.4.2 Clasificación del suelo.....	104
6.5. COEFICIENTES DE PERFIL DE SUELO F_a , F_d y F_s	104
6.6. COEFICIENTES DE CARGA SISMICA K_h y K_v	105
6.7. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES.....	106
6.7.1 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 1-1 – CONDICIONES NORMALES	109
6.7.2 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 1-1 – CONDICIONES SATURADAS	110
6.7.3 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 1-1 – CONDICIONES SÍSMICAS	112
6.7.4 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 2-2 – CONDICIONES NORMALES	113
6.7.5 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 2-2 – CONDICIONES SATURADAS	114
6.7.6 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 2-2 – CONDICIONES SÍSMICAS	116
6.7.7 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 3-3 – CONDICIONES NORMALES	118
6.7.8 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 3-3 – CONDICIONES SATURADAS	120
6.7.9 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 3-3 – CONDICIONES SÍSMICAS	122
6.8. MODELOS GEOFÍSICOS 3D.....	123
6.8.1 Modelo Eléctrico 3D.....	123
6.8.2 Modelo Sísmico 3D.....	132
CAPITULO VII	142
7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	142
7.1. Conclusiones.....	142
7.2. Limitaciones del estudio	144
7.3. Recomendaciones.....	144
CAPITULO VIII	145
8 BIBLIOGRAFÍA	145
9 ANEXOS	147
9.1. DROMOCRONAS	147
9.2. PERFILES GEOFISICOS (Resistividad eléctrica, sísmica de refracción, MASW).....	153



9.3. TABLA RESUMEN DE RESULTADOS DE ANALISIS MULTICANAL MASW	175
9.3.1 LM-1	175
9.3.2 LM-2	175
9.3.3 LM-3	176
9.3.4 LM-4	177
9.3.5 LM-5	177
9.3.6 LM-6	178
9.3.7 LM-7	178
9.3.8 LM-8	179
9.3.9 LM-9	179
9.3.10 LM-10	180
9.4. ESTABILIDAD DE TALUDES	181
9.5. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS SUELOS	189
9.6. REGISTRO FOTOGRÁFICO	191

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Ubicación de la zona de estudio	20
Figura 1-2: Localización de la Urbanización Trigales Altos en la Planificación Vigente “Proyecto de Planificación del Tablón de Patamarca” (Gestión de Riesgos, 2015)	22
Figura 2-1: Nomenclatura de taludes y laderas (Suarez, 1998)	23
Figura 2-2: Efectos directos e indirectos derivados de la ocurrencia de los deslizamientos de tierra (Suarez, 2009)	24
Figura 2-3: Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento (Suarez, 2009)	25
Figura 2-4: Dimensiones de un deslizamiento (van Westen, 2006)	25
Figura 2-5: Tipos de movimientos de ladera (J. Hutchinson, 1988; Varnes, 1978)	26
Figura 2-6: Volteo o inclinación en materiales residuales (Suarez, 2009)	27
Figura 2-7: Diagrama de análisis, método del talud infinito (Suarez, 2009)	34
Figura 2-8: Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas (Suarez, 1998)	34
Figura 2-9: Diagrama para determinar el factor fo para el método Janbú (Suarez, 2009)	36
Figura 2-10: Aplicación de diferentes métodos geofísicos (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2009)	37
Figura 2-11: Ondas Primarias “P” (Instituto de Prevención Sísmica)	38
Figura 2-12: Ondas Secundarias “S” (Instituto de Prevención Sísmica)	39



Figura 2-13: Ondas Love “L” (Instituto de Prevención Sísmica).	40
Figura 2-14: Ondas Rayleigh “R” (Instituto de Prevención Sísmica).	40
Figura 2-15: Diagrama de reflexión y refracción, Ley de Snell (Avilés & Barzallo, 2016).	42
Figura 2-16: Esquema de ensayos de refracción y reflexión sísmica (Guarachi, 2013)	48
Figura 2-17: Método de refracción sísmica (Comisión Nacional del Agua, 2009)	49
Figura 2-18: Ejemplos de la dispersión en medios estratificados (Modificado Rix 1988, Foti 2000).	49
Figura 2-19: Esquema MASW con fuente activa (Park Seismic).	51
Figura 3-1: Ubicación Geográfica de la zona de estudio	54
Figura 3-2: Situación geográfica de la zona de estudio (Samaniego, 2018).....	55
Figura 3-3: Hidrografía del área de estudio (Samaniego, 2018).	56
Figura 3-4: Geología local, Trigales Altos. (Samaniego, 2018).	57
Figura 3-5: Mosaico de fotos muestran afloramientos de areniscas de la Formación Santa Rosa en los alrededores de la urbanización Los Trigales Altos (Tecnosuelos, 2006).....	57
Figura 3-6: Afloramientos de arcillas limosas de la Formación Santa Rosa en los alrededores de la Urbanización Trigales Alto (Tecnosuelos, 2006)	58
Figura 3-7: Afloramiento de grava arenosa semiconsolidada en el respaldo de la urbanización Los Trigales Altos (Tecnosuelos, 2006).	59
Figura 3-8: Afloramiento de depósitos coluviales en el área de Los Trigales Altos (Tecnosuelos, 2006). .	59
Figura 3-9: Mosaico de fotos que muestra exposiciones de suelo orgánico dentro del perímetro de la urbanización Los Trigales Altos (Tecnosuelos, 2006).	60
Figura 3-10: Mapa de máximas intensidades sísmicas del Ecuador (Singaicho, 2009).....	61
Figura 3-11: Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z - Adaptado de Código Ecuatoriano de la Construcción, (2014).	62
Figura 5-1: Ubicación de líneas eléctricas levantadas.....	68
Figura 5-2: Resultados del proceso de inversión LE-1	71
Figura 5-3: Resultados del proceso de inversión LE-2	72
Figura 5-4: Resultados del proceso de inversión LE-3	74
Figura 5-5: Resultados del proceso de inversión LE-4	75
Figura 5-6: Resultados del proceso de inversión LE-5	77
Figura 5-7: Resultados del proceso de inversión LE-6	78
Figura 5-8: Resultados del proceso de inversión LE-7	80



Figura 5-9: Resultados del proceso de inversión LE-8	81
Figura 5-10: Ubicación de líneas sísmicas	82
Figura 5-11: Ubicación de líneas sísmicas MASW	84
Figura 6-1: Perfil eléctrico LE-1	87
Figura 6-2: Perfil eléctrico LE-2	87
Figura 6-3: Perfil eléctrico LE-3	88
Figura 6-4: Perfil eléctrico LE-4	88
Figura 6-5: Perfil eléctrico LE-5	89
Figura 6-6: Perfil eléctrico LE-6	89
Figura 6-7: Perfil eléctrico LE-7	90
Figura 6-8: Perfil eléctrico LE-8	90
Figura 6-9: Perfil sísmico LS1-1.....	91
Figura 6-10: Perfil sísmico LS1-2.....	91
Figura 6-11: Perfil sísmico LS-2.....	92
Figura 6-12: Perfil sísmico LMS-1.....	92
Figura 6-13: Perfil sísmico LMS-2.....	93
Figura 6-14: Perfil sísmico LMS-3.....	93
Figura 6-15: Perfil sísmico LMS-4.....	94
Figura 6-16: Perfil sísmico LMS-5.....	94
Figura 6-17: Perfil sísmico LMS-6.....	95
Figura 6-18: Perfil sísmico LMS-7.....	95
Figura 6-19: Perfil sísmico LMS-8.....	96
Figura 6-20: Perfil sísmico LMS-9.....	96
Figura 6-21: Perfil sísmico LMS-10.....	97
Figura 6-22: Perfil de velocidad de corte Vs LM-1	98
Figura 6-23: Perfil de velocidad de corte Vs LM-2	98
Figura 6-24: Perfil de velocidad de corte Vs LM-3.....	99
Figura 6-25: Perfil de velocidad de corte Vs LM-4.....	99



Figura 6-26: Perfil de velocidad de corte Vs LM-5	100
Figura 6-27: Perfil de velocidad de corte Vs LM-6	100
Figura 6-28: Perfil de velocidad de corte Vs LM-7	101
Figura 6-29: Perfil de velocidad de corte Vs LM-8	101
Figura 6-30: Perfil de velocidad de corte Vs LM-9	102
Figura 6-31: Perfil de velocidad de corte Vs LM-10	102
Figura 6-32: UBICACIÓN DE PERFILES PARA MODELACIÓN DE ESTABILIDAD DE TALUDES	106
Figura 6-33: Modelo 1-1 - condiciones saturadas - falla no circular – método de Fellenius	108
Figura 6-34: Modelo 1-1 - condiciones normales - falla circular – método de Janbu	109
Figura 6-35: Modelo 1-1 - Condiciones normales - falla no circular – método de Janbu	109
Figura 6-36: Modelo 1-1 - condiciones saturadas - falla circular – método de Janbu	110
Figura 6-37: Modelo 1-1 - condiciones saturadas - falla no circular – método de Janbu	111
Figura 6-38: Modelo 1-1 - condiciones sísmicas - falla circular – método de Janbu	112
Figura 6-39: Modelo 1-1 - condiciones sísmicas - falla no circular – método de Janbu	112
Figura 6-40: MODELO 2-2 - Condiciones normales - falla circular – método de Janbu	113
Figura 6-41: MODELO 2-2 - Condiciones normales - falla no circular – método de Janbu	114
Figura 6-42: MODELO 2-2 - Condiciones saturadas - falla circular – método de Janbu	114
Figura 6-43: MODELO 2-2 - Condiciones saturadas - falla no circular – método de Janbu	115
Figura 6-44: Modelo 2-2 - condiciones sísmicas - falla circular – método de Janbu	116
Figura 6-45: Modelo 2-2 - condiciones sísmicas - falla no circular – método de Janbu	117
Figura 6-46: Modelo 3-3 - condiciones normales - falla circular – método de Janbu	118
Figura 6-47: MODELO 3-3 - Condiciones normales - falla no circular – método de Janbu	119
Figura 6-48: Modelo 3-3 - Condiciones saturadas - falla circular – método de Janbu	120
Figura 6-49: Modelo 3-3 - Condiciones saturadas - falla no circular – método de Janbu	121
Figura 6-50: MODELO 3-3 - Condiciones sísmicas - falla circular – método de Janbu	122
Figura 6-51: Modelo 3-3 - Condiciones sísmicas - falla no circular – método de Janbu	123
Figura 6-52: Perspectiva general del modelo 3D Eléctrico	124
Figura 6-53: Vista lateral norte del modelo 3D Eléctrico	124



Figura 6-54: Vista lateral este del modelo 3D Eléctrico	125
Figura 6-55: Vista lateral sur del modelo 3D Eléctrico	125
Figura 6-56: Vista lateral oeste del modelo 3D Eléctrico	126
Figura 6-57: Vista en planta de la superficie del modelo 3D Eléctrico	126
Figura 6-58: Vista del modelo 3D Eléctrico variando posición en el eje X (Este)	127
Figura 6-59: Vista del modelo 3D Eléctrico variando posición en el eje Y (Norte)	128
Figura 6-60: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 60 y 70 ohm/m	129
Figura 6-61: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 50 y 60 ohm/m	129
Figura 6-62: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 40 y 50 ohm/m	129
Figura 6-63: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 30 y 40 ohm/m	130
Figura 6-64: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 20 y 30 ohm/m	130
Figura 6-65: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 10 y 20 ohm/m	130
Figura 6-66: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 8 y 10 ohm/m	130
Figura 6-67: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 6 y 8 ohm/m	131
Figura 6-68: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 5 y 7 ohm/m	131
Figura 6-69: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 4 y 5 ohm/m	131
Figura 6-70: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 3 y 4 ohm/m	132
Figura 6-71: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 0 y 3 ohm/m	132
Figura 6-72: Perspectiva general del modelo 3D Sísmico (Vp)	133
Figura 6-73: Vista lateral norte del modelo 3D Sísmico (Vp)	133
Figura 6-74: Vista lateral este del modelo 3D Sísmico (Vp)	134
Figura 6-75: Vista lateral sur del modelo 3D Sísmico (Vp)	134
Figura 6-76: Vista lateral oeste del modelo 3D Sísmico (Vp)	135
Figura 6-77: Vista en planta de la superficie del modelo 3D Sísmico (Vp)	135
Figura 6-78: Vista en planta inferior del modelo 3D Sísmico (Vp)	136
Figura 6-79: Vista del modelo 3D Sísmico (Vp) variando posición en el eje X (Este)	137
Figura 6-80: Vista del modelo 3D Sísmico (Vp) variando posición en el eje Y (Norte)	138
Figura 6-81: Vista de materiales con velocidad sísmica (Vp) entre 2000 y 3800 m/s	139



Figura 6-82: Vista de materiales con velocidad sísmica (V_p) entre 1400 y 2000 m/s..... 139

Figura 6-83: Vista de materiales con velocidad sísmica (V_p) entre 800 y 1400 m/s..... 139

Figura 6-84: Vista de materiales con velocidad sísmica (V_p) entre 600 y 800 m/s..... 140

Figura 6-85: Vista de materiales velocidad sísmica (V_p) entre 400 y 600 m/s 140

Figura 6-86: Distribución de las franjas de debilidades 141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Metodologías utilizadas en la modelación de taludes..... 31

Tabla 2-2: Métodos de análisis de estabilidad de taludes 32

Tabla 2-3: Rangos usuales de variación de la velocidad de compresión en diversos tipos de materiales geológicos..... 39

Tabla 2-4: Velocidades de onda asociados a los diferentes tipos de suelos..... 41

Tabla 2-5: Criterios para Carga Admisible en función de V_s y factores de seguridad n 46

Tabla 5-1: Ubicación de las líneas geofísicas mediante Tomografía Eléctrica 68

Tabla 5-2: Resumen de resistividades..... 69

Tabla 5-3: Ubicación de líneas sísmicas 82

Tabla 5-4: Ubicación de líneas geofísicas MASW 83

Tabla 5-5: Parámetros geotécnicos..... 86

Tabla 6-1: Tipos de perfiles de suelo (NEC -2015 NEC-SE-DS)..... 103

Tabla 6-2: Coeficiente F_a : Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto (NEC -2015 NEC-SE-DS)..... 104

Tabla 6-3: Coeficiente F_d : Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca (NEC -2015 NEC-SE-DS)..... 104

Tabla 6-4: Coeficiente F_s : Comportamiento no lineal de los suelos (NEC -2015 NEC-SE-DS) 105

Tabla 6-5: Ubicación de perfiles para modelos de estabilidad de taludes 106

Tabla 6-6: Tabla de resumen de factores de seguridad (FS) de los análisis de estabilidad de los taludes 107

Tabla 6-7: Factor de seguridad por corte mínimo 108



**CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO
UNIVERSITARIO**

Leonardo Xavier Palacios Guzmán en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “MODELACIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA 3D, MEDIANTE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre 2019

Leonardo Xavier Palacios Guzmán

C.I: 0104626841



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Leonardo Xavier Palacios Guzmán, autor del trabajo de titulación **“MODELACIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA 3D, MEDIANTE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre 2019

Leonardo Xavier Palacios Guzmán

C.I: 0104626841



DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación lo dedico a:

A mis padres por todo su amor brindado, siendo los pilares fundamentales para el ser humano y profesional que actualmente soy.

A mi esposa e hija, Nicole y Antonella quienes representan el motor de mi vida.

Leonardo Xavier Palacios Guzmán



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad de Cuenca, por haberme permitido ser parte de esta y abierto sus puertas de conocimiento para poder estudiar mi carrera, al igual que a los diferentes docentes que brindaron su saber humano y profesional para la consecución de esta meta.

Al Ing. Alfredo Vázquez, por creer en este proyecto y estar siempre dispuesto a atender mis inquietudes, por extender su trabajo más allá de un horario o de un establecimiento y, por último, gracias por sus enseñanzas como docente. De igual forma hago extensivo el agradecimiento a la empresa Geo&Geo Cía. Ltda., especialmente al Sr. Ángel Loja quien con su apoyo en campo colaboró para el levantamiento de la información.

Gracias a mis padres que han sido guía y apoyo en el camino de mi vida, muchos de los logros que he alcanzado se los debo a ustedes entre los que se incluye este.

A mi esposa, por su apoyo incondicional y amor impartido, ahora y siempre.

Leonardo Xavier Palacios Guzmán



1 GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb & Harrod, 1989); sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. Todo esto debería ser considerado por la institución pertinente a la hora de elaborar un Plan de desarrollo y ordenamiento territorial y controlar su ejecución y cabal cumplimiento.

Suarez, (1998) indica:

Los deslizamientos producen cambios en la morfología del terreno, diversos daños ambientales, daños en las obras de infraestructura (agua potable, alcantarillado, vías, entre otros), destrucción de viviendas, puentes, bloqueo de ríos, entre otros. El volumen total de daños es superior al de los terremotos y las inundaciones. Sin embargo, un gran porcentaje de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se implementan las medidas de prevención o control. Los mismos están relacionados con las montañas y algunas son más susceptibles a las amenazas por movimiento de terreno debido a que en ciertas ocasiones se reúnen los cuatro elementos más importantes para su ocurrencia tales como el relieve, la sismicidad, la meteorización y las lluvias intensas.

La Geofísica estudia la Tierra mediante métodos de la física, de carácter indirecto, a fin de conocer su evolución y características actuales (geofísica pura) y también como herramienta de prospección de recursos (geofísica aplicada). Pueden medirse directamente los campos físicos naturales (gravedad, magnetismo, radioactividad, etc.) o generarse campos artificiales por emisión de electricidad, energía sísmica, etc., para así obtener mediciones más efectivas a los fines exploratorios (Chelotti, L., Acosta, N., Foster, 2009). Los métodos geofísicos se plantean como solución a las problemáticas que generan los métodos tradicionales ya que son técnicas no destructivas y de investigación extensiva.

La prospección geofísica ha llegado a ser una rama imprescindible de la ingeniería para resolver diversos problemas asociados a definir las condiciones físicas y mecánicas de las estructuras geológicas del subsuelo; monitorear fuentes de contaminación, evaluar propiedades mecánicas de los materiales geológicos, ubicar cavidades, entre otros que podrían afectar a una obra civil, asegurar las inversiones económicas; reconocer zonas de rellenos, entre otros (Manilla, 2003). En el área de la ingeniería civil, la prospección y las técnicas de prospección de mayor uso son: geoelectricidad, sismología, la gravimetría, la técnica del radar de penetración terrestre, y los registros geofísicos de pozos.

En Azuay-Ecuador, debido a su naturaleza montañosa consecuencia de su ubicación en la zona de la Cordillera de los Andes se encuentra amenazada por diferentes tipos de procesos geológicos. En 1993 el deslizamiento de "La Josefina" en el sector de Tahuall causó pérdidas humanas (Chamot et al., 1993) al tiempo que represó el río Paute formando un lago de 190 millones de m³, inundando un área de 1000 ha (Zeas, 1993). Este desastre pone en evidencia la magnitud e importancia de los fenómenos naturales y la falta de estudios de prevención.

En el año de 1998 el proyecto de Prevención de Desastres Naturales en la cuenca del río Paute (PRECUPA) elaboró un mapa para ubicar ciertas zonas con deslizamientos. El proyecto PRECUPA ubica al barrio de los Trigales Altos, como una zona sin movimientos de ladera detectados. Sin embargo,

Basabe, Neumann, Almeida, Herrera, & García, (1998) explican que “bajo condiciones hidrometeorológicas extremas o actividades antrópicas anti-técnicas, este sector es susceptible a fenómenos de inestabilidad de ladera” (p. 83). Trabajos más recientes GESTIÓN DE RIEGOS, 2015; TECNOSUELOS, 2006; Rivera, 2012 han identificado un deslizamiento activo en la zona que afecta a un relleno sin obra de drenaje, ubicado en una zona de suelos expansivos, dañando viviendas, vías, así como redes de agua potable y alcantarillado.

El deslizamiento está ubicado en la ciudadela “Trigales Altos” al noroeste de la ciudad de Cuenca, en la parroquia Hermano Miguel, en el barrio “Los Trigales” que colinda con los barrios: Patamarca II, el Tablón, El Tablón Chico, Terrenos UNE y Cajaloma; aproximadamente se abordará un área de 3.15 Ha, en donde se tiene identificado que existe presencia de un deslizamiento activo que afecta a todo tipo de infraestructura que existe en la zona. La ubicación de la zona de estudio se indica en la Figura 1-1:

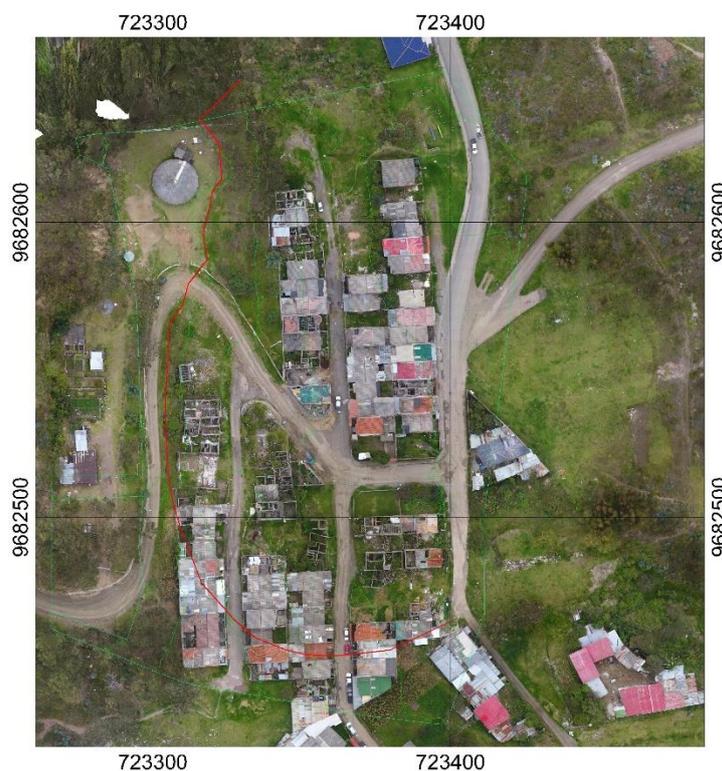


Figura 1-1: Ubicación de la zona de estudio

En el trabajo de GESTION DE RIESGOS, (2015) se presenta una cartografía de la cicatriz del deslizamiento en la que se identifica su corona, así como parte de los flancos izquierdo y derecho. En relación con la masa deslizada, esta no se encuentra plenamente definida. Para ello, la prospección geofísica se torna una herramienta rápida, económica y de ejecución sencilla en comparación con otros medios de investigación del subsuelo (SPT, DPSH, corte directo, etc.) (Das, 2011).

Para abarcar el área de estudio se ha previsto utilizar tres métodos de investigación geofísica, Resistividad Eléctrica, Sísmica de Refracción y Análisis Multicanal de Ondas MASW. Se levantó ocho tomas de Resistividad Eléctrica de aproximadamente 155 m de longitud cada una, el levantamiento de la información geofísica con sísmica de refracción se realizó mediante el tendido de 3 líneas, se colocaron 23 geófonos con una separación de 2.5 m entre cada geófono. Con el método MASW, se procedió al levantamiento de información de 10 líneas, para cada perfil se instaló 23 geófonos ubicados a 1.50 m cada uno.

El proceso de levantamiento de información geofísica se lo realizará en función al espacio disponible en el sector y tomará la forma de una malla cuadrículada con el objeto de correlacionar los resultados unos



con otros para la realización de modelos físicos 2D y 3D, así como el modelo para el análisis de estabilidad del talud.

El propósito de esta investigación técnica es obtener una imagen 2D o tomografía de las condiciones geológicas- geotécnicas en el área de estudio. Para la modelación 3D se hará uso del software Voxler, el cual permite la visualización 3D de datos geofísicos volumétricos, el programa ayudará para la interpretación geológica-geotécnica de lo que podría estar sucediendo en el deslizamiento y a qué profundidad se encuentra el problema, para de esta manera realizar el análisis de estabilidad del talud mediante el uso del software Slide y así presentar posibles soluciones. Es importante mencionar que para armar las tomografías se hará uso de los datos topográficos levantados anteriormente por Irwin Rashid Samaniego, en su trabajo de titulación, "Caracterización de la tipología y cinemática del deslizamiento de la urbanización Trigales Altos, Cuenca". Finalmente, se levantará el perfil topográfico de cada una de las líneas geofísicas propuestas en este proyecto, a fin de conocer si existe cambio en dichos perfiles entre los periodos de 2018 y 2019.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Analizar la estabilidad del talud mediante la caracterización física y geotécnica de los estratos existentes en el subsuelo del deslizamiento Trigales Altos.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Investigar y correlacionar los resultados existentes para la zona del deslizamiento.
2. Obtener resultados de resistividad eléctrica y velocidades sísmicas V_p (velocidad de ondas de compresión) y V_s (velocidad de ondas de cortante).
3. Construir un modelo 3D de las propiedades físicas del subsuelo del deslizamiento, haciendo uso de los datos geotécnicos a obtener y de los ensayos geotécnicos realizados en la zona de estudio productos de otras investigaciones, (Ensayo triaxial consolidado- no drenado, SPT, corte directo).
4. Estructurar el perfil topográfico del talud y el modelo 2D junto con sus propiedades geomecánicas del subsuelo.
5. Determinar la estabilidad del talud en la zona investigada y proponer métodos de solución.

1.3. ANTECEDENTES

GESTION DE RIESGOS, (2015) recopila la siguiente información:

La Urbanización "Trigales Altos" fue aprobada por el I. Concejo Cantonal en sesión de fecha 8 de agosto de 1991 en base del Acta de la Comisión de Urbanismo de fecha 23 de julio de 1991; el Proyecto de Modificación de la Urbanización fue aprobado por el Director de Planificación el 5 de febrero de 1992. Esta urbanización corresponde a un Programa de Vivienda de Interés Social, las construcciones de las viviendas se efectuaron mediante un convenio entre el Banco Ecuatoriano de la Vivienda y la Empresa Privada CONSTRUARIAS Cía. Ltda., para financiar las obras relacionadas con la urbanización y la construcción de viviendas de interés social, consolidándose paulatinamente la construcción de 517 viviendas de 1 piso.

A partir del año 2000 se detecta problemas de inestabilidad del suelo en la zona de los Trigales y áreas aledañas, por lo que la Municipalidad emprendió varias acciones a fin de mitigar los impactos provocados, como las que a continuación se detallan.

El 21 de marzo del 2003, el I. Concejo Cantonal resolvió suspender todo trámite de actuación urbanística y posteriormente en diciembre del 2004, el I. Concejo Cantonal resolvió declarar como área de emergencia, suspensión que concluyó el 16 de julio del 2006.

A finales del 2005, a través de la Comisión de Gestión Ambiental, se procede a contratar con la empresa Tecnosuelos, los Estudios de Perforaciones y Resistividad Eléctrica para la Ciudadela Los Trigales y Áreas Aledañas.

TECNOSUELOS CIA LTDA, (2006) concluye lo siguiente:

En nuestra opinión y basados en las observaciones del reconocimiento geológico consideramos que las causas de inestabilidad no son causadas por deslizamientos laterales del terreno sino más bien por asentamientos diferenciales causados por consolidación de suelos orgánicos y expansión-contracción de suelos coluviales meteorizados (arcillas expansivas).

La planificación vigente en la Urbanización “Trigales Altos” denominada “Proyecto de Planificación del Tablón de Patamarca”, Actuación Urbanística de la zona denominada el Tablón de Patamarca, fue aprobada por el I. Concejo Cantonal el 03 de octubre del 2013 (Figura 1-2).

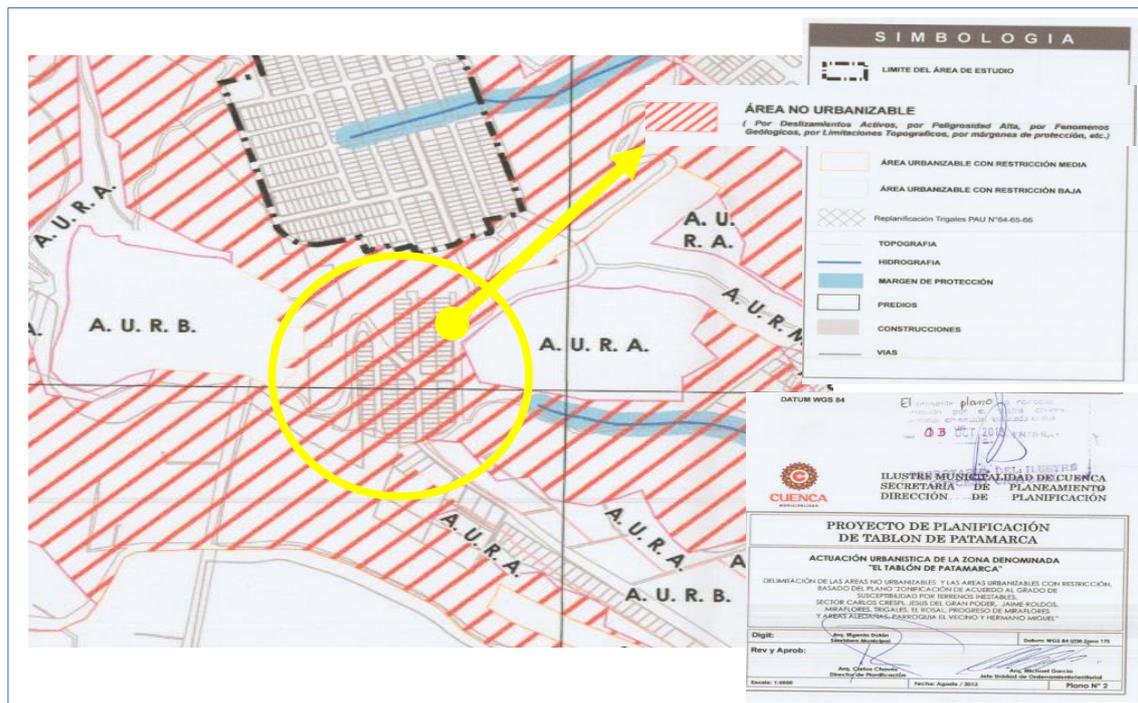


Figura 1-2: Localización de la Urbanización Trigales Altos en la Planificación Vigente “Proyecto de Planificación del Tablón de Patamarca” (Gestión de Riesgos, 2015).

Dentro de la Planificación Vigente la Urbanización “Trigales Altos” se encuentra emplazada dentro del área catalogada como “Área No Urbanizable por Deslizamientos Activos”.

2 MARCO TEORICO

2.1. TALUD

Una superficie de terreno expuesta situada a un ángulo con la horizontal se llama talud o pendiente no restringida (Das, 2001), pudiendo ser estos de origen natural o antrópica, el estudio de este tema es muy importante y de ahí el porqué de su dificultad debido a que abarca varias ramas de la ingeniería como la mecánica de suelos, mecánica de rocas, geología, geotecnia, ingeniería estructural, entre otros. En ciertos casos la estabilidad juega un papel muy importante en la obra, condicionando la existencia de la misma como puede verse en presas de tierra, donde un mal cálculo puede hacer fracasar la obra (Matteis, 2003). En la Figura 2-1 se indica cómo se compone un talud natural o artificial.

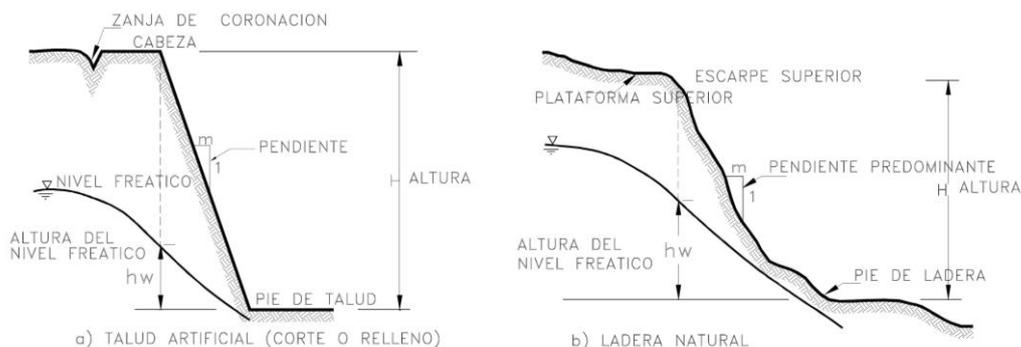


Figura 2-1: Nomenclatura de taludes y laderas (Suarez, 1998).

2.2. PARTES DE UN TALUD

Suarez (1998) indica que en talud o ladera se identifican los siguientes elementos:

- **Pie, pata o base:** El pie corresponde al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera. La forma del pie de una ladera es generalmente cóncava.
- **Cabeza, cresta, cima o escarpe:** Cabeza se refiere al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud o ladera. Cuando la pendiente de este punto hacia abajo es semi-vertical o de alta pendiente, se le denomina "escarpe". Los escarpes pueden coincidir con coronas de deslizamientos. La forma de la cabeza generalmente es convexa.
- **Altura:** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza generalmente no son accidentes topográficos bien marcados.
- **Altura de nivel freático:** Es la distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua (la presión en el agua es igual a la presión atmosférica). La altura del nivel freático se acostumbra medirla debajo de la cabeza del talud.
- **Pendiente:** Es la medida de la inclinación de la superficie del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación $m:1$, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo: $45^\circ = 100\% = 1H:1V$ (Suarez, 1998).

2.3. DESLIZAMIENTO

Un deslizamiento se define como un movimiento de una masa de roca, detritos o tierra, pendiente abajo bajo la acción de la gravedad, cuando el esfuerzo de corte excede el esfuerzo de resistencia del material (van Westen, 2006), los deslizamientos pueden producirse de distintas maneras, es decir en forma rápida o lenta, con o sin motivos apreciables, entre otros. Matteis, (2003) expone que se producen como consecuencia de excavaciones o socavaciones en el pie del talud y en otros casos se produce por desintegración gradual de la estructura del suelo, aumento de las presiones intersticiales debido a infiltraciones de agua, entre otros. Las principales causas son un incremento del stress de corte y una disminución en la resistencia del material (van Westen, 2006). En la Figura 2-2 se reúnen las posibles consecuencias de un deslizamiento.

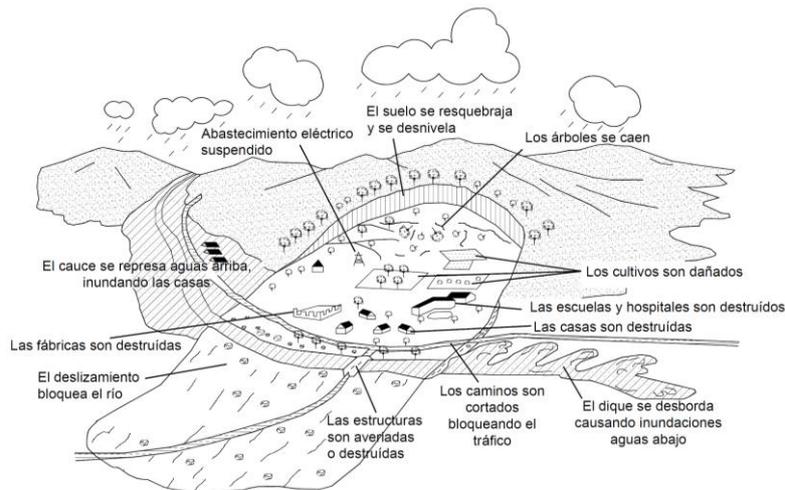


Figura 2-2: Efectos directos e indirectos derivados de la ocurrencia de los deslizamientos de tierra (Suarez, 2009).

2.4. PARTES DE UN DESLIZAMIENTO

Suarez (1998) describe los componentes de un movimiento en masa típico, cuyas partes son las siguientes y se ubican en la Figura 2-3 también se puede ver en la Figura 2-4 las dimensiones que se deben considerar en un deslizamiento:

- **Cabeza.** Parte superior de la masa de material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud. Arriba de la cabeza está la corona.
- **Cima.** El punto más alto de la cabeza, en el contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- **Corona.** El material que se encuentra en el sitio, (prácticamente inalterado), adyacente a la parte más alta del escarpe principal, por encima de la cabeza.
- **Escarpe principal.** Superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material conforma la superficie de la falla.
- **Escarpe secundario.** Superficie muy inclinada producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve. En un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.
- **Superficie de falla.** Área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado. El suelo por debajo de la superficie de la falla no se mueve, mientras que el que se encuentra por encima de ésta, se desplaza. En algunos movimientos no hay superficie de falla.

- **Pie de la superficie de falla.** La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- **Base.** El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- **Punta o uña.** El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- **Cuerpo principal del deslizamiento.** El material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla. Se pueden presentar varios cuerpos en movimiento.
- **Superficie original del terreno.** La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
- **Costado o flanco.** Un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo.

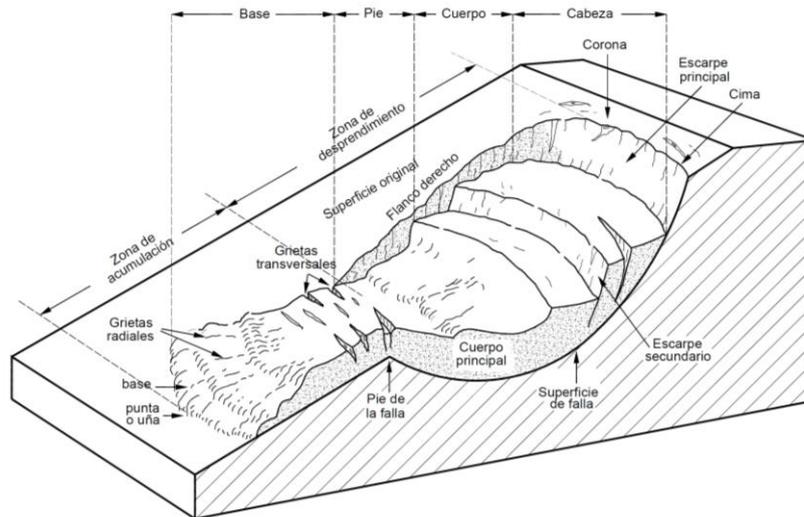
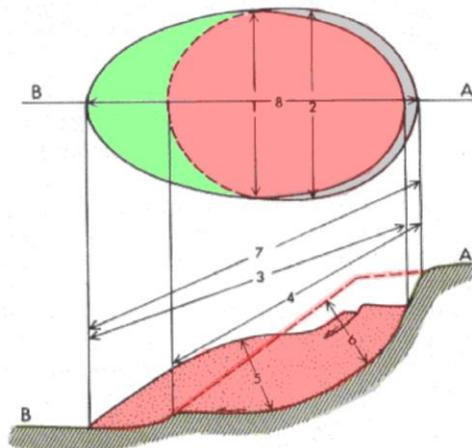


Figura 2-3: Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento (Suarez, 2009).



1. Ancho de la masa desplazada (W_d)
2. Ancho de la superficie de ruptura (W_r)
3. Largo de la masa desplazada (L_d)
4. Largo de la superficie de ruptura (L_r)
5. Profundidad de la masa desplazada (D_d)
6. Profundidad de la superficie de ruptura (D_r)
7. Longitud total (L)
8. Largo de la línea central (L_{cl})

Figura 2-4: Dimensiones de un deslizamiento (van Westen, 2006).

2.5. CLASIFICACIÓN DE MOVIMIENTOS DE LADERA

En la actualidad existen varias clasificaciones debido a la complejidad que abarca los movimientos de ladera, las cuales han sido investigadas por una amplia gama de disciplinas, por ello para poder clasificar los movimientos de ladera se debe tener en cuenta los criterios utilizados para su diferenciación.

A continuación, se presenta se presenta una clasificación simplificada a partir de la propuesta elaborada por Varnes (1978) y Hutchinson (1988) en la Figura 2-5.

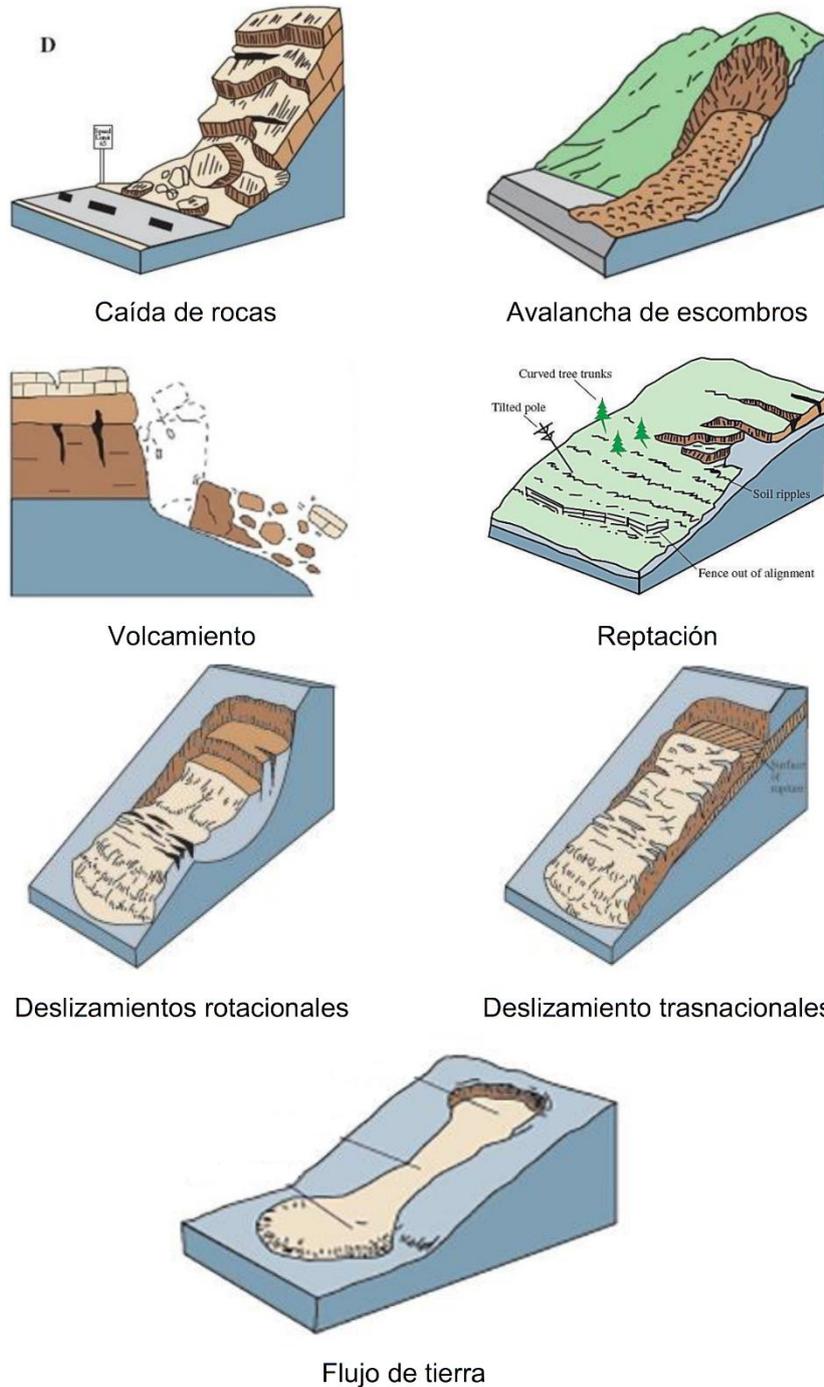


Figura 2-5: Tipos de movimientos de ladera (J. Hutchinson, 1988; Varnes, 1978).

2.5.1 DERRUMBES Y CAIDA DE BLOQUES

Son fenómenos que presentan una ruptura brusca y caída más o menos libre y a gran velocidad de un bloque o una masa rocosa “en seco”. Gran parte del transporte se da en el medio aéreo, pero también existe un componente de salto y rodamiento. La zona de origen corresponde prioritariamente a acantilados rocosos o laderas de fuerte pendiente, donde la roca está fracturada y alterada (Samaniego, 2018).

Los volúmenes implicados suelen ser de hasta 100.000 m³. Tienen un alto componente de sorpresa, pues rara vez presentan signos precursores o anunciadores (o éstos son difíciles de detectar) y, muy a menudo, son desencadenados por factores exógenos (sismos, vibraciones de maquinaria pesada, explosiones, árboles sobre el macizo rocoso, etc.).

La velocidad del movimiento puede ser elevada hasta 40 m/s.

2.5.2 AVALANCHAS DE ROCAS / DE DETRITOS

Son fenómenos que presentan una ruptura brusca y caída más o menos libre y a gran velocidad de una masa rocosa “en seco”. Gran parte del transporte se da en el medio aéreo, pero también existe un componente de salto y rodamiento. Se considera un evento catastrófico, temporalmente instantáneo y de muy alta recurrencia.

El volumen de material movilizado suele ser muy superior a los 100.000 m³, generalmente 1 ó varios millones de metros cúbicos de roca.

La velocidad del movimiento suele ser muy elevada >40m/s.

2.5.3 VOLCAMIENTO

Este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia adelante de una unidad o unidades de material térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad y generalmente, ocurren en las formaciones rocosas (Suarez, 2009). Las fuerzas que lo producen son generadas por las unidades adyacentes, el agua en las grietas o juntas, expansiones y los movimientos sísmicos. La inclinación puede abarcar zonas muy pequeñas o incluir volúmenes de varios millones de metros cúbicos. La Figura 2-6 muestra un ejemplo de volcamiento.

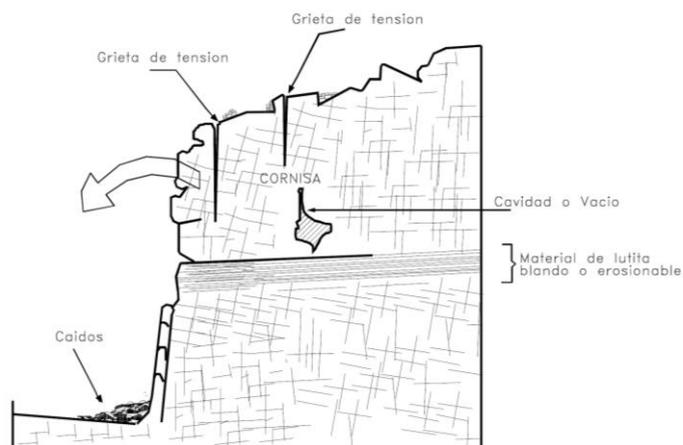


Figura 2-6: Volteo o inclinación en materiales residuales (Suarez, 2009).



2.5.4 REPTACIÓN

La reptación consiste en movimientos muy lentos a extremadamente lentos del suelo subsuperficial sin una superficie de falla definida. Generalmente, el movimiento es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno (Suarez, 2009).

Se le atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en suelos, usualmente, muy blandos o alterados.

Samaniego (2018) define que la reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos y que es el desplazamiento lento, prácticamente imperceptible, que afecta a los materiales menos cohesivos de la cubierta de suelo (edáfica), es decir, a los materiales poco consolidados (particularmente a los terrenos de cultivo), afecta los suelos hasta una profundidad promedio de un metro.

2.5.5 DESLIZAMIENTO

Este movimiento consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada. El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda, la que sería, la superficie de falla (Suarez, 2009). Los deslizamientos pueden ser de una sola masa que se mueve o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes, pueden obedecer a procesos naturales o a desestabilización de masas de tierra por el efecto de cortes, rellenos, deforestación, etc.

Los deslizamientos se pueden a su vez dividir en dos subtipos denominados deslizamientos rotacionales y traslacionales. Esta diferenciación es importante porque puede definir el sistema de análisis y estabilización a emplearse.

- ***Deslizamiento de rotación***

Movimiento relativamente lento de una masa de suelo, roca o ambos, a lo largo de una superficie de ruptura en forma circular (que coincide con la de transporte). En su fase inicial, existe poca distorsión de los materiales. En algunos casos, a medida que la masa se desplaza, los materiales se dislocan progresivamente y el mecanismo de inestabilidad deviene complejo (Samaniego, 2018).

El movimiento, aunque es curvilíneo no es necesariamente circular, lo cual es común en materiales residuales donde la resistencia al corte de los materiales aumenta con la profundidad.

En la cabeza del movimiento, el desplazamiento es aparentemente semi-vertical y tiene muy poca rotación, sin embargo, se puede observar que generalmente, la superficie original del terreno gira en dirección de la corona del talud, aunque otros bloques giren en la dirección opuesta (Suarez, 1998).

- ***Deslizamiento de traslación***

En el deslizamiento de traslación el movimiento de la masa se desplaza hacia fuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. La diferencia importante entre los movimientos de rotación y traslación está principalmente, en la aplicabilidad o no de los diversos sistemas de estabilización. Sin embargo, un movimiento de rotación trata de autoestabilizarse, mientras uno de traslación puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera hacia abajo (Suarez, 1998).

El material afectado es rocoso, estratificado o diaclasado, formando placas o paquetes cuyas bases quedan desprovistas de soporte, ya sea por erosión natural o por cortes artificiales en un talud (es tal vez el problema geodinámico más comúnmente desencadenado por la intervención humana, cuando se hacen cortes para carreteras, canales, etc.) (Samaniego, 2018).



2.5.6 FLUJOS O COLADAS

En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos y los puede haber de roca, de residuos o de suelo o tierra.

Suarez (2009) nos dice que los flujos muy lentos o extremadamente lentos pueden asimilarse en ocasiones, a los fenómenos de reptación y la diferencia consiste en que en los flujos existe una superficie fácilmente identificable de separación entre el material que se mueve y el subyacente, mientras en la reptación la velocidad del movimiento disminuye al profundizarse en el perfil, sin que exista una superficie definida de rotura.

La ocurrencia de flujos está generalmente, relacionada con la saturación de los materiales subsuperficiales. Algunos suelos absorben agua muy fácilmente cuando son alterados, fracturados o agrietados por un deslizamiento inicial y esta saturación conduce a la formación de un flujo.

Son fenómenos básicamente estacionales, es decir, frecuentes en temporada de lluvias, aunque son numerosos los casos relacionados con roturas de conductos de agua, depósitos de agua, o por efecto de la aceleración de deslizamientos, por trastornos en el régimen hidrogeológico e, inclusive, por sacudida sísmica (licuación de arenas) (Samaniego, 2018). En dependencia del material movilizado puede haber:

- **Flujo en roca**

Los movimientos de flujo en roca comprenden las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas. La distribución de velocidades puede simular la de líquidos viscosos. Este tipo de movimiento ocurre con mucha frecuencia en zonas tropicales de alta montaña y poca vegetación, especialmente en la cordillera de los Andes (Suarez, 2009).

Su ocurrencia es mayor en rocas ígneas y metamórficas muy fracturadas y pueden estar precedidos por fenómenos de inclinación. Estos flujos tienden a ser ligeramente húmedos y su velocidad tiende a ser rápida a muy rápida (Suarez, 1998).

- **Flujo de residuos (Detritos)**

Por lo general, un flujo de rocas termina en uno de residuos. Los materiales se van triturando por el mismo proceso de flujo y se puede observar una diferencia importante de tamaños entre la cabeza y el pie del movimiento (Suarez, 1998).

El movimiento de los flujos de detritos puede ser activado por las lluvias, debido a la pérdida de resistencia por la disminución de la succión al saturarse el material o por el desarrollo de fuerzas debidas al movimiento del agua subterránea (Collins y Znidarcic, 1997).

- **Flujo de lodo**

Suele involucrar volúmenes variables de material fino con alto contenido de limos y arcillas. Según Suarez, (2009) las velocidades de desplazamiento igualmente pueden ser variables y suelen estar relacionadas con factores como la pendiente de la ladera y la cantidad de agua involucrada en la movilización del material.

- **Flujo de tierra**

Suelen presentar grandes volúmenes de material terroso con menos de 2 mm de diámetro predominando sobre limos y arcillas, generando formas de lengua o de gran lóbulo. Las velocidades medias del



movimiento pueden variar entre: cm–dm/año a cm–m/día (estas pueden no ser homogéneas en toda la colada) (Matteis, 2003).

2.6. ESTABILIDAD DE TALUD

Se define como la inclinación que deberá tener un talud a lo largo de su vida útil sin fallar, mientras mayor sea la inclinación será mayor su eficiencia, dependiendo el propósito de dicha estructura. Aquí radica el motivo principal del estudio de dicho problema.

Matteis, (2003) manifiesta lo siguiente:

Los problemas relacionados con la estabilidad de laderas naturales difieren radicalmente de los que se presentan en taludes construidos por el ingeniero. Dentro de estos deben verse como esencialmente distintos los problemas de los cortes de laderas y los de terraplenes. En primer lugar, la naturaleza de los materiales involucrados y, en segundo, en todo un conjunto de circunstancias que dependen de cómo se formó el talud y de la historia geológica, de las condiciones climáticas que primaron a lo largo de tal historia y de la influencia del hombre que ejerce en la actualidad o haya ejercido en el pasado. Esta historia y génesis de formación de laderas y taludes, la historia de esfuerzos a que estuvieron sometidos y la influencia de condiciones climáticas, definen aspectos tan importantes como configuración de los suelos y las rocas, o el flujo de las aguas subterráneas a través de los suelos que forman la ladera o el talud, el cual influye decisivamente en sus condiciones de estabilidad.

2.7. METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD

Dentro de las metodologías disponibles, se encuentran los métodos de equilibrio límite, los métodos numéricos y los métodos dinámicos para el análisis de caídos de roca y flujos, entre otros.

Los métodos numéricos son la técnica que muestra la mejor aproximación al detalle, los métodos de límite de equilibrio, son más sencillos de utilizar y permiten analizar los casos de falla traslacional y de falla rotacional, así como las fallas de inclinación (“Toppling”) y las fallas en cuña.

En el caso de los sistemas de falla complejos, es conveniente utilizar metodologías de modelación que tengan en cuenta los factores que producen los movimientos. Según Suarez (2009) los factores que generan el deslizamiento pueden ser complejos y muy difíciles de modelar; no obstante, con el objeto de analizar esas situaciones complejas, existen algunas herramientas utilizando elementos finitos, diferencias finitas, elementos discretos y modelos dinámicos.

En la Tabla 2-1 se presenta un resumen de las metodologías utilizadas en los análisis convencionales de estabilidad de taludes.

Tabla 2-1: Metodologías utilizadas en la modelación de taludes

Método	Parámetros Utilizados	Ventajas	Limitaciones
Límite de equilibrio	Topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas.	Existe una gran cantidad de paquetes de software. Se obtiene un número de factor de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua.	Genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. No incluye análisis de las deformaciones.
Esfuerzo-deformación continuos	Geometría del talud, propiedades de los materiales, propiedades elásticas, elasto-plásticas y de "creep". Niveles freáticos, resistencia.	Permite simular procesos de deformación. Permite determinar la deformación del talud y el proceso de falla. Existen programas para trabajar en dos y tres dimensiones. Se puede incluir análisis dinámico y análisis de "creep".	Es complejo y no lineal. Comúnmente no se tiene conocimiento de los valores reales a utilizar en la modelación. Se presentan varios grados de libertad. No permite modelar roca muy fracturada.
Discontinuos Esfuerzo-deformación elementos discretos	Geometría del talud, propiedades del material, rigidez, discontinuidades resistencia y niveles freáticos.	Permite analizar la deformación y el movimiento relativo de bloques.	Existe poca información disponible sobre las propiedades de las juntas. Se presentan problemas de escala, especialmente en los taludes en roca.
Cinemáticos estereográficos para taludes en roca	Geometría y características de las discontinuidades. Resistencia a las discontinuidades.	Es relativamente fácil de utilizar. Permite la identificación y análisis de bloques críticos, utilizando teoría de bloques. Pueden combinarse con técnicas estadísticas.	Útiles para el diseño preliminar. Se requiere criterio de ingeniería para determinar cuáles son las discontinuidades críticas. Evalúa las juntas.
Dinámica de caídos de roca	Geometría del talud, tamaño y forma de los bloques y coeficiente de restitución.	Permite analizar la dinámica de los bloques y existen programas en dos y tres dimensiones.	Existe muy poca experiencia de su uso en los países tropicales.
Dinámica de flujos	Relieve del terreno. Concentración de sedimentos, viscosidad y propiedades de la mezcla suelo-agua.	Se puede predecir el comportamiento, velocidades, distancia de recorrido y sedimentación de los flujos.	Se requiere calibrar los modelos para los materiales de cada región. Los resultados varían de acuerdo con el modelo utilizado.

Fuente: Suarez, 2019.

2.8. FACTOR DE SEGURIDAD (F.S.)

Suarez (2009) define lo siguiente:

Un análisis de límite de equilibrio permite obtener un factor de seguridad o a través de un análisis regresivo, obtener los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla. Una vez se han determinado las propiedades de resistencia al cortante de los suelos, las presiones de poros y otras propiedades del suelo y del talud, se puede proceder a calcular el factor de seguridad del talud. Este análisis de estabilidad consiste en determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla o deslizamiento.

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla.

2.9. METODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE

Durante muchos años se ha realizado el análisis de los movimientos de los taludes o laderas, haciendo uso de las técnicas de equilibrio límite. Este sistema supone que, en el caso de una falla las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie de falla y equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

A lo largo de los años se han desarrollado y mejorado varios métodos de estudio para este tema, el análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Se han ido mejorando los sistemas de dovelas desarrollados por Petterson y Fellenius (1936). Algunos métodos son precisos y otros, solamente aproximados. Los métodos de Bishop (1955) y Janbú (1954) han sido muy utilizados y se han desarrollado métodos de análisis más precisos y complejos como los de Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967), ayudados por programas de software que permiten realizar análisis muy rigurosos. En la Tabla 2-2 se enumeran algunos de los métodos más utilizados.

Tabla 2-2: Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación.
Arco circular, (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\phi = 0$).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, sea asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

Fuente: Suarez, 2009.



2.9.1 Método del talud infinito

Con frecuencia, en los deslizamientos de gran magnitud, la mayor parte de la masa deslizada se mueve aproximadamente en forma paralela a la superficie del terreno. La naturaleza del movimiento está controlada por algún elemento geológico como una capa de roca o una capa de materiales poco resistentes (Suarez, 2009). Si la longitud relativa del deslizamiento es muy grande en relación con su espesor, la contribución de la resistencia en la cabeza y el pie del deslizamiento, es menor comparada con la resistencia del resto de la superficie de falla. Este tipo de deslizamiento se puede analizar suponiendo un talud infinito.

Las suposiciones del método del talud infinito son las siguientes: suelo isotrópico y homogéneo, talud infinitamente largo y superficie de falla paralela al talud. Analizando el elemento de la Figura 2-7 y realizando una igualdad de fuerzas resistentes y actuantes, se obtiene la siguiente expresión:

$$F.S. = \frac{c + (\gamma z - \gamma_w h) \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

γ = Peso específico del suelo

γ_w = Peso específico del agua

β = Pendiente del talud

ϕ = Angulo de fricción

c = Cohesión del suelo

Simplificando para un talud seco de suelos sin cohesión ($c = 0$)

$$F.S. = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \quad \text{Ecuación 2}$$

El ángulo de fricción para el factor de seguridad igual a 1.0, se le denomina ángulo de reposo.

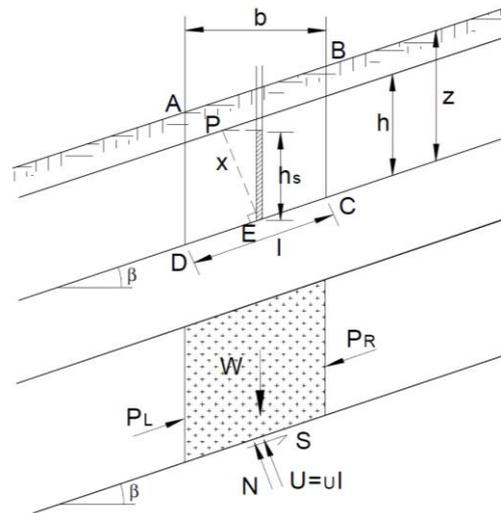


Figura 2-7: Diagrama de análisis, método del talud infinito (Suarez, 2009).

2.9.2 Método Ordinario o de Fellenius

El método de las Dovelas asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de estas fuerzas obtiene el Factor de Seguridad.

Las fuerzas que actúan sobre una dovela son (Figura 2-8):

- El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.
- Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangente a la superficie de falla.
- Las fuerzas de presión de tierras y cortante en las paredes entre dovelas, las cuales no son consideradas por Fellenius, pero sí son tenidas en cuenta en otros métodos de análisis más detallados.

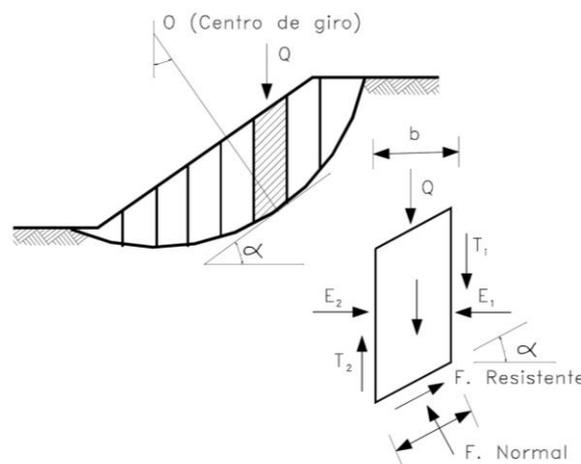


Figura 2-8: Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas (Suarez, 1998).



El método de Fellenius calcula el Factor de seguridad con la siguiente expresión:

$$F.S. = \frac{\sum [C' b \sec \alpha + (W \cos \alpha - u b \sec \alpha) \tan \phi]}{\sum W \sin \alpha} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

α = Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.

W = Peso total de cada tajada.

u = Presión de poros = $\gamma_w h_w$

b = Ancho de la tajada

C', ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

2.9.3 Método de Bishop

Bishop (1955) presentó un método utilizando Dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las Dovelas. La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo a la expresión:

$$F.S. = \frac{\sum [C' b + (W - u b) \tan \phi / m_a]}{\sum W \sin \alpha} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$$m_a = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F.S.} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

b = Ancho de la Dovela

W = Peso de cada Dovela

C', ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w h_w$

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

Como se puede observar en la ecuación, el término factor de seguridad FS se encuentra tanto en la izquierda como en la derecha de la ecuación; se requiere un proceso de prueba y error para calcular el factor de seguridad.

2.9.4 Método de Janbú

Janbú (1973) presenta un método de Dovelas para superficies de falla curvas, no circulares. De acuerdo con Janbú. Donde f_0 , depende de la curvatura de la superficie de falla (Figura 2-9).

$$F.S. = \frac{f_o \sum \left\{ [c'b + (W - ub) \tan \phi] \frac{1}{\cos \alpha m} \right\}}{\sum (W \tan \alpha)} \quad \text{Ecuación 6}$$

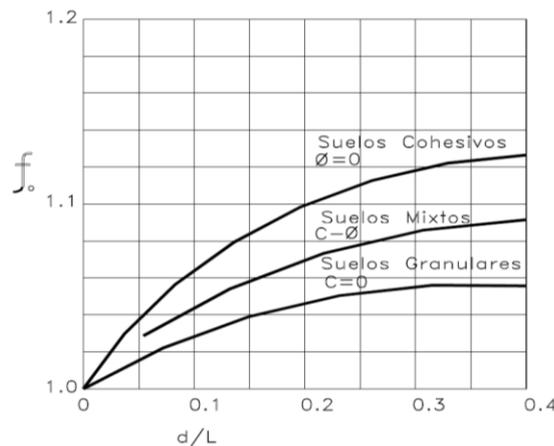
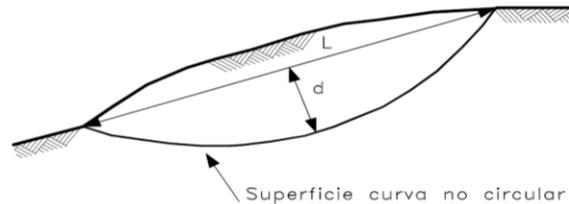


Figura 2-9: Diagrama para determinar el factor f_o para el método Janbú (Suarez, 2009)

2.10. COMPARACIÓN DE LOS DIVERSOS MÉTODOS

La cantidad de métodos que se utilizan, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad.

A nivel mundial los métodos de los métodos Bishop y de Janbú son los más utilizados por los ingenieros geotécnicos, los cuales en su concepción teórica no satisfacen equilibrios de fuerzas o de momentos. Los valores de factores de seguridad que se obtienen por estos dos métodos generalmente, difieren en forma importante de resultados utilizando procedimientos que satisfacen el equilibrio, como son los métodos de Spencer y de Morgenstern-Price (Suarez, 1998).

Según Suarez (2009) los factores de seguridad determinados con el método de Bishop difieren por aproximadamente el 5% con respecto a soluciones más precisas, mientras el método simplificado de Janbú generalmente, subestima el factor de seguridad hasta valores del 30%, aunque en algunos casos los sobrestima hasta valores del 5%. Los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis. En los métodos más complejos y precisos se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a valores no realísticos de FS.

Braja (2001) afirma que el método simplificado de Bishop es probablemente el método más ampliamente usado, se obtienen resultados con un alto grado de confianza en la mayoría de los casos con la ayuda de una computadora.

2.11. ENSAYOS GEOFISICOS

La Geofísica es la ciencia que estudia la Tierra mediante métodos de la física, a fin de conocer su evolución, características (geofísica pura) y también como herramienta de prospección de recursos (geofísica aplicada) (Avilés & Barzallo, 2016).

La ingeniería con el paso de los años ha podido adoptar este tipo de ensayos para poder estimar la velocidad de las ondas en la profundidad. De acuerdo a la onda de excitación que se utilice se clasifican en activos o pasivos. Otra forma de clasificar estos ensayos es si necesita un sondaje o no para poder realizar la medición. Se clasifican en invasivos si la instrumentación se instala a cierta profundidad en varios sondeos como el caso de los ensayos UPHOLE, DOWNHOLE y CROSSHOLE. Finalmente se clasifican como no invasivos si la instrumentación se coloca en la superficie del terreno y se realiza la medición con una fuente activa también ubicada en la superficie. Se conocen ensayos como los de tipo SAW (spectral analysis surface waves) y MASW (multichannel analysis surface waves) (Correia, 2015). En la Figura 2-10 se presenta una compilación de varios ensayos geofísicos como: gravimétrico, magnetométrico, eléctrico, sísmico, radioactivo y perfilajes en pozo.

Pueden medirse directamente los campos físicos naturales (gravedad, magnetismo, radioactividad, entre otros) o generarse campos artificiales por emisión de electricidad, energía sísmica, entre otros, para así obtener mediciones más efectivas a los fines exploratorios (Chelotti, Acosta, & Foster, 2009).

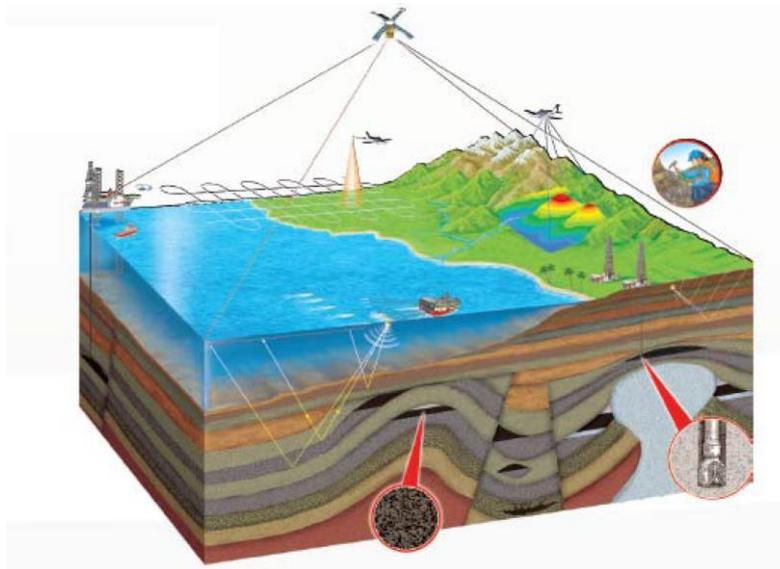


Figura 2-10: Aplicación de diferentes métodos geofísicos (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2009).

2.12. METODOS SÍSMICOS

El método geofísico que ha proporcionado mayor información acerca del interior de la Tierra y ha delimitado los yacimientos de hidrocarburos con mejor resolución que cualquier otro, es la sismología.

Las ondas generadas durante un terremoto o evento sísmico (artificial), se someten a detallados estudios que brindan una relevante información acerca de la estratificación de las capas y de las discontinuidades en el interior de la Tierra (Lazcano, 2007).

El método de "refracción", fue el primero en usarse con fines de ingeniería con el que se logró interpretar:

- Presencia de cuerpos de alta velocidad
- Profundidad al techo de cuerpos de alta velocidad
- Gradientes de velocidad

Se ha encontrado que las desventajas para aplicar la sismología se tienen:

- Los materiales suaves confinados por aquellos densos no son detectados.
- Una capa de espesor menor a un-cuarto de la profundidad al techo del mismo, no se detecta.

2.13. ONDAS SISMICAS

En un sismo se transmiten ondas que viajan al interior de la Tierra, siguiendo caminos curvos de acuerdo a la variada densidad y composición de las capas del interior de la Tierra. Estas ondas sísmicas son un tipo de onda elástica, producto de la propagación de perturbaciones temporales en el campo de esfuerzos que generan el movimiento del medio (Correia, 2015). Por otra parte, Lazcano (2007), expresa que las ondas sísmicas se pueden definir como una cantidad pequeña de energía elástica de deformación que viaja a través del subsuelo desde la fuente sísmica a velocidades que dependen de las densidades del medio por el cual viajan, a la vez que de su módulo de elasticidad.

2.14. ONDAS SÍSMICAS DE CUERPO

Estas ondas elásticas se propagan en el interior de la tierra. En prospección de reflexión y refracción, estas ondas son la fuente de información usada para representar el interior de la Tierra, debido a la propagación en todas las direcciones lejos de la fuente, a su vez este tipo de ondas se divide en: Ondas P y Ondas S (Mercedes & Montenegro, 2005).

2.14.1 Ondas Primarias (P)

Las Ondas P o también conocidas como ondas de compresión, se propagan en la superficie y en el subsuelo, y retornan por reflexión y refracción; poseen las velocidades más altas y arriban antes que ninguna otra, se denotan como " V_p " (Correia, 2015). En la figura Figura 2-11 se observa su comportamiento.

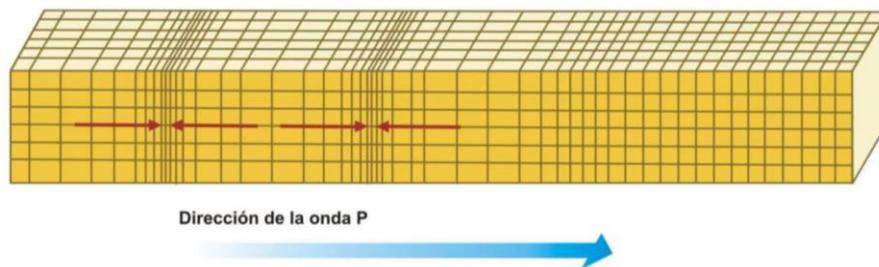


Figura 2-11: Ondas Primarias "P" (Instituto de Prevención Sísmica).

El rango de velocidades de estas ondas varía entre 300 m/s y 7000 m/s, de acuerdo con los valores de la Tabla 2-3 según las investigaciones de Jakovsky.

Tabla 2-3: Rangos usuales de variación de la velocidad de compresión en diversos tipos de materiales geológicos

Rangos usuales de variación de la velocidad de compresión en diversos tipos de materiales geológicos.		
Material Tipo	Velocidad de Compresión (m/s)	
Material superficial (Capa de alteración de suelos y rocas)	305	610
Grava, arena y arcillas (secas y húmedas)	468	915
Arena húmeda	610	1830
Areniscas y lutitas	1830	4270
Caliza	2140	6100
Granito	4580	5800
Rocas metamórficas	3050	7020

Fuente: Avilés y Barzallo, 2016.

2.14.2 Ondas Secundarias (S)

Conocidas también como ondas transversales secundarias o de corte, "Vs". El movimiento de partículas en este caso ocurre perpendicular a la dirección de propagación por efecto del esfuerzo de corte. Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. Su velocidad es alrededor de 58% de la de una onda P para cualquier material sólido (Correia, 2015). En la Figura 2-12 se observa su comportamiento.

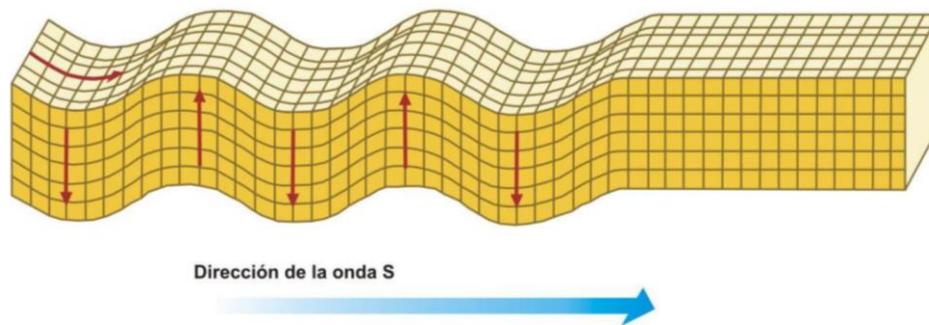


Figura 2-12: Ondas Secundarias "S" (Instituto de Prevención Sísmica).

2.15. ONDAS SÍSMICAS DE SUPERFICIE

Son ondas que se propagan a lo largo de la superficie de la tierra. Sus amplitudes en la superficie de la Tierra pueden ser muy largas, sin embargo, decaen exponencialmente con la profundidad. Se propagan más lentamente que las ondas S, se generan con menor eficiencia por fuentes enterradas y tienen amplitudes que decaen más lentamente con la distancia desde la fuente, que las observadas en las ondas corporales (Jaimes, 2011).

Las ondas superficiales tienen la característica de que cambian de forma mientras viajan, debido a que los diferentes componentes de las frecuencias que las constituyen se propagan a diferentes velocidades, lo cual se conoce como onda de dispersión. En la Figura 2-13 y Figura 2-14 se observa su comportamiento.

Estas ondas son producto de la energía que poseen las ondas de cuerpo que llegan a la superficie. Existen dos tipos de ondas superficiales: Love y Rayleigh.

2.15.1 Ondas Love (L)

Ocurren solo en donde un medio con ondas S de baja velocidad subyace de una capa con ondas S de mayor velocidad. El movimiento de partículas ocurre en la dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda pero paralelo a la superficie (Avilés & Barzallo, 2016).

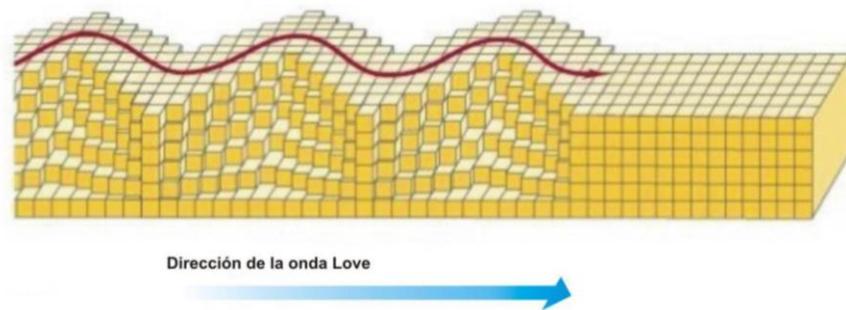


Figura 2-13: Ondas Love "L" (Instituto de Prevención Sísmica).

2.15.2 Ondas Rayleigh

Viajan a lo largo de la superficie libre de la tierra con amplitudes que disminuyen exponencialmente con la profundidad. El movimiento de las partículas es en sentido elíptico retrogrado en un plano vertical con respecto a la superficie, como contienen componentes de corte solo viajan a través de medios sólidos. Su velocidad de propagación que se define como velocidad de fase C_r , es determinada principalmente por la velocidad V_s de los materiales. La relación entre ambas se expresa como $C_r = 0.94V_s$ (Jaimes, 2011). En la Figura 2-14 se observa su comportamiento.

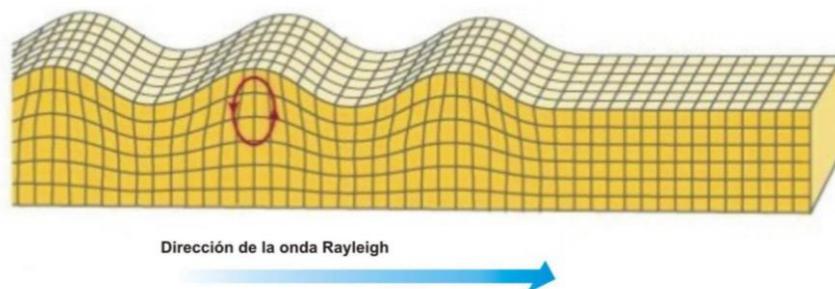


Figura 2-14: Ondas Rayleigh "R" (Instituto de Prevención Sísmica).

2.16. VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (VS)

El autor Jaimes, (2011) define que para la caracterización de suelos desde el punto de vista sísmico es importante conocer los perfiles de velocidad V_s , de las capas de subsuelo que subyacen el terreno, hasta una profundidad de al menos 30 metros; el perfil de velocidades en los primeros 30 metros de profundidad resulta necesario para (Tabla 2-4):

- Evaluar la respuesta sísmica del terreno donde se va a realizar una construcción.
- Evaluar potenciales de licuefacción de suelos en un terreno (cuando se encuentren arenas).

- Evaluar la transmisión de vibraciones generadas por explosiones, máquinas u otros elementos en superficie o profundidad.
- Utilizando el perfil de velocidad de onda de corte V_s , en los primeros 30 metros de profundidad es posible determinar una velocidad equivalente V_{s30} pudiéndose caracterizar el terreno de manera global. Las velocidades de onda de corte asociadas a los diferentes tipos de suelos son las siguientes:

Tabla 2-4: Velocidades de onda asociados a los diferentes tipos de suelos

TIPO DE SUELO	V_s (m/s)
Roca	$V_s > 1000$
Grava	$V_s > 700$
Arena Densa	$700 > V_s > 500$
Arena Suelta	$500 > V_s > 400$
Suelo Fino Consistente	$400 > V_s > 200$
Suelo Fino Blando	$200 > V_s > 80$

Fuente: Jaimes, 2011.

Para poder comparar en términos de velocidad promedio, se realiza el cálculo de V_{s30} , que corresponde a la relación:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s-i}}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

V_{s-i} : velocidad de ondas de corte de corte del estrato i en m/s.

h_i : espesor del estrato i en metros.

n : número de estratos en los 30 metros superiores del terreno.

2.17. PRINCIPIOS Y LEYES QUE RIGEN LAS ONDAS

Los métodos sísmicos hacen uso de diversas propiedades de la propagación y transmisión del movimiento ondulatorio en los materiales, estas propiedades se enuncian en los principios mencionados a continuación:

2.17.1 Principio de Huygens

Cada punto de un frente de ondas se convierte en emisor de un nuevo frente de ondas en todas direcciones. Todos estos nuevos frentes se integran en uno único mientras el medio de propagación sea homogéneo. En un medio isótropo el frente de ondas es esférico. Si el medio es anisótropo el frente de onda se deforma. Y si encuentra heterogeneidades genera difracciones (Avilés & Barzallo, 2016).

2.17.2 Principio de Fermat

Todo movimiento ondulatorio que viaja a través de un medio de un punto a otro, usará la trayectoria de tiempo mínimo (Comisión Nacional del Agua, 2009).

2.17.3 Principio de Snell

Los rayos incidente y refractado y la normal a la superficie en el punto de incidencia están en un mismo plano. La relación entre los senos de los ángulos incidente i y de refracción r medidos entre los rayos y la normal es constante entre dos medios e igual a la relación de velocidades de la onda entre uno y otro medio, constante que se conoce como índice de refracción n (Avilés & Barzallo, 2016).

$$n = V_1 / V_2 = \sin \theta_1 / \sin \theta_2$$

Ecuación 8

Esta ley es muy importante en la caracterización de suelos, ya que los métodos sísmicos se basan en que la velocidad de las ondas elásticas es diferente para rocas diferentes (Figura 2-15).

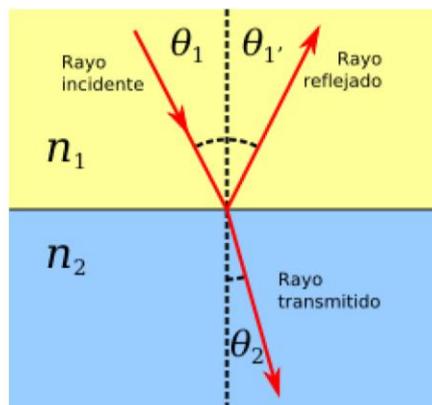


Figura 2-15: Diagrama de reflexión y refracción, Ley de Snell (Avilés & Barzallo, 2016).

2.18. FACTORES QUE AFECTAN LA PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS

Chelotti et al., (2009) señalan los principales factores que afectan la propagación de las ondas sísmicas en un medio son:

- **Absorción o Atenuación inelástica:** Es la pérdida de energía de la onda debida a la fricción entre granos de la roca y que se convierte en calor. Está en relación directa con la compactación

y resulta: $A_i = A_o \cdot e^{-q \cdot r}$ (siendo A_o la amplitud o intensidad inicial, r la distancia recorrida y q el coeficiente de absorción, en dB/λ)

- **Divergencia esférica:** Es la distribución de la energía inicial focal (teóricamente puntual) en una superficie cuasi-esférica cada vez mayor. Representa la disminución exponencial de la relación energía/área.
- **Difracciones:** Análogamente a los fenómenos ópticos, son consecuencia del Principio de Huygens y se producen por heterogeneidades laterales (fallas, cambios bruscos de buzamiento, terminaciones rocosas subhorizontales, etc.).



- **Dispersión:** Los cambios de la frecuencia producen variaciones en la velocidad de las ondas, ya que existe una dependencia física. Una gran disminución de frecuencia produce una pequeña reducción de la velocidad. (Es el mismo efecto que sufre la luz cuando separa sus colores en un prisma: para cada frecuencia, distinta velocidad y, por lo tanto, distinto ángulo de refracción.)
- **Desperdigamiento (Scattering):** El choque de las ondas con partículas menores produce ondas pequeñas que propagan energía en todas direcciones.
- **Conversión de modo de ondas:** Cuando una onda P que viaja a través de un medio llega a una interfaz con un ángulo de incidencia menor que 90 grados, parte de su energía es reflejada, parte es transmitida y otra parte se convierte en ondas S. Los ángulos con que cada rayo de onda P y S reflejada y transmitida viajará por el medio están dados por la ley de Snell.

2.19. PARAMETROS DINAMICOS DEL SUBSUELO

Las constantes elásticas, conocidas también como módulos elásticos, juegan un papel fundamental a la hora de caracterizar los suelos. Estas constantes son importantes en la sismología debido a que la velocidad de las ondas sísmicas depende de las mismas y de la densidad de la roca. De esta manera, son empleadas para la caracterización de sitios en la geotecnia aplicada a ingeniería civil. La teoría de la elasticidad comprende el estudio de los materiales sólidos elásticos lineales sometidos a pequeñas deformaciones, de tal manera que los esfuerzos y deformaciones se relacionen linealmente entre sí (Jaimes, 2011).

Constantes elásticas más comunes son:

- **Coefficiente de Poisson (ν).** Todo elemento solicitado a carga axial experimenta una deformación no solo en el sentido de la sollicitación (deformación primaria x), sino también según el eje perpendicular (deformación secundaria o inducida y o z), o sea, toda tracción longitudinal con alargamiento implica una contracción transversal (disminución de la sección del elemento estirado).

Ecuación 9

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$$

Y en función de las velocidades sísmicas:

Ecuación 10

$$\nu = \frac{\left(\frac{v_p}{v_s}\right) - 2}{\left(\frac{v_p}{v_s}\right) - 2}$$

$v_p =$ ondas primarias

$v_s =$ ondas secundarias

Un material con coeficiente de Poisson 0,5 es un material perfectamente incompresible deformado elásticamente a deformaciones pequeñas.



- **Módulo de Corte (G).** Mide la resistencia de un cuerpo a la fuerza de corte, cuando un cuerpo es sometido a una fuerza paralela a una de sus caras mientras la otra se mantiene fija, no produce un cambio en su volumen, significa que, a su vez, produce una fuerza opuesta a la deformación.

La velocidad Vs está controlada por el módulo de corte de la siguiente manera:

$$G = Vs^2 \cdot \gamma$$

Ecuación 11

- **Módulo de Young (E).** La razón de proporcionalidad entre el esfuerzo (fuerza por unidad de área) y deformación unitaria (deformación por unidad de longitud) está dada por la constante E, denominada módulo de Young, que es característico de cada material. Se puede expresar como:

Ecuación 12

$$E = 2G(1 + \nu)$$

- **Módulo Volumétrico K.** Mide la resistencia de un material a la compresión uniforme y está definido como el aumento de presión que causa la disminución relativa de volumen.

El módulo se define como:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

Ecuación 13

2.20. BASE TEÓRICA PARA LA EXPRESIÓN EMPÍRICA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CARGA ADMISIBLE Qa

La expresión empírica para determinar la capacidad máxima de compresión en la base de cimentación puede expresarse considerando parámetros como: profundidad de desplante Df, densidad del suelo por encima de la base de fundación γ y el factor de seguridad n de la siguiente manera:

$$q_a = \gamma \cdot D_f / n$$

Ecuación 14

Con el fin de incorporar la velocidad de onda de corte Vs que se obtiene de la interpretación geofísica (MASW) se expresará el parámetro de profundidad de desplante Df como velocidad multiplicada por el tiempo de la siguiente manera:



$$Df=Vs.t$$

Ecuación 15

Donde V_s es la velocidad de onda cortante media en el terreno de la cimentación y t es un parámetro desconocido. El parámetro t de tiempo se introduce en el presente documento simplemente como un parámetro ficticio con el fin de mantener la coherencia en unidades apropiadas.

Sustituyendo la fórmula (Ecuación 15) en la expresión (Ecuación 14) se obtiene:

$$q_a = \gamma Vs.t/n$$

Ecuación 16

Para una formación rocosa dura y con los parámetros sugeridos por Keceli (2000): $q_a = 10000 \text{KN/m}^2$, $V_s = 4000 \text{m/s}$, $\gamma = 35 \text{KN/m}^3$ y $n = 1.4$, se puede determinar el parámetro desconocido t .

Sustituyendo en la fórmula (Ecuación 16) se obtiene el valor de $t = 0.1 \text{seg}$.

Entonces la expresión empírica para el cálculo de la carga admisible en una formación rocosa dura se puede determinar de la siguiente manera:

$$q_a = 0.1.\gamma Vs/n$$

Ecuación 17

Esta es la expresión empírica deseada para determinar la carga admisible q_a , en suelos y rocas, una vez que se disponga de la densidad media, γ , para la capa de suelo por encima de la base de cimentación y la velocidad media de la onda in situ V_s de la capa de suelo justo debajo de la base de la cimentación. La unidad de V_s es en m/s , la unidad de γ es en KN/m^3 , entonces el valor de q_a resultante está en unidades de kPa . Los valores de peso de la unidad se pueden calcular mediante las expresiones empíricas:

$$\gamma_p = \gamma_o + 0.002V_p$$

Ecuación 18

Ecuación 19

$$\gamma_s = 4.3V_s^{0.25}$$

Según lo expuesto anteriormente por Tezcan et al. (2006) y por Keceli (2009), respectivamente. La segunda expresión es especialmente recomendable para suelos granulares, para los cuales los valores medidos V_s representan adecuadamente el grado de contenido de agua y/o porosidad.

Los factores de seguridad y la carga admisible para diferentes tipos de suelo (roca) se puede determinar de acuerdo con la Tabla 2-5.

Tabla 2-5: Criterios para Carga Admisible en función de V_s y factores de seguridad n .

Soil type	V_s -range (m/s)	n	$q_a=(KN/m^2)$
Hard rocks	$V_s \geq 4000$	$n=1.4$	$q_a=0.071\gamma V_s$
Soft rocks	$750 \leq V_s \leq 4000$	$n=4.6-8.10$ V_s	$q_a=0.1\gamma V_s/n$
Soils	$750 \geq V_s$	$n=4.0$	$q_a=0.025\gamma V_s\beta$
Linear interpolation is applied for $750 \leq V_s \leq 4000$ m/s; β , correction factor is used for sands only.			

Para otros valores de V_s mayores a 750m/s y menores a 4000m/s, se recomienda la interpolación lineal para determinar el valor de n .

Se determinó por Terzagui y Peck (1976) que la anchura de pie B tiene una influencia en la reducción del valor de la presión de carga admisible para suelos granulares. Por tanto, un factor de corrección β se introduce en la fórmula solo para suelos arenosos, como se indica en la tercera línea de la Tabla 2-5.

Los valores propuestos de este factor de corrección de diferente anchura B de cimentación son los siguientes:

$$\beta = 1.00 \text{ para } (0 \leq B \leq 1.20 \text{ m})$$

Ecuación 20

$$\beta = 1.13 - 0.11B \text{ para } (1.2 \leq B \leq 3.00 \text{ m})$$

Ecuación 21

$$\beta = 0.83 - 0.01B \text{ para } (3.0 \leq B \leq 12.00 \text{ m})$$

Ecuación 22

2.21. COEFICIENTE DE BALASTO

La velocidad de la onda de corte puede ser utilizada con éxito para determinar k_s =coeficiente de balasto de la capa de suelo justo debajo de la base de la cimentación. El coeficiente de k_s de balasto se define, similar a la definición de constante de muelle en la ingeniería mecánica, como la presión vertical necesaria para producir una unidad de desplazamiento vertical y está expresada como:

$$k_s = q_a / d$$

Ecuación 23



Para cimentaciones superficiales, el desplazamiento vertical total está restringido a 1 pulgada = 0.025m, según lo prescrito por Terzagui y Peck (1976). Cuando el valor de $d = 0.025m$ es sustituido en la ecuación 22, el coeficiente de balasto se convierte en unidades de KN/m^3 ;

$$k_s = 40 q_a \text{ o } k_s = 4 \gamma V_s/n$$

Ecuación 24

2.22. PARAMETROS QUE AFECTAN LA VELOCIDAD DE LAS ONDAS

Los parámetros que afectan la velocidad de propagación de las ondas sísmicas de acuerdo a Jaimes (2011) son:

- **Litología:** La velocidad de las ondas es diferente para rocas diferentes.
- **Porosidad:** Disminuye con la profundidad aumentando la densidad y la velocidad.
- **Edad de la roca:** No varía por sí misma la velocidad, pero si los procesos asociados al paso del tiempo (erosión).
- **Fluidos y saturación de agua:** Al aumentar la densidad del fluido intersticial la velocidad aumenta, (saturación del suelo).
- **Cementación:** Aumenta la velocidad, disminuye la porosidad y aumenta los módulos elásticos.
- **Presión de poros y presión litostática:** Si la presión litostática aumenta (presión impuesta sobre una capa de suelo o roca por el peso del material que lo recubre) y la presión de poros se mantiene constante la matriz se comprime aumentando los módulos elásticos y la densidad varía aumentando la velocidad.
- **Contenido de arcillas:** Para niveles de arcilla bajos la velocidad aumenta hasta el punto en el cual desciende debido a que la arcilla empieza a hacer parte de la matriz.
- **Geometría de los poros:** La geometría y relación entre ellos determina parcialmente la estructura sólida de la roca y los módulos elásticos.
- **Anisotropía:** La velocidad se ve afectada por el ángulo de incidencia de la onda y el plano normal.

2.23. METODOS SÍSMICOS NO INVASIVOS

No se considera la extracción de muestras de suelo o la alteración de la superficie sobre la cual se necesita obtener información y se conoce como un método no invasivo ya que no necesita de perforaciones para la determinación de V_s y V_p , a diferencia de los métodos conocidos como down-hole, up-hole o cross-hole.

Dentro de los métodos sísmicos de la geofísica aplicada se encuentra los de refracción y reflexión sísmica. En estos métodos se mide el lapso de tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre un sitio donde se generan y la llegada de estas a diferentes puntos de observación (Correia, 2015). En este método se dispone una serie de sensores en alineados en puntos conocidos.

Existen otros métodos que utilizan las ondas superficiales del tipo Rayleigh, como el SSRM (Steady State Rayleigh Method), SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) y MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), entre otros, los cuales también cuentan con un arreglo de sensores en superficie y una fuente de excitación ubicada a una distancia conocida. La diferencia con la refracción y reflexión de onda es justamente el tipo de onda utilizado en su análisis. (Correia, 2015)

2.23.1 SISMICA DE REFRACCIÓN

Este método mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas, desde el sitio donde se genera la onda sísmica y la llegada de éstas a los puntos de observación. Para ello se usan sensores en línea recta a distancias conocidas. La adquisición se realiza con sensores (geófonos), la unidad de adquisición (en ella se almacenan los movimientos del terreno detectados por los géofonos), los cables de conexión y el cable de trigger (encargado de demarcar el momento de inicio de registro en la unidad de adquisición) (Jaimes, 2011) (Figura 2-16).

La longitud de los perfiles suele situarse habitualmente entre 20 y 150 m, con separación entre géofonos que no exceden los 10 m.

Los géofonos, también denominados sismodetectores, son transductores que convierten la energía mecánica manifestada a través de pequeños movimientos del terreno en energía eléctrica, la cual es transmitida por un cable hasta el sismógrafo que amplifica, filtra y registra las señales en papel (sismograma), película o cinta magnética, según sea el análisis y proceso que posteriormente se requiera realizar a los datos (Comisión Nacional del Agua, 2009).

El instante en que se originan las ondas (llamado tiempo cero) es registrado dentro del expediente de pulsos de llegada. Cada expediente consta de un conjunto de registros individuales provenientes de cada geófono. Los datos son manipulados para ser presentados en un formato gráfico llamado curva tiempo-distancia o dromocronas cuya forma está relacionada con las condiciones geológicas del lugar en estudio. Las velocidades calculadas están relacionadas a la identificación y cuantificación de diferentes tipos de material detectados en profundidad (Lopez, Mejia, & Vega, 2008).

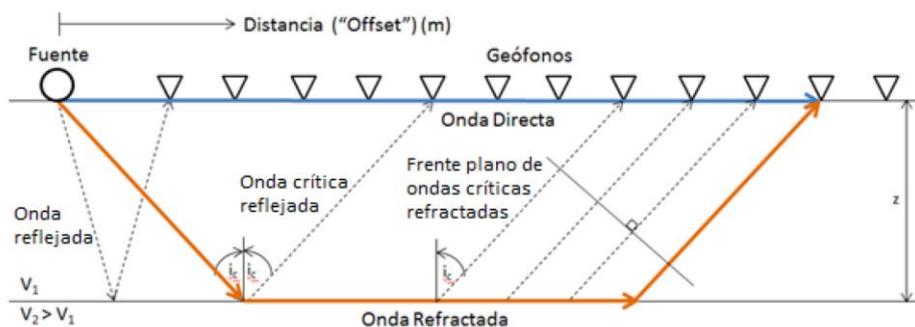


Figura 2-16: Esquema de ensayos de refracción y reflexión sísmica (Guarachi, 2013)

La Comisión Nacional del Agua, (2009) lo resume así, a partir de la observación, procesamiento y análisis de estos registros o sismogramas es posible construir gráficas tiempo - distancia (Figura 2-17a). Las ondas sísmicas longitudinales P y transversales S viajan a través del medio con frentes de onda como los mostrados en la Figura 2-17b, de donde se obtienen los tiempos de arribo, desde el punto de tiro hasta los detectores y las distancias están determinadas por la separación entre géofonos. Con el análisis y procesamiento se determina el número de capas que conforman el subsuelo, sus espesores y velocidades de propagación (Figura 2-17c).

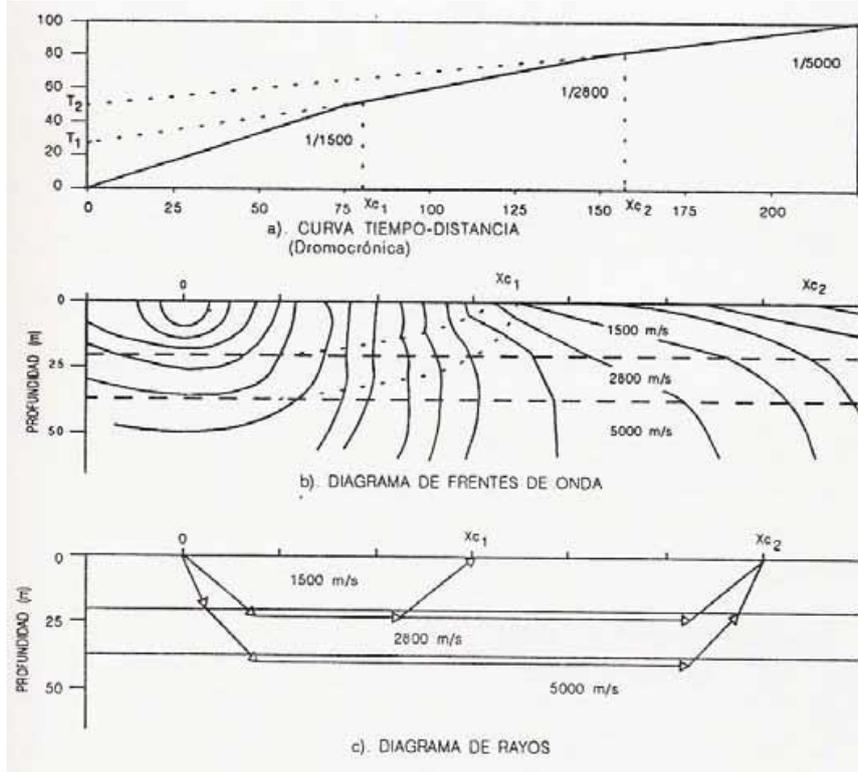


Figura 2-17: Método de refracción sísmica (Comisión Nacional del Agua, 2009)

Entre las aplicaciones más importantes en la Ingeniería Civil se utiliza para la medición de espesores de recubrimiento, profundidad de nivel freático, prospección petrolera y en la realización de estudios hidrogeológicos. Este método permite la localización (profundidad del sustrato), posición del acuífero bajo ciertas condiciones, así como la caracterización de suelos.

Está limitado por la cantidad y accesibilidad de zonas descubiertas o zonas verdes con suficiente extensión de tal manera que las extensiones de terrenos disponibles en el área de estudio limitan los alcances de la aplicación del método y por ende la profundidad de exploración. Además, si existe un estrato o capa que tiene una velocidad sísmica más baja que la capa inmediata superior a esta (caso de inversión de velocidad), la capa con baja velocidad sísmica no puede ser detectada (Lopez et al., 2008).

2.24. ONDAS SUPERFICIALES (RAYLEIGH)

Las ondas Rayleigh en un semiespacio homogéneo, isótropo y elástico no son dispersivas, lo que quiere decir que su velocidad es una función de las propiedades mecánicas del medio, pero no de la frecuencia. En medios estratificados sí se tiene el fenómeno de la dispersión geométrica, por lo que la velocidad de onda es función de la frecuencia, tal como se presenta en la Figura 2-18.

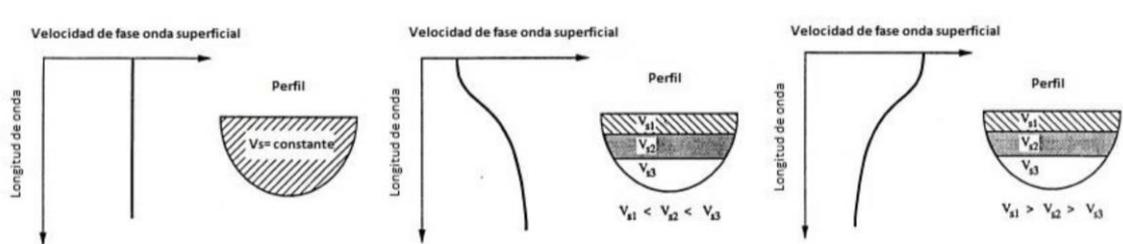


Figura 2-18: Ejemplos de la dispersión en medios estratificados (Modificado Rix 1988, Foti 2000).



Existen otros métodos que utilizan las *ondas superficiales* del tipo Rayleigh, como el SSRM (Steady State Rayleigh Method), SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMi (Refraction Microtremor) y ESAC (método de auto correlación espacial extendida), la diferencia con la refracción y reflexión sísmica es el tipo de onda utilizado en su análisis.

El procedimiento común para la caracterización mediante ondas superficiales (Rayleigh) consta de tres pasos:

1. Adquisición de datos: Se realiza mediante registros de campo con los debidos arreglos de geófonos que depende del método utilizado.
2. Análisis de dispersión: extracción de curvas de dispersión de cada registro. Una vez realizadas las mediciones en terreno se debe continuar con la interpretación de los datos, con el objetivo de calcular la curva de dispersión experimental que corresponde a la curva de velocidad de fase en función de la longitud de onda o de la frecuencia, construida a partir de los datos registrados en terreno.
3. Inversión: cálculo de V_s en profundidad: Este análisis está orientado a identificar parámetros desconocidos de un problema a partir de un modelo físico que reproduzca de buena forma los datos que se obtienen de mediciones experimentales.

El análisis de ondas Rayleigh, está dado por la determinación de la curva de dispersión teórica a partir de un modelo físico de propagación de estas ondas en un medio estratificado y la comparación con la curva de dispersión obtenida a partir de los datos en terreno.

En el presente trabajo de titulación para este método de análisis de caracterización del subsuelo mediante ondas superficiales utiliza la combinación de tres métodos MASW (método propuesto inicialmente), REMI y ESAC (métodos complementarios), implementado los dos últimos métodos para alcanzar una mayor profundidad que permita un mejor detalle de la zona de estudio. Cabe mencionar, que no se puede definir con exactitud la profundidad alcanzable producto de la combinación de los tres métodos, ya que dependen de factores como clima, humedad, topografía, densidad del suelo, entre otros, no obstante, en base a ensayos realizados se sugieren valores entre 35 – 55 m de profundidad (A. Vasquez, comunicación personal, 11 de junio de 2019).

2.24.1 METODO MASW

Según sus siglas en inglés Multichannel Analysis of Surface Waves, es uno de los métodos sísmicos de evaluación de la condición elástica del suelo, a partir de fuentes como mazos se generan ondas sísmicas superficiales, se analiza la velocidad de propagación de las ondas superficiales y finalmente se deduce las variaciones de la velocidad de ondas de corte (V_s) bajo la zona estudiada.

El procedimiento común para muestreos de MASW en 1D, 2D y 3D consta de tres pasos:

1. Adquisición de datos: mediante registros de campo
2. Análisis de dispersión: extracción de curvas de dispersión de cada registro
3. Inversión: cálculo de V_s en profundidad

Para un análisis 2D, se genera un mapa de V_s , el que se construye a través de un esquema de interpolación adecuado mediante la colocación de cada perfil de 1D de V_s en una ubicación superficial correspondiente a la mitad de la línea del receptor. La profundidad máxima que puede lograr con este método esta entre 10 a 30 m, variando según el lugar y fuente activa utilizada. En terrenos planos se consigue generar mejores ondas superficiales, sin embargo, cualquier relieve superficial cuya dimensión es mayor que 10% de D (largo de arreglo de geófonos), se convertirá en un significativo obstáculo para la generación de superficie de onda (Correia, 2015). En la Figura 2-19 se presenta un esquema de este método.

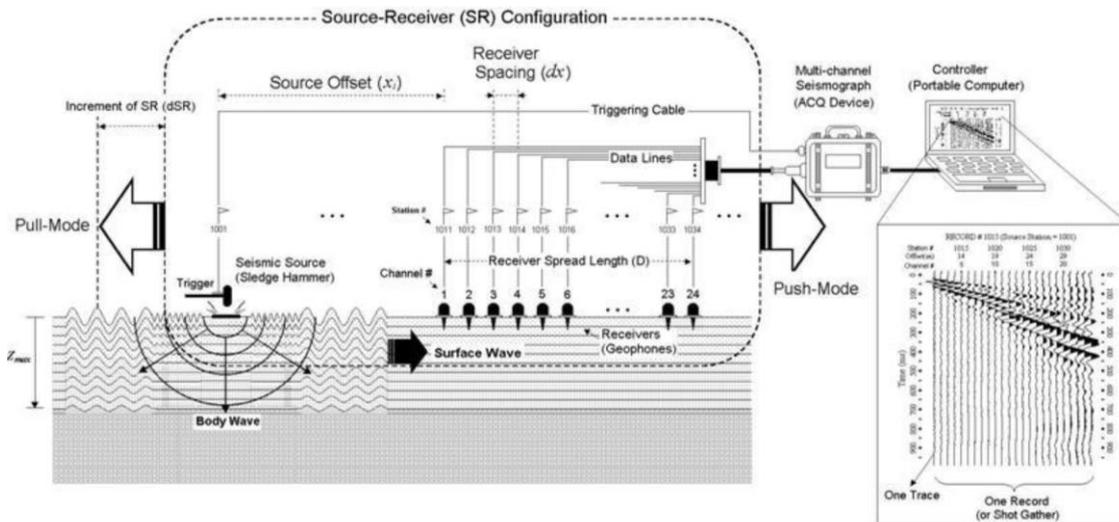


Figura 2-19: Esquema MASW con fuente activa (Park Seismic).

Los geófonos que deben ser utilizados en la implementación de este método deben ser verticales y de bajas frecuencias, como 4,5 Hz. A diferencia de los métodos de reflexión de ondas sísmicas, una disminución en la frecuencia no es tan crítica ni influye de manera considerable en la sensibilidad de los datos adquiridos (Correia, 2015).

MASW es uno de los métodos sísmicos más fáciles que entregan resultados competentes. La adquisición de datos es significativamente más tolerante que en otros métodos debido a la facilidad con que se mantiene la razón señal/ruido favorable para la medición. Esta razón señal/ruido es el factor que hace que las ondas de corte superficiales sean las ondas sísmicas más fuertes generadas que pueden viajar distancias mayores que las ondas de cuerpo sin sufrir de contaminación por ruidos externos (Correia, 2015).

2.24.2 METODO REMI (REFRACCION MICROTREMOR)

También conocida como sísmica de microtremores fue propuesto por Louie (2001) y constituye uno de los más recientes avances entre los métodos geofísicos aplicados a la caracterización de sitio y evaluación de terrenos para ingeniería civil, es un método para obtener información general, en una dimensión, de volúmenes grandes de subsuelo. Las bases teóricas del método son las mismas que las del análisis espectral de onda superficial (SASW) y de los análisis Multicanales de ondas superficiales (MASW) (Jaimes, 2011).

Este método es de gran aplicabilidad en zonas de ambientes urbanos, ya que a diferencia que la prueba tradicional de retracción sísmica, anteriormente explicada, el ruido es un factor que favorece al sondeo. Además, permite detectar estratos blandos entre estratos con rigideces mayores, mientras que la técnica de refracción sísmica sólo puede detectar variación de rigideces progresivamente mayores (Avilés & Barzallo, 2016). Dependiendo de las propiedades de los materiales en el subsuelo, la sísmica REMI puede determinar velocidades Vs a un mínimo de 40 m y un máximo de 100 m de profundidad.

Las ventajas de REMI desde el punto de vista de la adquisición sísmica son: requiere solamente del equipo estándar de refracción, no requiere de una fuente de energía de onda específica y trabaja mejor en ambientes con fuerte ruido superficial, elemento de disturbio en sísmica estándar (Samaniego, 2018).



2.24.3 METODO ESAC

Se trata de una modificación del método inicial SPAC (Aki, 1957) y se basa en estudiar las características del ruido ambiental en la superficie del suelo, tanto en tiempo como en el espacio. Las velocidades verticales registradas por sensores en distintos puntos en la superficie, durante un periodo de tiempo, son consideradas en este método como ondas superficiales que satisfacen una ecuación de onda definida en el tiempo y en el espacio, y a la vez, como muestras de un fenómeno estocástico estacionario en el tiempo y en el espacio (Cintas, 2013).

2.25. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

El método de resistividad eléctrica se utilizó por primera vez para la exploración de petróleo, gas y prospección de yacimientos minerales conductivos como el oro (Uvidia, 2015). Posteriormente se encontró diversas aplicaciones en el campo de la ingeniería como, por ejemplo: exploración de aguas subterráneas, vertederos y transferencia de soluto, delimitación, manejo agronómico mediante la identificación de áreas de compactación excesiva o espesor del suelo y la profundidad de la roca, y la evaluación de las propiedades hidrológicas del suelo (Samouëlian et al., 2005).

La primera aproximación práctica de los métodos eléctricos lo desarrolló Schlumberger en 1912 al inyectar corriente al suelo mediante una fuente artificial y posteriormente en 1925, Schlumberger junto con Wenner, idean la configuración de cuatro electrodos (tetraelectrónico), base de la prospección actual. El método de resistividad eléctrica utiliza corriente continua o corriente alterna de baja frecuencia para investigar la distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo (Reynolds, 1997).

La resistividad eléctrica del suelo puede considerarse como un patrón representativo de la variación espacial y temporal de muchas otras propiedades físicas y químicas del suelo, tales como estructura, contenido de humedad o composición del fluido de poros. Debido a que la técnica de medición de la resistividad es una técnica no destructiva, la misma ofrece una herramienta interesante para el control de calidad del desempeño de barreras del suelo (Gonzalo Aiassa, 2008).

La resistividad eléctrica ρ de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad σ como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica

al atravesar el material. El cumplimiento de la ley de Ohm ($R = V/I$), permite determinar la resistencia de una columna de suelo por medio de la medición de la diferencia de potencial entre dos puntos, y la determinación de la corriente entre los mismos (Gonzalo Aiassa, 2008).

2.25.1 RESISTIVIDAD APARENTE

En línea con los análisis del método de los cuatro electrodos, el valor de la resistividad eléctrica obtenida es el real para suelos homogéneos, o en aquellos casos en los cuales las heterogeneidades se encuentran a una distancia muy grande de los electrodos de emisión (o de inyección de corriente) y medición (o de lectura de tensión) (Araujo & Cárdenas, 2016).

En condiciones reales la corteza terrestre se compone de distintas capas y la profundidad de penetración de las corrientes inyectadas para la medición depende de la distancia entre los electrodos de emisión y de las heterogeneidades del terreno. Así, el valor del ρ obtenido no es la resistividad verdadera, sino un indicador de las resistividades del suelo y de la profundidad de penetración de la corriente (Germán, 2007).

Midiendo la resistividad aparente, se obtienen datos sobre la estructura de la parte superior de la corteza terrestre. Prácticamente todos los métodos de medición de resistividad de suelos están basados en el estudio de la resistividad aparente. Los suelos homogéneos no son muy comunes, debido a los procesos de conformación, que generalmente producen capas de diferentes materiales (Germán, 2007).



CAPÍTULO III

3 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La Urbanización “Trigales Altos” se encuentra ubicada al noreste de la ciudad de Cuenca, sector de Patamarca de la Parroquia Hermano Miguel, en las Coordenadas UTM WGS 84 UTM 17S 0723365X/9682514Y (Figura 3-1), a una altura de 2650 msnm, con una superficie aproximada de 3,15 Ha. Limita al Norte con el barrio Patamarca II, al Este con los terrenos de UNE y Cajaloma, al Sur con terrenos de la familia Eljuri y Cajaloma y al Oeste con el barrio El Tablón y El Tablón Chico (Figura 3-2).

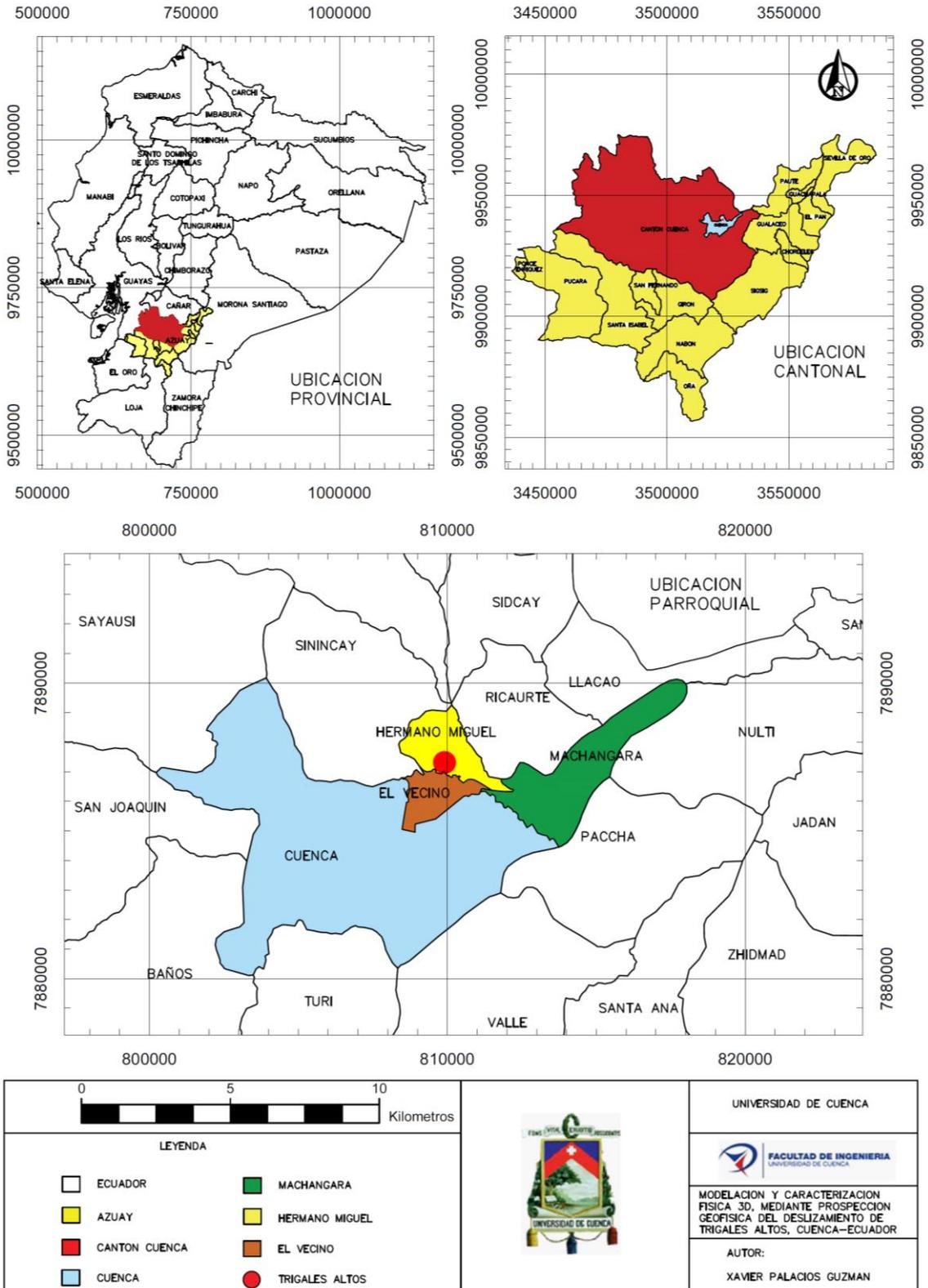


Figura 3-1: Ubicación Geográfica de la zona de estudio

Área de estudio - Los Trigales Altos

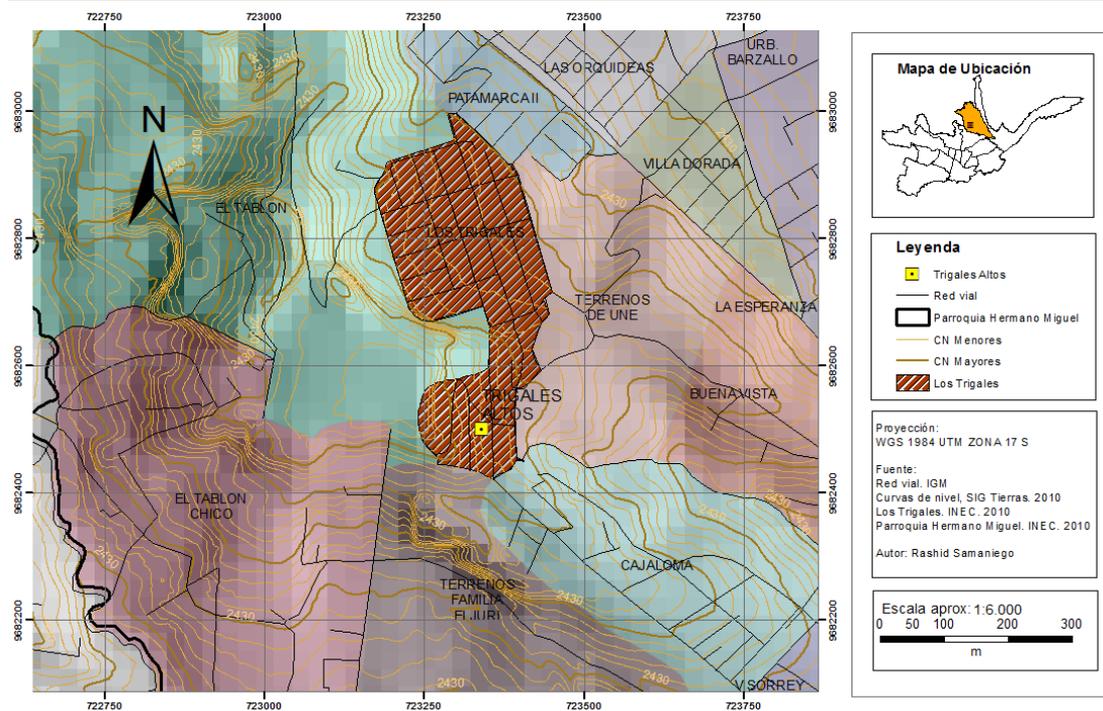


Figura 3-2: Situación geográfica de la zona de estudio (Samaniego, 2018).

3.2. CLIMA

La ciudad de Cuenca tiene temperaturas entre 7 a 15 grados centígrados en invierno y 12 a 25°C en verano, su temperatura media oscila en 15°C (FENEFEDIT, 2014), existen dos estaciones lluviosas entre los meses febrero a mayo y octubre a noviembre, y fluctúan de 500 y 2000 mm.

3.3. HIDROLOGÍA

En la zona de estudio existen dos cuencas de aporte que drenan sus aguas a dos quebradas designadas como Quebrada: s/n 1 y s/n 2 (Figura 3-3), las cuales pertenecen a la micro cuenca la Campiña que desemboca en el río Machángara.

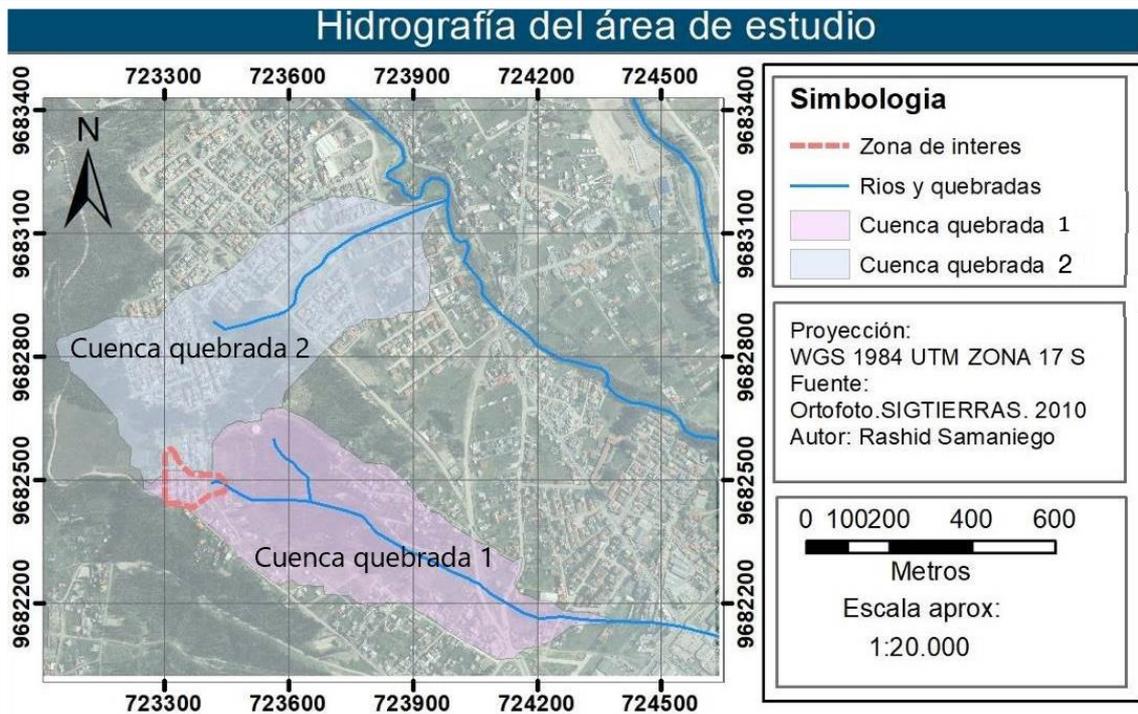


Figura 3-3: Hidrografía del área de estudio (Samaniego, 2018).

3.4. GEOLOGÍA LOCAL

En la zona de estudio se encuentra la formación Mangán (Terciario) rodeado por una terraza fluvio-glaciar (Cuaternario) y la formación Santa Rosa (Terciario).

Según los estudios de Perforaciones y Resistividad Eléctrica para la Ciudadela Los Trigales y áreas aledañas realizados por TECNOSUELOS CIA LTDA (2006) la geología de la zona se distribuye como se observa en la Figura 3-4 y explica que se encuentra la presencia de la formación Santa Rosa, terraza fluvio-glaciar, deposito coluvial y suelo orgánico:

En la zona de las urbanizaciones Trigales Alto y Bajo, Patamarca y Orquideas, yace inclinada entre 10 y 15 grados hacia el este, la serie de areniscas y arcillas de la Formación Santa Rosa, sobre la formación Santa Rosa yace, con discordancia angular, una gruesa terraza de 35 metros de espesor compuesto de grava arenosa medianamente consolidada, este depósito es masivo, de textura homogénea, groseramente estratificado y ligeramente inclinado hacia el oeste. El Depósito coluvial tiene estructura caótica y está compuesto por una matriz arcillo arenosa, húmeda y blanda con guijarros duros dispersos en ella. En el subsuelo de la urbanización Los Trigales Altos, inmediatamente debajo de calles y casas, se encuentra un suelo orgánico blando, de composición arcillosa, de color negro y que contiene guijarros duros dispersos en su matriz.

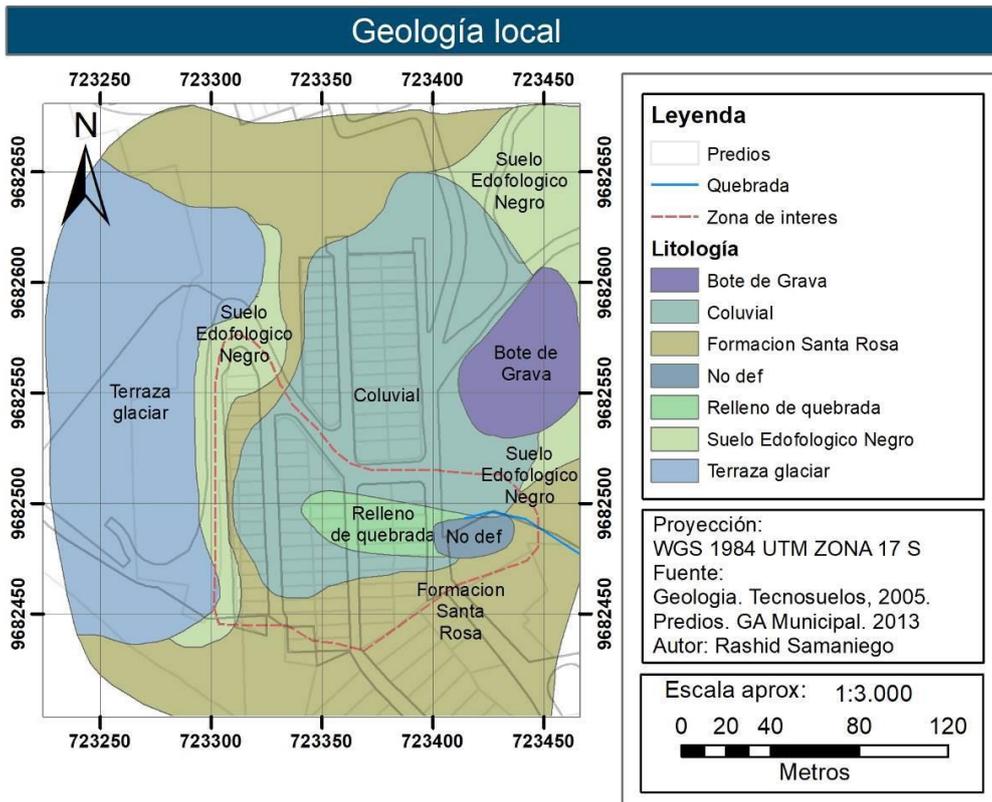


Figura 3-4: Geología local, Triguales Altos. (Samaniego, 2018).

3.4.1 FORMACION SANTA ROSA

Las areniscas son de grano fino a grueso, localmente microconglomeráticas, con guijarros de cuarzo lechoso, lítico volcánicos y alguna lutita roja. Son ricas en feldespato sódico caolinizado y cuarzo, minerales que se encuentran insertos en una matriz tobácea más fina parcialmente argilizada. Son por lo general de color gris claro con tinte verdoso en presentaciones frescas y suelen estar manchadas por oxidaciones ocre o rojas en presentaciones meteorizadas. Se observa una estratificación cruzada y grado de selección vertical. Son por lo general masivas, compactas, duras, ligeramente húmedas, y exhiben diaclasas sub-verticales métricas. Son lateralmente extensas con espesor constante y uniforme. Sus espesores característicos varían entre 1 a 3 metros, pero algunos bancos alcanzan los 5 metros de espesor (Figura 3-5).



Figura 3-5: Mosaico de fotos muestran afloramientos de areniscas de la Formación Santa Rosa en los alrededores de la urbanización Los Triguales Altos (Tecnosuelos, 2006).

Las arcillas son limosas y localmente arenosas, de color gris verdoso a crema en exposiciones grescas y manchadas, a veces intensamente por oxidaciones ocre y rojas (Figura 3-6). Su estructura interna es estratificada a masiva. Se presentan compactas, homogéneas, húmedas sin llegar a estar saturadas y a menudo contiene cristales de feldespato argilizado dispersos. Los taludes en corte practicados en estos niveles arcillosos se observan desmoronados, debido a la deshidratación y contracción que sufre la arcilla expuesta a la intemperie. Esto hace vulnerables a los taludes pues los estratos duros de arenisca están sujetos a desplomes por la socavación de los estratos blando de arcilla inferiores. Las capas de arcillas son lateralmente continuas y extensas. Sus espesores característicos varían entre 0.5 y 2 metros.



Figura 3-6: Afloramientos de arcillas limosas de la Formación Santa Rosa en los alrededores de la Urbanización Trigales Alto (Tecnosuelos, 2006)

La monótona y cíclica alternancia de arena/arcilla ha congelado en estas rocas los ciclos de sedimentación estacional ocurridos en la época de su génesis. La uniformidad en su composición lleva a pensar en una fuente litológicamente uniforme para estos sedimentos y la recurrente uniformidad en el espesor de las capas lleva a suponer la variación estacional del clima en el entorno de aquella época era uniforme y regular.

3.4.2 TERRAZA FLUVIO-GLACIAR

Sobre la formación Santa Rosa yace, con discordancia angular, una gruesa terraza de 35 metros de espesor compuesto de grava arenosa medianamente consolidada. Este depósito es masivo, de textura homogénea, groseramente estratificado y ligeramente inclinado hacia el Oeste. Entre los guijarros abundan aquellos de origen sedimentario, así como descompuestos. A su vez, un delgado suelo edáfico de color negro se ha formado a su techo. La matriz es una arena angulosa, muy gruesa, algo deleznable que llega a componer un 30% del depósito.

Los taludes practicados en este sedimento son muy vulnerables a la erosión hidráulica lineal. Esta unidad es muy porosa altamente permeable (Figura 3-7).



Figura 3-7: Afloramiento de grava arenosa semiconsolidada en el respaldo de la urbanización Los Trigales Altos (Tecnosuelos, 2006).

3.4.3 DEPOSITO COLUVIAL

La terraza fluvial anteriormente descrita forma una mezcla de bordes abruptos. Al desestabilizarse estos bordes, en el pasado geológico se produjeron desplomes, deslizamientos y flujos de barro que alimentaron depósitos coluviales acumulados al pie de estos barrancos y que tapizaron la infrayacente formación Santa Rosa.

El coluvión tiene estructura caótica y está compuesto por una matriz arcillo arenosa, húmeda y blanda con guijarros duros dispersos en ella. La matriz constituye un 80% del depósito. El coluvión inicialmente pudo contener mayor cantidad de guijarros y arena, pero estos fueron fuertemente meteorizados y argilizados in-situ debido al clima húmedo que reinaba en aquella época localmente.

Sobre el depósito coluvial se desarrollaron al menos dos horizontes de suelo orgánico negro, uno de los cuales fue eventualmente sepultado por un nuevo coluvio (Figura 3-8).



Figura 3-8: Afloramiento de depósitos coluviales en el área de Los Trigales Altos (Tecnosuelos, 2006).

3.4.4 SUELO ORGÁNICO

En el subsuelo de la urbanización Los Trigales Alto, inmediatamente debajo de calles y casas, se encuentra un suelo orgánico blando, de composición arcillosa, de color negro y que contiene guijarros duros dispersos en su matriz. En este suelo negro se presenta en dos niveles de 1.50 m cada uno, intercalados por un delgado estrato coluvial de color café compuesto de arena con guijarros duros.

El espesor del conjunto, suelo negro-coluvial-suelo negro, varía entre los 2 y 4 metros. Su distribución es más o menos uniforme a lo largo y ancho de la urbanización. Los Trigales Alto. El nivel de suelo orgánico inferior pasa transicionalmente a un grueso horizonte de arcilla café o crema con guijarros, y donde este horizonte se ha consumido por la pedogénesis, pasa directamente a los estratos de la formación Santa Rosa. La génesis de este suelo puede ser comprendida por la actividad biótica de la flora y fauna que vivía en el sitio, en el cual reinaba un ambiente húmedo y frío.

Esta actividad biológica ha “digerido” el techo de la capa coluvial subyacente y ha integrado en su matriz los duros guijarros residuales. El estrato coluvial que se observa en la Figura 3-9, interrumpe temporalmente la pedogénesis, representa un evento de erosión que provino del depósito de grava ubicado en el respaldo de la urbanización.



Figura 3-9: Mosaico de fotos que muestra exposiciones de suelo orgánico dentro del perímetro de la urbanización Los Trigales Altos (Tecnosuelos, 2006).

3.5. SISMICIDAD

De acuerdo al mapa de máximas intensidades sísmicas del Ecuador (Figura 3-10) (Singaucho, 2009), en la zona de la ciudad de Cuenca la aceleración sísmica pico puede alcanzar valores que se encuentran entre 4.5-8.9 % g (0.44-0.87 m/s², g=gravedad, 9.81 m/s²), al relacionarlo con la escala de Mercalli modificada los daños son leves en edificios e infraestructuras (Samaniego, 2018).

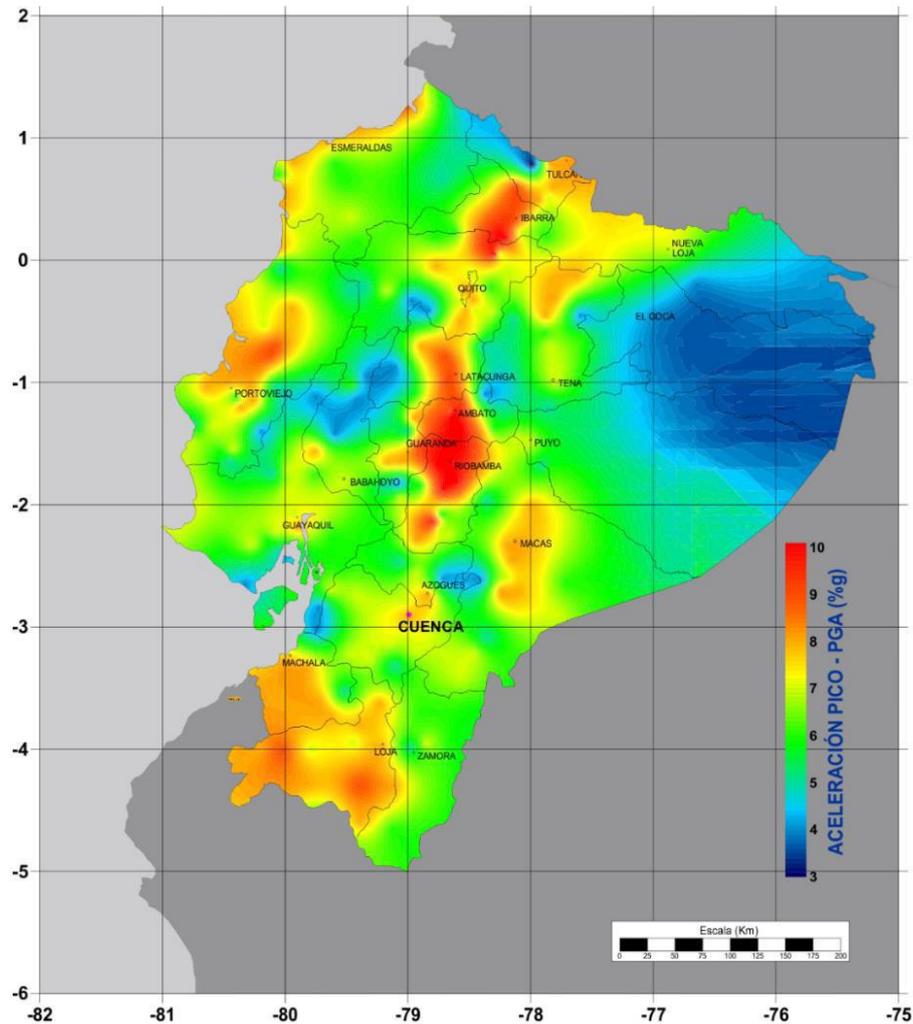


Figura 3-10: Mapa de máximas intensidades sísmicas del Ecuador (Singaicho, 2009)

Al momento de diseñar cualquier infraestructura se debe tener en cuenta la influencia sísmica en la zona, Puntualmente, la provincia del Azuay se encuentra en un nivel sísmico alto por lo que es necesario prever en el diseño aspectos como asentamientos diferenciales, rupturas en las juntas y tuberías por deflexiones excesivas, en el Código Ecuatoriano de la Construcción (NEC 2014). Se establece 6 zonas sísmicas, para este caso de estudio de la Parroquia Hermano Miguel, la misma se ubica en la zona II con valor de factor Z de 0.25 (Figura 3-11). Tomando en cuenta dicho valor se define que ésta no es una zona en la que se debe dar prioridad a este factor para definir las consideraciones en el diseño y construcción. Acorde a la NEC (2014), el valor de factor Z representa la aceleración máxima en roca para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad (Código Ecuatoriano de la Construcción, 2014).

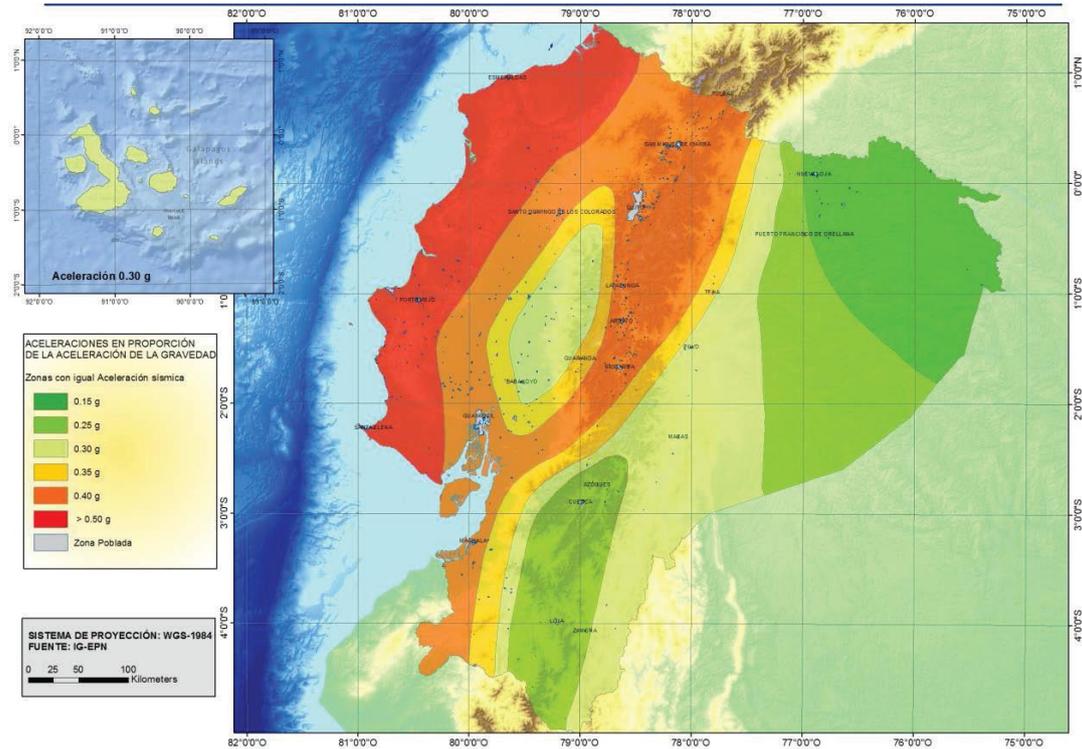


Figura 3-11: Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z - Adaptado de Código Ecuatoriano de la Construcción, (2014).

3.6. ACCIONES ANTRÓPICAS

Samaniego, (2018), de acuerdo con su estudio expresa que:

Según moradores de la zona se evidenció un gran deslizamiento en el año 2000, que el proyecto de urbanización “Trigales Altos” en su inicio eran casas de interés social de un piso y conforme pasó el tiempo, varios propietarios empezaron a levantar un segundo piso. Se cree que el aumento de carga que supone la ampliación de los edificios pudo contribuir a la desestabilización de la ladera, la urbanización fue construida en el año de 1992 y 8 años después se dio primer deslizamiento, fecha que lo confirma el informe técnico realizado por gestión de riesgos en el año 2015. Conforme el paso del tiempo las carreteras han sufrido arreglos a medida que el terreno se ha ido deformando (p. 66).

De acuerdo con esta información primaria se identifica que, en la zona de estudio, se destacó la existencia de una quebrada la cual fue rellenada en su totalidad, referente a esto no se incluyó ningún sistema de drenaje inicialmente para contrarrestar la acción antes expuesta.

3.7. EDIFICACIONES EN MAL ESTADO

De acuerdo a los datos recolectados por Samaniego, (2018), se sabe que:

En la zona de estudio existen una totalidad de 66 predios en los cuales hay 5 terrenos baldíos, se identificaron 37 edificaciones con afecciones estructurales de estas, 12 están demolidas completamente, 2 aún están habitadas y en 23 viviendas se han detectado movimientos. Según el informe técnico del estado actual de la urbanización: “Trigales Altos” (Gestión de Riegos, 2015) los habitantes de 22 fueron reubicados (p. 66).



Esta urbanización comprende una superficie aproximada de 3.5 ha en las cuales se encuentran asentados 114 predios, en los cuales hay 104 familias dueñas de 93 casas afectadas. La comunidad esperaba una respuesta hasta el 18 de diciembre de 2018 por parte del Gobierno Autónomo Municipal de Cuenca para una posible reubicación o indemnización, respuesta que, hasta el presente mes, julio de 2019 no se ha efectuado.

CAPÍTULO IV

4 METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo de titulación se procede a explicar cada uno de los métodos propuestos de prospección física como son Sísmica de Refracción, Resistividad Eléctrica y Análisis multicanal de ondas MASW.

4.1. SÍSMICA DE REFRACCIÓN.

4.1.1 Procedimiento

La aplicación del método consiste en disponer una serie de sensores o geófonos en línea recta a distancias conocidas formando la línea de refracción, que se encuentra conectado a un sismógrafo el cual registra la información generada por la carga sísmica o perturbaciones.

A una distancia conocida del extremo de la línea de refracción, en el punto de disparo “shot” se generan las ondas sísmicas a partir de un martillo o por detonación de explosivos.

4.1.2 Equipo

- Sismógrafo PASI modelo 16SG24-N (Equipo combinado – sismógrafo y tomógrafo eléctrico)
- Cables sísmicos
- Geófonos verticales
- Geófono starter
- Cables para geófono starter
- GPS Garmin GPSmap 76CSx.
- Herramientas varias

4.1.3 Preparación del equipo

Antes de iniciar los trabajos de campo, se deberá verificar el buen funcionamiento de los equipos a utilizar: sismógrafo, el detonador, geófonos, continuidad de los cables, estado de la batería y operación de los radios de comunicación.

Deberá existir homogeneidad en las características, marca y modelo de geófonos y equipos utilizados en el estudio sísmico, así como la compatibilidad entre sismógrafo, cable, geófono y detonador.

4.1.4 Tendidos sísmicos

Para planificar la distribución del tendido, se basó en la información y el espacio disponible de la zona de trabajo, de tal forma que se facilite la identificación de rasgos topográficos y geológicos representativos de la zona.

Se debe identificar claramente los parámetros del tendido como: longitud, distancia entre geófonos, separaciones de shots (puntos de tiro, PT) con respecto a los geófonos, número de geófonos, número y



ubicación de shots, orientación y ubicación del tendido, tipo y cantidad de la fuente de energía en cada shot y tipo de geófonos.

Para obtener el detalle adecuado del comportamiento de las características elásticas del sitio, los tendidos deben estar formados por un mínimo de 10 geófonos alineados y un PT en cada extremo del alineamiento. Se recomienda; sin embargo, que todo tendido tenga adicionalmente un PT en cada extremo del alineamiento, que esté alejado del geófono más próximo cuando menos en un 25% de la longitud del tendido, así como un PT en el centro del mismo (GEO&GEO CIA LTDA, 2017).

4.1.5 Apoyo topográfico

El trabajo de campo debe apoyarse con el trabajo topográfico, para ubicar y marcar las líneas y determinar las coordenadas de cada uno de los puntos de ubicación de los geófonos y shots empleados en cada tendido.

La recolección de datos de refracción sísmica se recomienda iniciar luego de tener ubicadas y estacadas al menos las dos primeras líneas, continuando con el levantamiento de forma paralela al trabajo topográfico.

4.1.6 Trabajo de campo

Se debe colocar e instalar los equipos coordinando simultáneamente las siguientes actividades:

- Ubicación de los shots y puntos de recepción, procurando un buen acoplamiento de los geófonos
- Realizar las conexiones entre aparatos, dispositivos y accesorios
- Probar el buen funcionamiento del equipo y realizar los ajustes necesarios
- Seleccionar los parámetros dependiendo de las características del sitio y de acuerdo con la geometría del tendido y posición de los shots.
- Tomar las medidas de seguridad requeridas para cada detonación
- Iniciar el registro cuando el ruido del medio ambiente sea mínimo y el personal tenga las medidas de seguridad necesarias.
- Analizar el registro en la pantalla y realizar los ajustes necesarios
- Comprobar la calidad de los registros antes de desconectar los equipos.

4.1.7 Análisis de resultados

Con los registros obtenidos en campo y a partir de la observación, procesamiento y análisis de estos registros (Sismogramas) se construyen gráficas tiempo – distancia (Dromocronas), de cuyo análisis se deberá obtener los siguientes resultados:

1. Número de capas con diferentes propiedades elásticas.
2. Velocidad de transmisión de las ondas elásticas en las capas.
3. Espesores de horizontes refractores.
4. Geometría de los planos refractores.
5. Comportamiento elástico dinámico de los materiales.

Para el análisis de los resultados se recomienda utilizar los siguientes métodos:

- Método del tiempo de intercepción
- Método de distancia crítica



4.2. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

4.2.1 Procedimiento

En relación a la investigación geofísica mediante métodos eléctricos, se ha optado por procesar la información mediante el software RES2DINV, que utiliza un proceso de inversión, a fin de lograr un modelo en dos dimensiones que visualice la estructura del suelo a ser estudiada, proporcionándonos información de la resistividad del terreno de forma detallada. La información levantada en el campo es complementada con información del perfil topográfico que lo conforma, a fin de mejorar el proceso de análisis de la información.

4.2.2 Equipo

- Fuente de poder
- Cables para sondeo
- Cables para perfilaje geoelectrico
- Electrodo
- Equipos de comunicación
- Herramientas varias

4.2.3 Tendidos eléctricos

Para planificar la distribución del tendido, se basó en la información y el espacio disponible de la zona de trabajo, de tal forma que se facilite la identificación de rasgos topográficos y geológicos representativos de la zona.

Se debe identificar claramente los parámetros del tendido como: longitud, distancia entre electrodos, número y tipo de electrodos, orientación y ubicación del tendido, tipo y cantidad de la fuente de energía y método.

4.2.4 Apoyo topográfico

El trabajo de campo debe apoyarse con el trabajo topográfico, para ubicar y marcar las líneas y determinar las coordenadas de cada uno de los puntos de ubicación de los electrodos empleados en cada tendido.

4.2.5 Trabajo de campo

1. Identificar el sector en el cual se requiere la información de la prospección eléctrica
2. Instalar los equipos, el tendido de la línea eléctrica dependerá de la longitud total requerida y con ello el número de electrodos necesarios para el trabajo.
3. Configurar el equipo y programar para realizar las lecturas: se puede realizar con el arreglo Wenner – Schlumberger.
4. En este trabajo de titulación se configuró el equipo y se programó para realizar las lecturas con el arreglo WENNER, cuyo esquema se presenta a continuación.
5. Luego de tomar las lecturas, se realiza la revisión y validación de datos.

4.2.6 Análisis de Resultados

En lo referente al modelo de la teoría de Inversión, éste es una representación matemática idealizada de una sección del suelo. Los datos adquiridos por la generación de corriente eléctrica en el medio, pueden ser calculados mediante relaciones matemáticas para definir un modelo calculado mediante diferencias



finitas o elementos finitos y son estimados mediante ecuaciones que explican el fenómeno de propagación en el suelo.

4.3. ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)

4.3.1 Procedimiento

La aplicación del método consiste en disponer una serie de sensores o geófonos en línea recta a distancias conocidas, que se encuentra conectado a un sismógrafo el cual registra la información generada por la carga sísmica.

A una distancia conocida del extremo de la línea, en el punto de disparo “shot” se generan las ondas sísmicas a partir de un martillo.

4.3.2 Equipo

- Sismógrafo (Equipo combinado – sismógrafo y tomógrafo eléctrico)
- Cables sísmicos
- Geófonos verticales
- Geófono starter
- Cables para geófono starter
- Herramientas varias

4.3.3 Preparación del equipo

Antes de iniciar los trabajos de campo, se deberá verificar el buen funcionamiento de los equipos a utilizar: sismógrafo, el detonador, geófonos, continuidad de los cables, estado de la batería y operación de los radios de comunicación.

Deberá existir homogeneidad en las características, marca y modelo de geófonos y equipos utilizados en el estudio sísmico, así como la compatibilidad entre sismógrafo, cable, geófono y detonador.

4.3.4 Tendidos sísmicos

Para planificar la distribución del tendido, se basó en la información y el espacio disponible de la zona de trabajo, de tal forma que se facilite la identificación de rasgos topográficos y geológicos representativos de la zona.

Se deberá definir con criterio los parámetros del tendido como: longitud, distancia entre geófonos, separaciones de shots (puntos de tiro) con respecto a los geófonos), número de geófonos, número y ubicación de shots, orientación y ubicación del tendido, tipo y cantidad de la fuente de energía en cada shot y tipo de geófonos.

Para obtener el detalle adecuado del comportamiento de las características elásticas del sitio, los tendidos deben estar formados por un mínimo de 23 geófonos alineados, dos shots en cada extremo del alineamiento tres shots internos.

4.3.5 Apoyo topográfico

El trabajo de campo debe apoyarse con el trabajo topográfico, para ubicar y marcar las líneas y determinar las coordenadas de cada uno de los puntos de ubicación de los geófonos y shots empleados en cada tendido.



La recolección de datos, se recomienda iniciar luego de tener ubicadas y estacadas al menos las dos primeras líneas, continuando con el levantamiento de forma paralela al trabajo topográfico.

4.3.6 Trabajo de campo

De acuerdo a la planificación se deberá colocar e instalar los equipos coordinando simultáneamente las siguientes actividades:

- Ubicación de los shots y puntos de recepción, procurando un buen acoplamiento de los geófonos.
- Realizar las conexiones entre aparatos, dispositivos y accesorios.
- Probar el buen funcionamiento del equipo y realizar los ajustes necesarios.
- Seleccionar los parámetros dependiendo de las características del sitio y de acuerdo con la geometría del tendido y posición de los shots.
- Iniciar el registro cuando el ruido del medio ambiente sea mínimo y el personal tenga las medidas de seguridad necesarias.
- Analizar el registro en la pantalla y realizar los ajustes necesarios.
- Comprobar la calidad de los registros antes de desconectar los equipos.

4.3.7 Análisis de resultados

El modelo matemático parte de un modelo geotécnico, en base a los parámetros de los materiales (densidad, elasticidad, velocidad del medio), y los espesores de los medios a ser analizados, con los cuales se genera una simulación mediante la representación de una curva de dispersión teórica. Con ésta se genera una curva experimental, con lo cual se puede determinar el perfil de velocidades en los medios analizados.

Las ondas Rayleigh de alta frecuencia permiten estudiar los medios en la parte superficial, en tanto que las ondas de baja frecuencia posibilitan el análisis a mayor profundidad.

CAPÍTULO V

5 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA

5.1. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

En relación con la investigación geofísica mediante métodos eléctricos, se ha optado por procesar la información mediante el software RES2DINV, que utiliza un proceso de inversión, a fin de lograr un modelo en dos dimensiones que visualice la estructura del suelo a ser estudiada, proporcionando información de la resistividad del terreno de forma detallada.

La información levantada en el campo es complementada con información del perfil topográfico que lo conforma, a fin de mejorar el proceso de análisis de la información. En la Tabla 5-1 se observa la información geográfica de cada línea eléctrica, mientras que en la Figura 5-1 se observa la distribución de las líneas eléctricas en la zona de estudio.

Tabla 5-1: Ubicación de las líneas geofísicas mediante Tomografía Eléctrica

PERFIL ELECTRICICO	LONGITUD (m)	INICIO		FIN	
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE
LE-1	155.00	723298.20	9682477.22	723296.03	9682629.98
LE-2	155.00	723325.17	9682466.42	723334.90	9682618.78
LE-3	155.00	723361.83	9682445.65	723359.28	9682601.98
LE-4	155.00	723401.17	9682463.92	723394.33	9682618.39
LE-5	145.00	723266.55	9682465.03	723396.95	9682433.50
LE-6	140.00	723277.11	9682629.00	723403.70	9682621.46
LE-7	155.00	723288.09	9682622.89	723378.19	9682501.99
LE-8	150.00	723268.11	9682508.69	723409.99	9682499.96

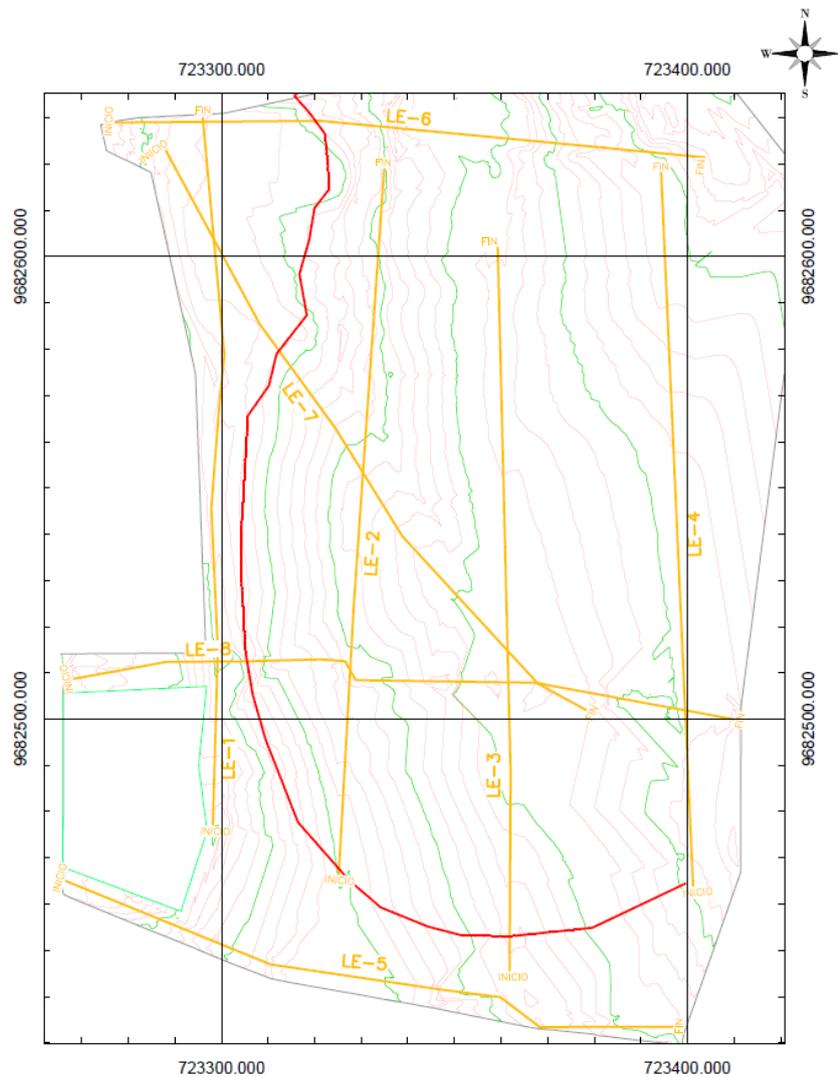


Figura 5-1: Ubicación de líneas eléctricas levantadas

El resumen de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla 5-2:



Tabla 5-2: Resumen de resistividades

PERFIL ELÉCTRICO	LONGITUD (m)	RESISTIVIDAD APARENTE (ohm-m)		RESISTIVIDAD CON INVERSIÓN (ohm-m)	
		MÍNIMA	MÁXIMA	MÍNIMA	MÁXIMA
LE-1	155.00	4.10	43.98	0.96	132.21
LE-2	155.00	3.78	23.78	2.12	42.15
LE-3	155.00	5.15	16.49	1.40	33.49
LE-4	155.00	4.40	18.03	1.48	36.59
LE-5	145.00	2.78	53.41	2.78	53.41
LE-6	140.00	4.30	41.15	1.77	59.49
LE-7	155.00	5.34	36.76	2.34	64.94
LE-8	150.00	3.94	47.12	3.33	69.50

Para la tabla anterior se presentan valores de resistividad aparente, que es la resistividad medida en el campo por el equipo, mientras que la resistividad con inversión es la resistividad que presentaría el suelo luego del proceso de inversión. Se puede observar que los valores se encuentran en un rango entre 0.96 y 132.21 ohm-m. Para valores de resistividad entre 0 y 10 ohm-m pudiera tratarse de un suelo sedimentario meteorizado de grano fino, por lo que se trataría de un suelo arcilloso meteorizado generado a partir de las lutitas rojizas y negras que se pueden observar en los taludes antrópicos existentes y según la formación geológica que aflora en la zona de estudio. Para los valores mayores de resistividad se trataría de suelos más gruesos, arenas, con clastos centimétricos propios de suelos de origen fluvio-glacial como lo son las terrazas existentes en la cuenca geológica de Cuenca.

5.1.1 Línea eléctrica LE-1

Los datos obtenidos del levantamiento se detallan a continuación:

PASI survey WENNER 19/05/27-10:40:13
Electrode spacing is 5.000.
Wenner array
Measurements are in apparent resistivity.
Total number of datum points is 144.
Position of first electrode in array is given.
144 5.000 50.000 6.0
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 155.00.
Minimum electrode spacing is 5.00.
Topographic data present.
The number of topographical datum points is 32.
Total number of data levels is 10.
Total number of electrodes is 32.
First electrode is located at 0.00.
Last electrode is located at 155.00.
Minimum and maximum apparent resistivity values are 4.10 and 43.98
Minimum, maximum and average geometric factors used in data set are 31.4, 314.2 and 115.6

Para el proceso de inversión el software usado RES2DINV, utiliza una subrutina de modelado directo para calcular los valores de resistividad aparente, mediante una técnica de optimización de mínimos cuadrados no lineales (deGroot-Hedlin y Constable 1990, Loke y Barker 1996a). El programa admite tanto la diferencia finita como el elemento finito. Para calcular el valor de resistividad aparente medido, se usan factores geométricos los cuales dan una aproximación de resistividad ya que el valor de resistividad aparente resultante no es el mismo que la verdadera para un medio homogéneo. Para una línea eléctrica con n electrodos, hay $n(n + 1) / 2$ combinaciones posibles. Por ejemplo, si hay 25 electrodos en la línea de levantamiento, hay 300 combinaciones posibles. En la práctica, no se hacen todas las mediciones



posibles por lo que es necesario el uso de estos factores geométricos para el cálculo de la resistividad verdadera del medio físico.

$$\text{Factor geométrico} = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{r_1}\right) - \left(\frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_{n-1}}\right) + \left(\frac{1}{r_n}\right)\right]}$$

El proceso de inversión que realiza el software se encarga de calcular la resistividad real del medio físico mediante aproximaciones por mínimos cuadrados iterativamente hasta disminuir el error absoluto. Los resultados del proceso de inversión se detallan a continuación:

Reading file C:\GEOF_E2\2019\19_TRIGALES_XAVIER\GEOFISICA\ELECTRICAS\tri-le1_BE.INV

PASI survey WENNER 19/05/27-10:40:13

Electrode spacing is 2.500.

Wenner array

Total number of datum points is 144.

Position of mid-point of array is given.

144 80.000 50.000 6.0

Electrode locations are 0.00 and 10.00.

Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 155.00.

Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 155.0.

Line length is 155.0.

Minimum electrode spacing is 2.5.

Sorting data points.

Number of data levels is 10.

Number of electrodes is 63.

Reading inversion results.

The model has 13 layers and 510 blocks.

Iteration 1 : RMS error 21.15.

Iteration 2 : Abs. error 13.47.

Iteration 3 : Abs. error 11.60.

Iteration 4 : Abs. error 10.34.

Iteration 5 : Abs. error 9.43.

Iteration 6 : Abs. error 8.93.

Iteration 7 : Abs. error 8.64.

Reference resistivity used is 12.654

Topographical data present in inversion file.

Damped topography was incorporated into inversion model.

Blocks sensitivity information present.

Average sensitivity is 0.609.

Inversion constraints information present.

Reading of file has been completed.

Maximum value 132.21

Minimum value 0.96

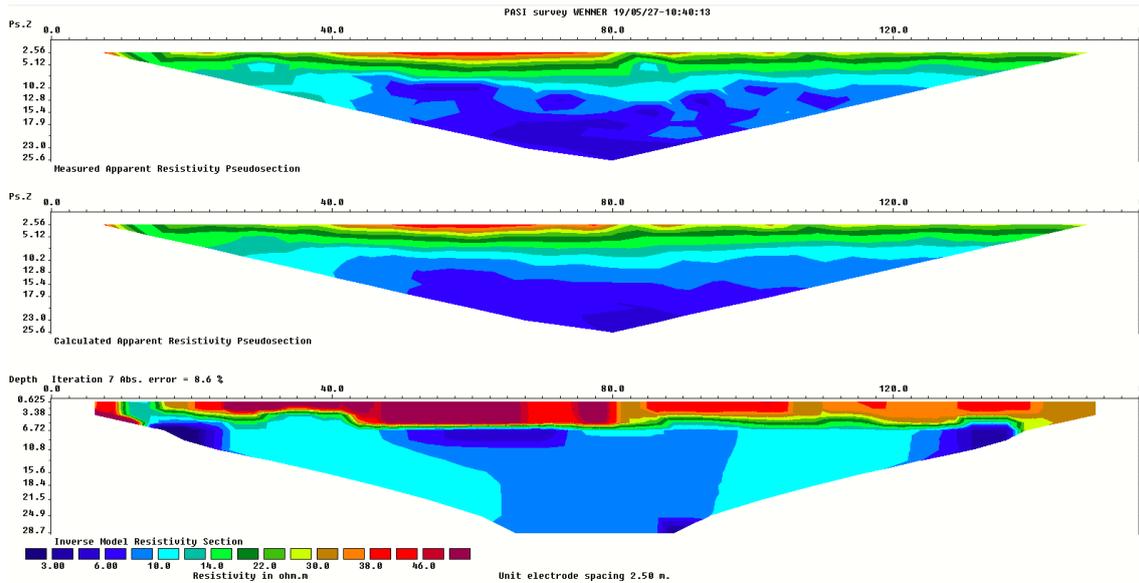


Figura 5-2: Resultados del proceso de inversión LE-1

Previo al proceso de inversión se dispone de las mediciones de resistividad aparente del equipo, con lo cual se realiza el análisis, como se puede apreciar en la primera gráfica de la Figura 5-2, en tanto que en la última se encuentra con el resultado del proceso de inversión.

5.1.2 Línea eléctrica LE-2

Los datos obtenidos del levantamiento se detallan a continuación:

PASI survey WENNER 19/05/27-12:30:00
Electrode spacing is 5.000.
Wenner array
Measurements are in apparent resistivity.
Total number of datum points is 151.
Position of first electrode in array is given.
151 5.000 50.000 4.8
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 155.00.
Minimum electrode spacing is 2.50.
Topographic data present.
The number of topographical datum points is 32.
Total number of data levels is 10.
Total number of electrodes is 63.
First electrode is located at 0.00.
Last electrode is located at 155.00.
Minimum and maximum apparent resistivity values are 3.78 and 23.78
Minimum, maximum and average geometric factors used in data set are 31.4, 314.2 and 121.1

Los resultados del proceso de inversión se detallan a continuación:

Reading file C:\GEOF_E2\2019\19_TRIGALES_XAVIER\GEOFISICA\ELECTRICAS\tri-le2_E.INV

PASI survey WENNER 19/05/27-12:30:00

Electrode spacing is 2.500.

Wenner array

Total number of datum points is 151.

Position of mid-point of array is given.

151 80.000 50.000 4.8

Electrode locations are 0.00 and 10.00.

Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 155.00.

Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 155.0.

Line length is 155.0.

Minimum electrode spacing is 2.5.

Sorting data points.

Number of data levels is 10.

Number of electrodes is 63.

Reading inversion results.

The model has 13 layers and 508 blocks.

Iteration 1 : RMS error 15.73.

Iteration 2 : Abs. error 10.37.

Iteration 3 : Abs. error 9.09.

Iteration 4 : Abs. error 8.49.

Iteration 5 : Abs. error 8.17.

Reference resistivity used is 9.263

Topographical data present in inversion file.

Damped topography was incorporated into inversion model.

Blocks sensitivity information present.

Average sensitivity is 0.615.

Inversion constraints information present.

Reading of file has been completed.

Maximum value 42.15

Minimum value 2.12

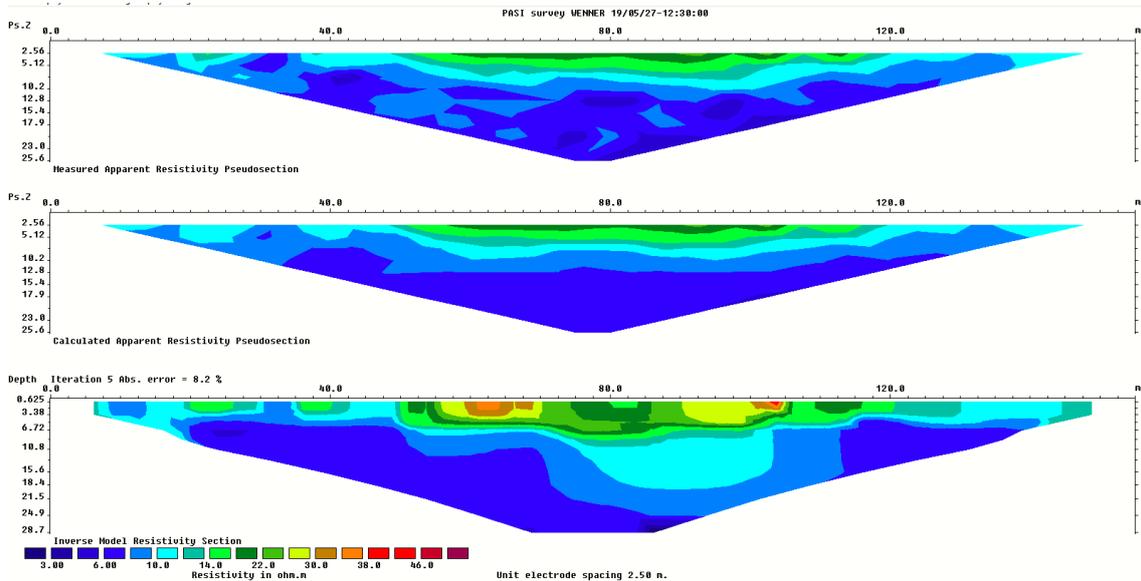


Figura 5-3: Resultados del proceso de inversión LE-2

5.1.3 Línea eléctrica LE-3

Los datos obtenidos del levantamiento se detallan a continuación:



PASI survey WENNER 19/05/27-15:17:54
Electrode spacing is 5.000.
Wenner array
Measurements are in apparent resistivity.
Total number of datum points is 149.
Position of first electrode in array is given.
149 5.000 50.000 7.5
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 155.00.
Minimum electrode spacing is 2.50.
Topographic data present.
The number of topographical datum points is 32.
Total number of data levels is 10.
Total number of electrodes is 63.
First electrode is located at 0.00.
Last electrode is located at 155.00.
Minimum and maximum apparent resistivity values are 5.15 and 16.49
Minimum, maximum and average geometric factors used in data set are 31.4, 314.2 and 120.2

Los resultados del proceso de inversión se detallan a continuación:

Reading file C:\GEOF_E2\2019\19_TRIGALES_XAVIER\GEOFISICA\ELECTRICAS\tri-le3_BE.INV

PASI survey WENNER 19/05/27-15:17:54
Electrode spacing is 2.500.
Wenner array
Total number of datum points is 149.
Position of mid-point of array is given.
149 80.000 50.000 7.5
Electrode locations are 0.00 and 10.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 155.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 155.0.
Line length is 155.0.
Minimum electrode spacing is 2.5.
Sorting data points.
Number of data levels is 10.
Number of electrodes is 63.
Reading inversion results.
The model has 13 layers and 508 blocks.
Iteration 1 : RMS error 14.91.
Iteration 2 : Abs. error 10.59.
Iteration 3 : Abs. error 9.67.
Iteration 4 : Abs. error 9.09.
Iteration 5 : Abs. error 8.60.
Iteration 6 : Abs. error 8.18.
Reference resistivity used is 8.681
Topographical data present in inversion file.
Damped topography was incorporated into inversion model.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 0.600.
Inversion constraints information present.
Reading of file has been completed.

Maximum value 33.49
Minimum value 1.40

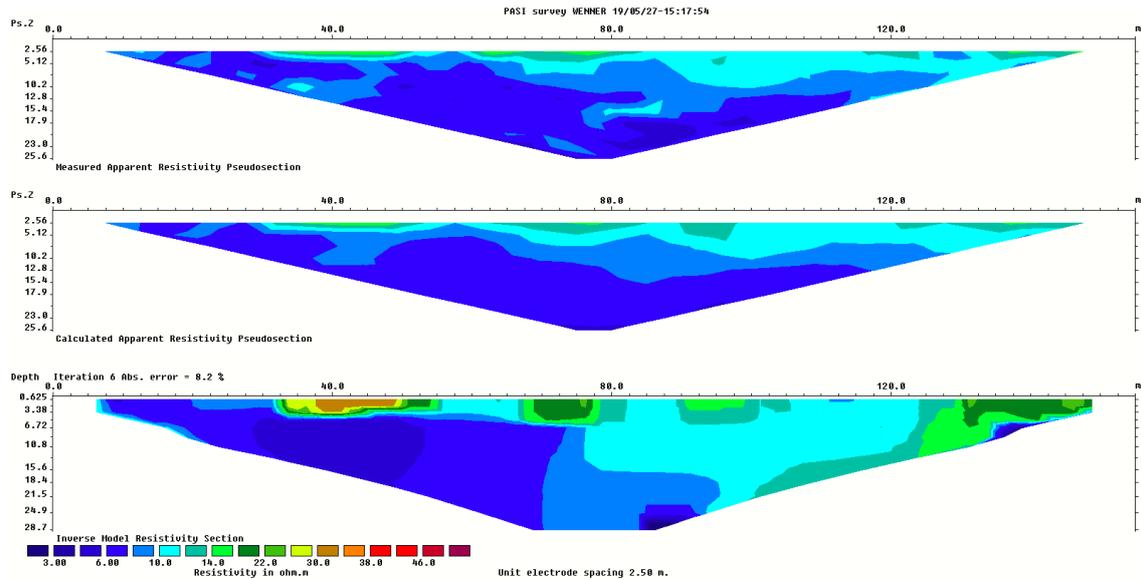


Figura 5-4: Resultados del proceso de inversión LE-3

5.1.4 Línea eléctrica LE-4

Los datos obtenidos del levantamiento se detallan a continuación:

PASI survey WENNER 19/05/28-10:00:29

Electrode spacing is 5.000.

Wenner array

Measurements are in apparent resistivity.

Total number of datum points is 145.

Position of first electrode in array is given.

145 5.000 50.000 4.8

Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 155.00.

Minimum electrode spacing is 2.50.

Topographic data present.

The number of topographical datum points is 32.

Total number of data levels is 10.

Total number of electrodes is 63.

First electrode is located at 0.00.

Last electrode is located at 155.00.

Minimum and maximum apparent resistivity values are 4.40 and 18.03

Minimum, maximum and average geometric factors used in data set are 31.4, 314.2 and 123.3

Los resultados del proceso de inversión se detallan a continuación:

Reading file C:\GEOF_E2\2019\19_TRIGALES_XAVIER\GEOFISICA\ELECTRICAS\tri-le4_BE.INV

PASI survey WENNER 19/05/28-10:00:29

Electrode spacing is 2.500.

Wenner array

Total number of datum points is 145.

Position of mid-point of array is given.

145 80.000 50.000 4.8

Electrode locations are 0.00 and 10.00.

Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 155.00.

Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 155.0.

Line length is 155.0.

Minimum electrode spacing is 2.5.

Sorting data points.

Number of data levels is 10.

Number of electrodes is 63.

Reading inversion results.

The model has 13 layers and 507 blocks.

Iteration 1 : RMS error 14.17.

Iteration 2 : Abs. error 9.65.

Iteration 3 : Abs. error 8.42.

Iteration 4 : Abs. error 7.74.

Iteration 5 : Abs. error 7.30.

Iteration 6 : Abs. error 7.06.

Reference resistivity used is 9.075

Topographical data present in inversion file.

Damped topography was incorporated into inversion model.

Blocks sensitivity information present.

Average sensitivity is 0.598.

Inversion constraints information present.

Reading of file has been completed.

Maximum value 36.59

Minimum value 1.48

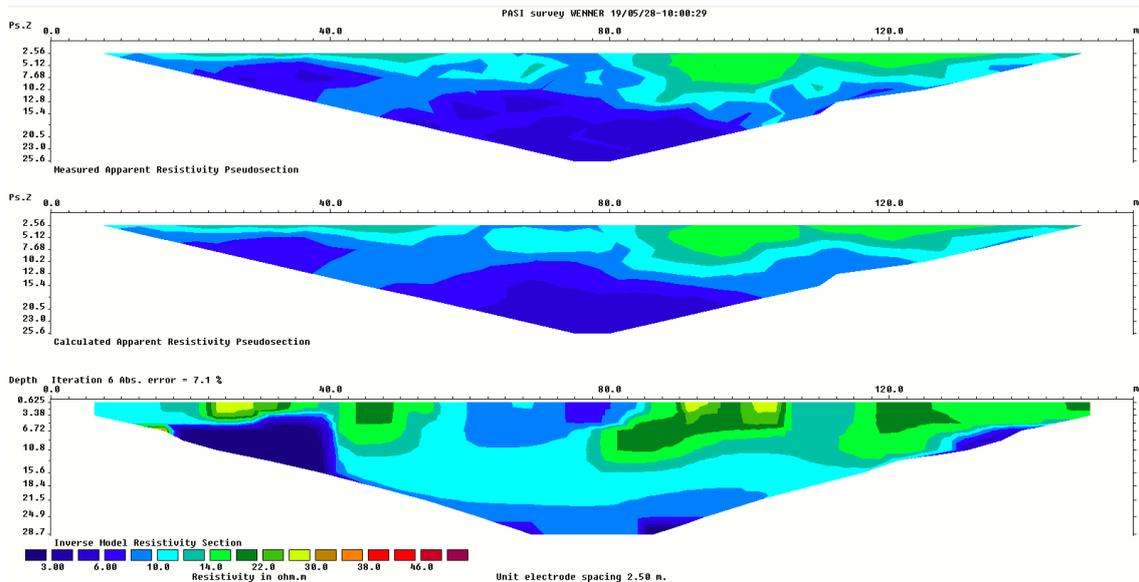


Figura 5-5: Resultados del proceso de inversión LE-4

5.1.5 Línea eléctrica LE-5

Los datos obtenidos del levantamiento se detallan a continuación:



PASI survey WENNER 19/05/28-15:31:15
Electrode spacing is 5.000.
Wenner array
Measurements are in apparent resistivity.
Total number of datum points is 121.
Position of first electrode in array is given.
121 10.000 45.000 3.4
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 145.00.
Minimum electrode spacing is 2.50.
Topographic data present.
The number of topographical datum points is 30.
Total number of data levels is 9.
Total number of electrodes is 59.
First electrode is located at 0.00.
Last electrode is located at 145.00.
Minimum and maximum apparent resistivity values are 2.78 and 53.41
Minimum, maximum and average geometric factors used in data set are 31.4, 282.7 and 112.2

Los resultados del proceso de inversión se detallan a continuación:

Reading file C:\GEOF_E2\2019\19_TRIGALES_XAVIER\GEOFISICA\ELECTRICAS\tri-le5_BE.INV

PASI survey WENNER 19/05/28-15:31:15
Electrode spacing is 2.500.
Wenner array
Total number of datum points is 121.
Position of mid-point of array is given.
121 77.500 45.000 3.4
Electrode locations are 0.00 and 10.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 145.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 145.0.
Line length is 145.0.
Minimum electrode spacing is 2.5.
Sorting data points.
Number of data levels is 9.
Number of electrodes is 59.
Reading inversion results.
The model has 12 layers and 449 blocks.
Iteration 1 : RMS error 20.07.
Iteration 2 : Abs. error 14.38.
Iteration 3 : Abs. error 12.94.
Iteration 4 : Abs. error 12.14.
Iteration 5 : Abs. error 11.67.
Reference resistivity used is 8.706
Topographical data present in inversion file.
Damped topography was incorporated into inversion model.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 0.553.
Inversion constraints information present.
Reading of file has been completed.

Maximum value 53.41
Minimum value 2.78

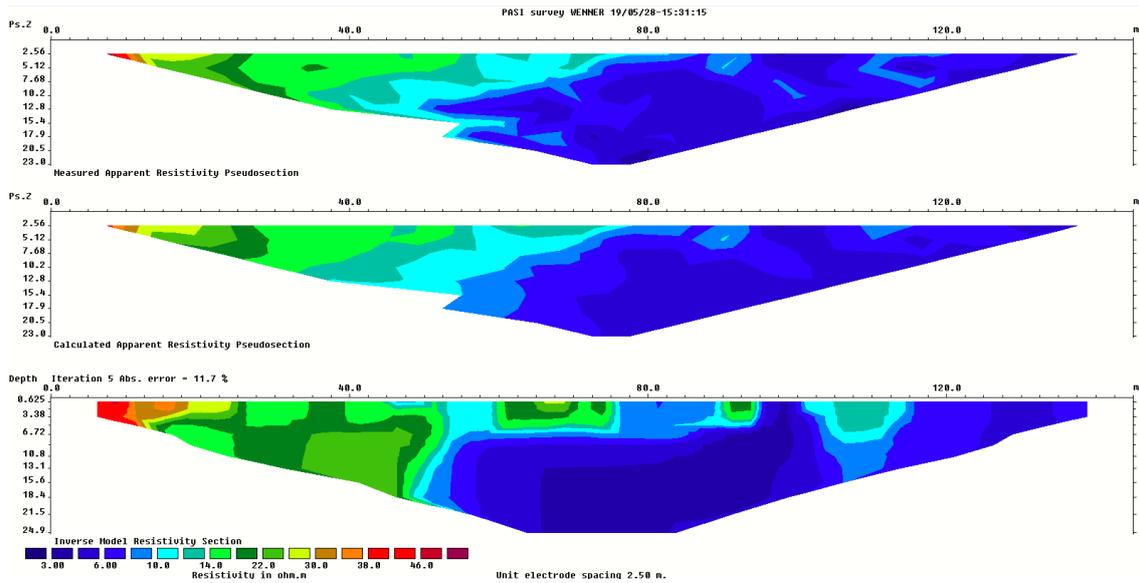


Figura 5-6: Resultados del proceso de inversión LE-5

5.1.6 Línea eléctrica LE-6

Los datos obtenidos del levantamiento se detallan a continuación:

PASI survey WENNER 19/05/28-11:57:09

Electrode spacing is 5.000.

Wenner array

Measurements are in apparent resistivity.

Total number of datum points is 120.

Position of first electrode in array is given.

120 5.000 45.000 5.9

Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 140.00.

Minimum electrode spacing is 2.50.

Topographic data present.

The number of topographical datum points is 29.

Total number of data levels is 9.

Total number of electrodes is 57.

First electrode is located at 0.00.

Last electrode is located at 140.00.

Minimum and maximum apparent resistivity values are 4.30 and 41.15

Minimum, maximum and average geometric factors used in data set are 31.4, 282.7 and 114.4

Los resultados del proceso de inversión se detallan a continuación:



Reading file C:\GEOF_E2\2019\19_TRIGALES_XAVIER\GEOFISICA\ELECTRICAS\tri-le6_BE.INV

PASI survey WENNER 19/05/28-11:57:09

Electrode spacing is 2.500.

Wenner array

Total number of datum points is 120.

Position of mid-point of array is given.

120 72.500 45.000 5.9

Electrode locations are 0.00 and 10.00.

Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 140.00.

Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 140.0.

Line length is 140.0.

Minimum electrode spacing is 2.5.

Sorting data points.

Number of data levels is 9.

Number of electrodes is 57.

Reading inversion results.

The model has 12 layers and 427 blocks.

Iteration 1 : RMS error 17.33.

Iteration 2 : Abs. error 10.74.

Iteration 3 : Abs. error 8.71.

Iteration 4 : Abs. error 7.81.

Iteration 5 : Abs. error 7.31.

Iteration 6 : Abs. error 6.86.

Iteration 7 : Abs. error 6.48.

Reference resistivity used is 9.638

Topographical data present in inversion file.

Damped topography was incorporated into inversion model.

Blocks sensitivity information present.

Average sensitivity is 0.586.

Inversion constraints information present.

Reading of file has been completed.

Maximum value 59.49

Minimum value 1.77

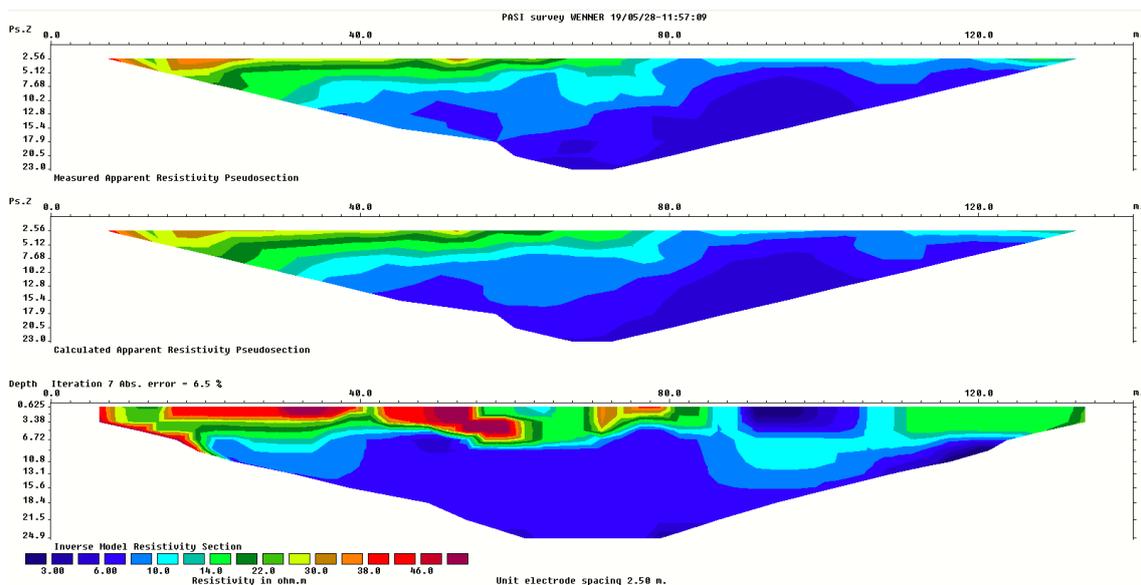


Figura 5-7: Resultados del proceso de inversión LE-6

5.1.7 Línea eléctrica LE-7

Los datos obtenidos del levantamiento se detallan a continuación:



PASI survey WENNER 19/05/27-17:13:54
Electrode spacing is 5.000.
Wenner array
Measurements are in apparent resistivity.
Total number of datum points is 144.
Position of first electrode in array is given.
144 5.000 50.000 7.7
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 155.00.
Minimum electrode spacing is 2.50.
Topographic data present.
The number of topographical datum points is 32.
Total number of data levels is 10.
Total number of electrodes is 63.
First electrode is located at 0.00.
Last electrode is located at 155.00.
Minimum and maximum apparent resistivity values are 5.34 and 36.76
Minimum, maximum and average geometric factors used in data set are 31.4, 314.2 and 124.6

Los resultados del proceso de inversión se detallan a continuación:

Reading file C:\GEOF_E2\2019\19_TRIGALES_XAVIER\GEOFISICA\ELECTRICAS\tri-le7_BE.INV

PASI survey WENNER 19/05/27-17:13:54
Electrode spacing is 2.500.
Wenner array
Total number of datum points is 144.
Position of mid-point of array is given.
144 80.000 50.000 7.7
Electrode locations are 0.00 and 15.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 155.00.
Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 155.0.
Line length is 155.0.
Minimum electrode spacing is 2.5.
Sorting data points.
Number of data levels is 10.
Number of electrodes is 63.
Reading inversion results.
The model has 13 layers and 508 blocks.
Iteration 1 : RMS error 11.99.
Iteration 2 : Abs. error 6.77.
Iteration 3 : Abs. error 5.23.
Iteration 4 : Abs. error 4.74.
Iteration 5 : Abs. error 4.54.
Reference resistivity used is 10.773
Topographical data present in inversion file.
Damped topography was incorporated into inversion model.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 0.597.
Inversion constraints information present.
Reading of file has been completed.

Maximum value 64.94
Minimum value 2.34

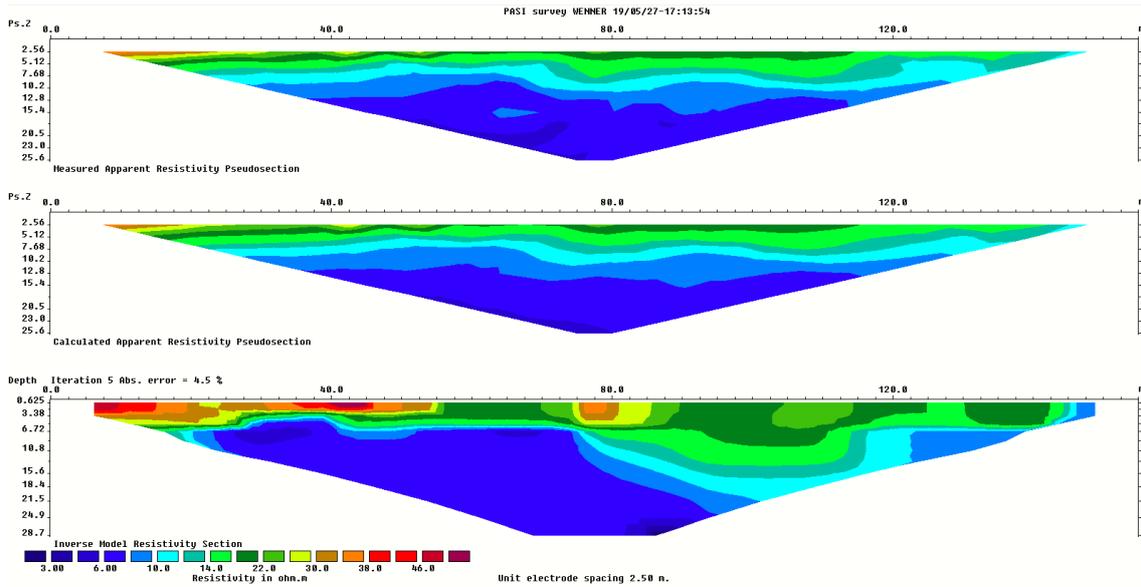


Figura 5-8: Resultados del proceso de inversión LE-7

5.1.8 Línea eléctrica LE-8

Los datos obtenidos del levantamiento se detallan a continuación:

PASI survey WENNER 19/05/29-10:38:30

Electrode spacing is 5.000.

Wenner array

Measurements are in apparent resistivity.

Total number of datum points is 130.

Position of first electrode in array is given.

130 0.000 50.000 5.5

Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 150.00.

Minimum electrode spacing is 2.50.

Topographic data present.

The number of topographical datum points is 31.

Total number of data levels is 10.

Total number of electrodes is 61.

First electrode is located at 0.00.

Last electrode is located at 150.00.

Minimum and maximum apparent resistivity values are 3.94 and 47.12

Minimum, maximum and average geometric factors used in data set are 31.4, 314.2 and 118.7

Los resultados del proceso de inversión se detallan a continuación:

Reading file C:\GEOF_E2\2019\19_TRIGALES_XAVIER\GEOFISICA\ELECTRICAS\tri-le8_BE.INV

PASI survey WENNER 19/05/29-10:38:30

Electrode spacing is 2.500.

Wenner array

Total number of datum points is 130.

Position of mid-point of array is given.

130 75.000 50.000 5.5

Electrode locations are 0.00 and 15.00.

Minimum and maximum electrode locations are 0.00 and 150.00.

Minimum and maximum electrode locations are 0.0 and 150.0.

Line length is 150.0.

Minimum electrode spacing is 2.5.

Sorting data points.

Number of data levels is 10.

Number of electrodes is 61.

Reading inversion results.

The model has 13 layers and 483 blocks.

Iteration 1 : RMS error 19.84.

Iteration 2 : Abs. error 13.47.

Iteration 3 : Abs. error 11.39.

Iteration 4 : Abs. error 10.48.

Iteration 5 : Abs. error 10.24.

Reference resistivity used is 9.205

Topographical data present in inversion file.

Damped topography was incorporated into inversion model.

Blocks sensitivity information present.

Average sensitivity is 0.548.

Inversion constraints information present.

Reading of file has been completed.

Maximum value 69.50

Minimum value 3.33

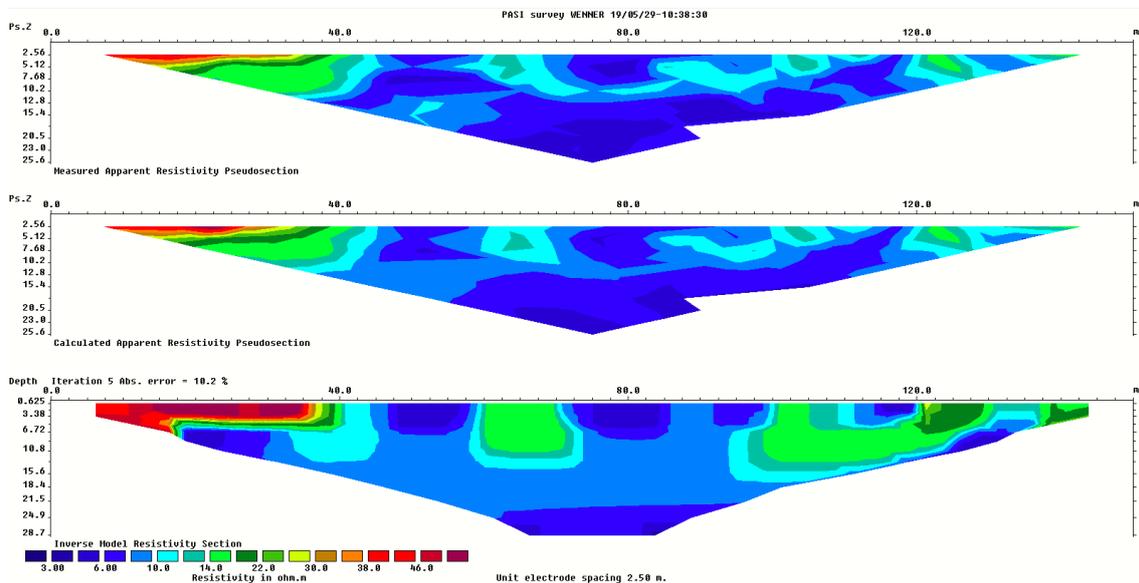


Figura 5-9: Resultados del proceso de inversión LE-8

5.2. SÍSMICA DE REFRACCIÓN

El levantamiento de la información geofísica con sísmica de refracción se realizó mediante el tendido de 3 líneas, se colocaron 23 geófonos con una separación de 2.5 m para las líneas LS-1.1 y LS-1.2, mientras

que para la línea LS-2 se utilizó una separación de 3.5 m entre cada geófono. La diferencia que existe entre la separación de los geófonos se debe a la disponibilidad del espacio físico existente en la zona

El nombre, longitud y ubicación de cada línea se resume en la Tabla 5-3, así como la distribución espacial en la zona de estudio se presenta en la Figura 5-10:

Tabla 5-3: Ubicación de líneas sísmicas

PERFIL SÍSMICO	LONGITUD (m)	INICIO		FIN	
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE
LS-1.1	55.00	723290.81	9682626.74	723342.90	9682626.68
LS-1.2	55.00	723352.99	9682626.92	723405.07	9682621.21
LS-2	77.00	723316.06	9682512.90	723387.00	9682504.71

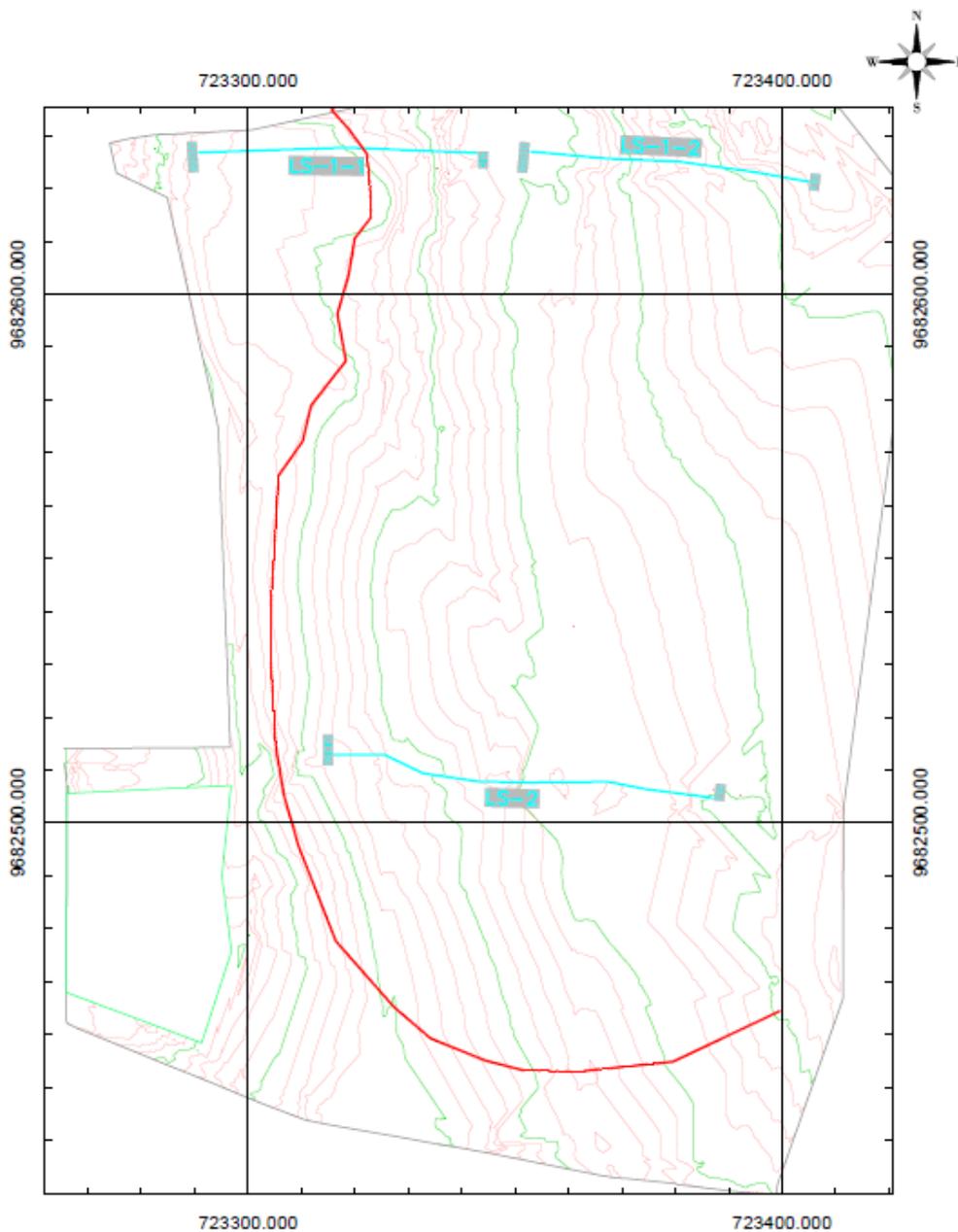


Figura 5-10: Ubicación de líneas sísmicas

Previo al retiro de los equipos se procedió a la revisión de consistencia de los datos, con el propósito que estos proporcionen la información necesaria y correcta para el siguiente proceso de interpretación. Para la revisión de consistencia de datos se observa que no se haya infiltrado ruido en las tomas de cada shot y que tenga una secuencia correcta.

En base a la información levantada en el campo, se procedió en primer lugar al ingreso de los datos en el software WINSISM, desarrollado por la empresa Suiza Geosoft. Este software cuenta con módulos para conversión de datos de los registros de los sismogramas generados por la lectura de los equipos a formato propio del programa para su procesamiento y análisis. Del registro de los sismogramas se obtienen las curvas tiempo – distancia (dromocronas) correspondientes a cada uno de los disparos (Shots) generados. Con esta información y con los datos topográficos se realizan los modelos para determinar los cambios de pendiente a fin de obtener las velocidades presentes en el terreno.

En el Anexo 9-1 se encuentran las dromocronas elaboradas dentro del proceso de interpretación geofísica, así como también la explicación de la información que éstas proporcionan.

5.3. ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)

Para la determinación de las velocidades de corte (V_s) mediante el método MASW, se procedió al levantamiento de información de 10 líneas MASW. Para cada perfil se instaló 23 geófonos ubicados a 1.50 m cada uno, y posterior a ello se realizaron impactos con martillo.

La Tabla 5-4 indica las coordenadas de los perfiles levantados y la Figura 5-11 indica la disposición espacial en la que fueron levantados.

Tabla 5-4: Ubicación de líneas geofísicas MASW

PERFIL MASW	LONGITUD (m)	PUNTO MASW	ESTE	NORTE
LM-1	33.00	INICIO	723297.60	9682543.10
		FINAL	723300.27	9682577.25
LM-2	33.00	INICIO	723299.38	9682589.16
		FINAL	723292.05	9682617.23
LM-3	33.00	INICIO	723330.55	9682581.99
		FINAL	723332.70	9682616.60
LM-4	33.00	INICIO	723360.50	9682522.75
		FINAL	723360.06	9682554.00
LM-5	33.00	INICIO	723360.15	9682598.85
		FINAL	723353.55	9682629.47
LM-6	33.00	INICIO	723400.68	9682475.39
		FINAL	723399.46	9682508.84
LM-7	33.00	INICIO	723396.83	9682581.26
		FINAL	723397.94	9682612.93
LM-8	33.00	INICIO	723322.05	9682574.91
		FINAL	723338.69	9682548.40
LM-9	34.50	INICIO	723327.83	9682493.09
		FINAL	723330.11	9682527.52
LM-10	34.50	INICIO	723365.80	9682471.37
		FINAL	723365.81	9682505.87

Previo al retiro de los equipos se procedió a la revisión de consistencia de los datos con el propósito de que éstos proporcionen la información necesaria y correcta para el proceso de interpretación.

Para investigar a mayor profundidad, aproximadamente entre 30 y 40 metros, se complementó el estudio con el registro de sismica pasiva mediante las técnicas ReMi (Refraction Microtremor) y ESAC, obtenidos mediante el registro del ruido ambiental.

En el Anexo 9-2 se encuentra la ubicación de los perfiles levantados y en el Anexo 9-6 se encuentra el registro fotográfico del trabajo realizado en el campo.

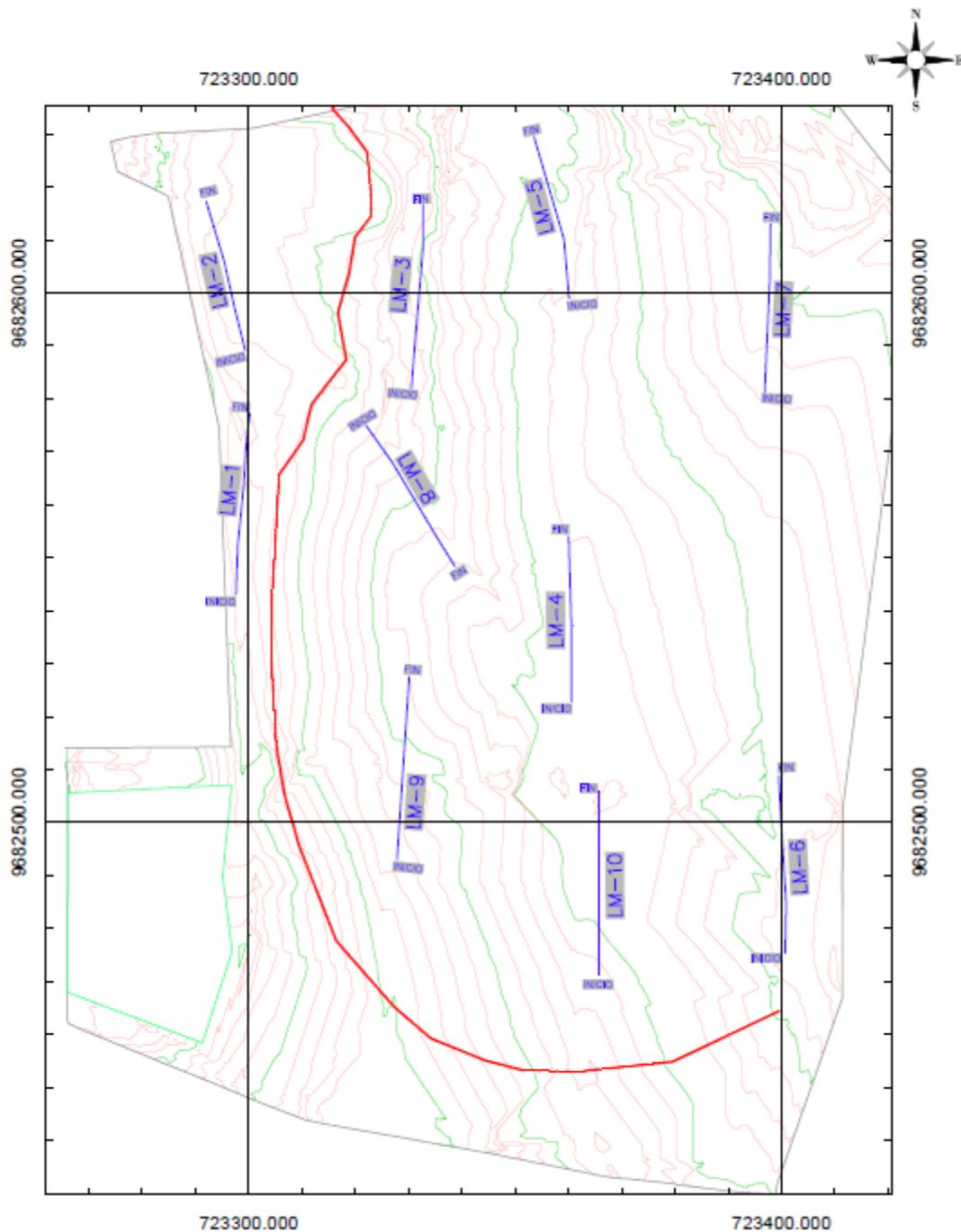


Figura 5-11: Ubicación de líneas sísmicas MASW



5.4. CÁLCULO DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DÍNAMICOS

Con el objeto de complementar la información para la determinación de los parámetros geotécnicos de la zona investigada mediante prospección geofísica se ha procedido a determinar parámetros adicionales de acuerdo con las expresiones de la sección 2.19, las cuales son:

- Coeficiente de Poisson
- Módulo de Corte o módulo de elasticidad al cortante
- Módulo de Young
- Módulo Volumétrico

5.4.1 Síntesis de parámetros geotécnicos dinámicos

Utilizando información proporcionada por ensayos de prospección geofísica realizados en el terreno, se obtuvieron datos de velocidad de onda sísmica de los estratos V_s y V_p , a través de los cuales proporcionan las características geotécnicas del suelo constituyente.

En la Tabla 5-5 se sistematizan los resultados de los parámetros geotécnicos, el valor de carga admisible se calcula considerando el factor de seguridad $n = 4$, para valores de $V_s \leq 750$ m/s conforme se indicó en la Tabla 2-5: Criterios para Carga Admisible en función de V_s y factores de seguridad n .



Tabla 5-5: Parámetros geotécnicos

ZONA	ESTRATO	VP	VS	PESO ESPECÍFICO	MODULO POISSON	MODULO ELASTICIDAD	MÓDULO DE CORTE	MÓDULO VOLUMÉTRICO	MÓDULO EDOMÉTRICO	CARGA ADMISIBLE	COHESIÓN	FRICCIÓN	COEFICIENTE BALASTO
				γ	ν	E	G	K	Eed	q_a	c	$^\circ$	k_s
				Ecuación 19, en la página 45	Ecuación 10, en la página 43	Ecuación 12, en la página 44	Ecuación 11, en la página 44	Ecuación 13, en la página 44		Ecuación 17, en la página 45		Ecuación 24, en la página 47	
		m/s	m/s	kN/m ³	m/m	MPa	MPa	MPa	MPa	kPa	kPa	Grados	kN/m ³
PERFIL 1-1	1	380	175.5	15.65	0.36	134	49	165	230	69	18.74	3.93	2748
	2	760	236.4	16.86	0.45	278	96	864	992	100	28.72	4.71	3984
	3	1410	264.4	17.34	0.48	366	123	3347	3512	115	46.54	10.26	4584
	4	1630	325.9	18.27	0.48	585	198	4681	4945	149	67.31	13.94	5956
	5	1890	371.7	18.88	0.48	786	266	6517	6870	175	82	18	7016
	6	2180	463.3	19.95	0.48	1288	436	9076	9658	231	101	27	9244
	7	2360	505.6	20.39	0.48	1567	531	10860	11568	258	120	30	10308
PERFIL 2-2	1	645	233.6	16.81	0.42	266	93	588	712	98	30.32	4.74	3928
	2	730	173.2	15.6	0.47	140	48	783	847	68	20.55	3.74	2700
	3	1262	238.0	16.89	0.48	289	97	2610	2740	101	27.8	4.69	4020
	4	1650	289.0	17.73	0.48	448	151	4716	4917	128	55.29	11.81	5124
	5	1984	363.1	18.77	0.48	748	252	7190	7526	170	78	16	6816
	6	2200	469.9	20.02	0.48	1330	451	9270	9871	235	101	27	9412
PERFIL 3-3	1	576	169.3	15.51	0.45	132	45	464	524	66	20.06	3.7	2624
	2	1044	200.0	16.17	0.48	195	66	1708	1795	81	23.76	4	3236
	3	1430	231.9	16.78	0.49	274	92	3373	3496	97	31.01	4.75	3892
	4	1720	308.4	18.02	0.48	518	175	5198	5430	139	47.11	10	5556
	5	2085	348.6	18.58	0.49	683	230	7921	8228	162	78	16	6476
	6	2400	414.3	19.4	0.48	1007	339	10931	11383	201	93	22	8036

6 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

6.1. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

6.1.1 Perfil eléctrico LE-1

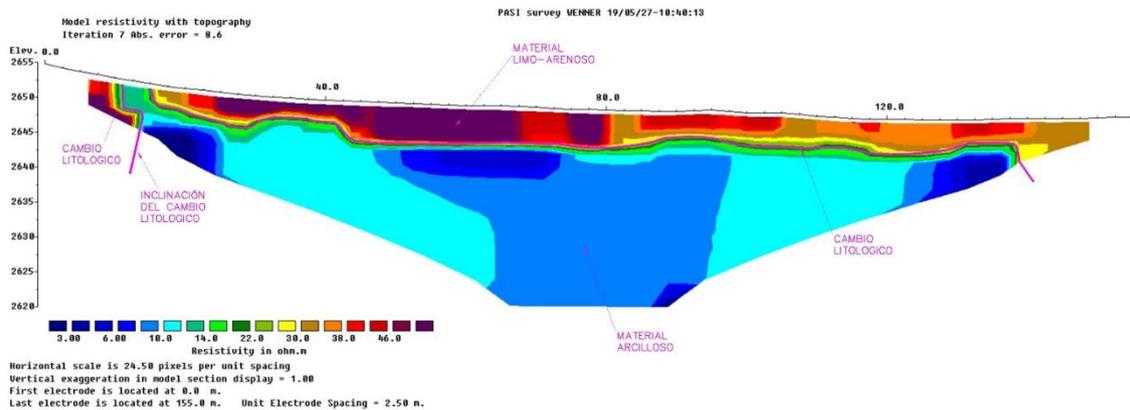


Figura 6-1: Perfil eléctrico LE-1

Del análisis de los resultados de la tomografía eléctrica, Figura 6-1, se puede indicar que existe presencia de material arcilloso, representado en color azul con valores de resistividad entre 3 y 6 ohm/m. Con valores superiores de resistividad se encontrarían limos y limo-arenosos los cuales oscilan entre 30 y 50 ohm/m representado por la gama de colores cálidos.

Así también, se puede evidenciar la presencia de cambios litológicos existentes junto con su inclinación. Existe una transición de lo que pudiera ser la Formación Santa Rosa geológicamente formada por material fino como arcillas y limos, hacia la terraza fluvio-glacial compuesta por una matriz limo-arenosa con presencia de clastos centimétricos. Esta transición se encontraría entre los 3 m y 5 m de profundidad aproximadamente a lo largo de toda la línea eléctrica (colores cálidos).

6.1.2 Perfil eléctrico LE-2

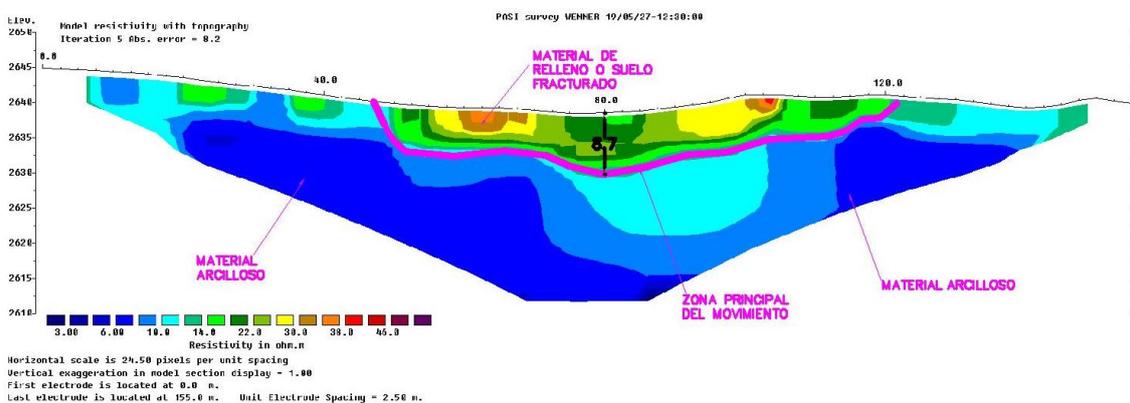


Figura 6-2: Perfil eléctrico LE-2

En la Figura 6-2 se evidencia la presencia de lo que podría ser material de relleno o suelo fracturado con espacio de vacíos con mayor contenido de agua superficialmente representado por los colores verde y

amarillo cuyas resistividades eléctricas fluctúan entre 15 y 38 ohm/m. De igual manera se delimita la zona principal del movimiento, que aproximadamente pudiera estar de 8 m a 9 m de profundidad.

6.1.3 Perfil eléctrico LE-3

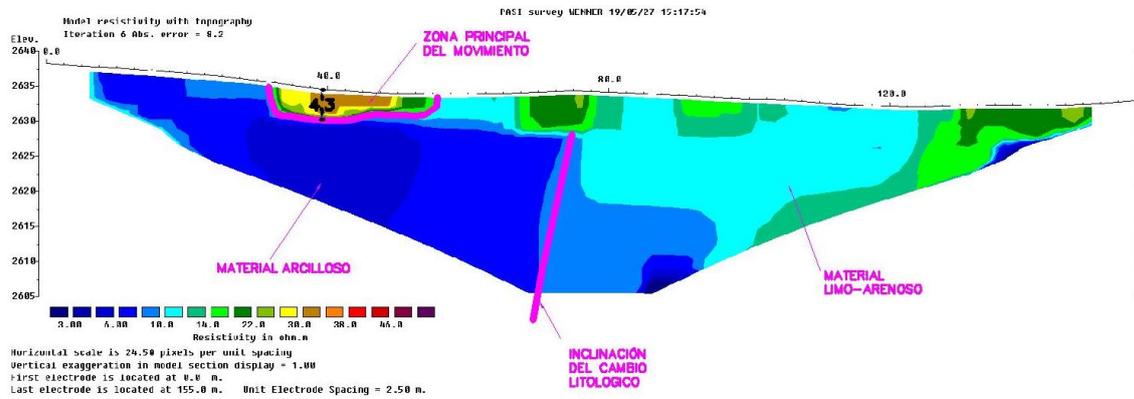


Figura 6-3: Perfil eléctrico LE-3

En esta tomografía eléctrica, Figura 6-3, se puede indicar la presencia de suelo fracturado con espacio de vacíos de lo que podría ser la zona principal de movimiento a menor profundidad, aproximadamente de 4 m representado por los colores cálidos verde y amarillo cuyas resistividades están entre 15 y 35 ohm/m. De igual manera se puede inferir la existencia de un cambio litológico inclinado de material fino arcilloso a un material un poco más grueso limo-arenoso. El cambio estaría dado por la transición vertical entre los colores azul y turquesa con valores de resistividad de 6 a 10 ohm/m respectivamente.

6.1.4 Perfil eléctrico LE-4

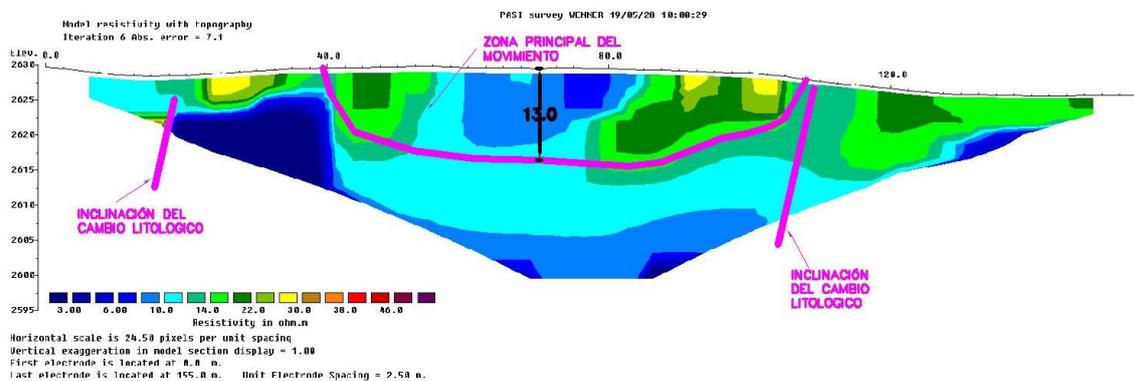


Figura 6-4: Perfil eléctrico LE-4

En la Figura 6-4 se puede interpretar la zona principal del movimiento hasta 13 m de profundidad aproximadamente debido a la presencia de variaciones erráticas de las resistividades superficiales, colores azul, turquesa, amarillo y verde, los cuales representarían resistividades de 4.5, 11, 30 y 22 ohm/m, respectivamente, que indicarían que se trata de un suelo fracturado de origen arcilloso con espacio de vacíos con mayor presencia de agua superficialmente. De igual forma, también se puede observar la alternancia de los cambios litológicos existentes en el subsuelo junto con su inclinación paralela.

6.1.5 Perfil eléctrico LE-5

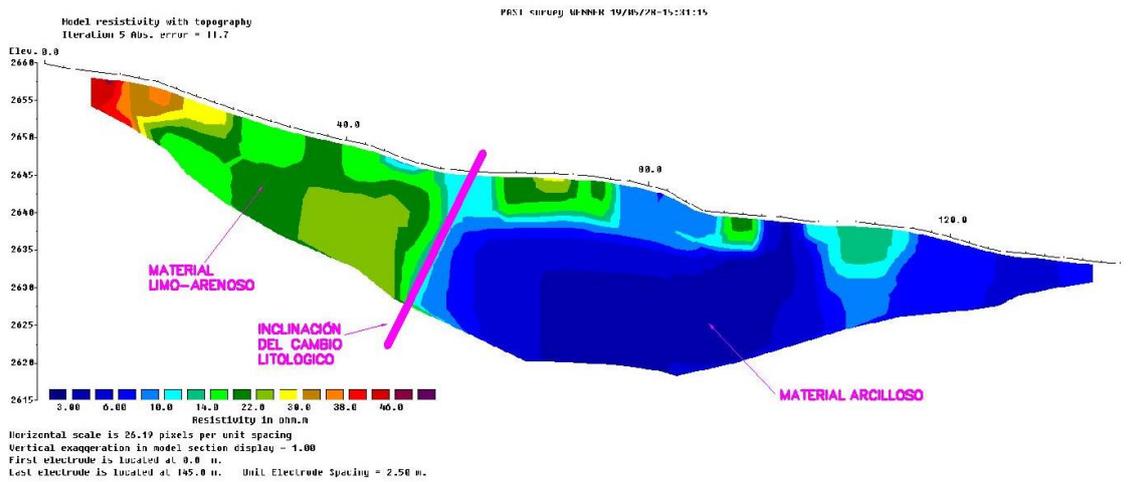


Figura 6-5: Perfil eléctrico LE-5

En la Figura 6-5 es en donde más se puede evidenciar geológicamente la presencia del cambio litológico con su inclinación, es decir, que se trata de una estratigrafía inclinada profunda presente en la zona de estudio, teniendo de color verde (entre 15 y 26 ohm/m) material fracturado un poco más grueso que el de color azul, material fino menos poroso y permeable como lo son las arcillas con resistividades cercanas a 3 y 9 ohm/m.

6.1.6 Perfil eléctrico LE-6

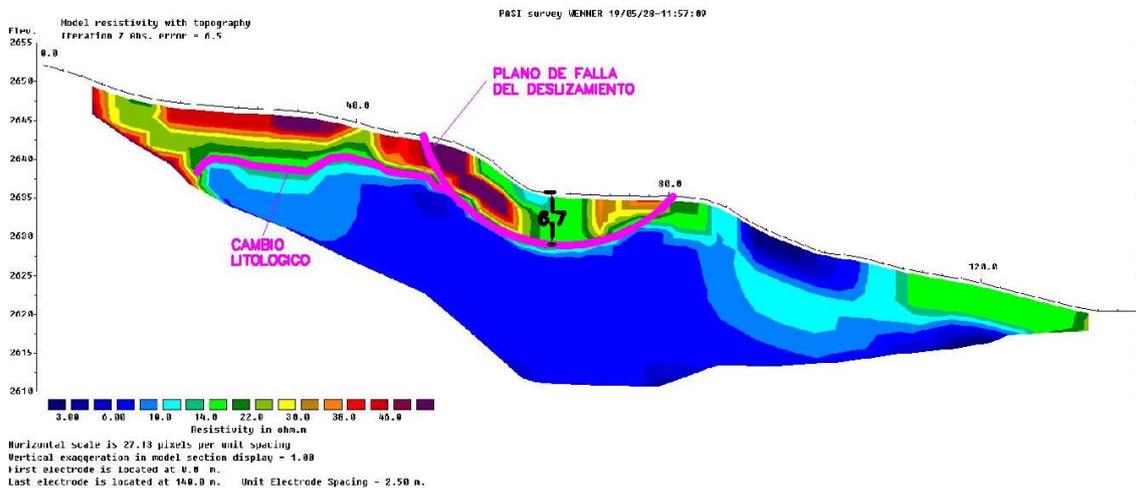


Figura 6-6: Perfil eléctrico LE-6

En esta tomografía (Figura 6-6) se pudiera evidenciar un plano de falla a una profundidad de 6.70 m por la resistividad alta (colores cálidos, resistividades eléctricas entre 15 y 50 ohm/m) presente cerca del plano inferido, lo que se trataría de material limo-arenoso fracturado con alto espacio de vacíos por lo que es poroso y altamente permeable. Se puede observar que el plano de falla se da exactamente en la zona del cambio litológico, sobre el contacto del material arcilloso impermeable (color azul) y el material fracturado.

6.1.7 Perfil eléctrico LE-7

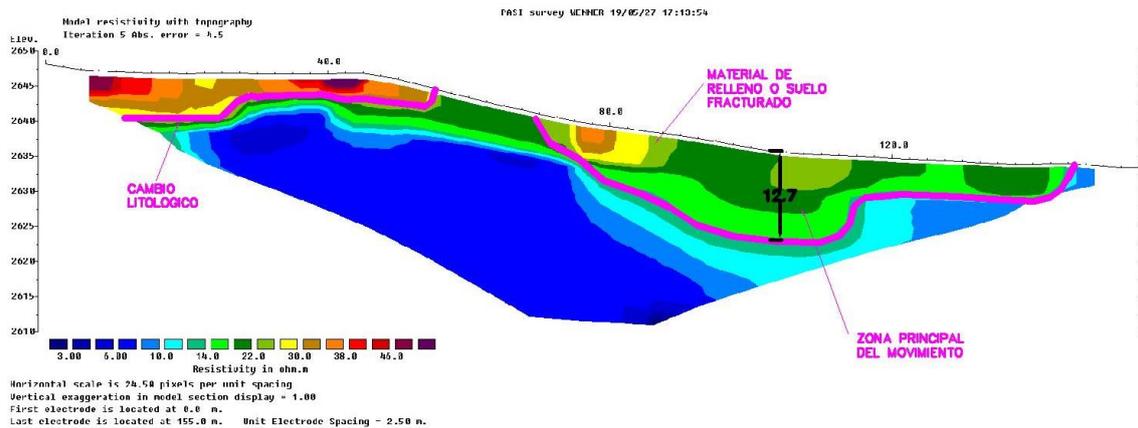


Figura 6-7: Perfil eléctrico LE-7

En esta tomografía eléctrica (Figura 6-7) también se puede evidenciar la presencia del cambio litológico antes mencionado, por su resistividad alta (de 15 a 38 ohm/m) podría tratarse de una terraza fluvio-glacial con presencia de clastos centimétricos conforme se puede ver los taludes antrópicos en la zona. Así también, se puede observar la zona principal del movimiento observado en campo con una potencia de alrededor de 13 m en su parte más profunda.

6.1.8 Perfil eléctrico LE-8

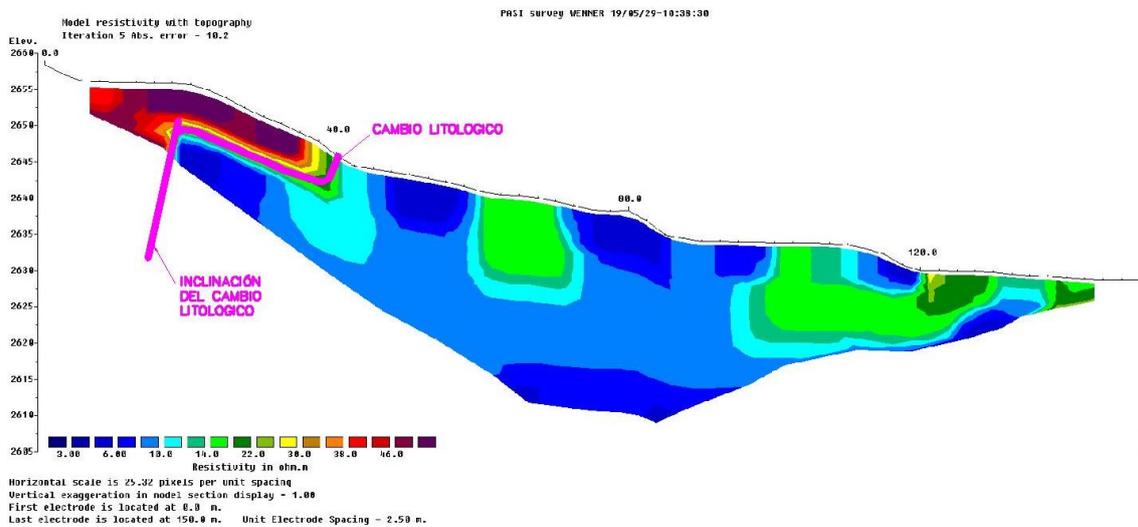


Figura 6-8: Perfil eléctrico LE-8

En la Figura 6-8 también se puede ver la inclinación vertical de la estratificación en la frontera del cambio litológico (ver colores cálidos con resistividad de entre 30 y 50 ohm/m). Además, este perfil por su ubicación perpendicular al escarpe (ver Figura 5-1) debería permitir observar todo el plano principal de falla, pero presenta discordancias claras debido a la presencia de bloques de escombros implantados en la superficie de la zona, lo que obviamente dificulta la medición de la resistividad eléctrica del suelo dando un error alto mayor al 10%, por lo que sus resultados no son los esperados. Al tener presencia de escombros existe espacio vacío entre los mismos, por lo que la conductividad eléctrica en el subsuelo varía, así también la resistividad eléctrica.

A partir de la correlación de datos sísmicos, tales como velocidades V_p y V_s , se procedió a interpretar cada perfil logrando identificar en otras zonas la profundidad del cambio litológico existente inferido mediante la técnica de resistividad eléctrica, validando de esta manera la información.

6.2. SÍSMICA DE REFRACCIÓN

6.2.1 Perfil sísmico LS1-1

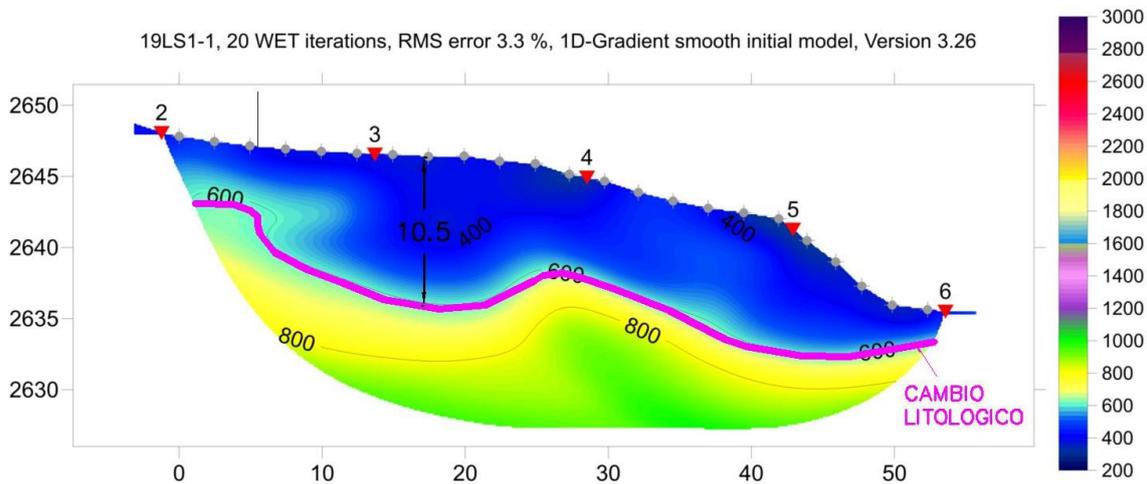


Figura 6-9: Perfil sísmico LS1-1

Para la tomografía sísmica (Figura 6-9) únicamente se alcanza a observar el cambio litológico existente alrededor de 10.5 m de profundidad a partir de los 600 m/s.

6.2.2 Perfil sísmico LS1-2

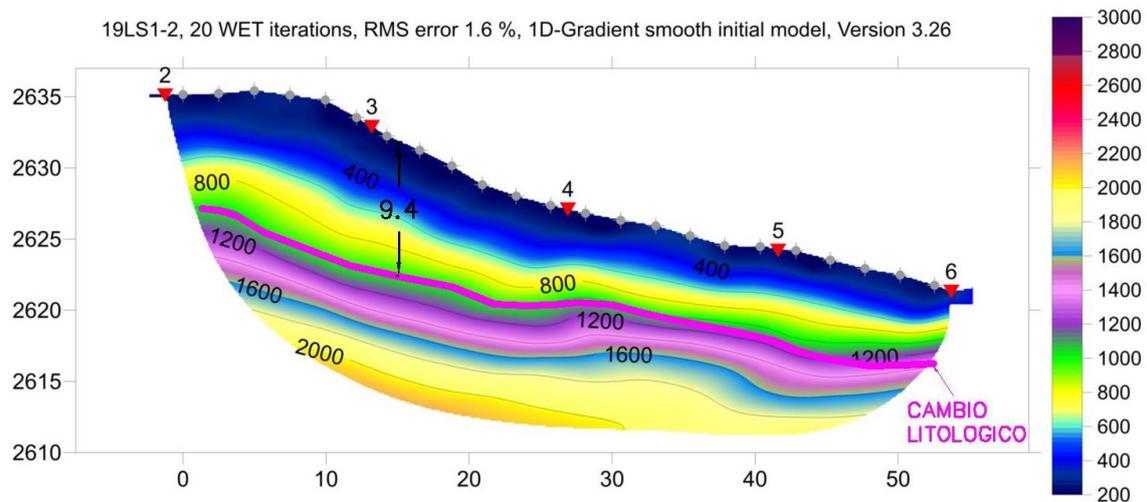
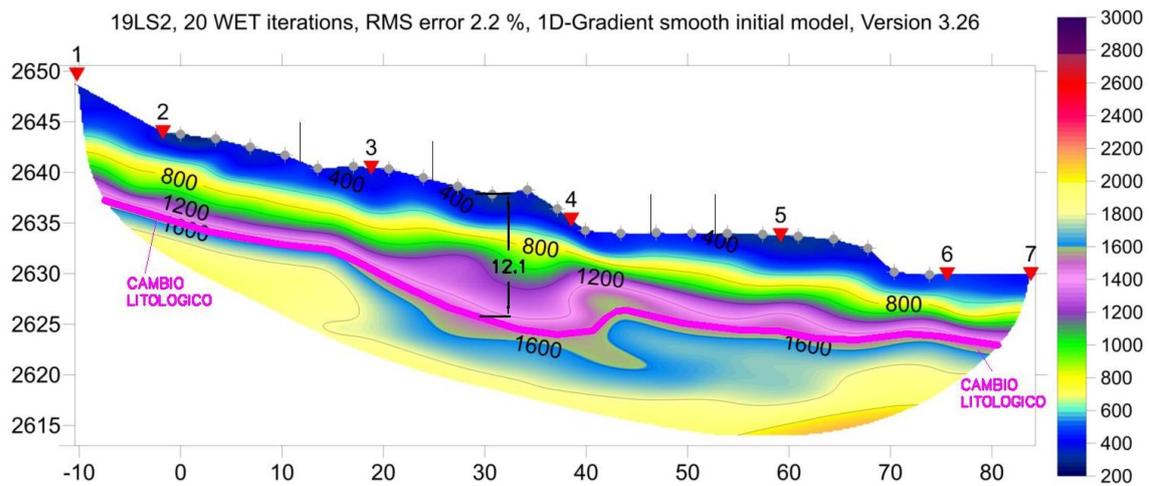


Figura 6-10: Perfil sísmico LS1-2

La Figura 6-10 presenta la zona del movimiento principal con materiales muy sueltos superficialmente, además se infiere la presencia de toda una franja de debilidad geofísica con un espesor entre 2 m y 3 m con alta presencia de humedad a una profundidad de 9.40 m aproximadamente con velocidades V_p que oscilan entre 800 y 1000 m/s.

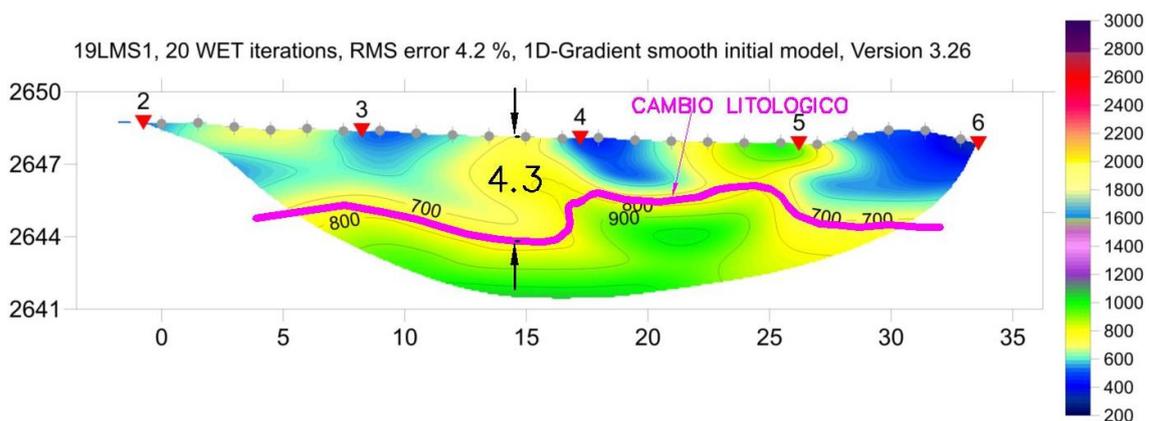
6.2.3 Perfil sísmico LS-2



Al igual que la línea LS-1-2, ésta (Figura 6-11) presentaría la zona del movimiento principal con materiales muy sueltos superficialmente, además se infiere la presencia de un cambio litológico a una profundidad de 12 m en promedio. Se puede observar que los materiales presentan altas velocidades V_p (superiores a 1600 m/s), lo que significaría que los mismos se encuentran con un porcentaje de humedad mayor que los de las capas superficiales.

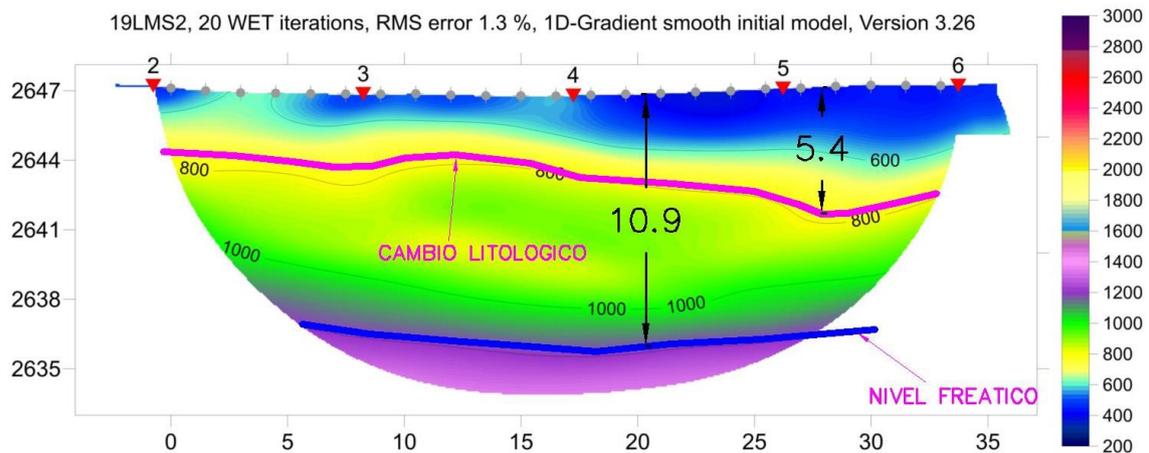
Además, se pudo obtener resultados de sismica de refracción (V_p), a partir de los datos levantados por el método MASW, a continuación, se presentan estos resultados:

6.2.4 Perfil sísmico LMS-1



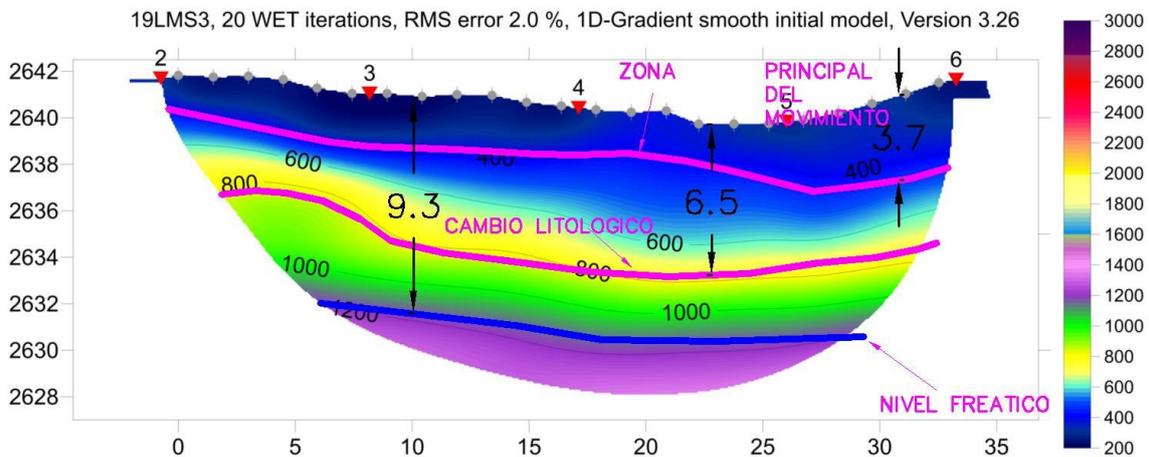
En la tomografía sísmica de la Figura 6-12 se puede observar aproximadamente a los 4.30 m de profundidad el cambio litológico existente entre la Formación Santa Rosa y la terraza fluvio-glacial en la superficie evidenciándose fácilmente la heterogeneidad de la terraza con presencia de clastos centimétricos por la no uniformidad de las velocidades sísmicas V_p que fluctúan entre los 600 y 800 m/s.

6.2.5 Perfil sísmico LMS-2



De la misma manera, en la Figura 6-13 se observa que el cambio litológico en esta zona se encuentra aproximadamente entre los 5.40 m de profundidad en su parte más potente, presentándose con una velocidad V_p entre 750 y 800 m/s; además se alcanzaría a evidenciar la presencia del nivel freático a partir de los 10 m de profundidad aproximadamente, por lo que el material que predomina en la zona presentaría valores V_p a partir de 1100 m/s cuando éste se encuentra saturado.

6.2.1 Perfil sísmico LMS-3



En la tomografía sísmica (Figura 6-14), se podría evidenciar la zona principal del movimiento debido a sus bajas características sísmicas (V_p menores a 400 m/s) presentes en la superficie con una potencia alrededor de 3.70 m, siendo esta una capa de material fracturado y altamente permeable debido a la presencia de espacios de vacíos. De igual manera se podría inferir la frontera entre la Formación Santa Rosa y la terraza fluvio-glacial, con una velocidad V_p igual 800 m/s; así como la presencia del nivel freático cerca a los 6.50 m y 9.30 m de profundidad respectivamente. El nivel freático estaría dado por materiales con velocidades sísmicas V_p superiores a 1100 m/s.

6.2.2 Perfil sísmico LMS-4

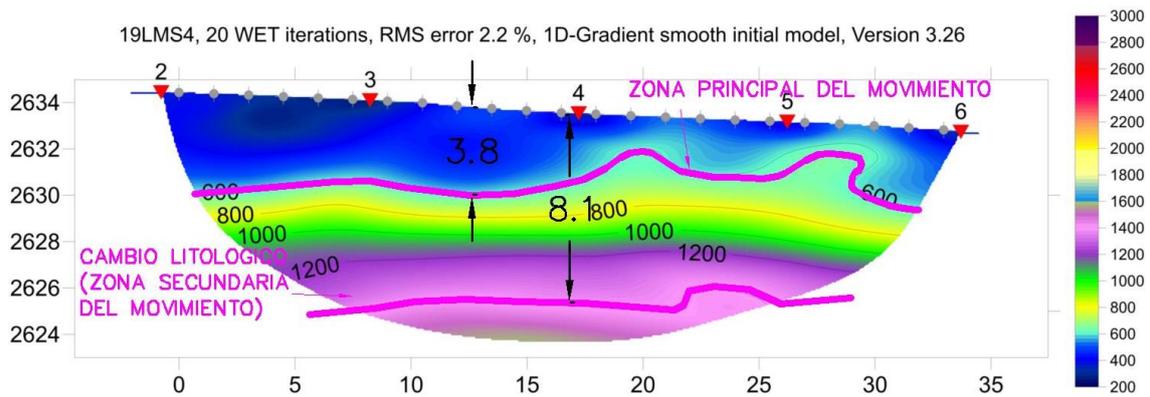


Figura 6-15: Perfil sísmico LMS-4

En los resultados de esta línea sísmica, Figura 6-15, se evidenciaría que en la zona hay presencia de medios geofísicos superficiales con una potencia de alrededor de 3.80 m de material con velocidades V_p de 400 a 600 m/s que se podría tratar de suelo fracturado poco compacto, por lo que podría ser la zona principal del movimiento; mientras que cerca de los 8.10 m se encontraría el cambio litológico con mayor presencia de agua debido a las altas velocidades V_p existentes, siendo aquí una potencial zona secundaria del movimiento.

6.2.3 Perfil sísmico LMS-5

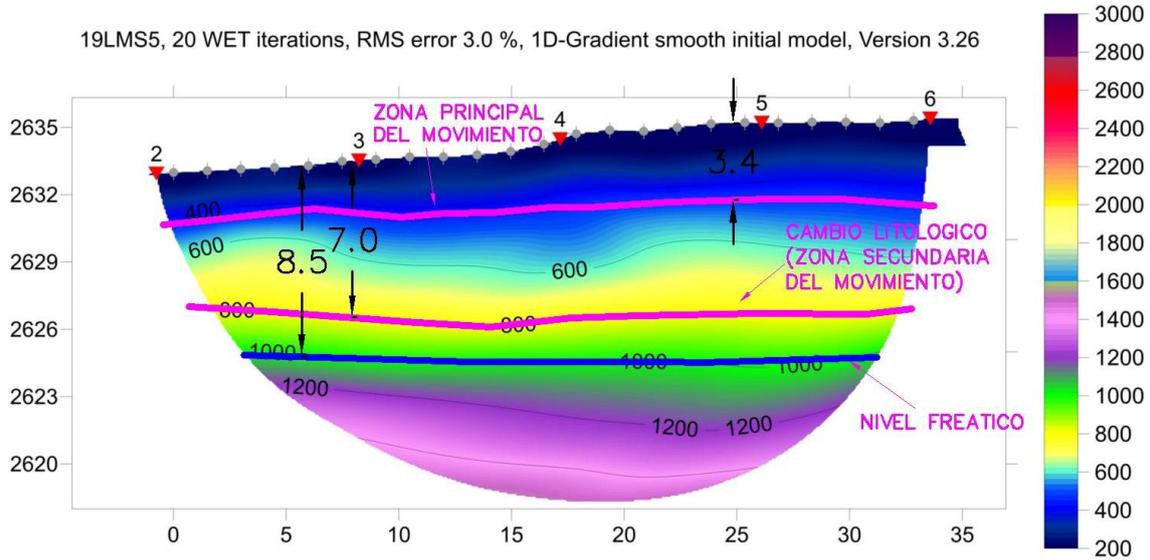


Figura 6-16: Perfil sísmico LMS-5

Igual que la tomografía sísmica LMS-4 (Figura 6-15), ésta también evidenciaría la zona con presencia de medios geofísicos superficiales con potencia de alrededor de 3.40 m de material con velocidades V_p de 400 a 500 m/s que se podría tratar de suelo fracturado poco compacto, por lo que podría ser la zona principal del movimiento; mientras que cerca de los 7 m se encontraría el cambio litológico con menor presencia de agua con velocidades V_p de 800 m/s, siendo aquí una potencial zona secundaria del movimiento. También se observaría el nivel freático a partir de los 8.50 m de profundidad aproximadamente, Figura 6-16.

6.2.4 Perfil sísmico LMS-6

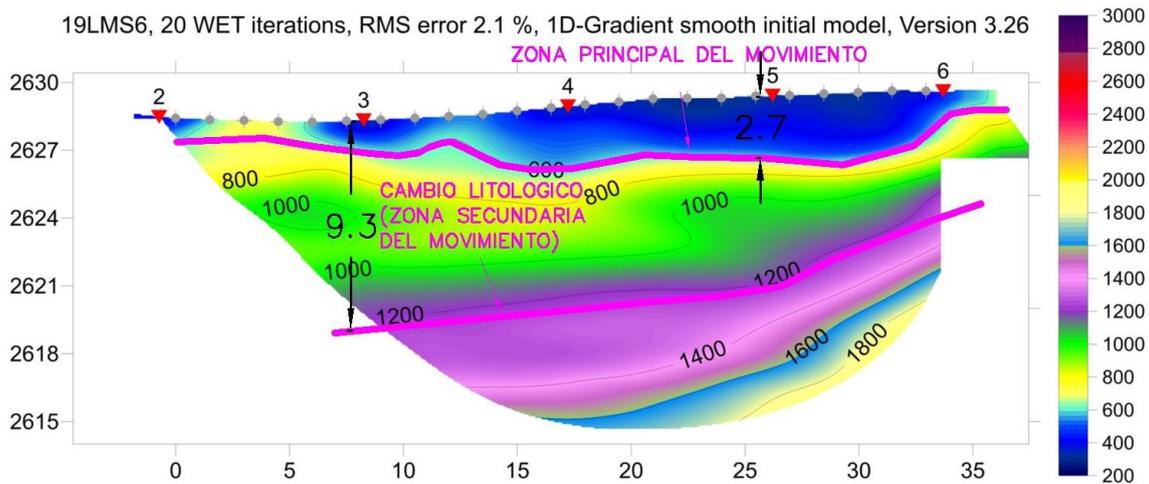


Figura 6-17: Perfil sísmico LMS-6

En esta Figura 6-17 de tomografía sísmica también se observa la presencia superficial de material menos consistente y poco compacto con potencia cerca de los 2.70 m y V_p menor o igual a 600 m/s siendo ésta la zona principal del movimiento. Aproximadamente a los 9 m de profundidad se encontraría el cambio litológico con velocidades sísmicas V_p mayores a 1200 m/s por lo que presenta alto riesgo de ser una zona secundaria del movimiento.

6.2.5 Perfil sísmico LMS-7

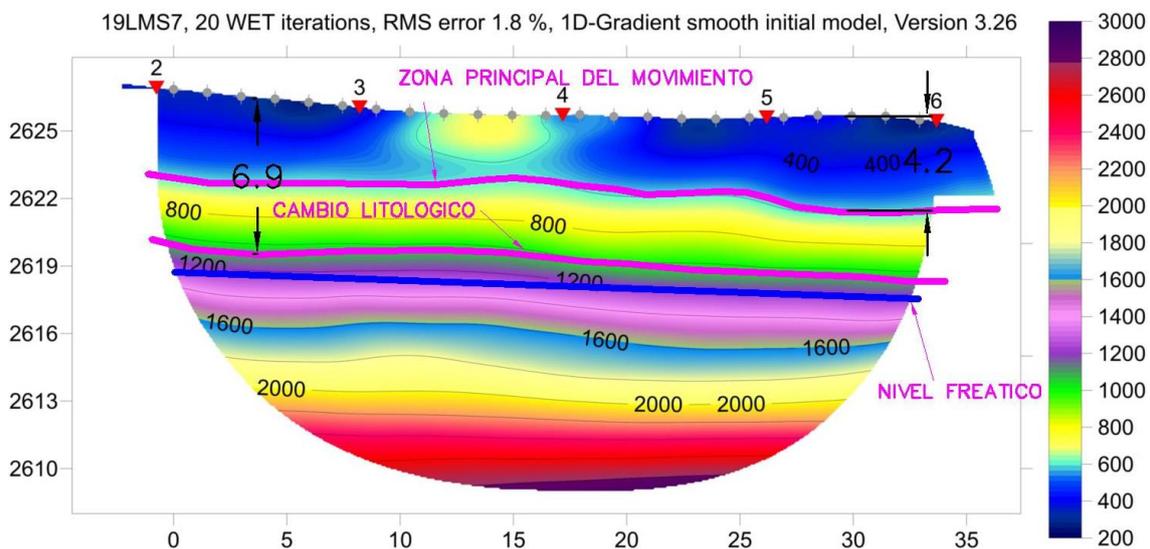


Figura 6-18: Perfil sísmico LMS-7

Para esta tomografía sísmica, Figura 6-18, se infiere claramente la zona principal del movimiento con características sísmicas inferiores a 600 m/s y una potencia aproximada de 4.20 m, así mismo se encontraría la frontera entre los materiales predominantes de la zona, el cambio litológico estaría alrededor de los 6.90 m dado por las velocidades V_p entre 1050 y 1100 m/s, mientras que el nivel freático se encontraría 1 m más abajo aproximadamente con velocidades superiores a 1200 m/s.

6.2.6 Perfil sísmico LMS-8

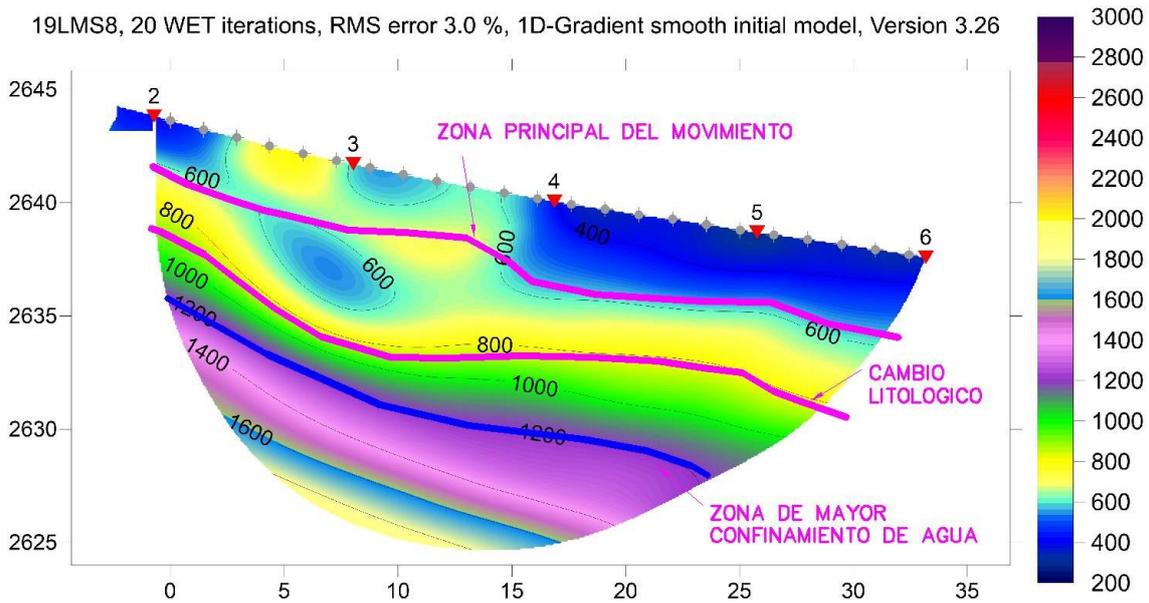


Figura 6-19: Perfil sísmico LMS-8

Al igual que la línea eléctrica LE-8 (Figura 6-8), existe cierta variación y discordancia en los resultados esperados debido a la presencia superficial de material de escombros y restos de lo que fue la estructura de la vía por lo que se llegaría a interpretar la zona principal del movimiento por la presencia de velocidades sísmicas V_p bajas superficialmente (inferiores a 600 m/s). Se podría inferir en la Figura 6-19 el cambio litológico entre las velocidades V_p entre 800 y 850 m/s. Adicionalmente se observaría que a partir de 1200 m/s existiría una zona de mayor confinamiento o retención del agua.

6.2.7 Perfil sísmico LMS-9

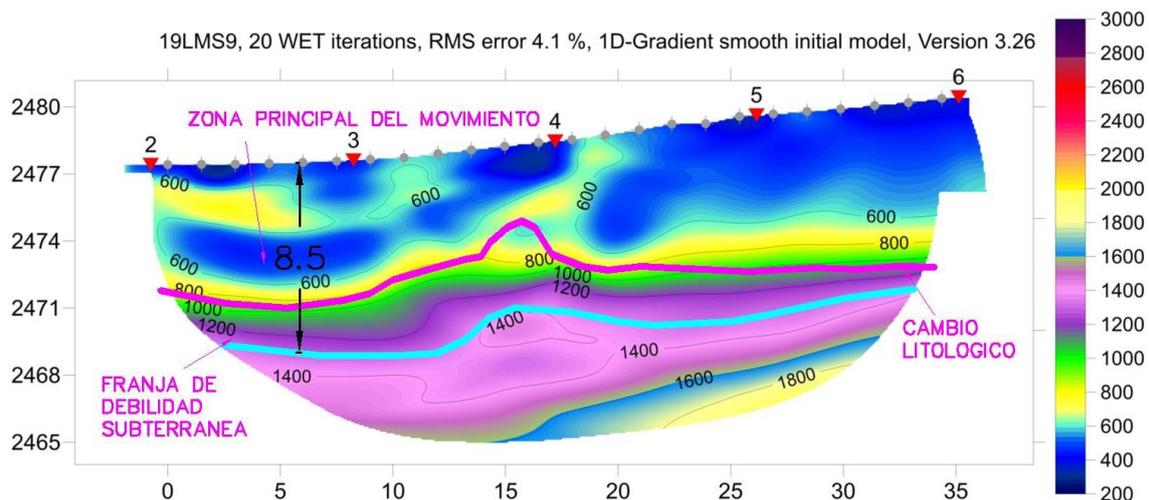
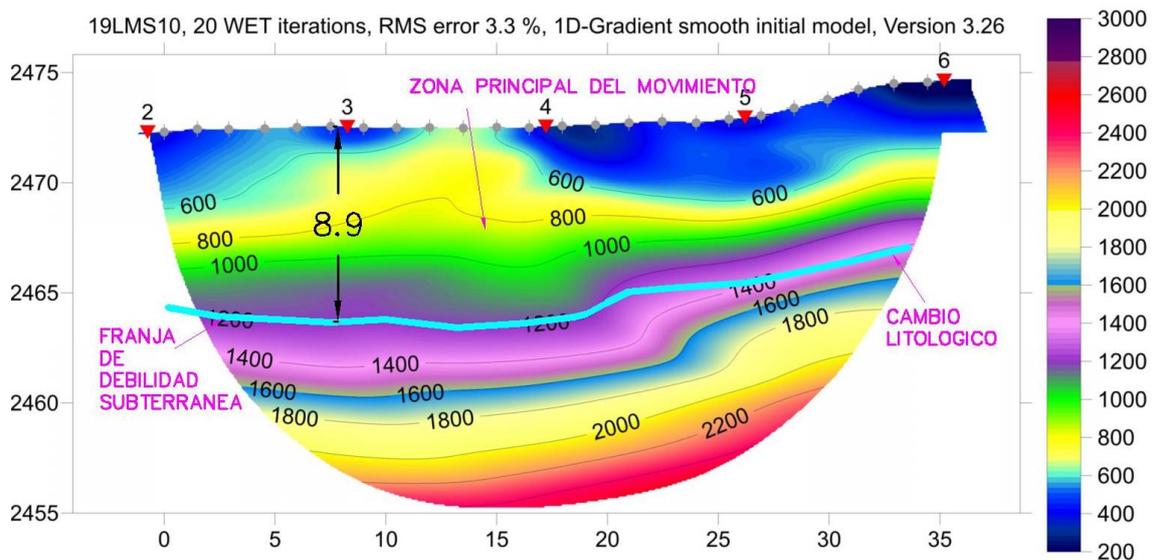


Figura 6-20: Perfil sísmico LMS-9

Esta Figura 6-20 de tomografía sísmica es muy clara presentando la zona del movimiento principal con materiales muy sueltos superficialmente, velocidades sísmicas V_p entre 400 y 800 m/s, además se infiere la presencia de toda una franja de debilidad geofísica con un espesor entre 2 m y 3 m con alta presencia de humedad a una profundidad de 8.50 m aproximadamente.

6.2.8 Perfil sísmico LMS-10



Para la zona baja del estudio se pudiera inferir que la profundidad del material en movimiento oscila alrededor de los 8.90 m con la presencia del cambio litológico y alto contenido de agua con velocidades similares a 1200 m/s (Figura 6-21). Las tomografías sísmicas (V_p) se encuentran en el Anexo 9-2.

6.3. ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES MASW

Para su procesamiento se utiliza un software especializado, desarrollado por la Sociedad Roma & Associati Srl. Los resultados obtenidos en el proceso de interpretación del método Análisis Multicanal de Ondas Superficiales se presentan desde la Figura 6-22 a la Figura 6-31. Se acompaña con una interpretación a los perfiles más relevantes. Para las demás figuras se indican presentan características geofísicas bajas con velocidades de corte entre 150 y 200 m/s, con profundidad variable entre 5 y 11 m, lo que puede comprenderse como la profundidad a la que alcanzaría el plano de falla del deslizamiento activo.

6.3.1 Perfil MASW LM-1

La Figura 6-22 presenta los resultados de las velocidades de corte V_s obtenidas del perfil LM-1, se puede observar que en el eje de las abscisas se encuentran las velocidades sísmicas V_s (m/s), mientras que en el eje de las ordenadas está la profundidad o espesor (m) de cada estrato encontrado. El perfil de velocidades de corte V_s presenta un medio geofísico superficial de bajas características, con un valor de 262 m/s entre 0 y 3.5 m, luego hay un estrato con menores características con velocidad de 227 m/s entre 3.5 y 7 m, se presenta un incremento de velocidad a 303 m/s a partir de los 9 m de profundidad, que es en donde podría generarse el plano de falla. A partir de los 15 m, el suelo presenta mejores características geofísicas con velocidades superiores a 343 m/s, desde donde existe una transición de suelo meteorizado hasta llegar al basamento de roca sedimentaria con velocidad igual a 573 m/s que correspondería a la formación Mangán. La formación geológica Santa Rosa se encontraría con una potencia de 26 m entre 9 y 35 m aproximadamente.

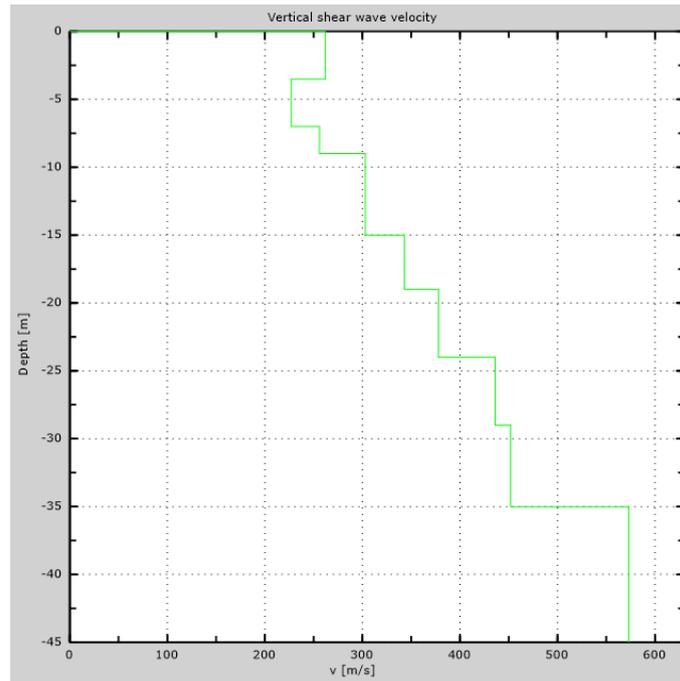


Figura 6-22: Perfil de velocidad de corte Vs LM-1

6.3.2 Perfil MASW LM-2

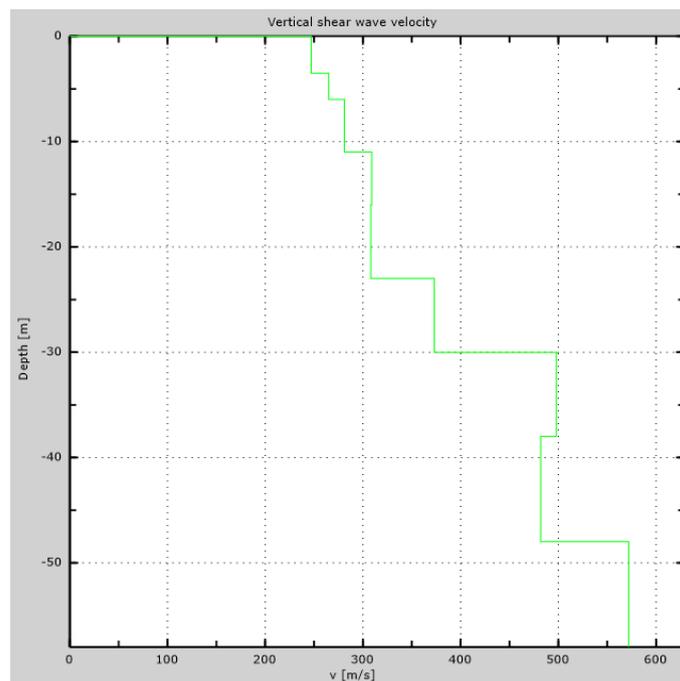


Figura 6-23: Perfil de velocidad de corte Vs LM-2

El perfil de velocidades de corte Vs de la Figura 6-23 presenta un estrato superficial con velocidades entre 247 y 281 m/s hasta los 11 m de profundidad, siendo el punto en donde se produciría el movimiento ya que a partir de dicha profundidad las características geofísicas del suelo mejoran avanzando una velocidad entre 309 y 373 m/s hasta los 30 m, en donde se encontraría el basamento con velocidades sísmicas superiores a 498 m/s.

6.3.3 Perfil MASW LM-3

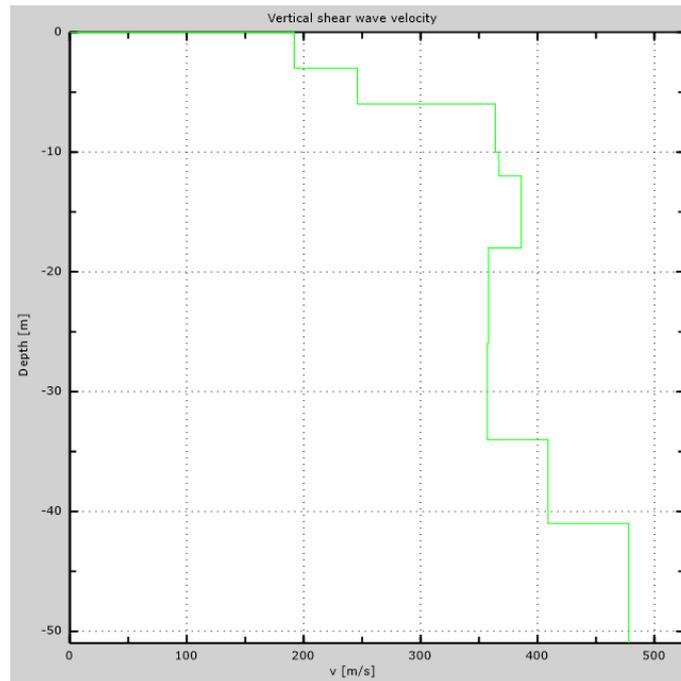


Figura 6-24: Perfil de velocidad de corte Vs LM-3

Para la Figura 6-24, la superficie presenta velocidades sísmicas Vs bajas entre 193 y 246 m/s hasta los 6 m de profundidad, a partir de ello las características geofísicas mejoran significativamente alcanzando valores entre 364 y 387 m/s hasta los 34 m, desde donde se encontraría el basamento rocoso con velocidad igual a 409 m/s.

6.3.4 Perfil MASW LM-4

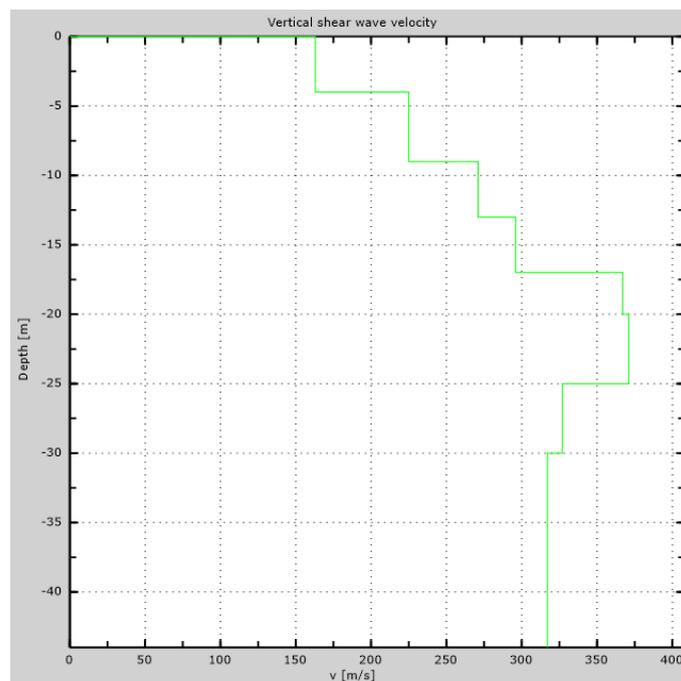


Figura 6-25: Perfil de velocidad de corte Vs LM-4

En el perfil LM-4 de la Figura 6-25, se observa que existe un medio superficial de propiedades geofísicas bajas con velocidades que se encuentran en rango entre 163 y 296 m/s hasta los 17 m de profundidad, desde donde mejora su velocidad con valores superiores a 317 m/s.

6.3.5 Perfil MASW LM-5

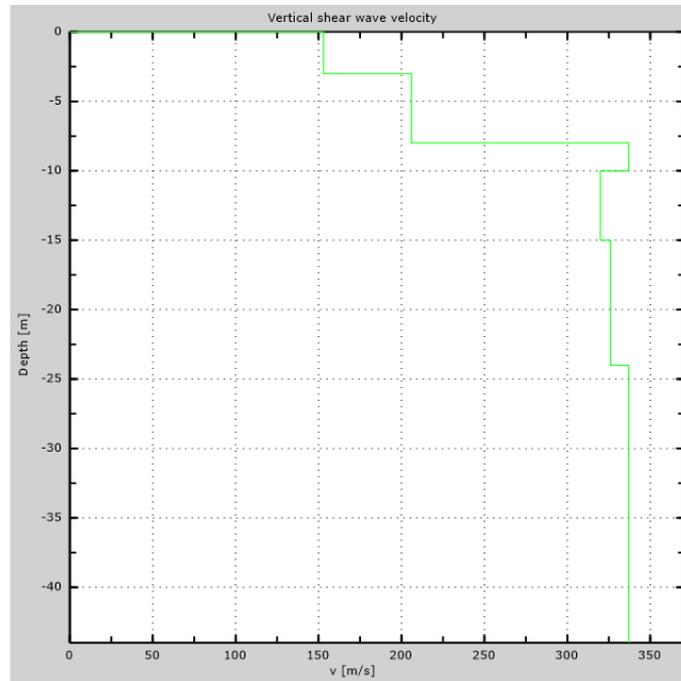


Figura 6-26: Perfil de velocidad de corte Vs LM-5

6.3.6 Perfil MASW LM-6

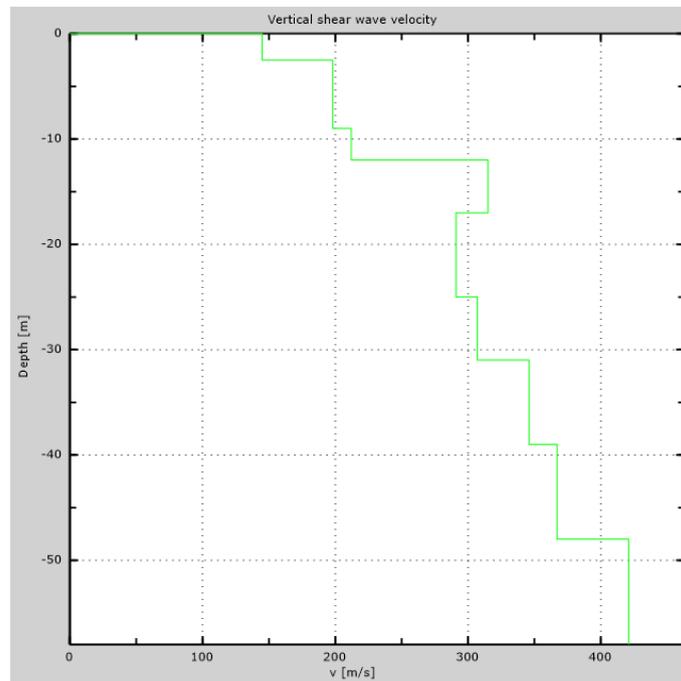


Figura 6-27: Perfil de velocidad de corte Vs LM-6

6.3.7 Perfil MASW LM-7

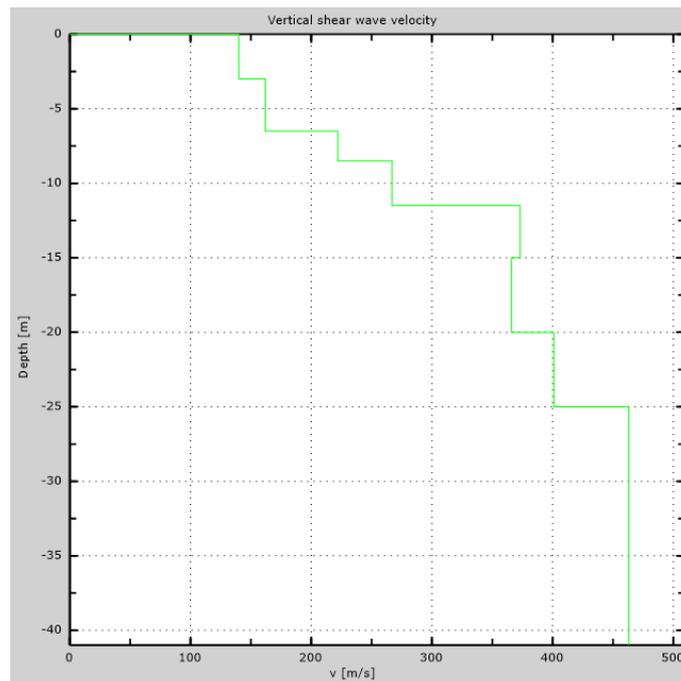


Figura 6-28: Perfil de velocidad de corte Vs LM-7

6.3.8 Perfil MASW LM-8

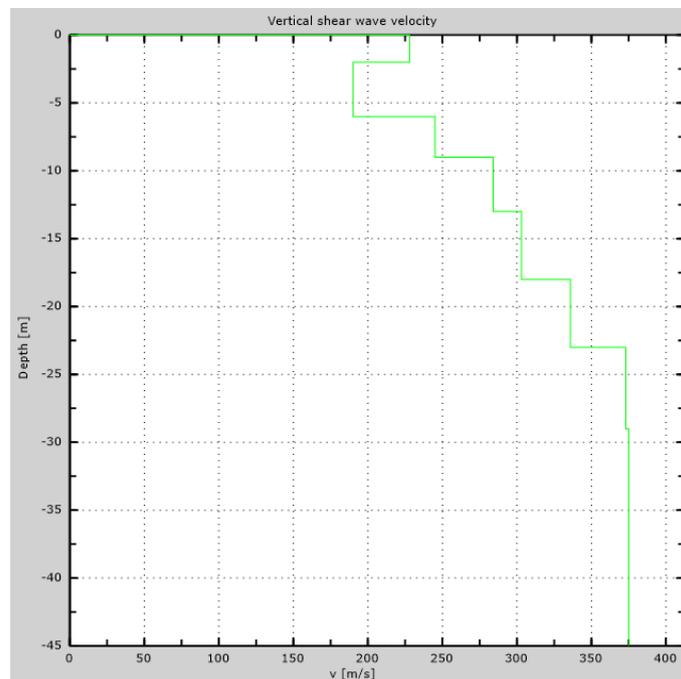


Figura 6-29: Perfil de velocidad de corte Vs LM-8

El perfil de velocidades de corte Vs de la Figura 6-29 presenta velocidades superficiales Vs igual a 228 m/s de 0 a 2 m, mientras que presenta una debilidad entre 2 y 6 m con Vs igual a 190 m/s con lo que se podría inferir que el plano de falla se da en este estrato, a razón de que a partir de esa profundidad las características geofísicas mejoran con velocidades Vs entre 245 y 303 m/s hasta una profundidad de 18 m, desde donde se encontraría el basamento con velocidades superiores.

6.3.9 Perfil MASW LM-9

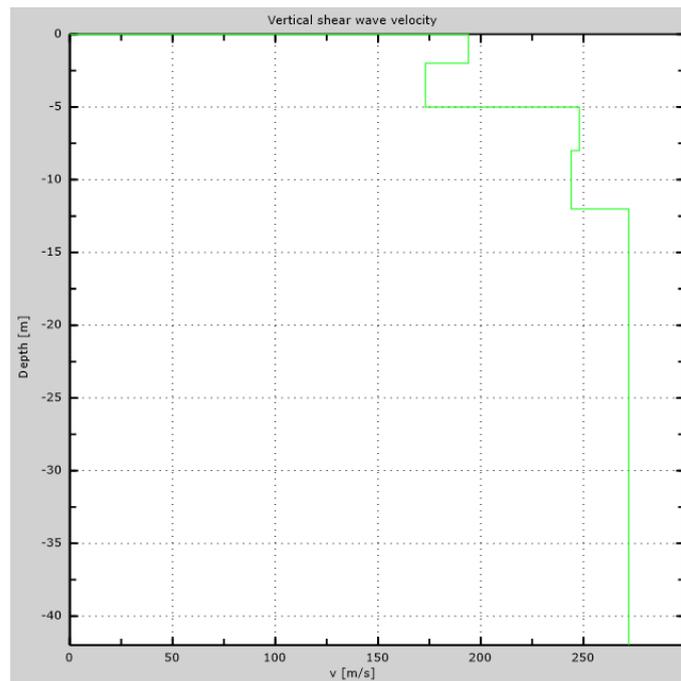


Figura 6-30: Perfil de velocidad de corte Vs LM-9

6.3.10 Perfil MASW LM-10

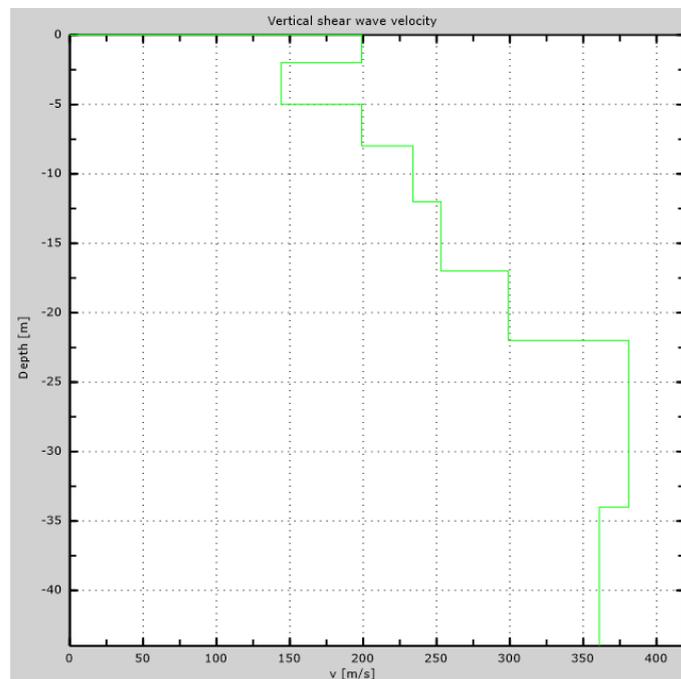


Figura 6-31: Perfil de velocidad de corte Vs LM-10

El perfil de velocidades de corte Vs de la Figura 6-31 presenta velocidades superficiales Vs igual a 199 m/s de 0 a 2 m, mientras que presenta una debilidad entre 2 y 5 m con Vs igual a 144 m/s con lo que se podría inferir que el plano de falla se da en este estrato, ya que a partir de esa profundidad las características geofísicas mejoran con velocidades Vs entre 199 y 299 m/s hasta una profundidad de 22 m, desde donde se encontraría el basamento con velocidades superiores.



6.4. ASPECTOS SÍSMICOS

6.4.1 Tipo de perfiles de suelos para el diseño sísmico

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-2015 NEC-SE-DS se definen seis tipos de suelo, los cuales se presentan en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1: Tipos de perfiles de suelo (NEC -2015 NEC-SE-DS)

Clasificación del tipo de suelo según la nueva normativa ecuatoriana de la construcción NEC-SE-DS2015 Numeral 3.2.1. Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico		
TIPO DE PERFIL	DESCRIPCIÓN	DEFINICIÓN
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $V_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $V_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $S_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180$ m/s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$
		$w \geq 40\%$ $S_u < 50$ kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²)
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1 —Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2 —Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).	
	F3 —Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con índice de Plasticidad IP > 75)	
	F4 —Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30m)	
	F5 —Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.	
	F6 —Rellenos colocados sin control ingenieril.	

Fuente: NEC, 2015.

6.4.2 Clasificación del suelo

Para clasificar el suelo de la zona de estudio es necesario conocer el valor de V_{s30} , se denomina V_{s30} al valor promedio de la velocidad de las ondas de corte en los primeros 30 m de subsuelo medidos desde la superficie. Se obtiene un único valor para el promedio de velocidad de ondas de corte, en los primeros 30 metros.

De acuerdo con la Tabla 6-1 y a la velocidad $V_{s30} = 313$ m/s obtenidos en los perfiles LM-1, LM-2 y LM-3 que se encuentran en la parte superior del talud; y con un $V_{s30} = 266$ m/s obtenido en el resto de perfiles del LM4 al LM10, el suelo se clasifica como tipo "D" correspondiente a "Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante $360 > V_s \geq 180$ m/s".

6.5. COEFICIENTES DE PERFIL DE SUELO F_a , F_d y F_s

De acuerdo con la ubicación el proyecto se encuentra en la Zona Sísmica II, le corresponde el factor $Z = 0.25$ y de acuerdo con la velocidad V_{s30} , el tipo de perfil de suelo es D, con estos parámetros se determinan los coeficientes de perfil de suelo según la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-2015 NEC-SE-DS en las siguientes tablas:

Tabla 6-2: Coeficiente F_a : Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto (NEC -2015 NEC-SE-DS)

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	≥ 0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1	0.85

Fuente: NEC, 2015.

Tabla 6-3: Coeficiente F_d : Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca (NEC -2015 NEC-SE-DS)

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	≥ 0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5

Fuente: NEC, 2015.

Los coeficientes F_a y F_d , amplifican las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca, tomando en cuenta los efectos de sitio.

Tabla 6-4: Coeficiente F_s : Comportamiento no lineal de los suelos (NEC -2015 NEC-SE-DS)

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.3	0.35	0.4	≥ 0.5
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.4
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2

Fuente: NEC, 2015.

Este coeficiente F_s , considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del período del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos.

Según las tablas anteriores (Tabla 6-2, Tabla 6-3 y Tabla 6-4), los valores de los Coeficientes de perfil de suelo son los siguientes:

$$F_a = 1.40$$

$$F_d = 1.45$$

$$F_s = 1.06$$

6.6. COEFICIENTES DE CARGA SÍSMICA K_h y K_v

Estos factores ayudan para el cálculo de la estabilidad de los taludes aplicando carga sísmica, conforme lo establece la norma NEC-SE-CM-2015, que hace referencia a Geotecnia y Cimentaciones. Para el cálculo se considera el coeficiente horizontal de la carga sísmica k_h , que se calcula aplicando la siguiente expresión:

$$k_h = 0.6(a_{max})/g$$

Donde:

k_h = Coeficiente horizontal de la carga sísmica

$$a_{max} = Z \cdot F_a$$

Z = Factor de zona sísmica

F_a = Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto.

g = gravedad

$$a_{max} = 0.25 * 1.40 * 9.81 = 3.4335$$

$$k_h = \frac{0.6(3.4335)}{9.81} = 0.214$$

Para el coeficiente vertical de carga sísmica se toma el 50% del coeficiente horizontal, $k_v=0.11$.

Como se puede observar, para este estudio se utilizó solo el coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto, F_a , para la determinación de la aceleración máxima para obtener el coeficiente horizontal de la carga sísmica. Los otros factores, F_d y F_s , son de suma importancia al momento de clasificar un suelo para el cálculo estructural, pues a partir de ellos se determina el sismo de diseño obteniendo los límites del período fundamental de vibración de la estructura.

6.7. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Para el análisis de estabilidad de taludes se procedió a delimitar tres perfiles debido a su importancia y a su pendiente máxima existente en la zona de estudio. La Figura 6-32: UBICACIÓN DE PERFILES PARA MODELACIÓN DE ESTABILIDAD DE TALUDES indica la ubicación de los perfiles para los modelos usados.

Tabla 6-5: Ubicación de perfiles para modelos de estabilidad de taludes

PERFIL	LONGITUD (m)	INICIO		FIN	
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE
1-1	127.85	723286.760	9682613.456	723413.271	9682631.939
2-2	146.50	723289.041	9682557.390	723411.091	9682476.358
3-3	124.56	723296.456	9682520.525	723418.229	9682546.711



Figura 6-32: UBICACIÓN DE PERFILES PARA MODELACIÓN DE ESTABILIDAD DE TALUDES



Para cada uno de los perfiles indicados, se obtuvo su perfil topográfico y su distribución de los estratos del subsuelo junto con sus propiedades geotécnicas (Anexo 9-4). A partir de ello, se procedió a modelar mediante el uso del software SLIDE 5.0 (Rocscience), el mismo que permite modelar suelos heterogéneos, con geometría y superficie de falla complejas.

Para cada perfil se modeló en tres diferentes escenarios, Condiciones Normales, Condiciones Saturadas y Condiciones Sísmicas, así mismo se analizó cada uno con dos tipos de fallas (roturas), Falla Circular o Falla No Circular. Los escenarios planteados fueron nombrados de esta forma para indicar los niveles de saturación o nivel freático inferido a partir de las mediciones geofísicas realizadas en campo, es decir que en las condiciones naturales se usa el nivel de agua identificado mediante el cálculo del módulo de Poisson (Ecuación 10) que se encontraría al momento del levantamiento de información geofísica. Para condiciones saturadas se supone que el nivel de saturación del suelo o nivel freático se eleva hasta la superficie.

A continuación, en la Tabla 6-6 se presenta un resumen de todos los factores de seguridad obtenidos de cada modelo con sus diferentes tipos de fallas, en los tres escenarios de condiciones y mediante tres métodos de cálculo (en total se obtuvo 54 factores de seguridad).

Tabla 6-6: Tabla de resumen de factores de seguridad (FS) de los análisis de estabilidad de los taludes

MODELO	TIPO DE FALLA	CONDICIONES	FACTOR SEGURIDAD		
			BISHOP	JANBU	FELLENIUS
1-1	CIRCULAR	NORMALES	1.279	1.209	1.258
		SATURADAS	1.151	1.088	1.149
		SISMICAS	0.660	0.629	0.660
	NO CIRCULAR	NORMALES	1.170	1.126	0.975
		SATURADAS	1.060	1.020	0.910
		SISMICAS	0.615	0.585	0.564
2-2	CIRCULAR	NORMALES	1.456	1.344	1.429
		SATURADAS	1.390	1.286	1.373
		SISMICAS	0.688	0.646	0.679
	NO CIRCULAR	NORMALES	1.329	1.282	0.782
		SATURADAS	1.275	1.231	0.824
		SISMICAS	0.628	0.604	0.481
3-3	CIRCULAR	NORMALES	1.369	1.267	1.340
		SATURADAS	1.271	1.174	1.260
		SISMICAS	0.573	0.547	0.578
	NO CIRCULAR	NORMALES	1.188	1.136	0.940
		SATURADAS	1.111	1.069	0.891
		SISMICAS	0.511	0.491	0.426

De todos los análisis realizados se procede a presentar los resultados de los más críticos en cada caso, es decir, que tienen un factor de seguridad menor y un tipo de falla más coherente a la realidad. Cabe mencionar que, aunque se haya obtenido un valor menor para el factor de seguridad, el método de Fellenius para el tipo de falla no circular, emite resultados de fallas no reales, es decir que es imposible que éstas se den en la realidad (Figura 6-33), por lo que no son presentadas en este documento.

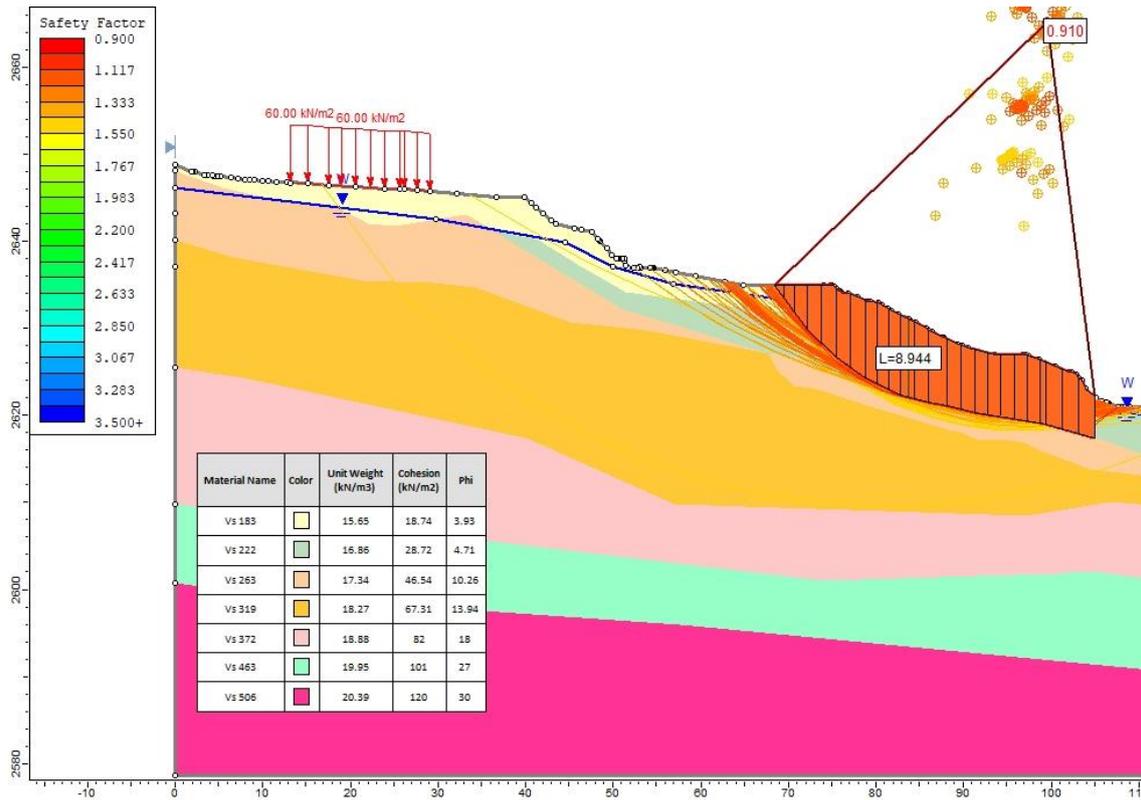


Figura 6-33: Modelo 1-1 - condiciones saturadas - falla no circular – método de Fellenius

En la Figura 6-33 se puede observar que la falla que se genera no es posible que se diera en la realidad debido a que, aunque se produzca la fractura entre los estratos de suelo, el material desprendido no tiene hacia donde deslizar.

El factor de seguridad mínimo para diferentes condiciones según las especificaciones de la NEC-SE-CM-2015, se muestra a continuación en la Tabla 6-7:

Tabla 6-7: Factor de seguridad por corte mínimo

Condición	Fs corte mínimo	
	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Nominal	1.5	1.25
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10
Carga Muerta + Carga Viva Nominal + Sismo de diseño pseudo estático	1.10	1.00
Taludes-condición estática y Agua Subterránea Normal	1.5	1.25
Taludes-condición pseudo estática con agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de diseño	1.05	1.00

Fuente: NEC, 2015.

Para el análisis de estabilidad de los modelos planteados en condiciones naturales y condiciones saturadas, el factor de seguridad F_s por corte mínimo que se usa para comparar si se trata de un talud estable y seguro es $F_s=1.5$. Mientras que para condiciones sísmicas se usa un $F_s=1.05$.

6.7.1 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 1-1 – CONDICIONES NORMALES

6.7.1.1 FALLA CIRCULAR

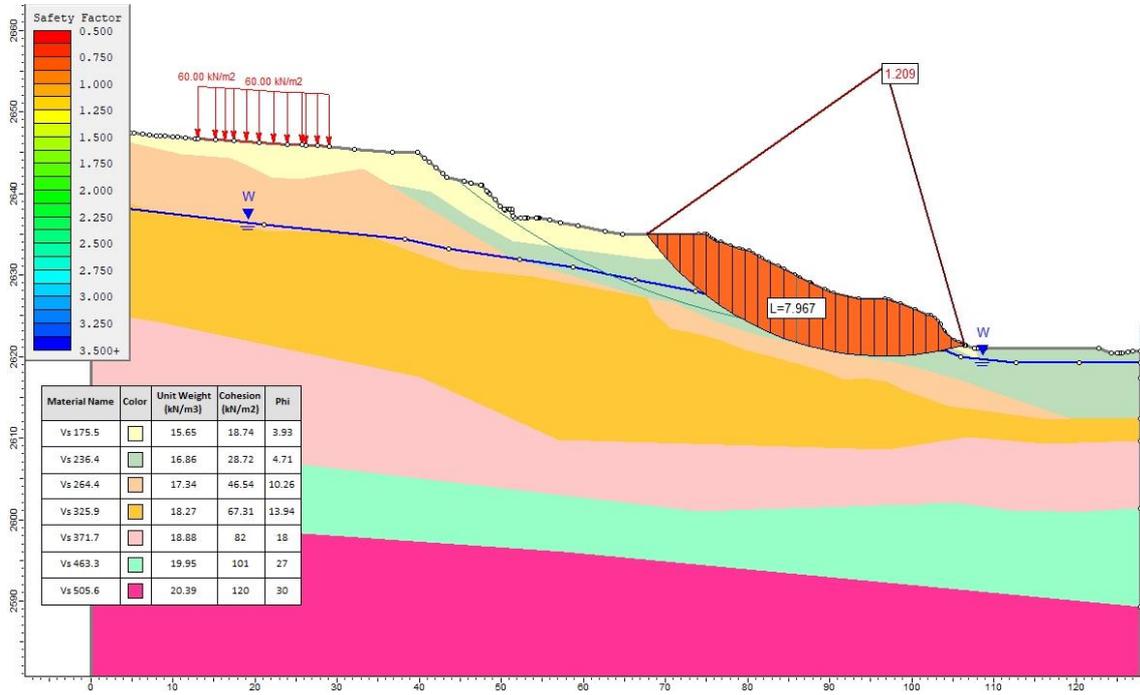


Figura 6-34: Modelo 1-1 - condiciones normales - falla circular – método de Janbu

6.7.1.2 FALLA NO CIRCULAR

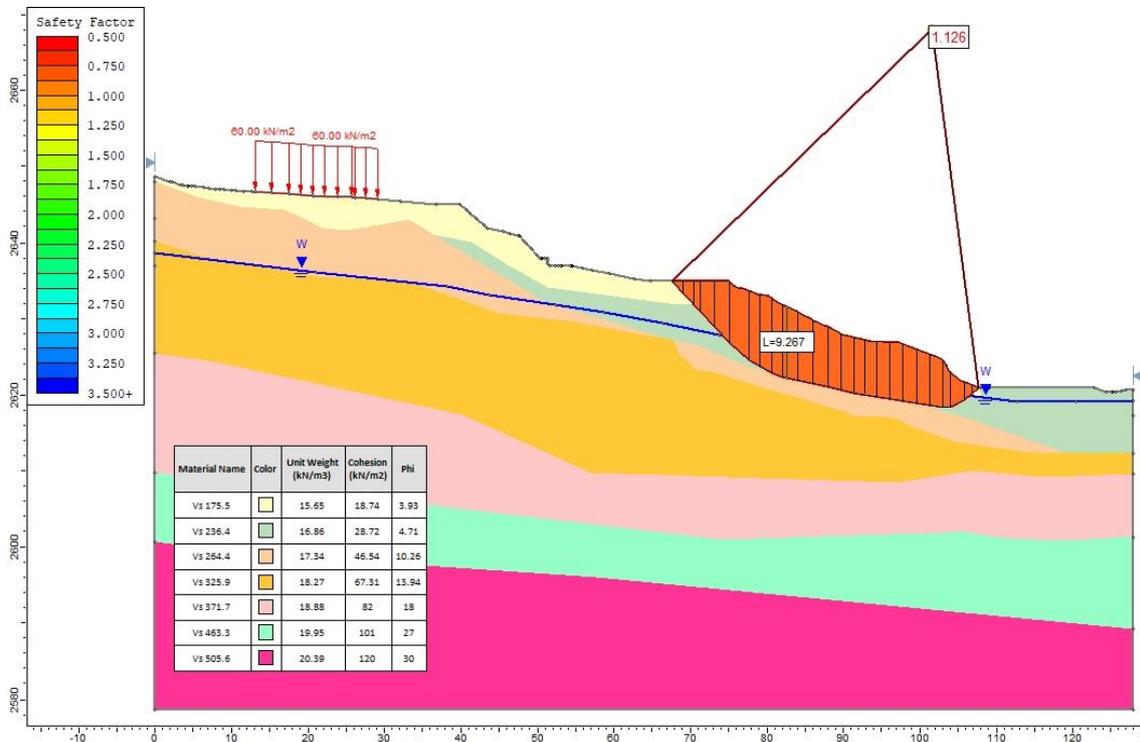


Figura 6-35: Modelo 1-1 - Condiciones normales - falla no circular – método de Janbu

El modelo 1-1 en condiciones normales de saturación y para una falla tipo circular (Figura 6-34) presenta un factor de seguridad de 1.209, mientras que para un tipo de falla no circular (Figura 6-35) el factor de seguridad es de 1.126 que resulta ser menor. En estos dos escenarios el talud se encuentra en condiciones de estabilidad aceptables, sin embargo, no son seguros tal como lo recomienda la norma ecuatoriana (FS=1.5). Lo que señala una probabilidad fuerte de fracaso (falla) del tipo no circular cuando el reservorio de agua potable en la zona se encuentre plenamente lleno, consecuencia a las cargas que tendría que soportar el talud.

6.7.2 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 1-1 – CONDICIONES SATURADAS

6.7.2.1 FALLA CIRCULAR

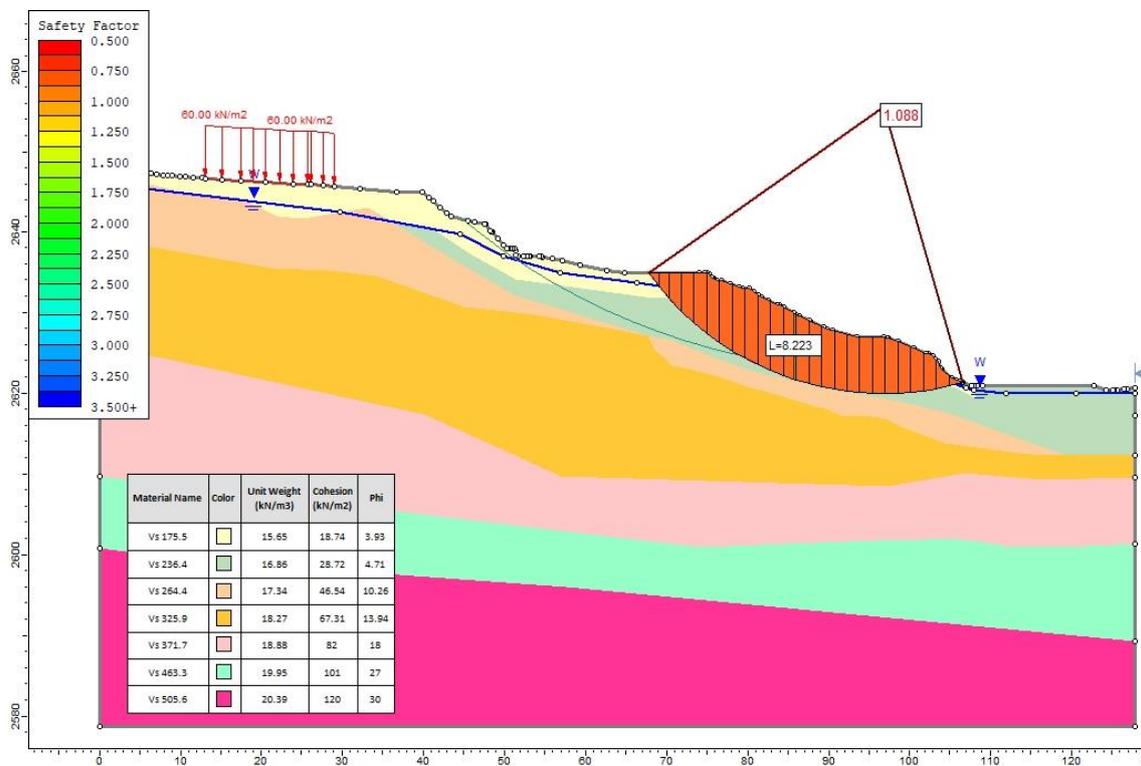


Figura 6-36: Modelo 1-1 - condiciones saturadas - falla circular – método de Janbu

El modelo 1-1 en condiciones saturadas, analizando una falla tipo circular (Figura 6-36) presenta un factor de seguridad de 1.088, mientras que para un tipo de falla no circular (Figura 6-37) el factor de seguridad es de 1.02 siendo este último menor. Por tanto, bajo estas condiciones se comprende que el talud se encuentra en condiciones de estabilidad al límite, lo que de acuerdo con la NEC (FS=1,5) se califica como riesgoso. Lo que indica que existe una probabilidad alta de que fracase el talud con un plano de falla tipo no circular cuando el reservorio de agua potable existente en la zona se encuentre plenamente lleno y el suelo se encuentre saturado.

6.7.2 FALLA NO CIRCULAR

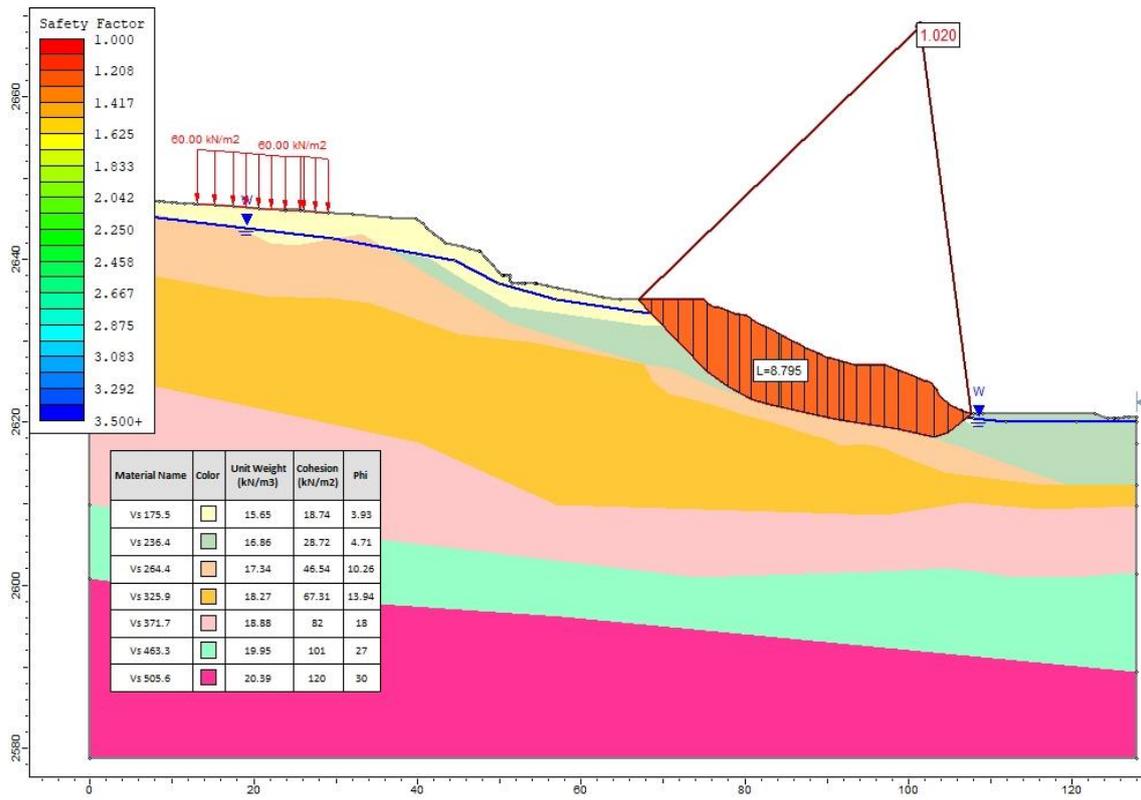


Figura 6-37: Modelo 1-1 - condiciones saturadas - falla no circular – método de Janbu

6.7.3 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 1-1 – CONDICIONES SÍSMICAS

6.7.3.1 FALLA CIRCULAR

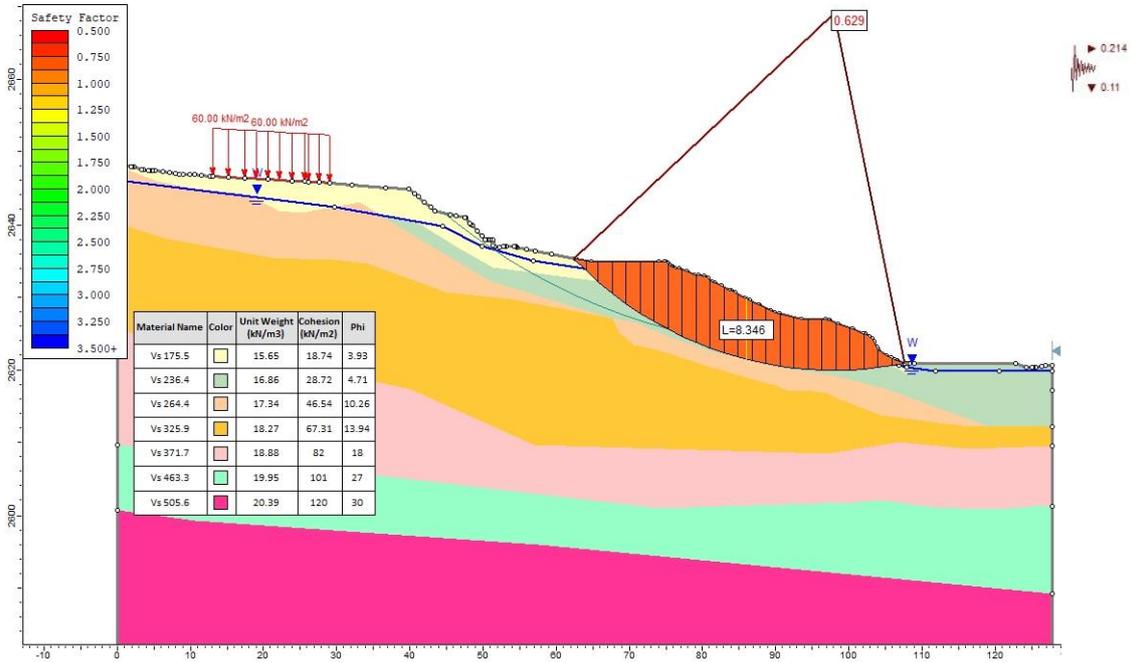


Figura 6-38: Modelo 1-1 - condiciones sísmicas - falla circular – método de Janbu

6.7.3.2 FALLA NO CIRCULAR

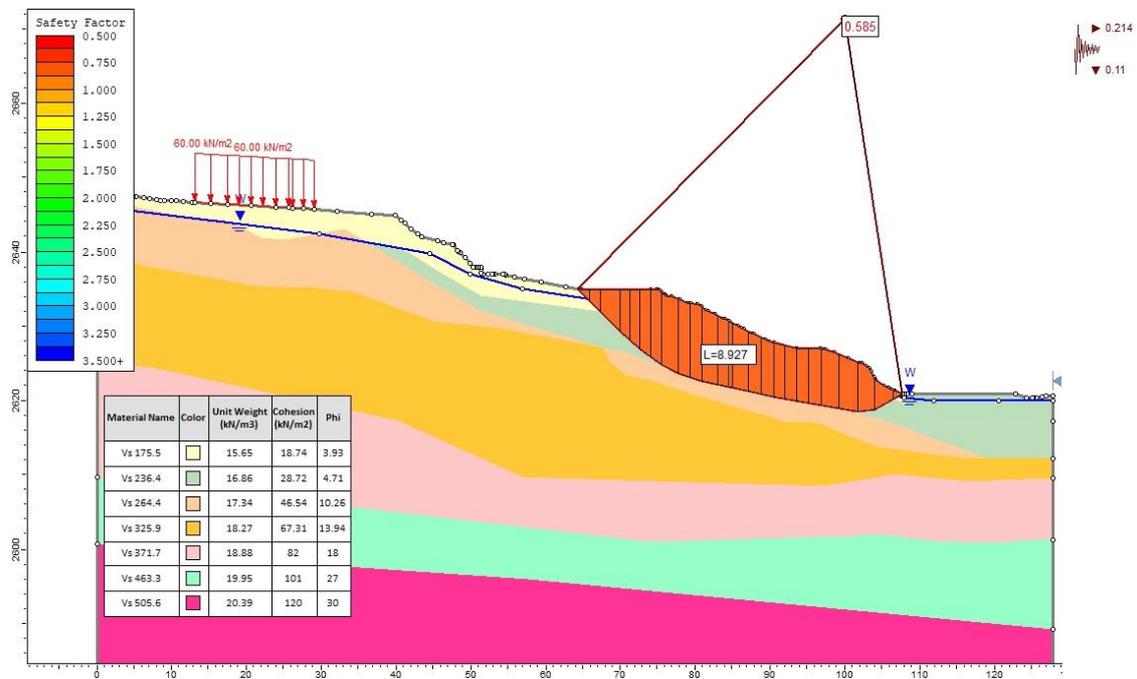


Figura 6-39: Modelo 1-1 - condiciones sísmicas - falla no circular – método de Janbu

El Modelo 1-1 con condiciones sísmicas, presenta una falla tipo circular (Figura 6-38) con un factor de seguridad de 0.629, mientras que para un tipo de falla no circular (Figura 6-39) el factor de seguridad es de 0.585 que resulta ser menor; para ambos modelos se puede decir que el talud se encontraría en condiciones de inestabilidad al momento de presentarse un sismo de magnitud considerable y que a su vez se haya saturado el suelo. Siguiendo a la NEC (FS= 1.05), nuevamente se evidencia que el talud estudiado, bajo las condiciones planteadas en los modelos, no es seguro ni tampoco estable.

Como resultado, puede darse la probabilidad de falla alta del talud con un plano de falla tipo no circular en caso de que se diesen los tres escenarios simultáneamente (reservorio de agua potable de la zona este plenamente lleno, el suelo se encuentre saturado y ocurriera un sismo de magnitud considerable).

6.7.4 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 2-2 – CONDICIONES NORMALES

6.7.4.1 FALLA CIRCULAR

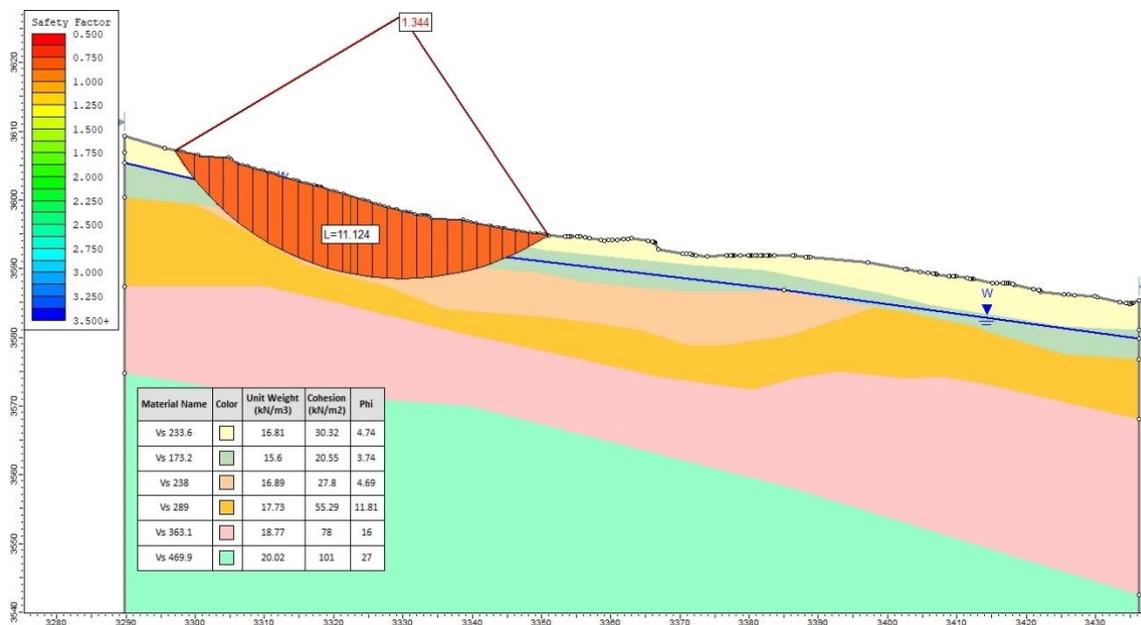


Figura 6-40: MODELO 2-2 - Condiciones normales - falla circular – método de Janbu

El modelo 2-2 bajo condiciones normales de saturación y para una falla tipo circular (Figura 6-40) presenta un factor de seguridad de 1.344, mientras que para un tipo de falla no circular (Figura 6-41) el factor de seguridad es de 1.282 el mismo que es menor. Los valores indican que el talud se halla en condiciones de estabilidad aceptables, no obstante, para la NEC continúa siendo no seguro (FS=1.5). Por ende, aumenta la probabilidad de la ocurrencia de una falla del tipo no circular.

6.7.4.2 FALLA NO CIRCULAR

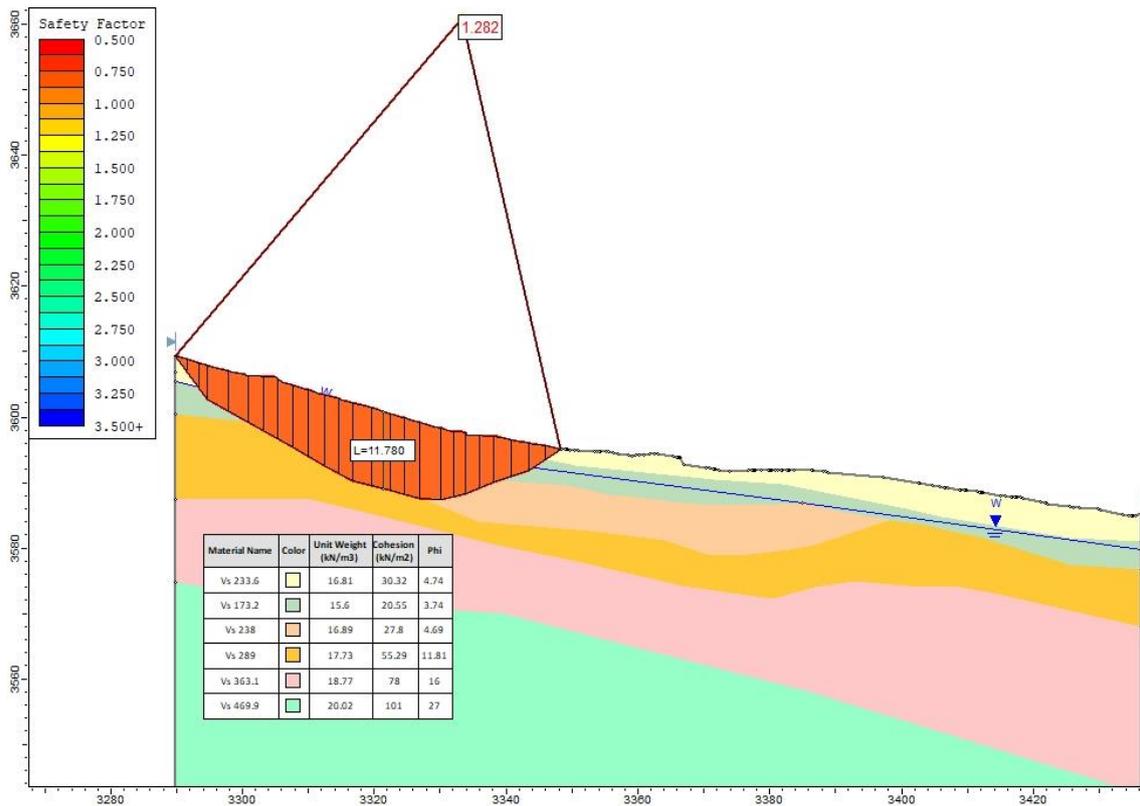


Figura 6-41: MODELO 2-2 - Condiciones normales - falla no circular – método de Janbu

6.7.5 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 2-2 – CONDICIONES SATURADAS

6.7.5.1 FALLA CIRCULAR

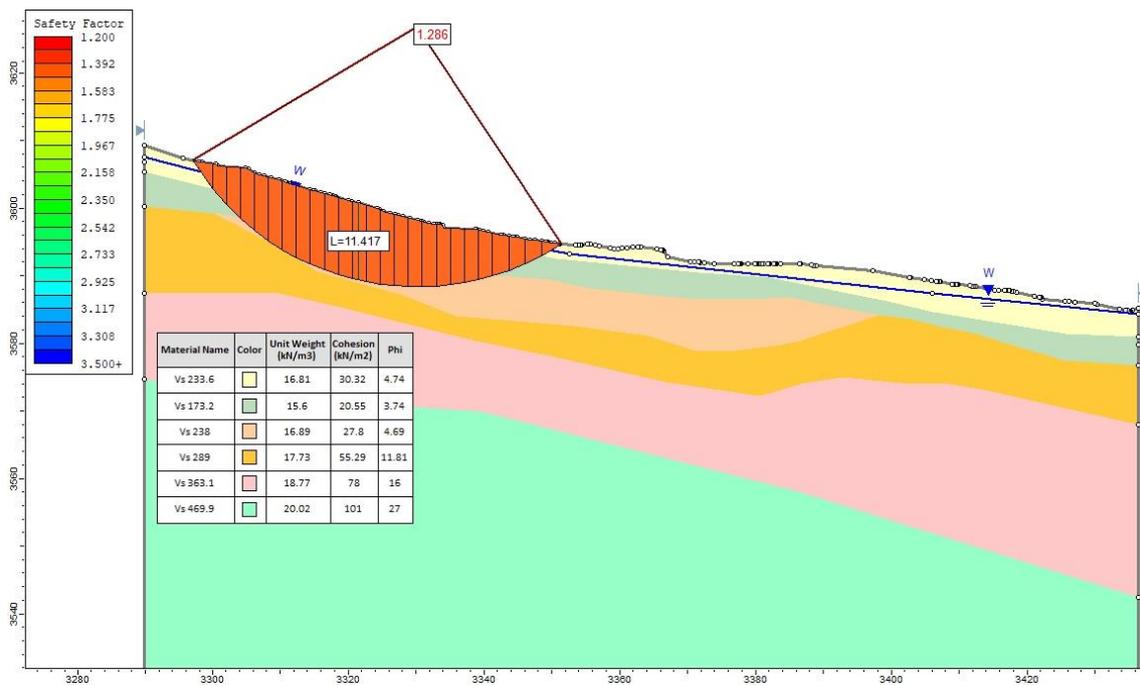


Figura 6-42: MODELO 2-2 - Condiciones saturadas - falla circular – método de Janbu

Para el modelo 2-2 en condiciones saturadas, analizando una falla tipo circular (Figura 6-42) presenta un factor de seguridad de 1.286, mientras que para un tipo de falla no circular (Figura 6-43) el factor de seguridad es de 1.231 siendo este el más bajo. Para cada caso, el talud muestra condiciones de estabilidad aceptables, no así para la NEC, cuyo FS mínimo aceptable es de 1.5. Por tanto, existe una probabilidad de que falle el talud con un plano de falla tipo no circular cuando el suelo se encuentre en condiciones de saturación.

6.7.5.2 FALLA NO CIRCULAR

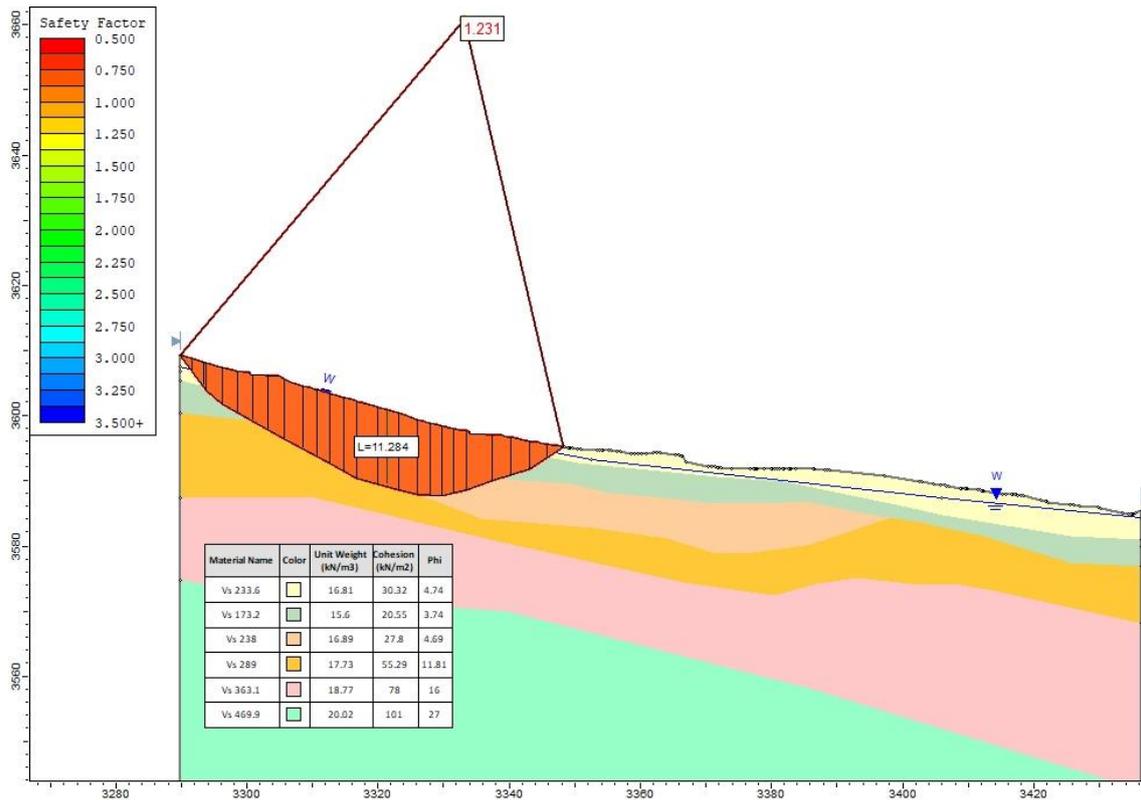


Figura 6-43: MODELO 2-2 - Condiciones saturadas - falla no circular – método de Janbu

6.7.6 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 2-2 – CONDICIONES SÍSMICAS

6.7.6.1 FALLA CIRCULAR

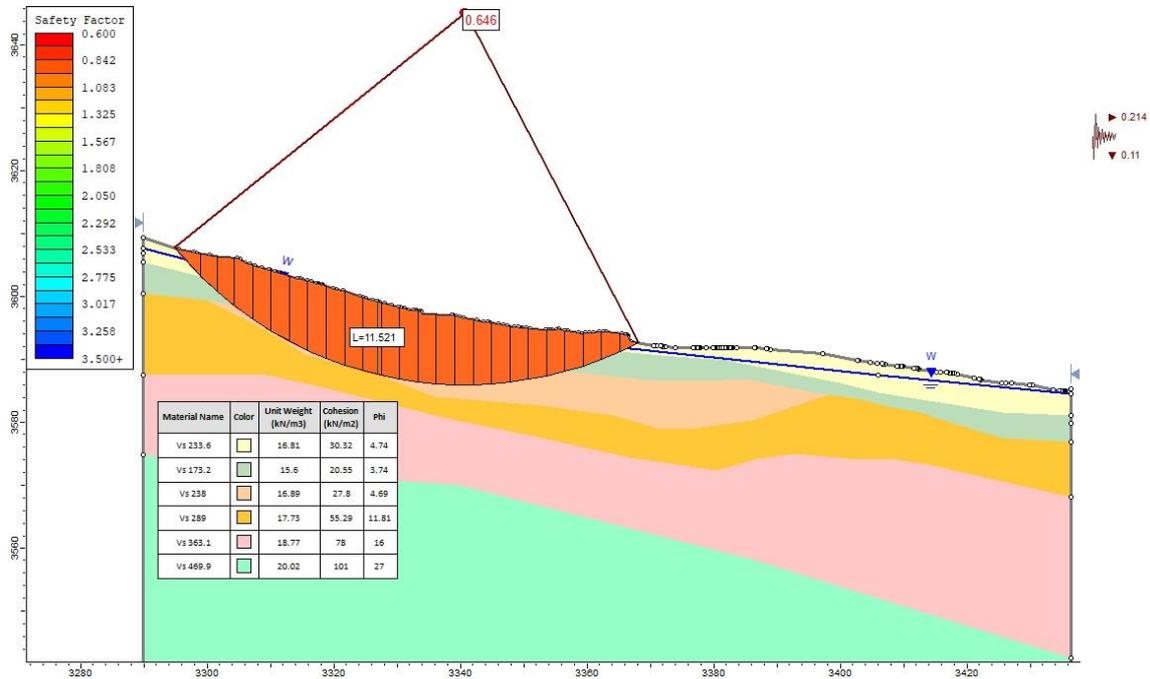


Figura 6-44: Modelo 2-2 - condiciones sísmicas - falla circular – método de Janbu

Para el modelo 2-2 en condiciones sísmicas, el factor de seguridad calculado para una falla tipo circular (Figura 6-44) es de 0.646, mientras que para un tipo de falla no circular (Figura 6-45) el factor de seguridad es de 0.604 que resulta ser menor; para cualquier tipo de falla se puede decir que el talud se encontraría en condiciones de inestabilidad al momento de presentarse un sismo de magnitud considerable y que a su vez, el suelo presentase saturación. Por ende, el talud no es seguro (NEC FS=1.05) y puede presentar riesgos con una probabilidad alta de falla de este sobre un plano de falla tipo no circular, al ocurrir los escenarios mencionados a la par (el suelo se encuentre saturado y ocurriera un sismo de magnitud considerable).

6.7.6.2 FALLA NO CIRCULAR

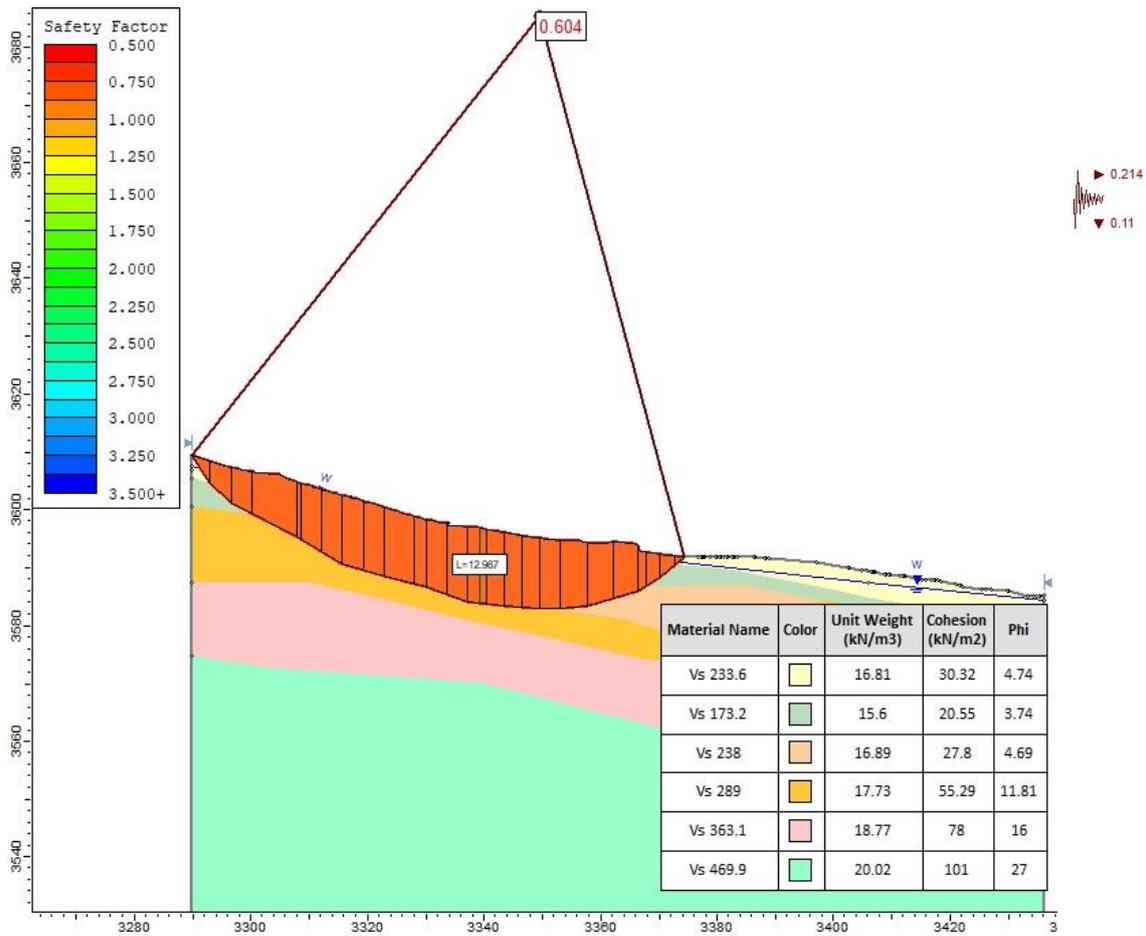


Figura 6-45: Modelo 2-2 - condiciones sismicas - falla no circular – método de Janbu

6.7.7 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 3-3 – CONDICIONES NORMALES

6.7.7.1 FALLA CIRCULAR

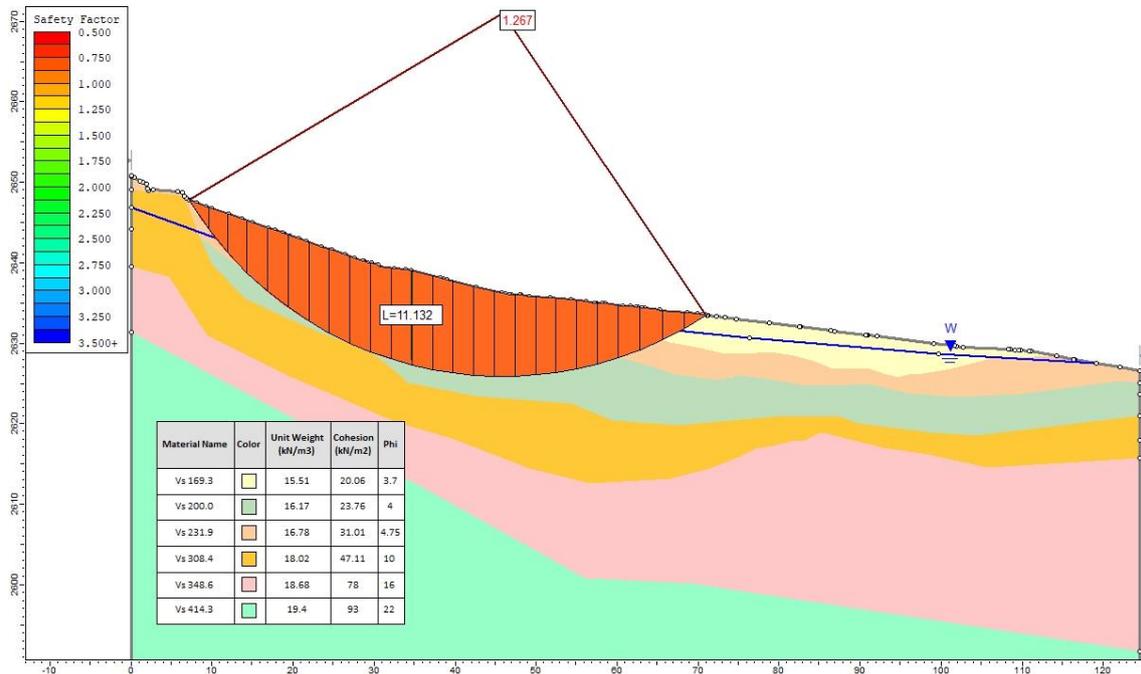


Figura 6-46: Modelo 3-3 - condiciones normales - falla circular – método de Janbu

El análisis del modelo 3-3 en condiciones normales de saturación se lo realizó de igual forma que los anteriores, para una falla tipo circular (Figura 6-46) el cual presenta un factor de seguridad de 1.267, y para un tipo de falla no circular (Figura 6-47) el cual responde a un factor de seguridad de 1.136, este último con el valor más bajo. A través de los modelos, se identifica al talud de estudio como no seguro al poseer condiciones de estabilidad riesgosas según los parámetros de la NEC (FS= 1.5). Se encuentra también, una probabilidad alta de sucesión de una falla del tipo no circular.

6.7.7.2 FALLA NO CIRCULAR

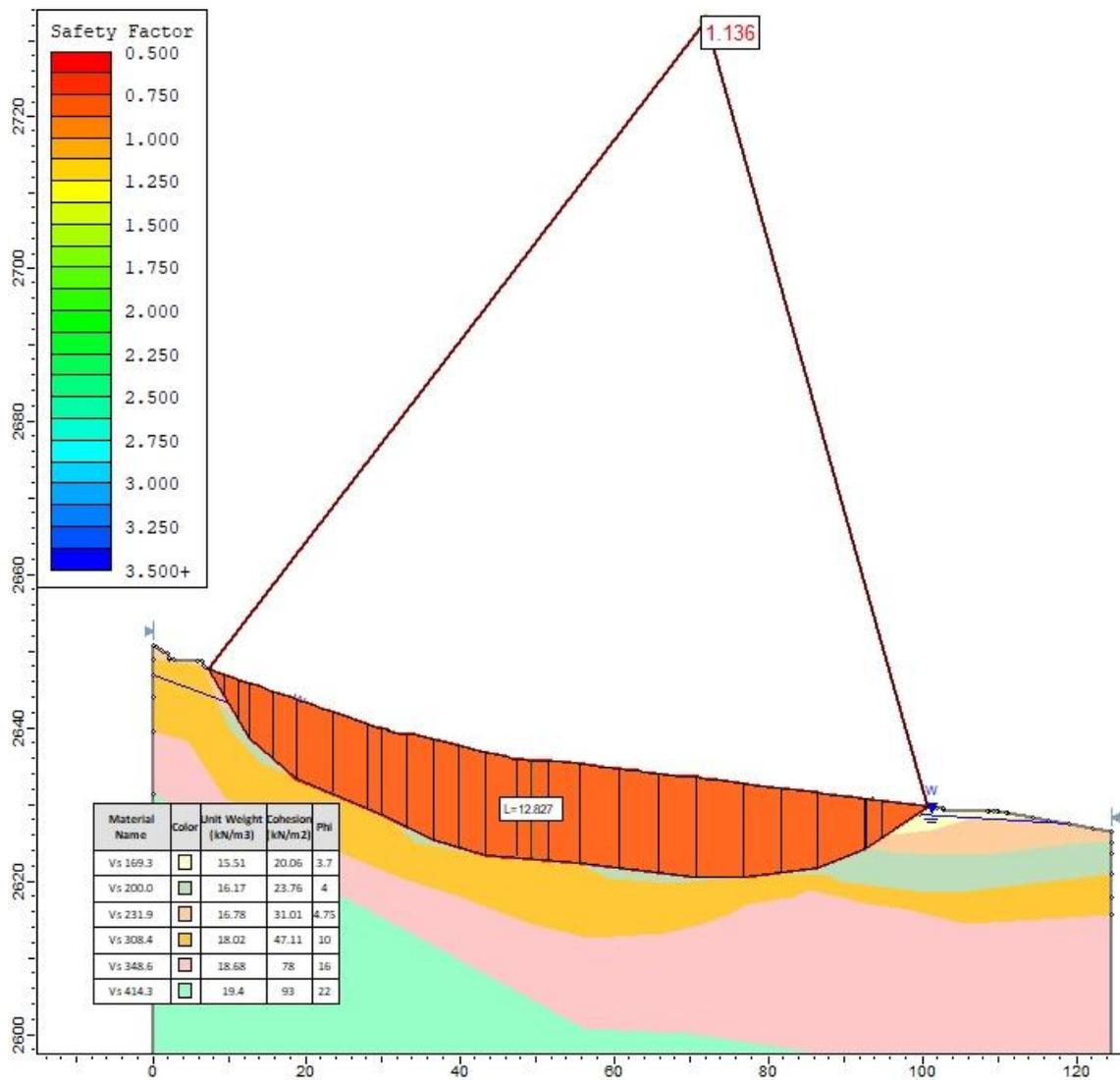


Figura 6-47: MODELO 3-3 - Condiciones normales - falla no circular – método de Janbu

6.7.8 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 3-3 – CONDICIONES SATURADAS

6.7.8.1 FALLA CIRCULAR

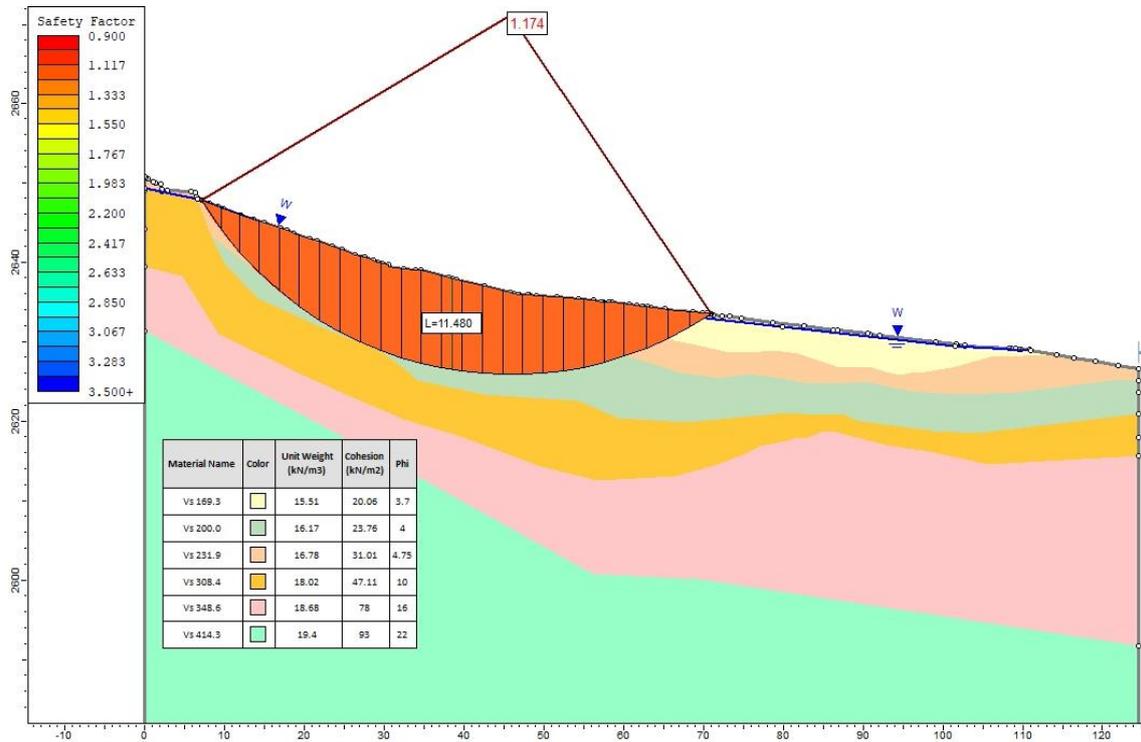


Figura 6-48: Modelo 3-3 - Condiciones saturadas - falla circular – método de Janbu

En condiciones saturadas, el modelo 3-3, analizando una falla tipo circular (Figura 6-48) presenta un factor de seguridad de 1.174, mientras que para un tipo de falla no circular (Figura 6-49Figura 6-50) el factor de seguridad es de 1.069 que resulta ser menor que el anterior. Los resultados señalan que el talud posee condiciones de estabilidad poco aceptables- no seguro, tal como lo recomienda la norma ecuatoriana (FS=1.5). Por consiguiente, es posible la ocurrencia de un falle del talud con un plano de falla tipo no circular cuando el suelo se encuentre saturado.

6.7.8.2 FALLA NO CIRCULAR

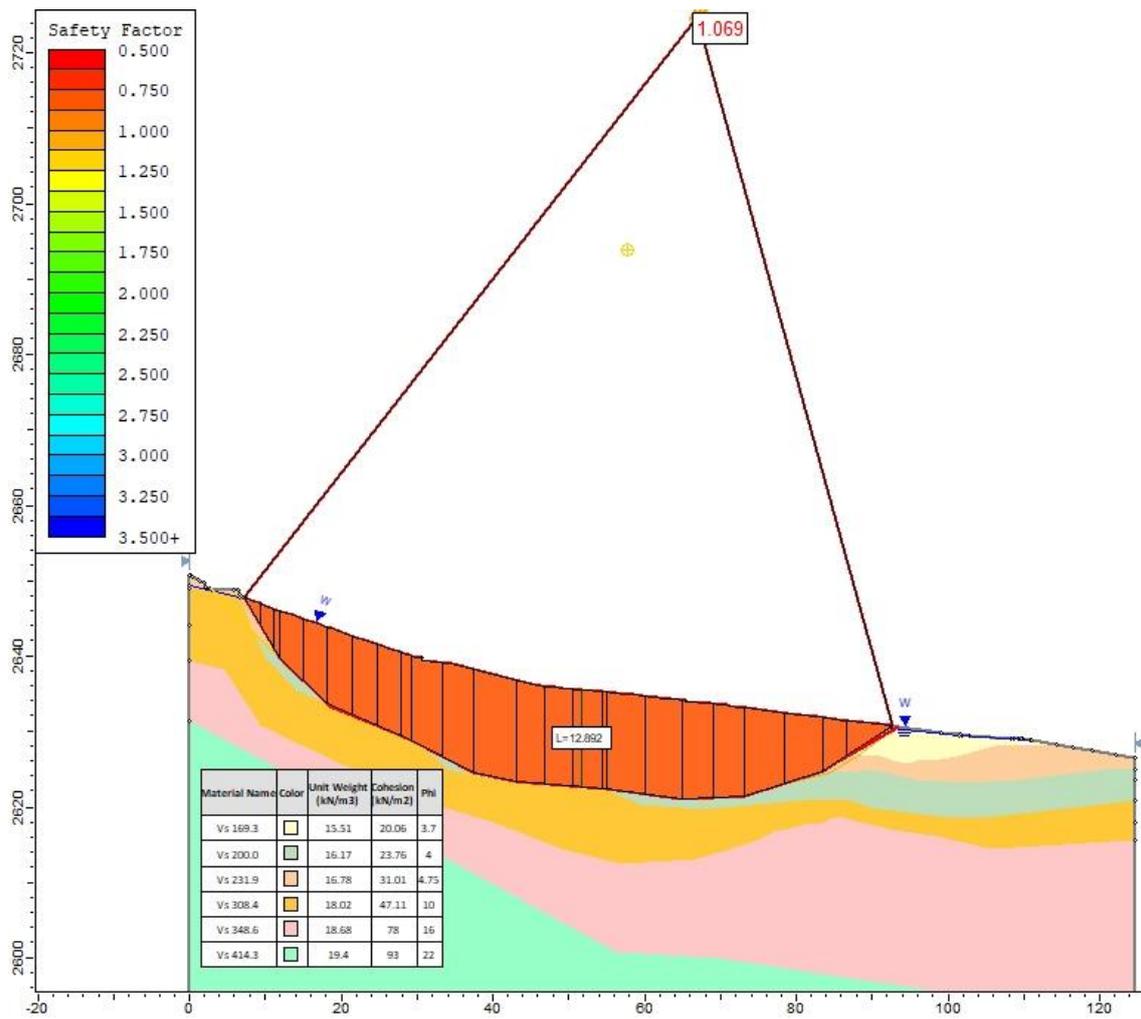


Figura 6-49: Modelo 3-3 - Condiciones saturadas - falla no circular – método de Janbu

6.7.9 ESTABILIDAD DE TALUD MODELO 3-3 – CONDICIONES SÍSMICAS

6.7.9.1 FALLA CIRCULAR

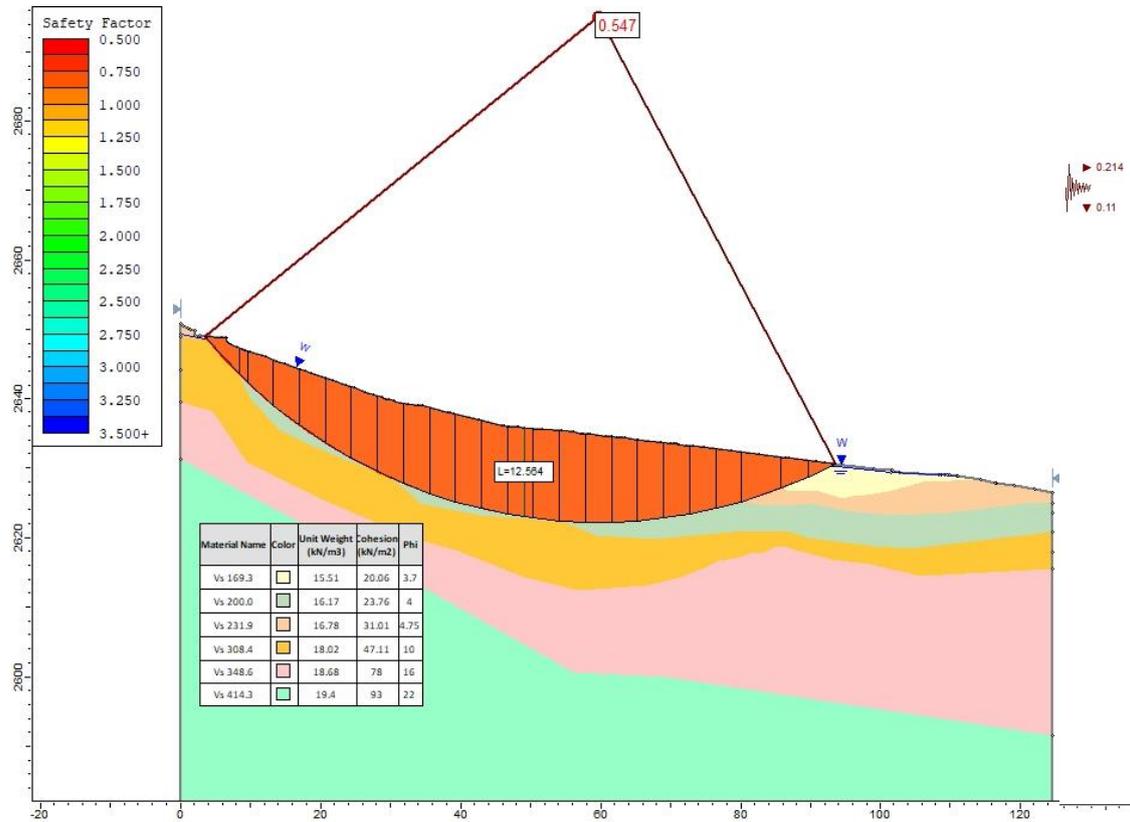


Figura 6-50: MODELO 3-3 - Condiciones sísmicas - falla circular – método de Janbu

Para el modelo 3-3 en condiciones sísmicas, presenta una falla tipo circular (Figura 6-50) con un factor de seguridad de 0.547, mientras que para un tipo de falla no circular (Figura 6-51) el factor de seguridad es de 0.491. Lo que indica que el talud sufriría condiciones de inestabilidad al presentarse un sismo de magnitud considerable y al tiempo que exista saturación en el suelo. Por consiguiente y según la NEC (FS=1.05) el talud no es estable y se clasifica como no seguro.

Los resultados dan paso a la probabilidad de falla del talud con un plano de falla tipo no circular en caso de suceder los dos escenarios simultáneamente (el suelo se encuentre saturado y ocurriera un sismo de magnitud considerable).

6.7.9.2 FALLA NO CIRCULAR

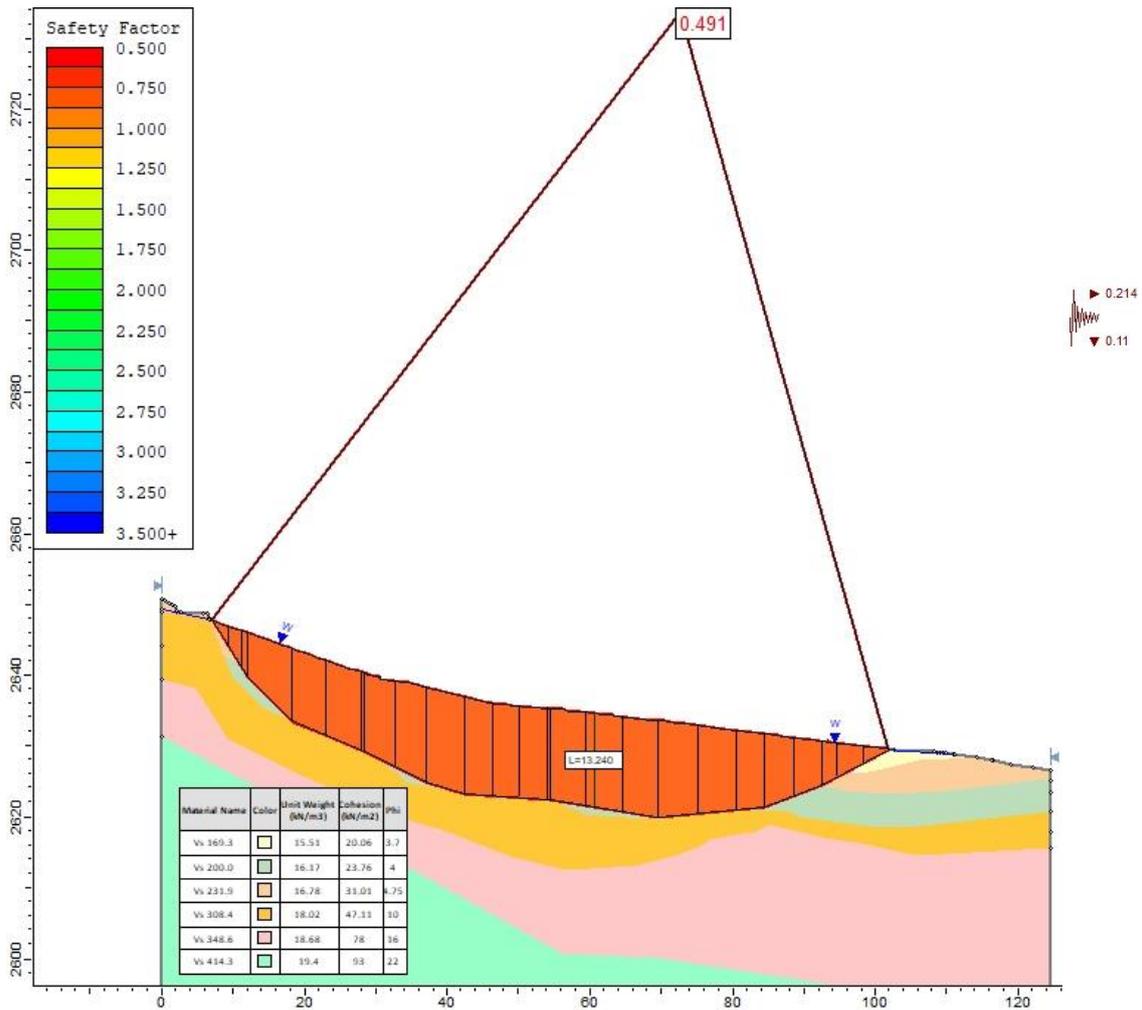


Figura 6-51: Modelo 3-3 - Condiciones sísmicas - falla no circular – método de Janbu

6.8. MODELOS GEOFÍSICOS 3D

6.8.1 Modelo Eléctrico 3D

Para el modelado 3D de la información de resistividad obtenida en el presente trabajo de investigación, se usó el software Voxler 3, un producto de la marca Golden Software Inc. El uso de un modelo en tres dimensiones ayuda para observar el comportamiento y la disposición en conjunto de los materiales o medios geofísicos que se encuentran en el subsuelo de la zona de estudio. A continuación se presentan estos resultados:

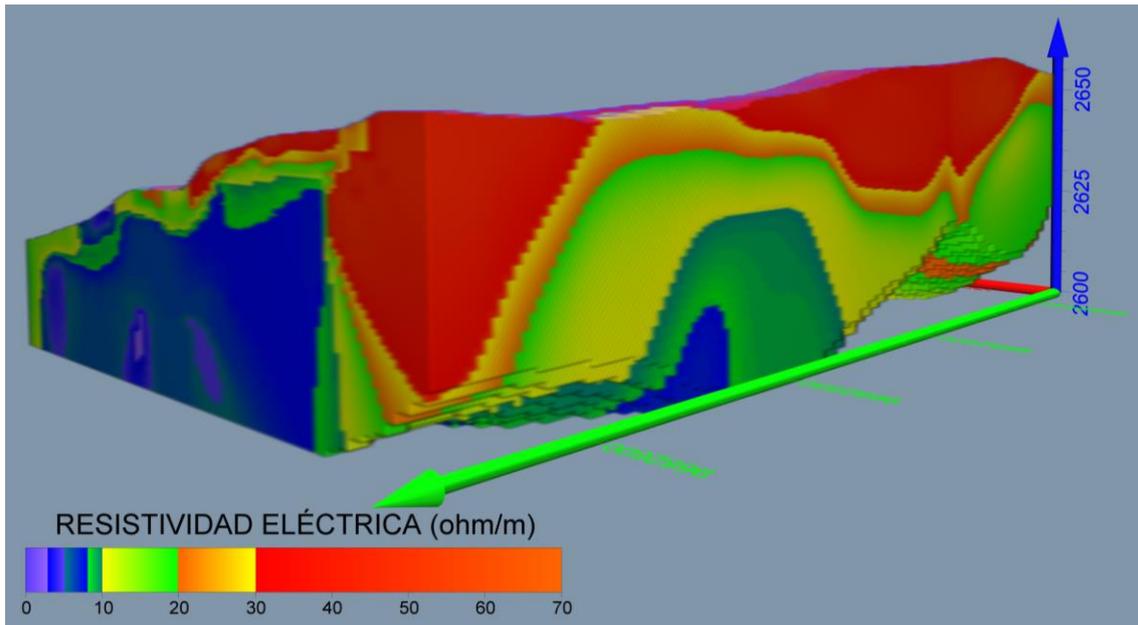


Figura 6-52: Perspectiva general del modelo 3D Eléctrico

En la Figura 6-52 se puede observar una perspectiva general del modelo 3D eléctrico vista desde el flanco del Noroeste de la zona de estudio, en donde se evidencia la presencia y distribución de materiales con resistividad eléctrica que varía en un rango de 3 (colores magenta y azul) a 70 ohm/m (colores cálidos).

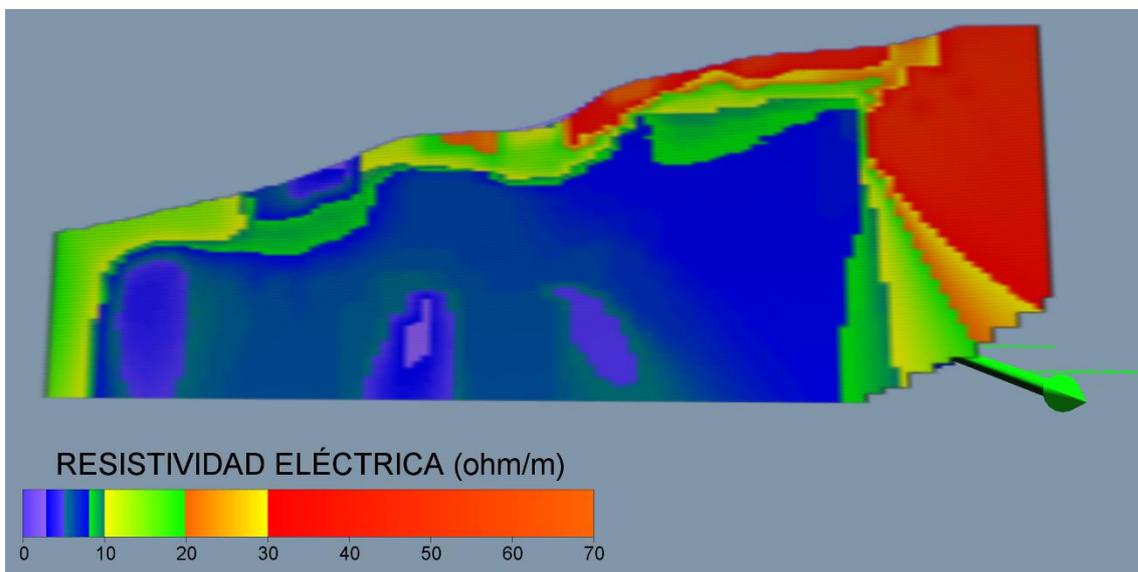


Figura 6-53: Vista lateral norte del modelo 3D Eléctrico

En la vista lateral desde el norte del modelo 3D (Figura 6-53), se aprecia que superficialmente existe material con resistividad eléctrica entre 10 y 20 ohm/m representado por el color verde, en la parte superior del talud se encuentra un material grueso con resistividades entre 30 y 70 ohm/m (colores cálidos en transición de naranja a rojo). Así mismo, debajo de estas capas se alcanza a divisar el cambio litológico con resistividades inferiores a 10 ohm/m (azul) las mismas que corresponderían a la formación Santa Rosa.

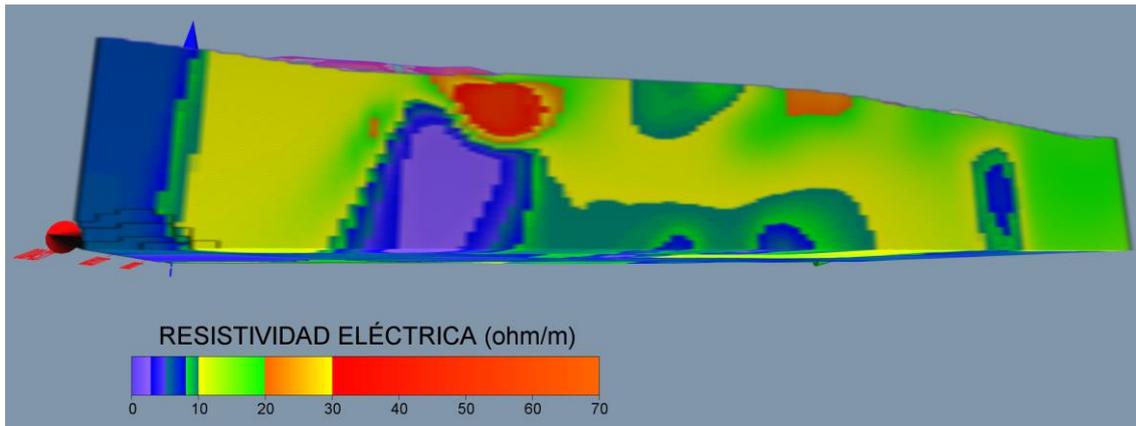


Figura 6-54: Vista lateral este del modelo 3D Eléctrico

Desde la vista lateral este del modelo 3D eléctrico (Figura 6-54), se nota el predominio de material con resistividad eléctrica oscilante entre 10 y 20 ohm/m (color verde y amarillo). Por su parte, en esta vista existe escaso material grueso con resistividades de 30 y 70 ohm/m (colores cálidos en transición de naranja a rojo). Finalmente, el color azul continúa representando el cambio litológico de la formación de Santa Rosa, cuyas resistividades son inferiores a 10 ohm/m.

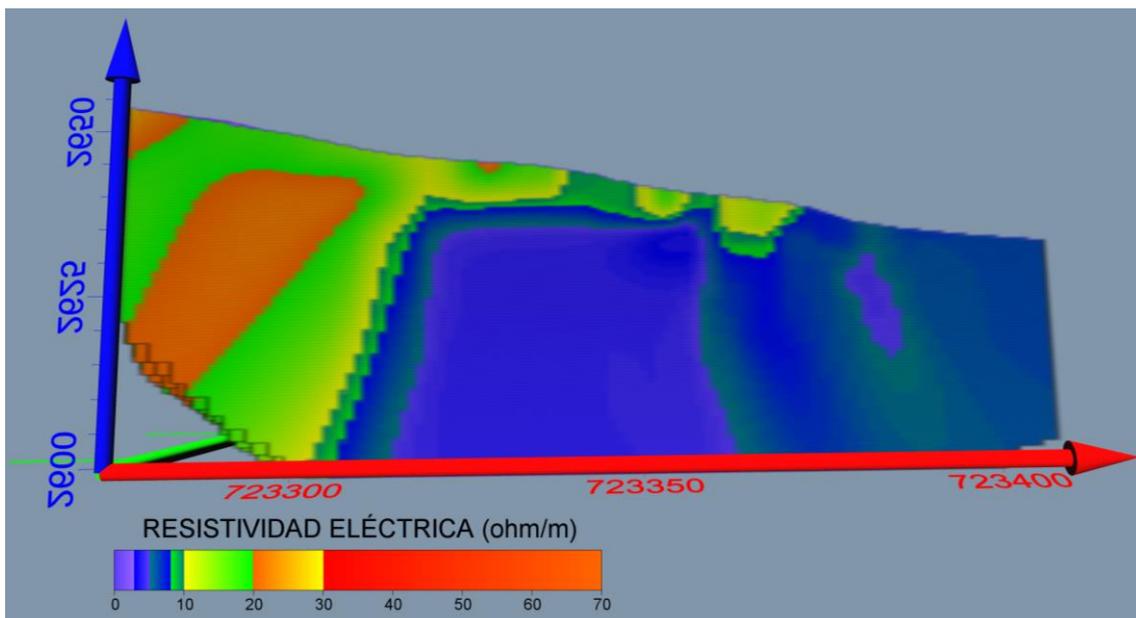


Figura 6-55: Vista lateral sur del modelo 3D Eléctrico

A partir de la vista lateral sur del modelo 3D eléctrico (Figura 6-55), se encuentra fuerte presencia de suelo fino arcilloso limoso (color azul), poseyendo resistividades son inferiores a 10 ohm/m. El color verde, muestra una transacción del material fino al suelo grueso con clásticos centimetritos, con resistividad eléctrica aproximada a 20 ohm/m.

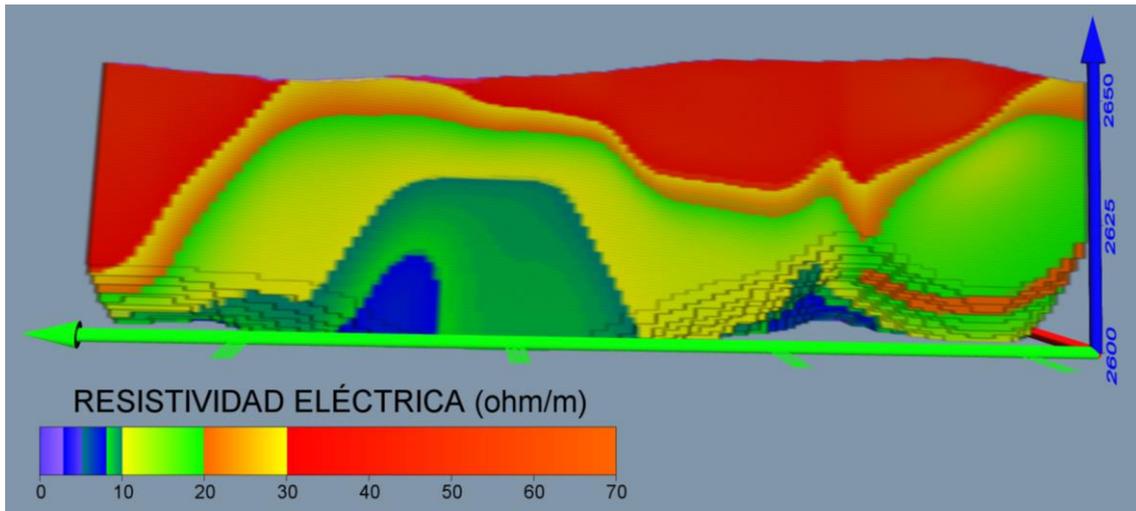


Figura 6-56: Vista lateral oeste del modelo 3D Eléctrico

La vista lateral oeste del modelo 3D eléctrico (Figura 6-56), denota mayor heterogeneidad así también el cambio litológico desde esta vista se observa surge de forma inclinada, como se puede ver en los costados laterales de la figura. La presencia de suelo fino es casi nula (color azul), no obstante el alcance del método se no entrega una mirada a mayor profundidad, donde pudiese encontrarse ese tipo de suelo.

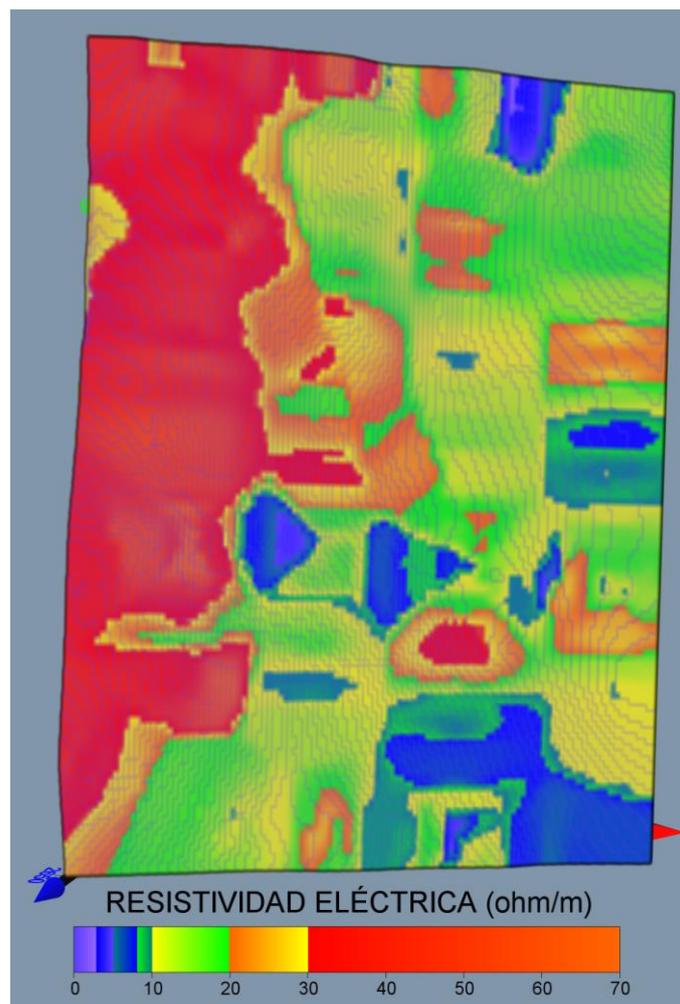


Figura 6-57: Vista en planta de la superficie del modelo 3D Eléctrico

Desde la vista lateral este del modelo 3D eléctrico (Figura 6-57), en la parte superior se halla el material más grueso del talud (color rojo), mientras que al descender se encuentra la presencia errática de materiales con resistividades diferentes, pudiendo explicarse por el movimiento activo de la zona.

La Figura 6-58 y Figura 6-59, pertenecientes al modelo 3D eléctrico con vista interna en posición eje X y Eje Y respectivamente, poseen características geofísicas similares a las vistas externas del modelo, anteriormente explicadas; suelos arcillosos de tipo fino con transiciones (fino a grueso) acompañado de materiales clásticos centimétricos pertenecientes a la terraza fluvio-glacial.

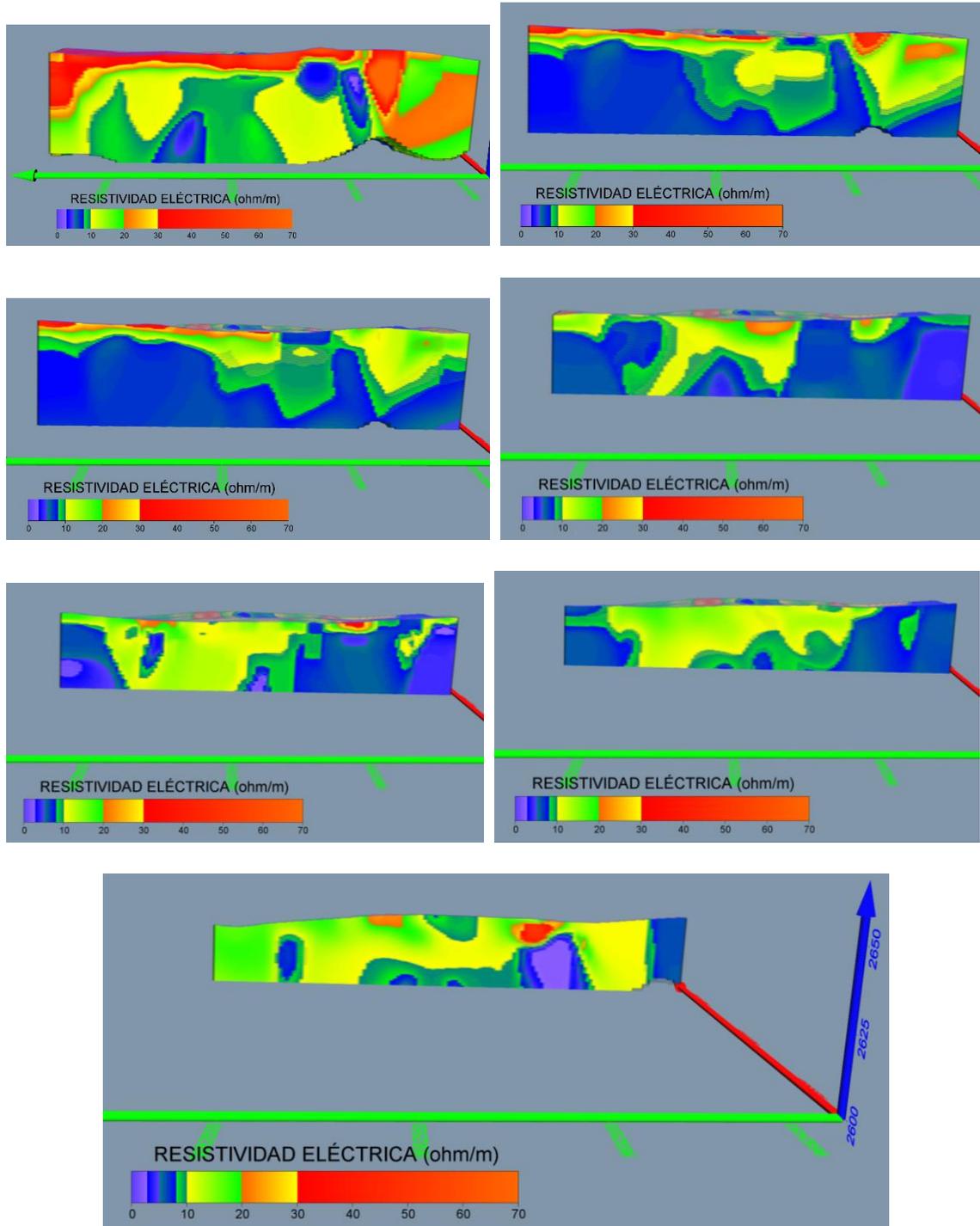


Figura 6-58: Vista del modelo 3D Eléctrico variando posición en el eje X (Este)

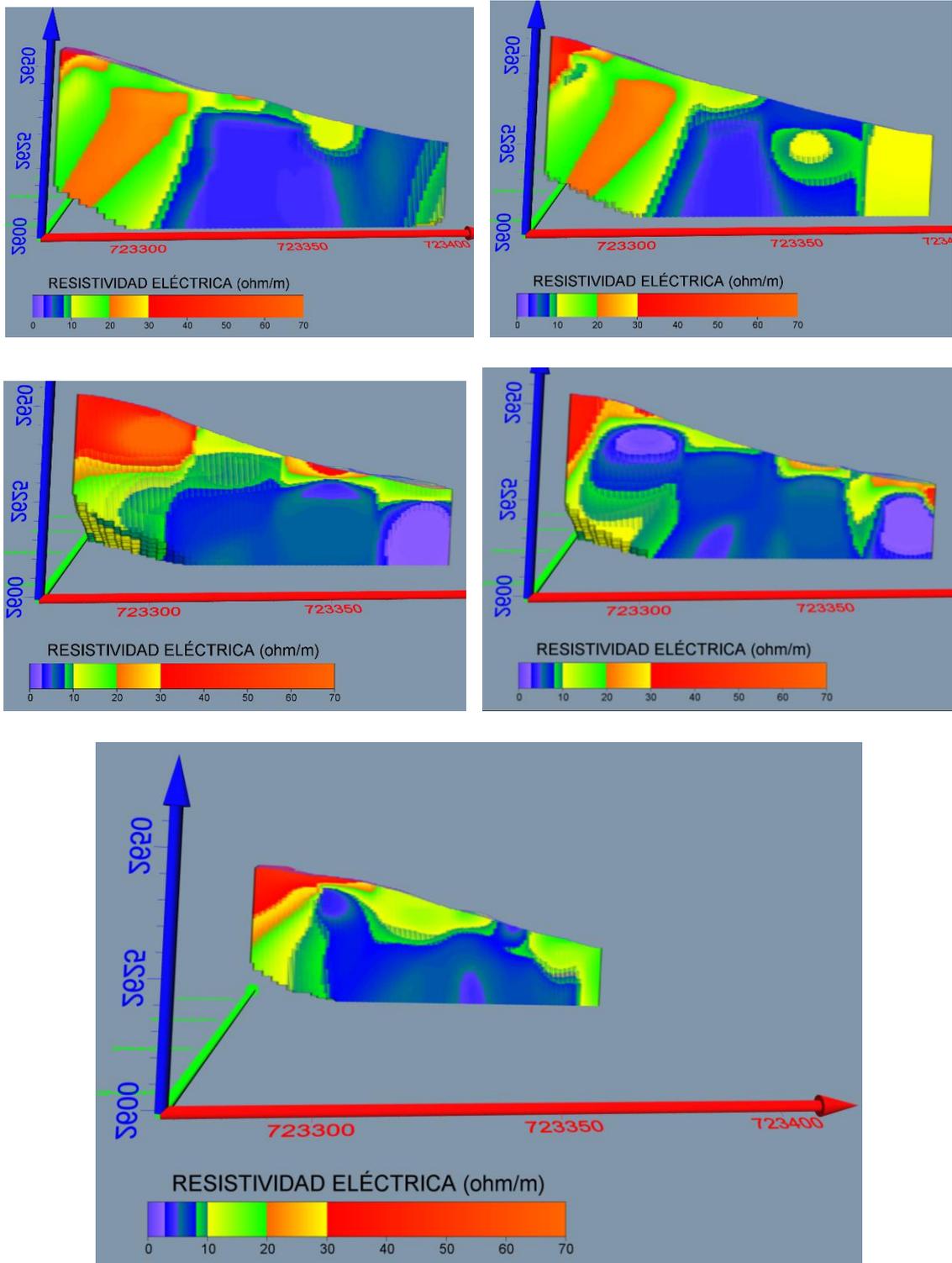


Figura 6-59: Vista del modelo 3D Eléctrico variando posición en el eje Y (Norte)

Las figuras que se exhiben desde la sección Figura 6-60 a la Figura 6-71, son el producto del uso de isosuperficies, que brinda el software utilizado. Siendo presentadas de acuerdo a rangos entre 1 y 70 ohm/m. Se resalta que a mayor descenso del rango de resistividad mayor presencia de suelo arcilloso limoso, el cual se expande y contrae con la presencia de agua, además este se caracteriza por ser impermeable, lo que representa que posee la capacidad de confinar el agua, provocando una superficie de falla en el cambio litológico.

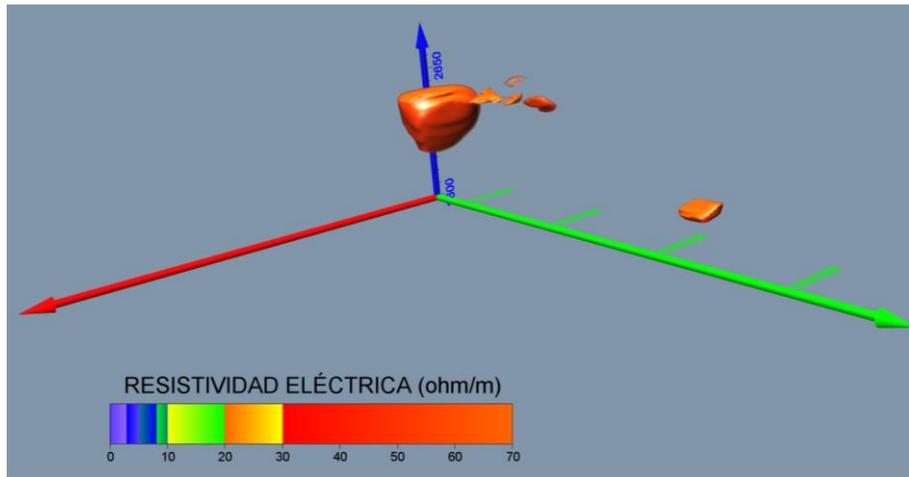


Figura 6-60: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 60 y 70 ohm/m

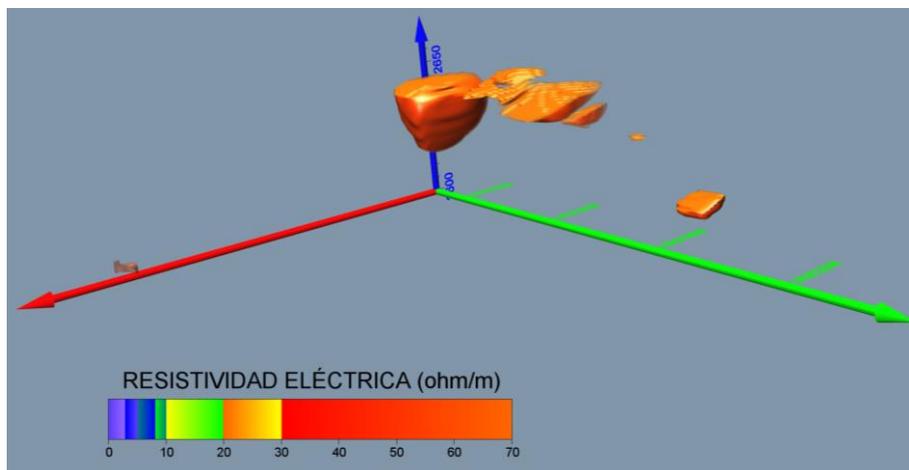


Figura 6-61: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 50 y 60 ohm/m

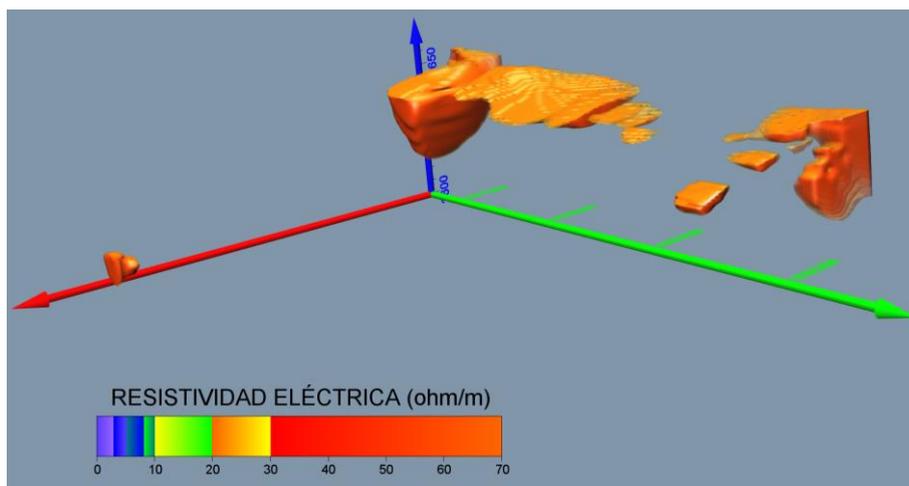


Figura 6-62: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 40 y 50 ohm/m

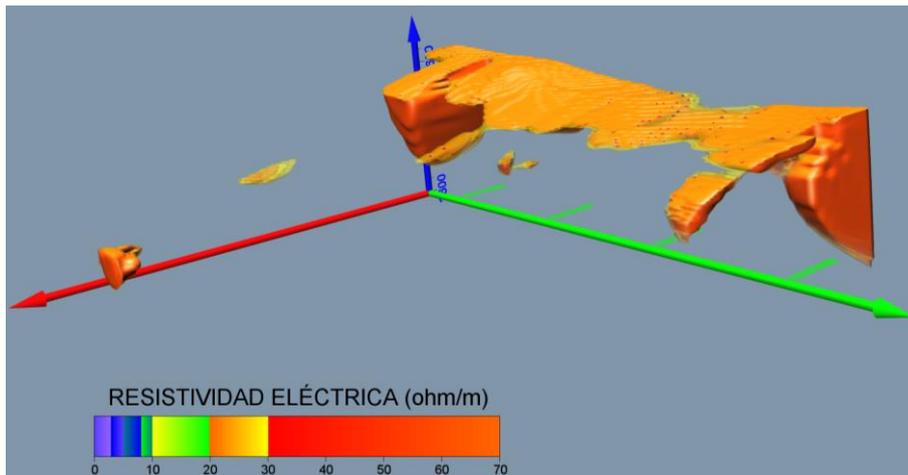


Figura 6-63: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 30 y 40 ohm/m

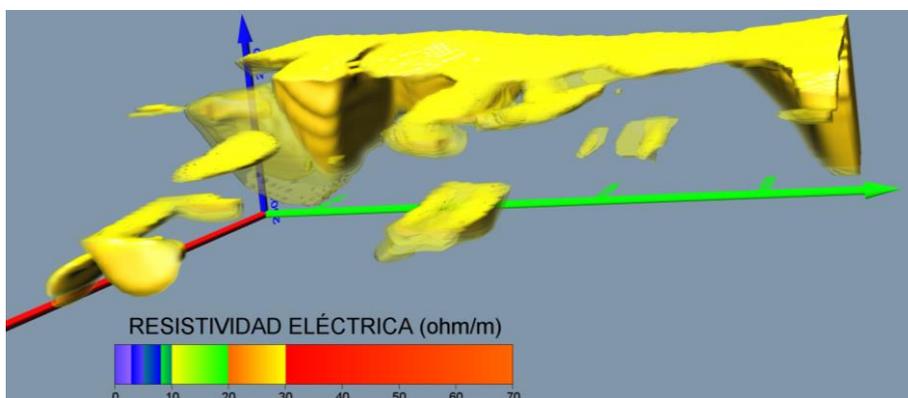


Figura 6-64: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 20 y 30 ohm/m

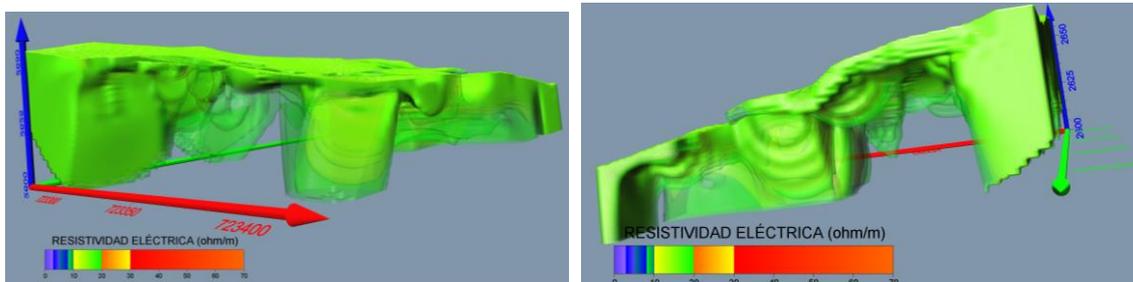


Figura 6-65: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 10 y 20 ohm/m

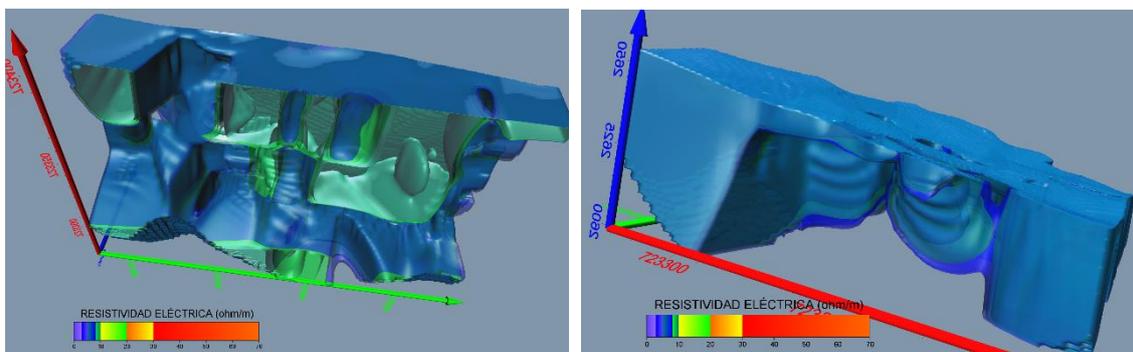


Figura 6-66: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 8 y 10 ohm/m

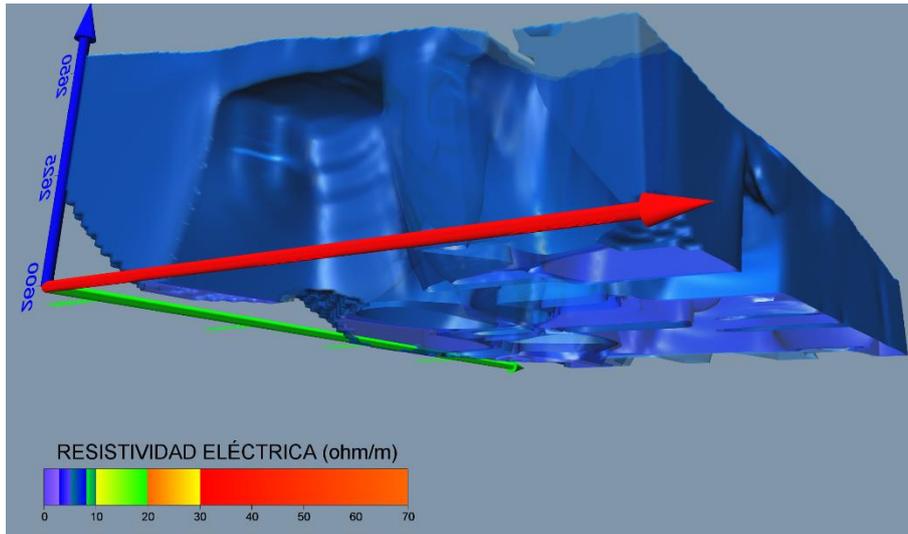


Figura 6-67: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 6 y 8 ohm/m

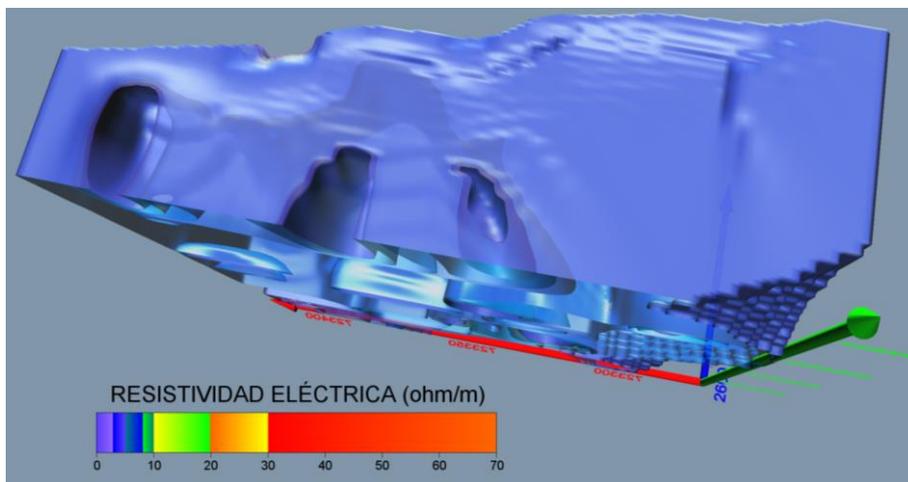


Figura 6-68: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 5 y 7 ohm/m

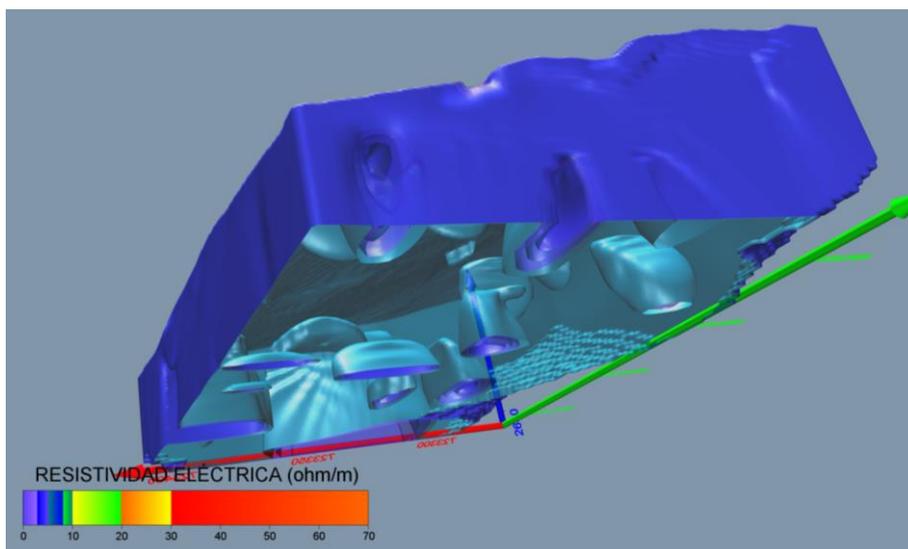


Figura 6-69: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 4 y 5 ohm/m

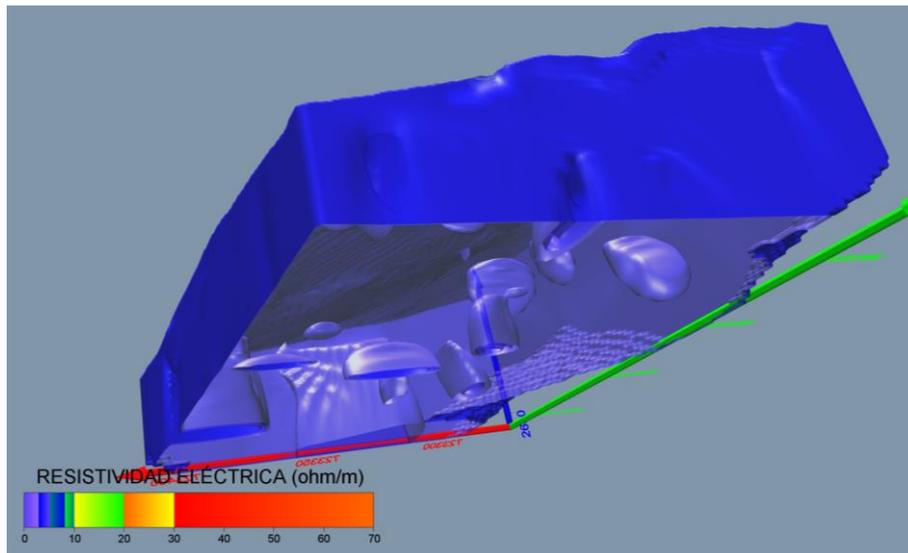


Figura 6-70: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 3 y 4 ohm/m

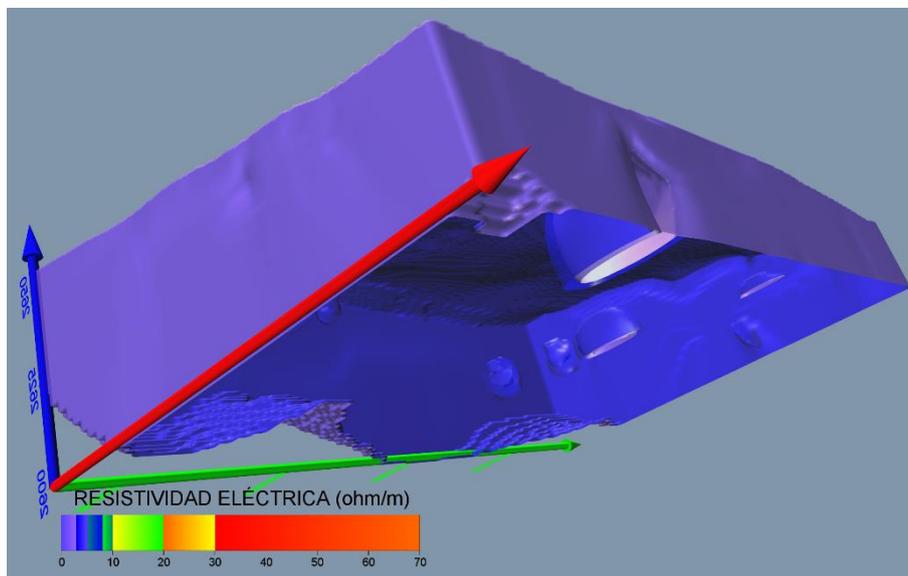


Figura 6-71: Vista de materiales con resistividad eléctrica entre 0 y 3 ohm/m

6.8.2 Modelo Sísmico 3D

A través del uso del software Voxler 3 se construyeron el modelo de velocidades sísmicas V_p , del cual se encuentran sus vistas en las figuras, a continuación.

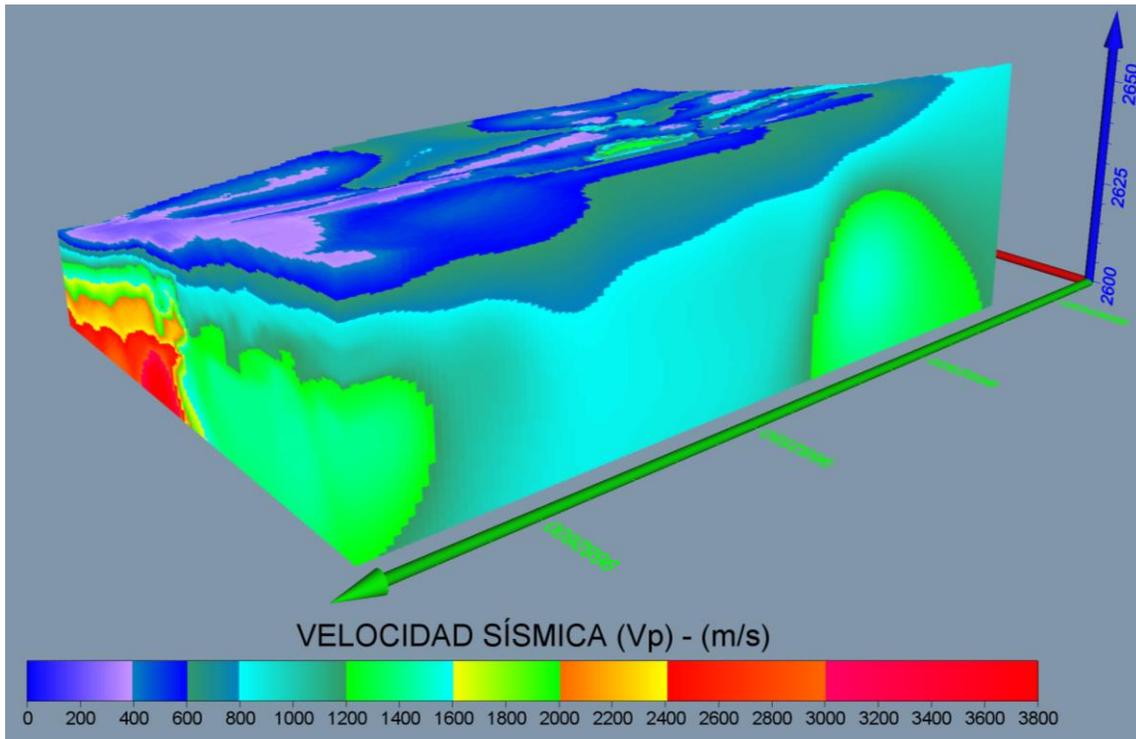


Figura 6-72: Perspectiva general del modelo 3D Sísmico (V_p)

En la Figura 6-72, se observa una perspectiva general del modelo 3D vista desde el flanco del Noroeste de la zona de estudio, en donde se puede evidenciar la presencia y la distribución de materiales con velocidades sísmicas V_p , con un rango de 200 (en tonalidades del azul) hasta los 3800 m/s (color rojo).

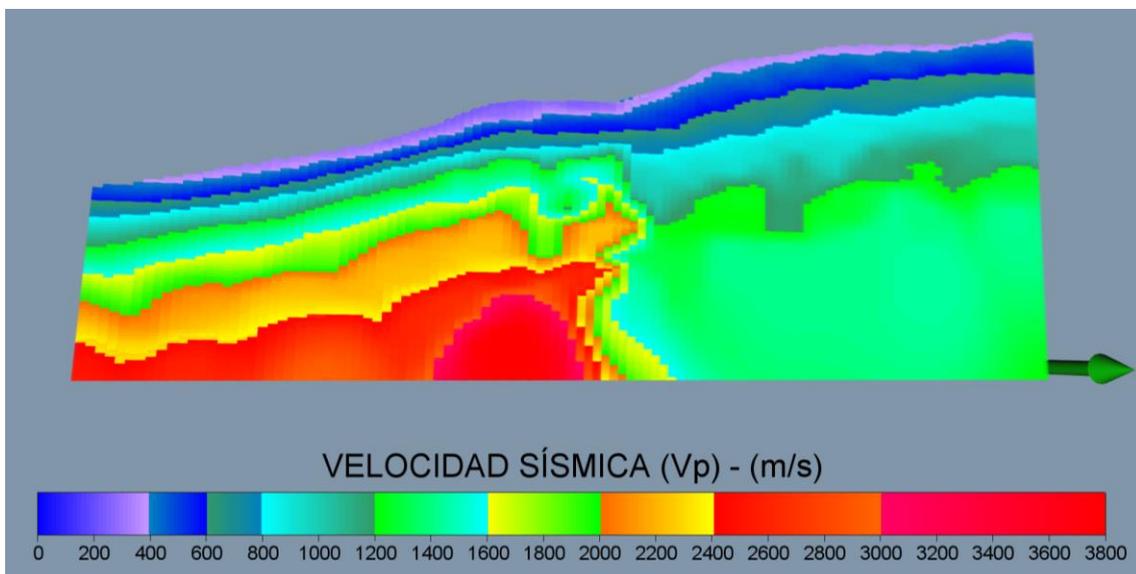


Figura 6-73: Vista lateral norte del modelo 3D Sísmico (V_p)

La Figura 6-73, posee un medio geofísico con características sísmicas entre 0 y 400 m/s (color azul y lila). Conforme se avanza en profundidad aumenta la velocidad sísmica del suelo, hasta a encontrarse con un estrato de basamento rocoso (color rojo).

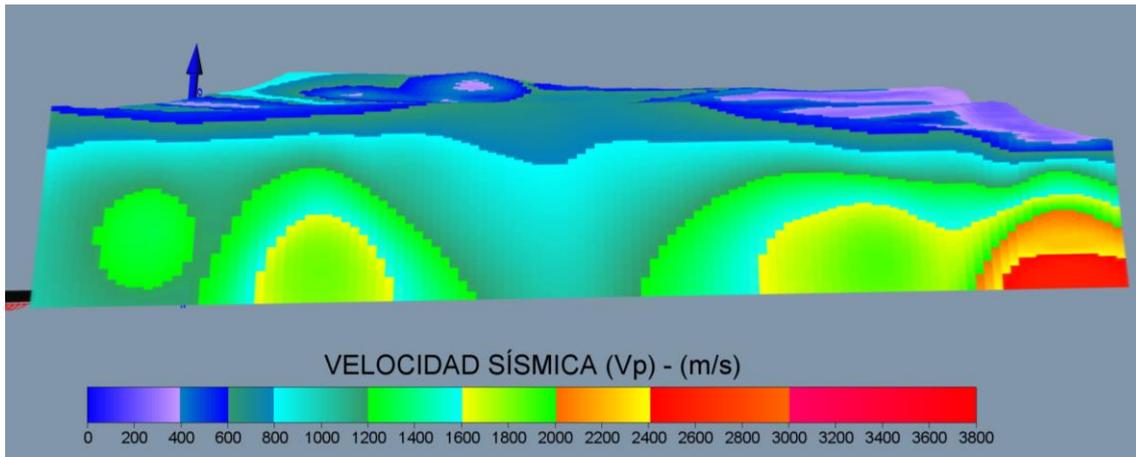


Figura 6-74: Vista lateral este del modelo 3D Sísmico (V_p)

En la vista lateral este (Figura 6-74), se observa la distribución de los estratos en forma inclinada.

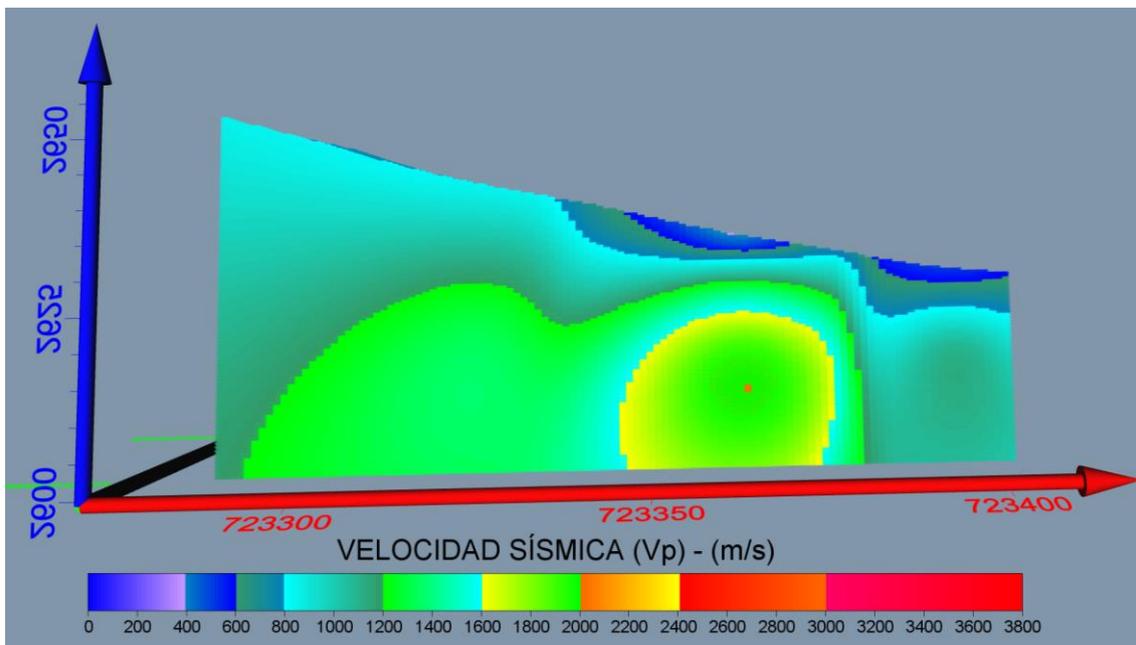


Figura 6-75: Vista lateral sur del modelo 3D Sísmico (V_p)

En la vista lateral sur (Figura 6-75) predominan velocidades sísmicas V_p entre 600 y 1200 m/s (color turquesa) y 1200 a 2000 m/s (color verde). Lo mismo sucede en la Figura 6-76.

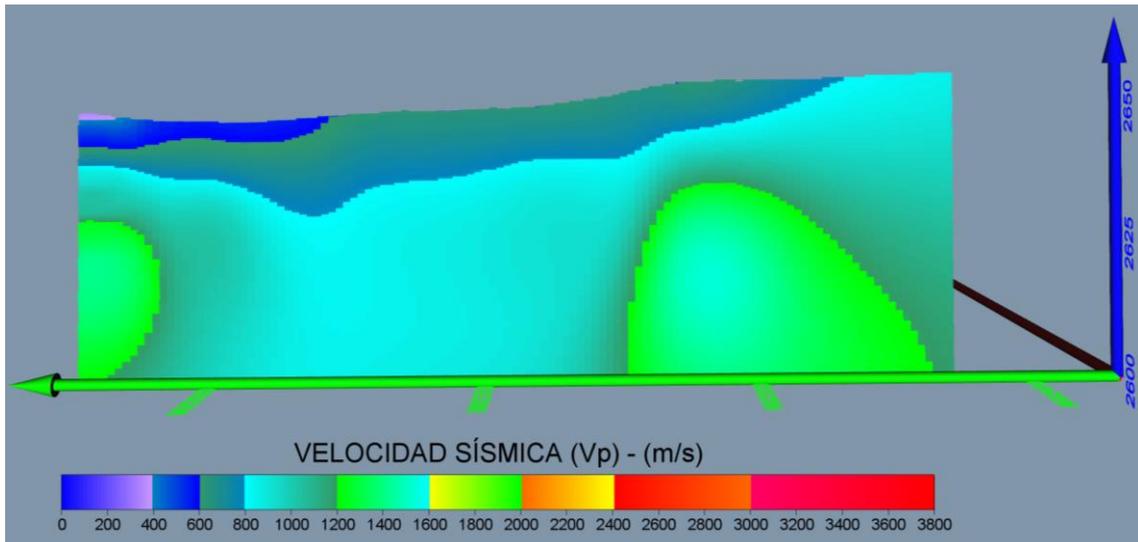


Figura 6-76: Vista lateral oeste del modelo 3D Sísmico (V_p)

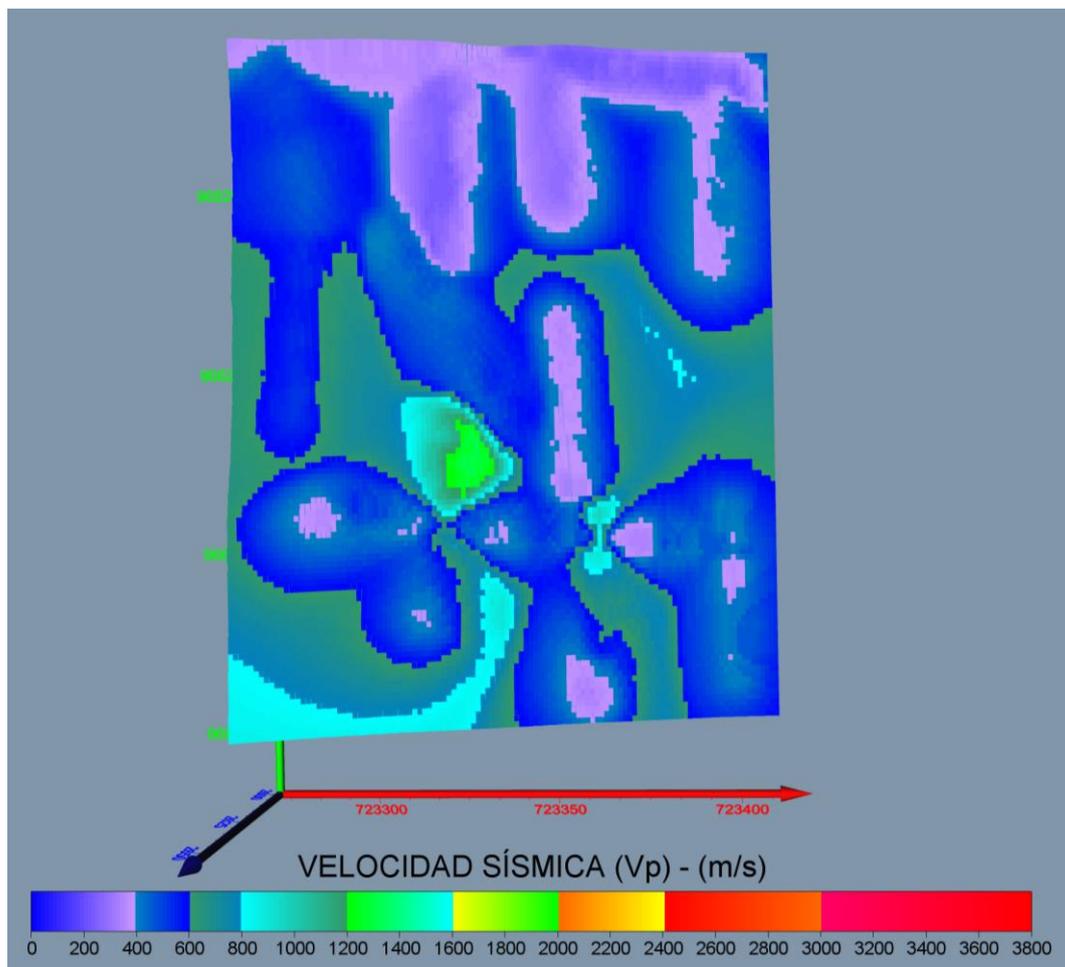


Figura 6-77: Vista en planta de la superficie del modelo 3D Sísmico (V_p)

La Figura 6-77, superficialmente se observa gran presencia de suelo con velocidades sísmicas bajas entre 100 y 400 m/s (color azul a lila). Lo que representaría un material suelto con bajas características geotécnicas.

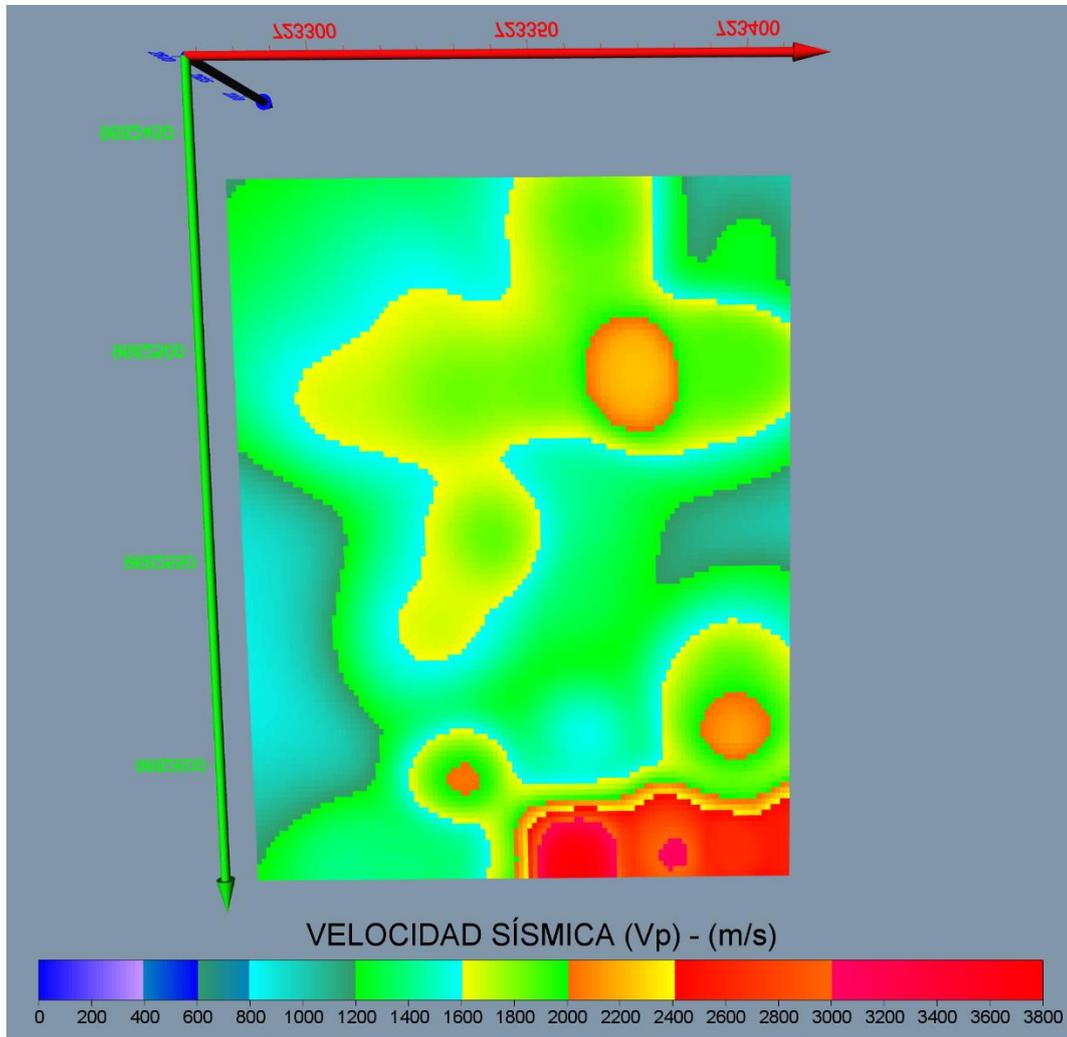


Figura 6-78: Vista en planta inferior del modelo 3D Sísmico (V_p)

La Figura 6-78, muestra un suelo saturado con características sísmicas entre 1200 a 2400 m/s (color verde y amarillo). Así también, el color rojo en la figura indica la presencia de un estrato rocoso.

Continuando, la Figura 6-79 y Figura 6-80, pertenecientes al modelo 3D sísmico V_p con vista interna en posición eje X y Eje Y respectivamente, señalan las posibles velocidades sísmicas de acuerdo al eje en que estas se analizan. En los dos casos, las velocidades predominantes oscilan entre 600 y 2000 m/s, acompañado de leves puntos con valores de 2000 a 3000 m/s. Se puede comprender que estos resultados, se deben a los niveles de saturación propios del suelo de estudio y escasas áreas de estrato rocoso.

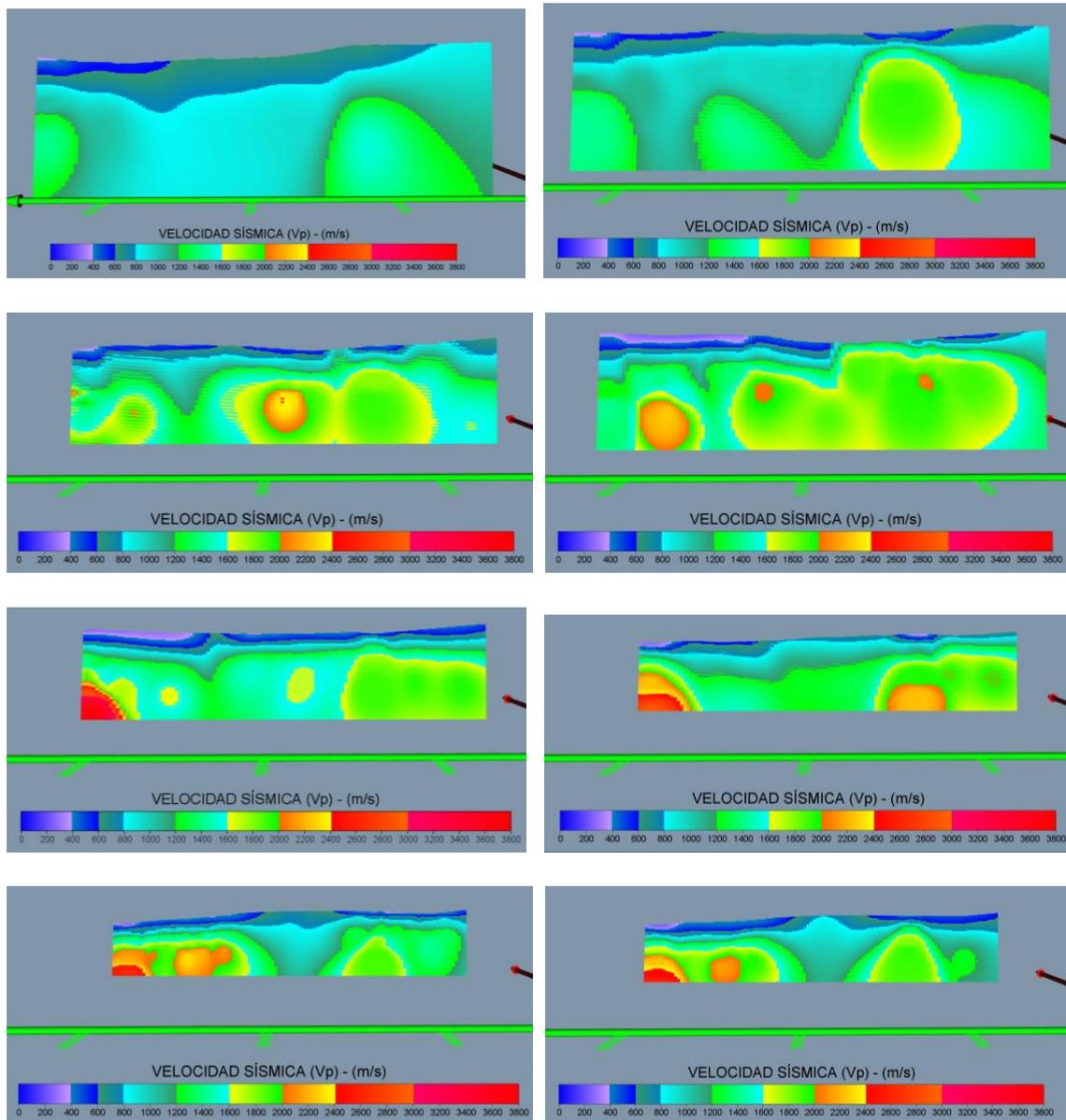


Figura 6-79: Vista del modelo 3D Sísmico (Vp) variando posición en el eje X (Este)

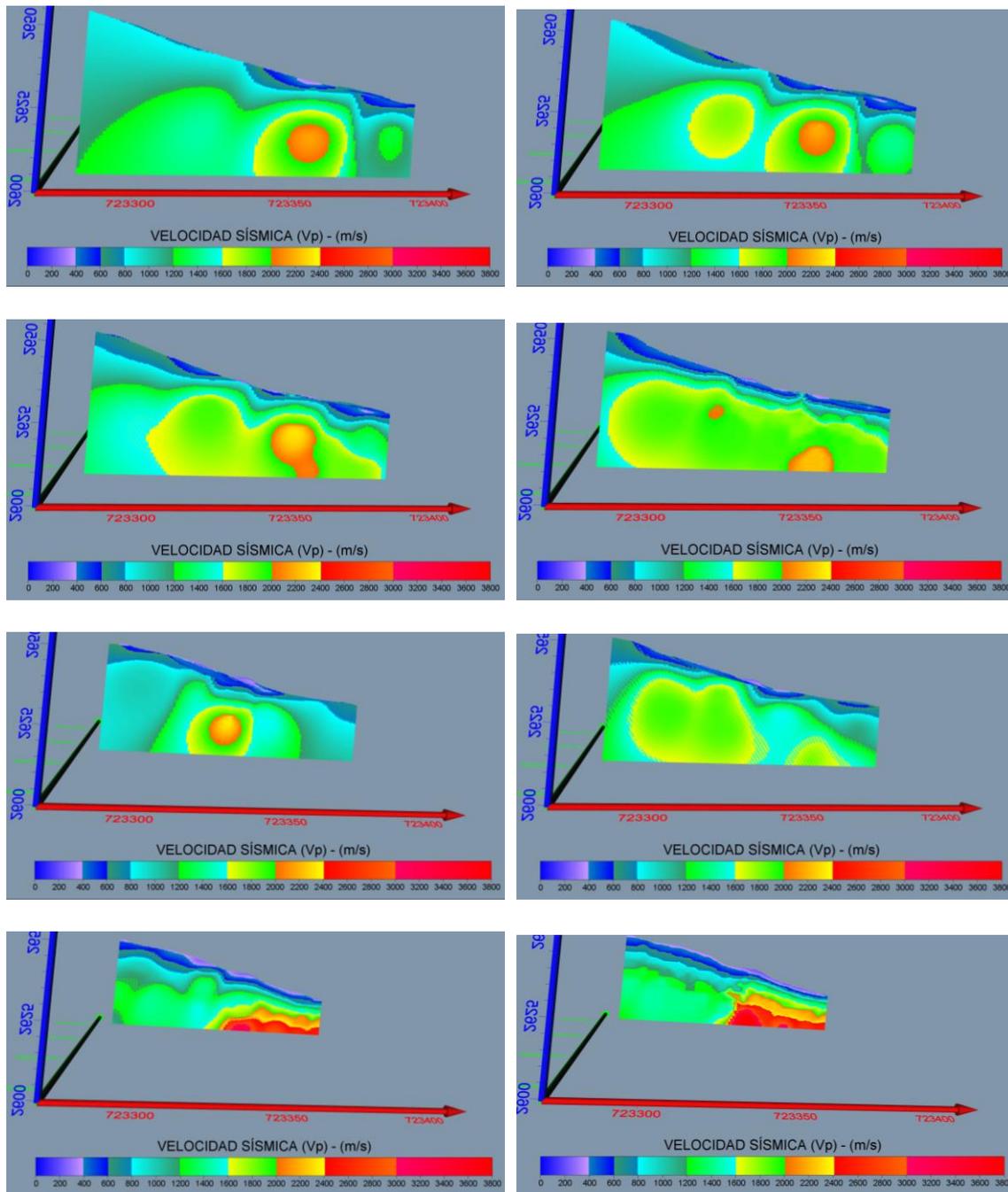


Figura 6-80: Vista del modelo 3D Sísmico (V_p) variando posición en el eje Y (Norte)

La siguiente sección, Figura 6-81 a la Figura 6-85, se describen como isosuperficies, con rangos entre 100 y 3800 m/s. Se indica que a mayor velocidad sísmica mayor la saturación del suelo, mientras que los que presentan valores inferiores a 600 m/s se refiere a suelo suelto fracturado con espacios de vacíos de bajas capacidades geotécnicas, debido a que su estructura interna ha sufrido rupturas por el movimiento activo del deslizamiento. Los valores mayores a 2400 muestran estratos rocosos. Es importante mencionar que velocidades sísmicas V_p altas no significan que el medio posee altas propiedades geotécnicas, puesto que estas velocidades pueden variar con la presencia del agua tratándose del mismo medio.

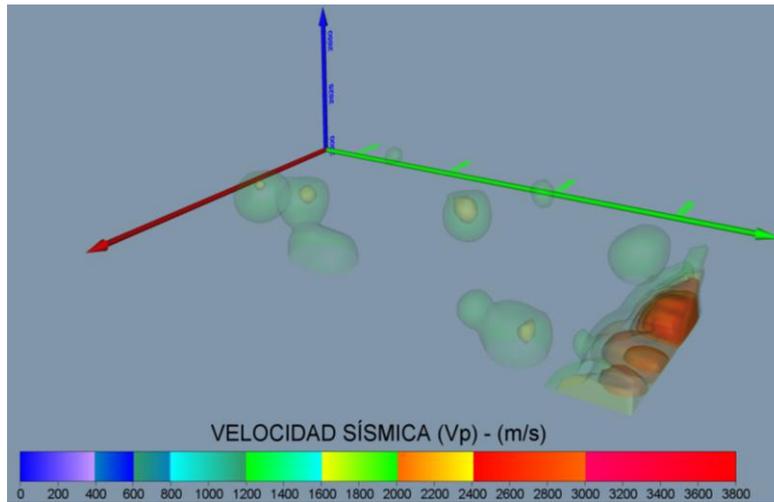


Figura 6-81: Vista de materiales con velocidad sísmica (V_p) entre 2000 y 3800 m/s

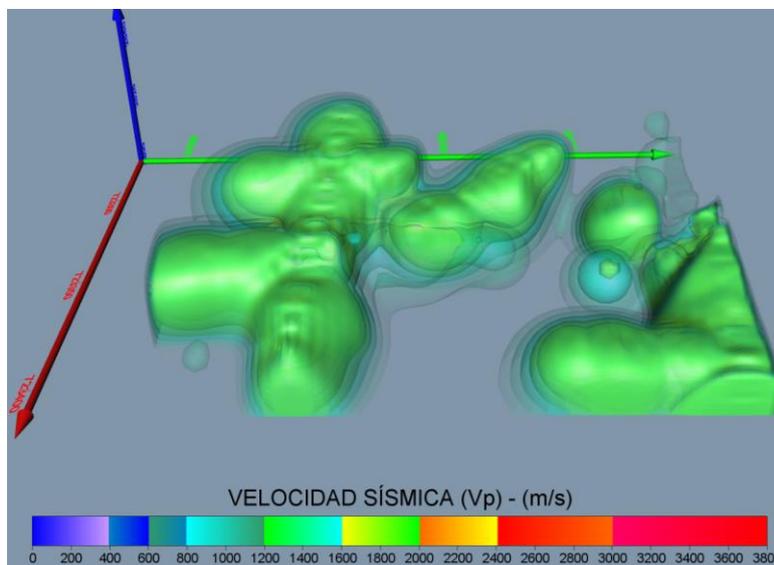


Figura 6-82: Vista de materiales con velocidad sísmica (V_p) entre 1400 y 2000 m/s

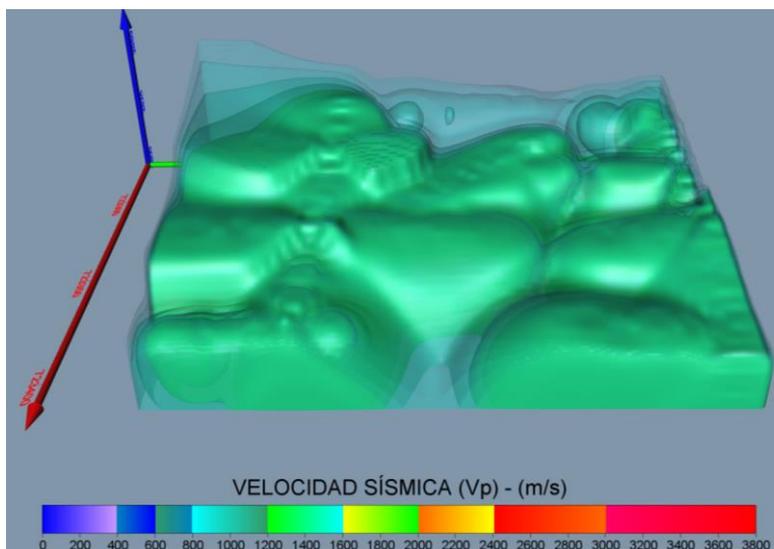


Figura 6-83: Vista de materiales con velocidad sísmica (V_p) entre 800 y 1400 m/s

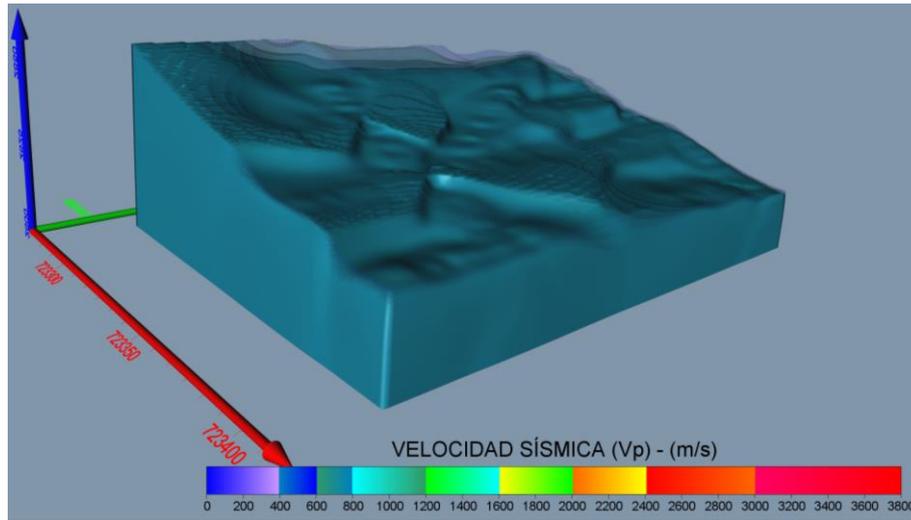


Figura 6-84: Vista de materiales con velocidad sísmica (V_p) entre 600 y 800 m/s

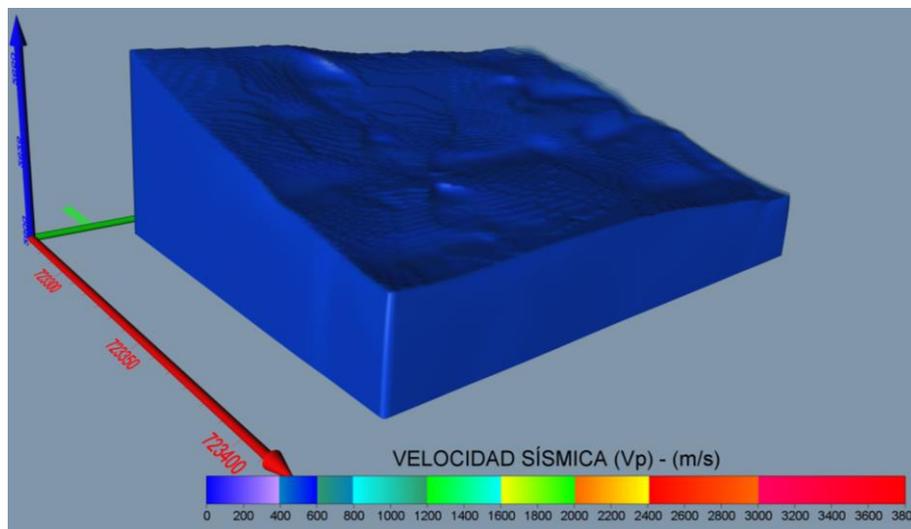


Figura 6-85: Vista de materiales velocidad sísmica (V_p) entre 400 y 600 m/s

A partir de los modelos 3D construidos y mediante la correlación de los resultados gráficos obtenidos se puede conocer el comportamiento en conjunto de toda la masa del subsuelo de la zona, se pudo encontrar y evidenciar que existen franjas inclinadas con rumbo $N62^{\circ}53'W$ de debilidades formadas por la presencia de cambios de materiales finos arcillo-limosos a materiales más gruesos limo-arenosos con escasa presencia de clastos centimétricos. Estas franjas paralelas que se han encontrado coinciden con las zonas en donde existe mayor afección en la infraestructura de la zona tal como se puede observar en la Figura 6-86.

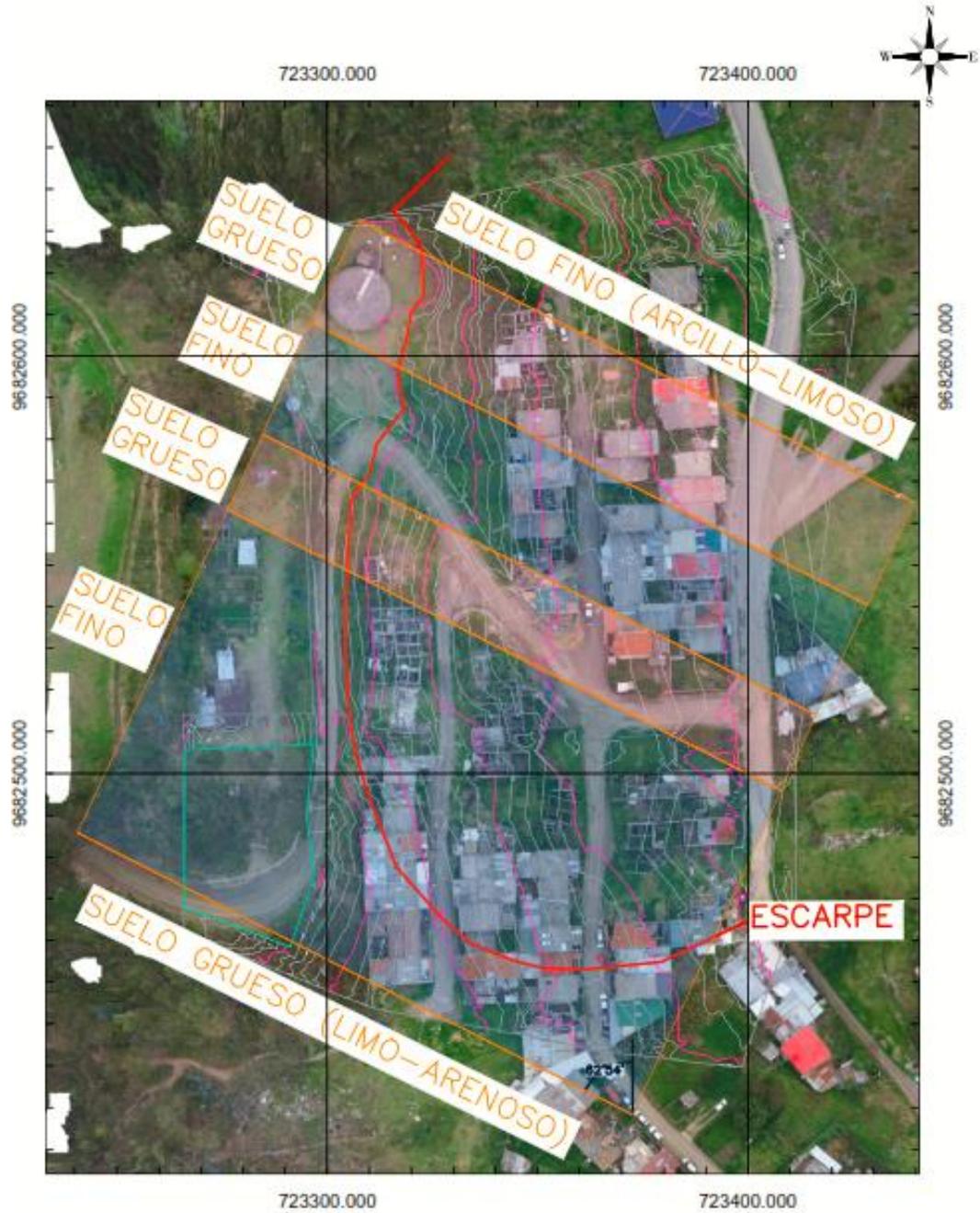


Figura 6-86: Distribución de las franjas de debilidades

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

El presente trabajo de titulación brinda una idea de los métodos geofísicos usados en caracterización de suelos y se plantea como base para futuros trabajos e investigaciones que se enfoquen en comparar las ventajas y desventajas de estos métodos que brinda la tecnología, logrando despertar el interés por el estudio y aplicación de las ondas sísmicas en los proyectos de ingeniería.

La zona de estudio se halla en la Urbanización "Trigales Altos", la misma que está ubicada al noreste de la ciudad de Cuenca, sector de Patamarca, en la Parroquia Hermano Miguel, en las Coordenadas UTM WGS 84 UTM 17S 0723365X/9682514Y, a una altura de 2650 msnm. Limita al Norte con el barrio Patamarca II, al Este con los terrenos de la UNE y Cajaloma, al Sur con terrenos de la familia Eljuri y Cajaloma y al Oeste con el barrio El Tablón y El Tablón Chico. En este territorio yace inclinada la serie de areniscas y arcillas de la Formación Santa Rosa entre 10 y 15 grados hacia el este, sobre ésta se encuentra, con discordancia angular, una gruesa terraza de 35 m de espesor compuesto de grava arenosa medianamente consolidada, de textura homogénea, groseramente estratificado y ligeramente inclinado hacia el oeste. El Depósito fluvio-glacial tiene estructura caótica y está compuesto por una matriz arcillo arenosa, húmeda y blanda con guijarros rojizos duros dispersos en ella. En el subsuelo de la urbanización Los Trigales Altos, inmediatamente debajo de calles y casas, se encuentra un suelo orgánico blando, de composición arcillosa, de color negro y que contiene guijarros duros dispersos en su matriz.

En la zona de estudio es evidente que existe un movimiento o deslizamiento de masas activo, en este trabajo de titulación se abordó un área aproximada de 3.15 Ha con la finalidad de encontrar el plano de falla, por lo que se utilizaron tres métodos de investigación geofísica, Resistividad Eléctrica, Sísmica de Refracción y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW). Se levantó 8 tomas de aproximadamente 155 m de longitud cada una; 3 tomas de 55 m y 10 líneas de 34.5 m, respectivamente. Se obtuvo tomografías del perfil del subsuelo tanto de resistividad eléctrica como de velocidades sísmicas V_p , además se obtuvo perfiles de velocidades de corte V_s en diferentes puntos de la zona de estudio. A partir de estos datos obtenidos se procedió a calcular parámetros geotécnicos y mediante la correlación de toda la información levantada se armó tres modelos geotécnicos para realizar el análisis de estabilidad de los taludes, además se pudo construir dos modelos 3D de resistividad eléctrica y velocidades sísmicas V_p para tener una mejor idea de cómo se encuentran distribuidos los medios geofísicos del subsuelo en la zona.

Del análisis de los resultados de la tomografía eléctrica indicaron que existe presencia de material arcilloso con valores de resistividad entre 3 y 6 ohm/m. Con valores superiores de resistividad se encontrarían limos y limo-arenosos los cuales oscilan entre 30 y 50 ohm/m. Así también, se evidenciar la presencia de cambios litológicos inclinados existentes y una transición que se encontraría entre los 3 m y 5 m de profundidad aproximadamente de lo que pudiera ser la Formación Santa Rosa geológicamente formada por material fino como arcillas y limos, hacia la terraza fluvio-glacial compuesta por una matriz limo-arenosa con presencia de clastos centimétricos. El cambio estaría dado por la transición vertical inclinada profunda entre los valores de resistividad de 6 a 10 ohm/m que sería material fracturado un poco más grueso con espacio de vacíos, poroso y altamente permeable, mientras que el otro material es fino menos poroso e impermeable como lo son las arcillas con resistividades cercanas a 3 y 9 ohm/m. En línea, se observó la presencia de lo que podría ser material de relleno o suelo fracturado con espacio de vacíos con mayor contenido de agua superficialmente cuyas resistividades eléctricas fluctúan entre 15 y 38 ohm/m de lo que podría ser la zona principal de movimiento a una profundidad, aproximadamente entre 4 m y 13 m debido a variaciones erráticas de las resistividades superficiales de 4.5, 11, 30 y 22 ohm/m. Se identifica que el plano de falla se da exactamente en la zona del cambio litológico, sobre el contacto del material arcilloso impermeable y el material fracturado.



De los resultados de tomografía sísmica se podría evidenciar la zona principal del movimiento debido a sus bajas características sísmicas (V_p menores a 400 m/s) presentes en la superficie con una potencia alrededor de 3.70 m, siendo esta una capa de material fracturado poco compacto y altamente permeable producto de espacios de vacíos, además se observa el cambio litológico existente entre la Formación Santa Rosa y la terraza fluvio-glacial en la superficie evidenciándose fácilmente la heterogeneidad de la terraza con presencia de clastos centimétricos por la no uniformidad de las velocidades sísmicas V_p que fluctúan entre los 600 y 800 m/s alrededor de 4.30 m y 12 m de profundidad lo que podría tratarse de la zona del movimiento principal con materiales muy sueltos superficialmente. Se evidencia que los materiales presentan altas velocidades V_p (superiores a 1600 m/s) conforme se avanza en profundidad, lo que significaría que los mismos se encuentran con un porcentaje de humedad mayor que los de las capas superficiales, dándose aquí una zona de mayor confinamiento o retención del agua lo que indicaría que el nivel freático se encontraría a partir de los 6.50 m y 10 m de profundidad en diferentes puntos de la zona de estudio.

De los resultados de los perfiles de velocidades de corte V_s se puede decir que posee un medio geofísico superficial de bajas características, con un valor que fluctúa entre 193 y 262 m/s hasta los 6 m de profundidad, luego hay un estrato de debilidad geofísica con velocidades entre 144 y 199 m/s con una profundidad promedio entre 3.5 y 18 m, con lo que se podría inferir que el plano de falla se da a lo largo de este estrato de potencia variable. A continuación, el suelo presenta mejores características geofísicas con velocidades superiores a 309 m/s, desde donde existe una transición de suelo meteorizado hasta llegar al basamento de roca sedimentaria con velocidad igual a 573 m/s que correspondería a la formación Mangán. La formación geológica Santa Rosa se encontraría con una potencia de 26 m entre 9 y 35 m aproximadamente. Además, se clasifica al suelo existente en la zona como un tipo D según la NEC-2015, cuyo valor de V_{s30} oscilan alrededor de 266 y 313 m/s con lo que se obtienen los coeficientes horizontal y vertical de la carga sísmica k_h y k_v , 0.214 y 0.11 respectivamente para la determinación de la aceleración máxima.

Del análisis de estabilidad de los taludes planteados, después de obtener los perfiles topográficos y construir los modelos en dos dimensiones de la distribución y las propiedades geomecánicas de los estratos del subsuelo, se obtiene los menores valores para los factores de seguridad (FS) mediante el cálculo con el método de Janbu y con una falla del tipo No circular en los diferentes escenarios estudiados. Los resultados indican que los taludes son estables con valores entre 1.126 y 1.282, no obstante, no son seguros en condiciones naturales y saturadas (FS entre 1.020 y 1.231), respectivamente; mientras que para el marco sísmico estos colapsarían ya que presentan estimaciones de FS entre 0.491 y 0.604 lo cual presenta un riesgo los habitantes de la zona. Si bien es cierto los riesgos que amenazan a los habitantes e infraestructuras no se da porque exista una pendiente fuerte en los taludes (mayor al 25-30%), sino más bien viene dada por las características o propiedades geotécnicas bajas de los suelos superficiales existentes en el sector los cuales se encuentran fracturados y sueltos cuyos pesos específicos varían entre 15.51 y 16.86 KN/m³, así como su cohesión entre 18.74 y 20.06 KPa y su fricción oscilante entre 3.7 y 4.71°.

Finalmente, los modelos 3D construidos permitieron conocer el comportamiento global de toda la masa del subsuelo de la zona. Por lo que se concluye que el suelo de estudio posee debilidades geofísicas como la presencia de discordancias verticales en la distribución de los estratos; lo que carrerea malas capacidades geotécnicas, convirtiéndola en una zona no apta para el hábitat y construcción. Estudiadas las características geológicas y geofísicas del terreno, este no es apto para cimentaciones superficiales, de acuerdo con lo señalado en el presente documento.



7.2. Limitaciones del estudio

Al ser métodos indirectos los valores obtenidos en la presente investigación pueden tener variación con los valores reales en porcentajes menores al 20%.

A razón de tiempo y disponibilidad de espacio en la zona el estudio la información geofísica se levantó en donde fue posible realizar el tendido de los perfiles, para una mejor definición se debiera trazar una malla en planta con los perfiles para obtener datos más confiables minimizando la interpolación de estos.

7.3. Recomendaciones

Se recomienda generalmente construcciones de muro de contención, sin embargo, en este caso no es así puesto que el plano de falla se encuentra entre los 7 y 18 m de profundidad en ciertas áreas de la zona, por lo que hacer un movimiento de tierras y construcción de muros de contención significaría costos excesivamente elevados frente a los posibles beneficios. No obstante, para brindar una solución al movimiento activo presente, se sugiere realizar trabajos de impermeabilización y drenaje superficial, a fin de evitar la infiltración del agua en las capas superficiales hasta que llegue a la capa arcillosa de confinamiento, en donde llega a producirse un “efecto jabón” (deslizamiento).

Al no ser una zona apta para asentamientos de cualquier tipo de infraestructura con cimentaciones superficiales se recomienda por seguridad definir como zona protegida, reforestar como área verde y construir infraestructuras simples tales como parques recreativos, en donde el movimiento no afecta a la inversión.

Todos los GAD municipales deberían exigir y controlar estrictamente un diseño y construcción técnica para la ejecución de viviendas de 2 plantas en adelante y que excedan al menos los 200 m² de construcción.

Se debe fomentar un mayor control y socialización a nivel de GAD provinciales, municipales y parroquiales a nivel nacional con la ciudadanía, para evitar así que la gente construya en zonas peligrosas y colaborar de esta manera con Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, para que en un futuro no haya un enfoque en dar respuesta y corregir un problema de este tipo, al contrario, únicamente realizar controles rutinarios a estas zonas de peligro para asentamientos humanos.

Debido a las características geotécnicas del suelo encontrado, es un material suelto por tal razón si se fuera a realizar excavaciones deberán preverse el sostenimiento para seguridad de los trabajadores.

Se debería implementar esta rama en la malla curricular de la carrera de ingeniería civil y que así los estudiantes puedan ir conociendo y comparando los métodos geofísicos y geotécnicos y así definir sus ventajas y desventajas en los diferentes campos de aplicación y dependiendo el tipo de proyecto.



8 BIBLIOGRAFÍA

Araujo, G., & Cárdenas, V. (2016). *Análisis de fisuras y grietas en pavimentos rígidos mediante resistividad eléctrica*. Universidad de Cuenca, Cuenca - Ecuador.

Avilés, J., & Barzallo, B. (2016). *Caracterización de suelos del Centro Histórico de la ciudad de Cuenca mediante métodos Geofísicos*. Universidad de Cuenca, Cuenca - Ecuador.

Basabe, P., Neumann, A., Almeida, E., Herrera, B., & García, E. (1998). *Prevención de desastres naturales en la Cuenca del Paute–Informe final: Proyecto Precupa*.

Brabb, E. E., & Harrod, B. L. (Eds.). (1989). *Landslides: Extent and economic significance: Proceedings 28th International Geological Congress Symposium on Landslides*. Recuperado de <http://pubs.er.usgs.gov/publication/70197547>

Chelotti, L., Acosta, N., & Foster, M. (2009). *La biblia de la Geofísica*. 308.

Cintas, S. R. (2013). *Estudio y optimización de técnicas basadas en ruido ambiente para la caracterización del terreno: Aplicación en el SE de la Península Ibérica*. 243.

Código Ecuatoriano de la Construcción. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción, cargas sísmicas - diseño sismo resistente*. Recuperado de <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>

Comisión Nacional del Agua. (2009). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Alcantarillado Sanitario*.

Correia, N. A. (2015). *Obtención del perfil de velocidad de onda de corte mediante método MASW y comparación con ensayo tipo Downhole en estaciones sismológicas de zona central*. 163.

Das, B. M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México D.F: México.

Das, B. M. (2011). *Principles of foundation engineering*. Stamford, Conn.: Cengage Learning.

deGroot-Hedlin, C., & Constable, S. (1990). *Occam's Inversion to generate smoothed, two-dimensional models for magnetotelluric data*. *Geophysics*, 55(1990), 1613-1624.

FENEFEDIT. (2014). *Ecuador - Un destino incluyente*. Retrieved from <http://turismoaccesible.ec>.

GEO&GEO CIA LTDA. (2017). *Especificaciones técnicas geofísica GEO&GEO CIA.LTDA*.

GESTION DE RIESGOS. (2015). *Informe técnico del estado actual de la urbanización: "Trigales Altos"*.

Jaimes, D. (2011). *Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos*. Universidad Industrial de Santander, BUCARAMANGA-COLOMBIA.

Lazcano, S. (2007). *Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie*.

Lopez, J., Mejía, J. A., & Vega, N. D. (2008). *Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P*. 363.



Loke, M., & Barker, R. (1996a). Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophys. Prospect.*, 44(1996), 499-523.

Manilla, A. (2003). *Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil*. Sanfandila.

Matteis, A. (2003). *Geología y Geotecnia - Estabilidad de taludes*. Universidad Nacional de Rosario.

Mercedes, G., & Montenegro, L. (2005). Mercedes, G., & Montenegro, L. (2005). *Introducción y Aplicación del método de sismica de microtremores en áreas urbanas*. Universidad Simón Bolívar Ingeniería Geofísica.

Samaniego, I. (2018). *Caracterización de la tipología y cinemática del deslizamiento de la urbanización Trigales Altos, Cuenca, a partir de fotografías aéreas, estación total, escáner láser terrestre y ensayos geotécnicos del suelo*. Universidad de Cuenca, Cuenca - Ecuador.

Soeters, R. & Van Westen, C.J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. En: A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds) *Landslides Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, DC, USA. 129-177.

Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga - Colombia.

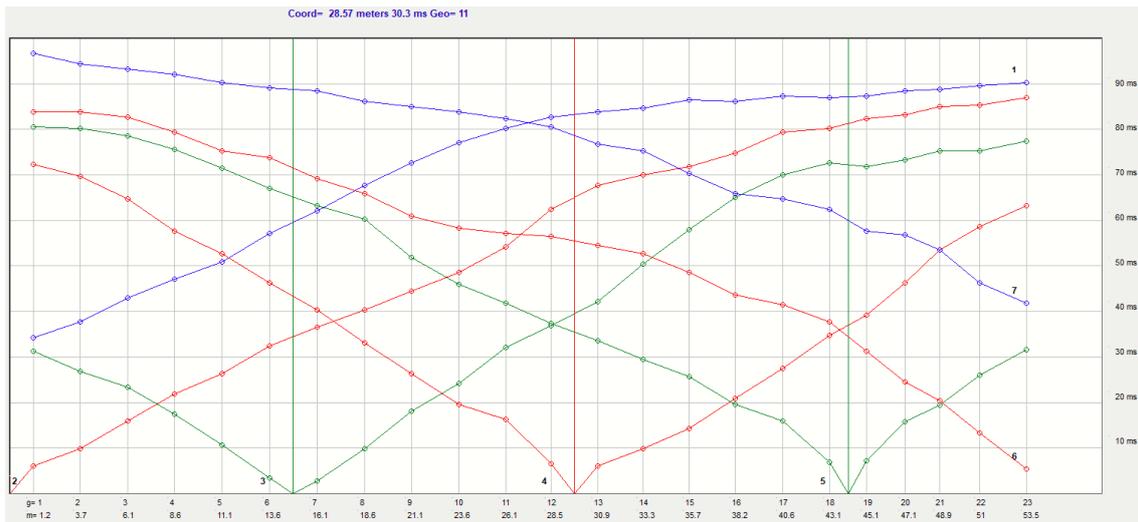
Suarez, J. (2009). *Deslizamientos Vol I Análisis Geotécnico*.

TECNOSUELOS CIA LTDA. (2006). *Estudio, perforaciones y resistividad eléctrica en la ciudadela Los Trigales Alto y zonas aledañas*.

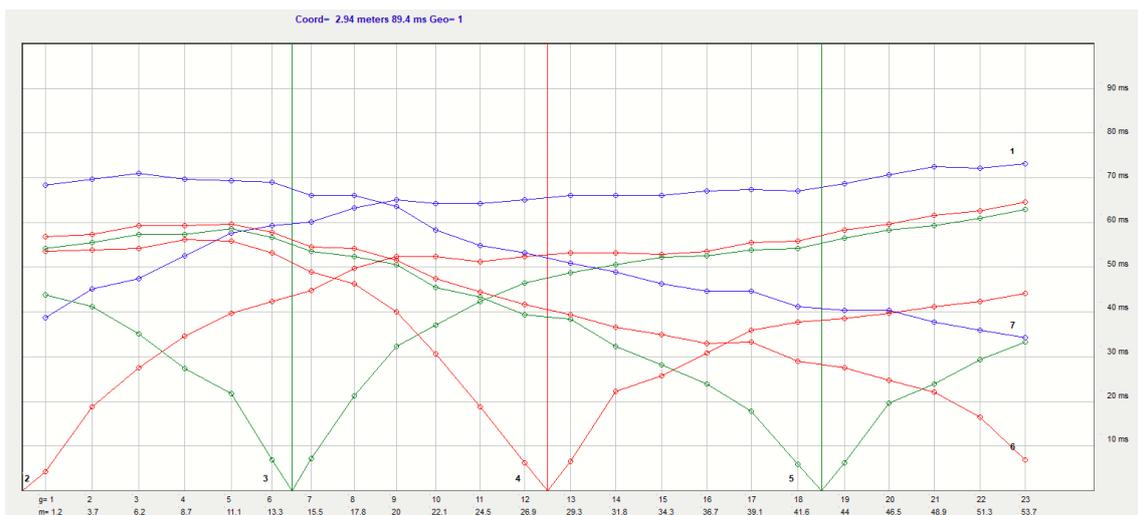
9 ANEXOS

9.1. DROMOCRONAS

LS-1-1

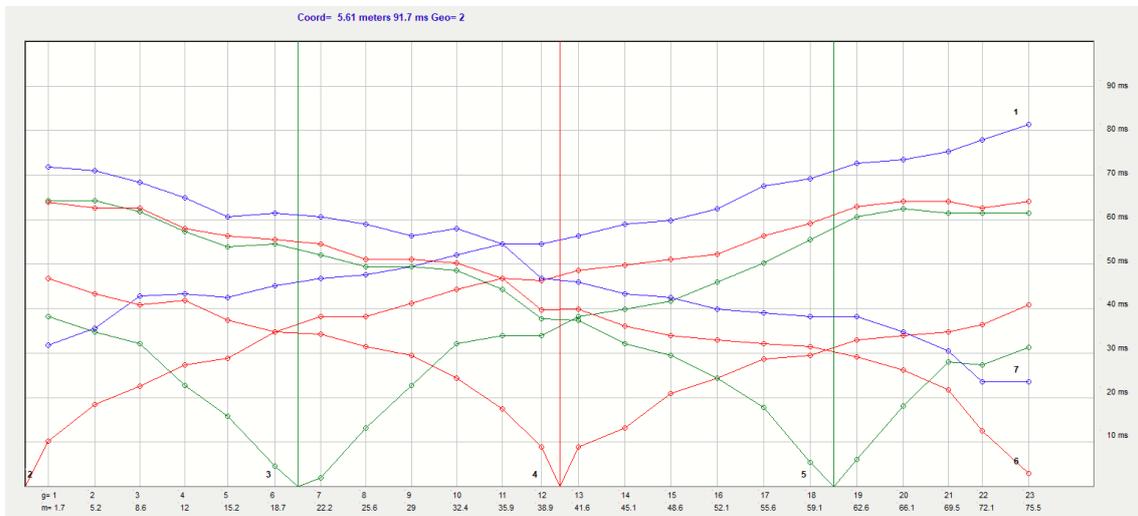


LS-1-2

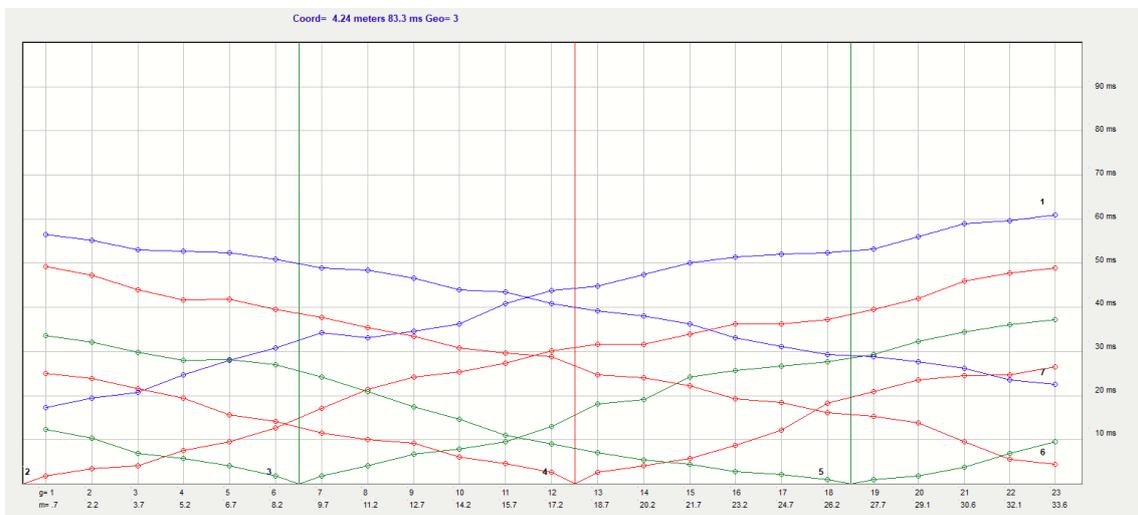




LS-2

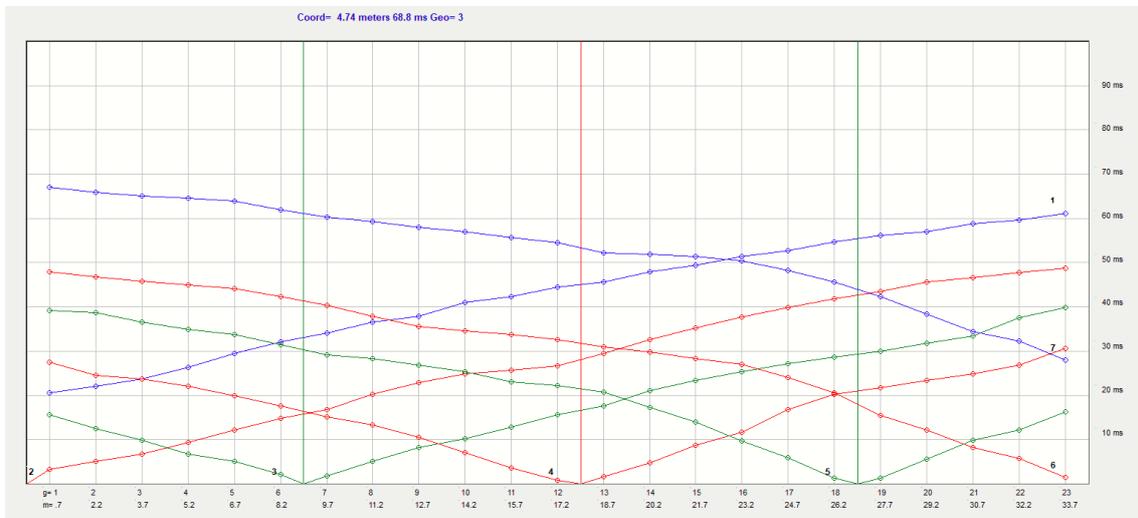


LMS-1

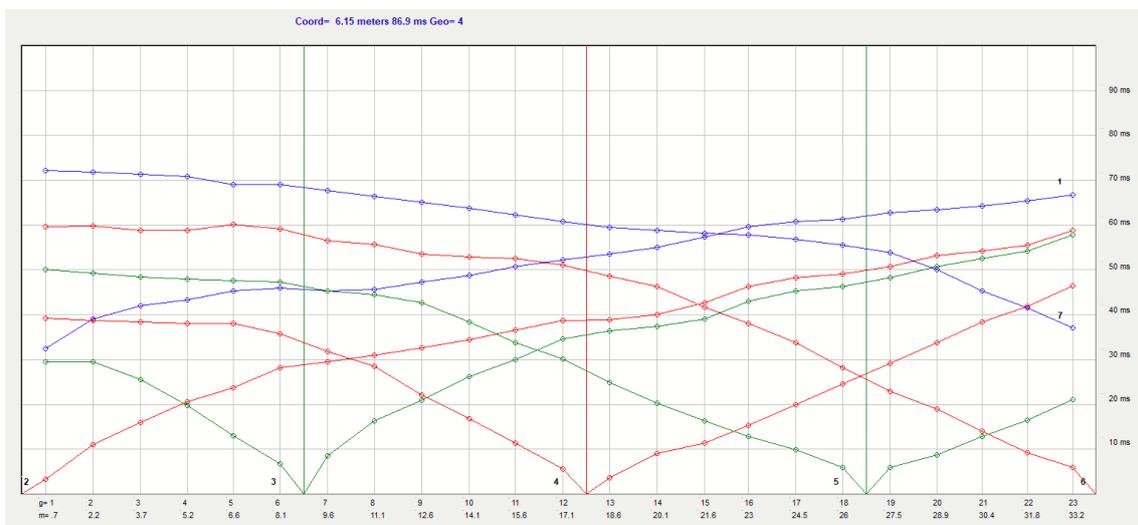




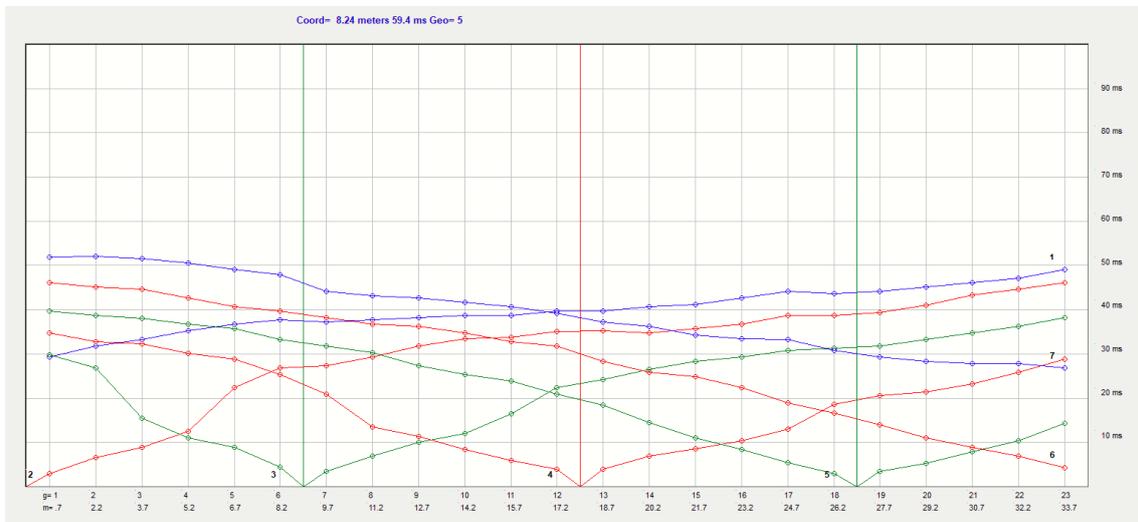
LMS-2



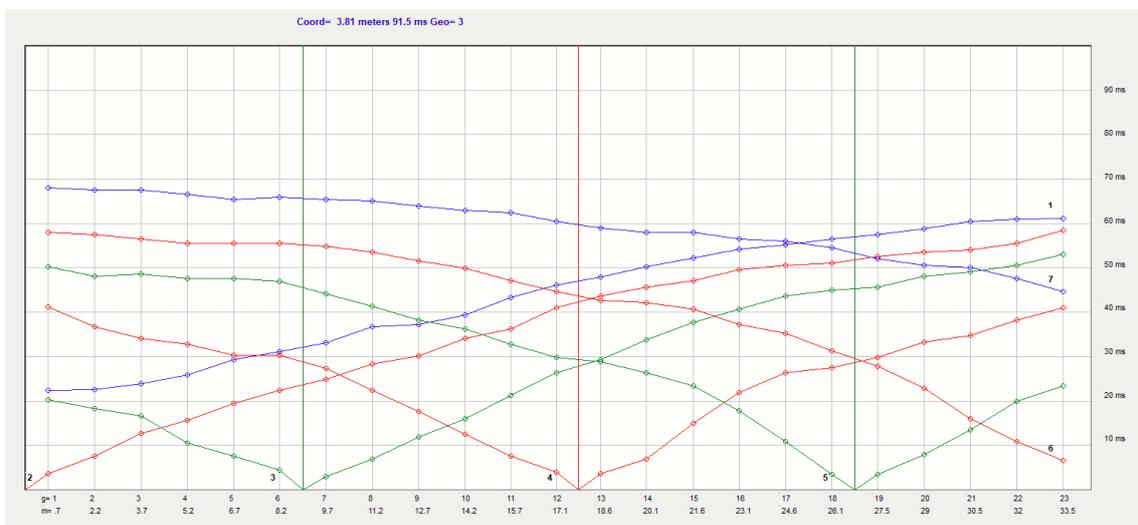
LMS-3



LMS-4

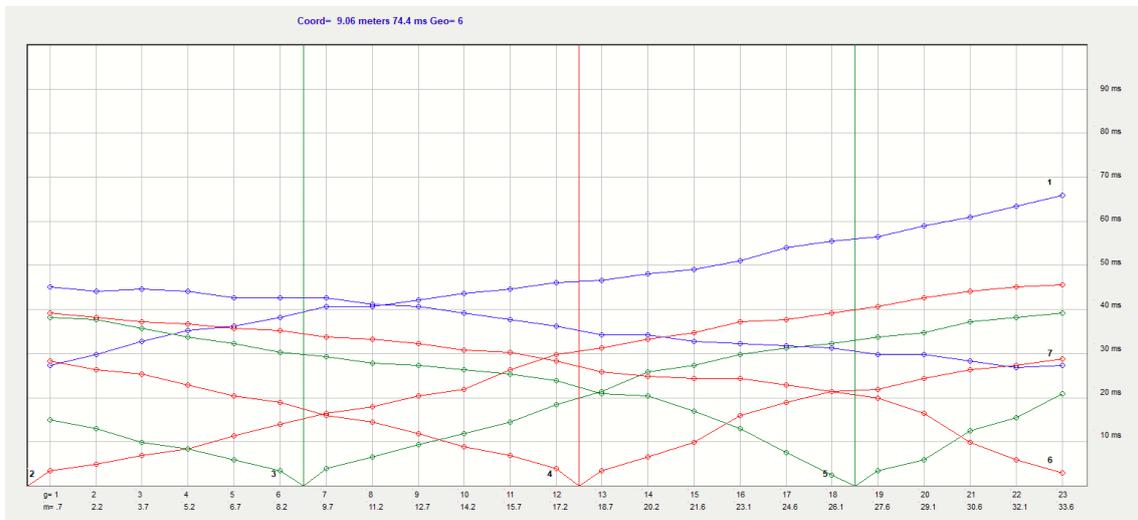


LMS-5

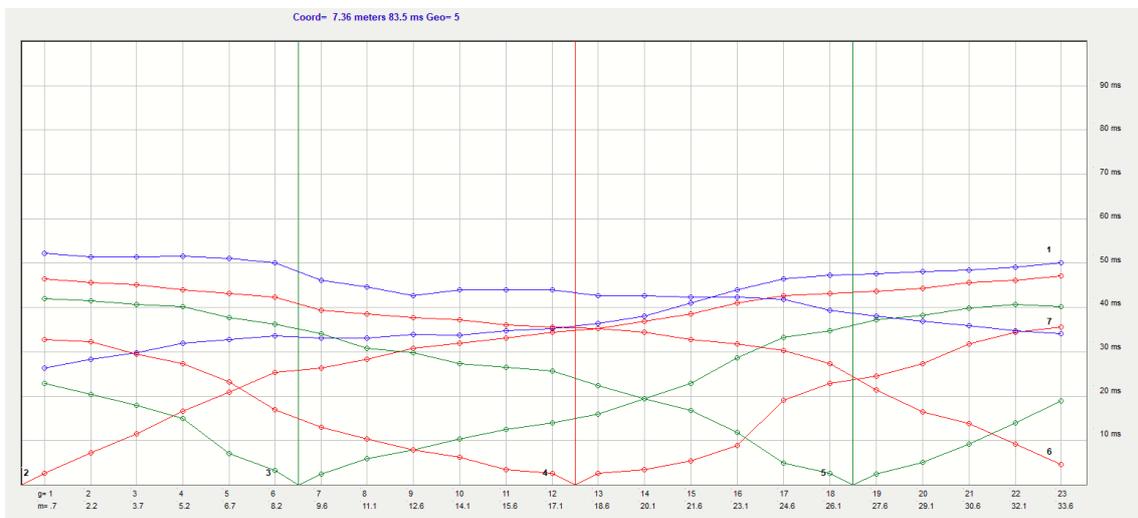




LMS-6

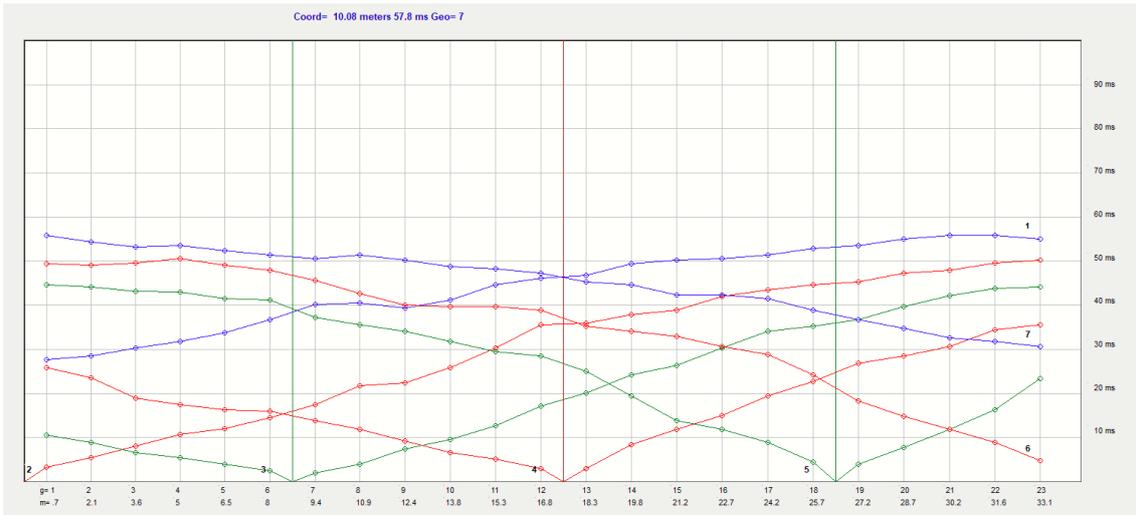


LMS-7

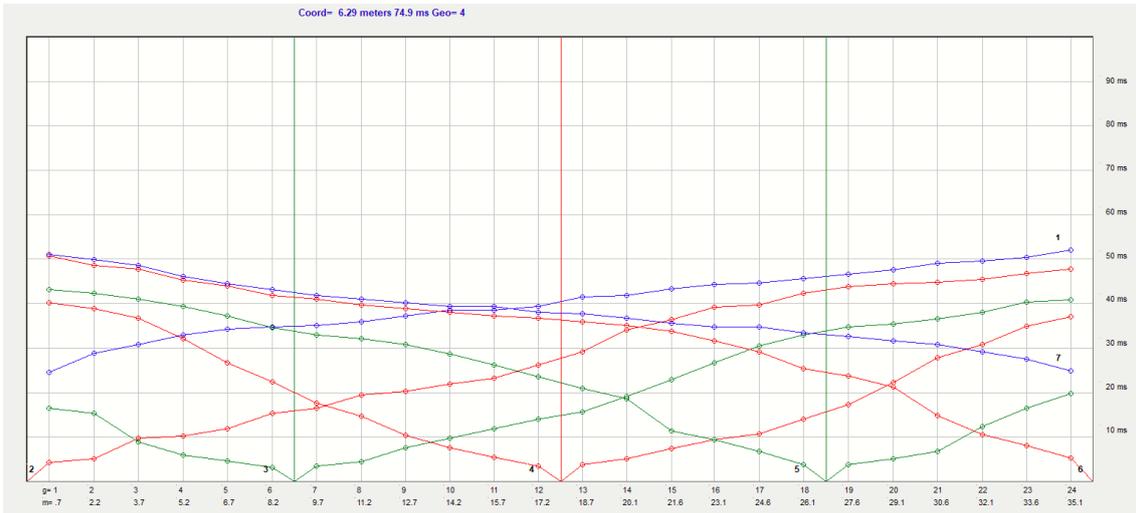




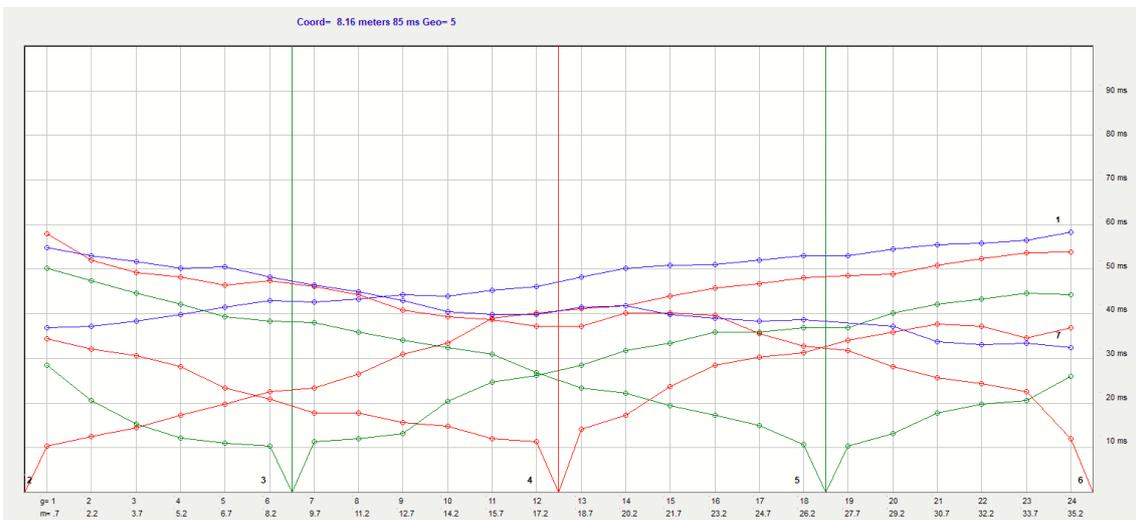
LMS-8



LMS-9

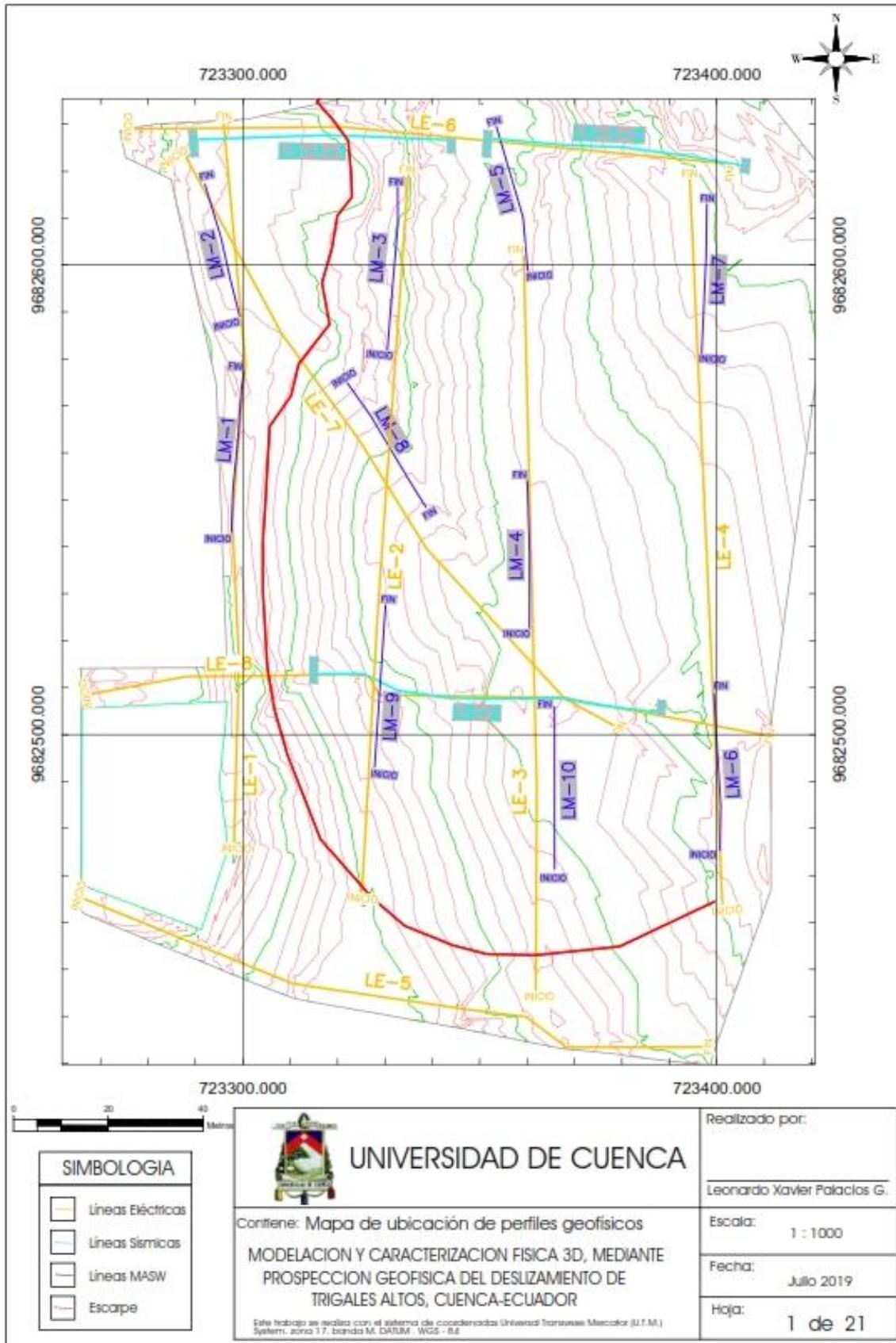


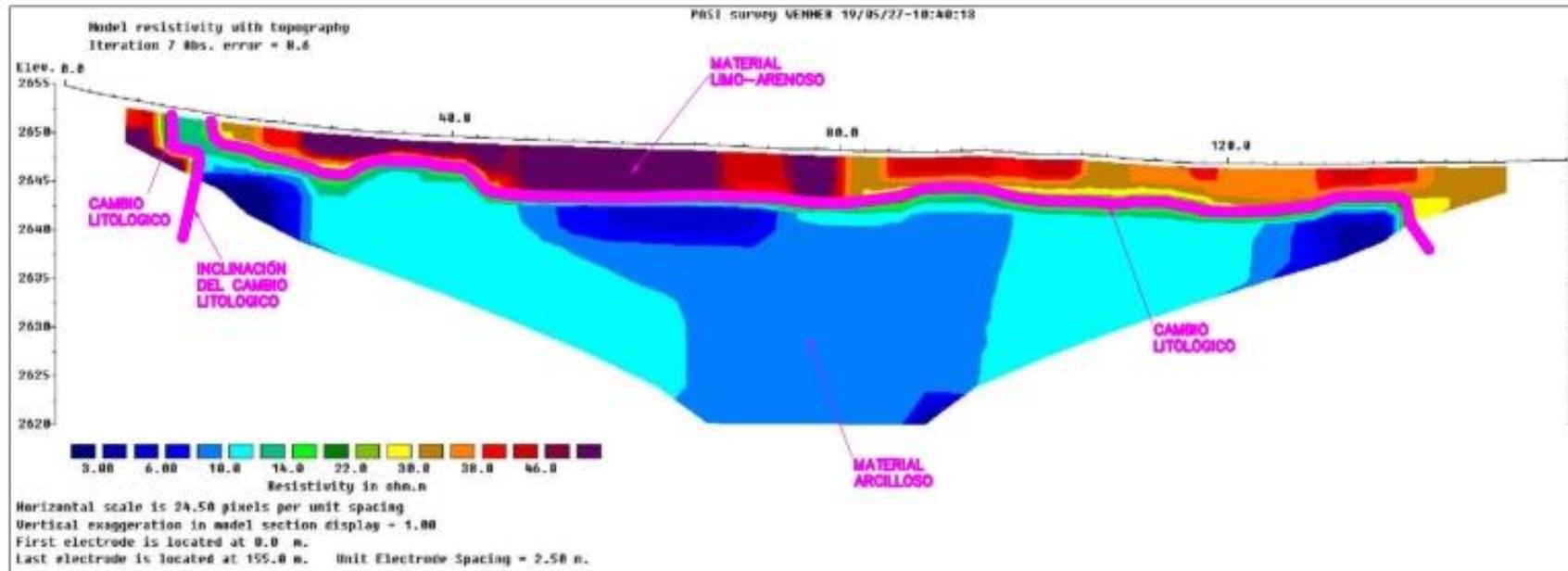
LMS-10





9.2. PERFILES GEOFISICOS (Resistividad eléctrica, sísmica de refracción, MASW)

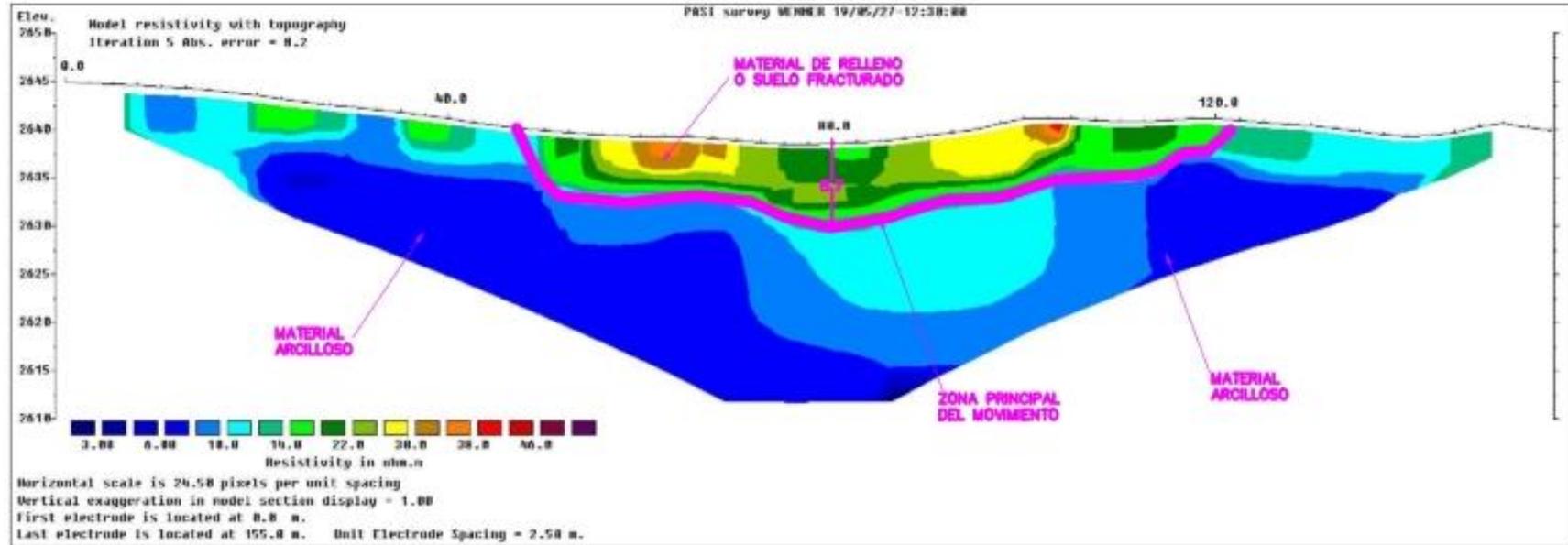




TOMOGRAFIA ELECTRICA LE-1



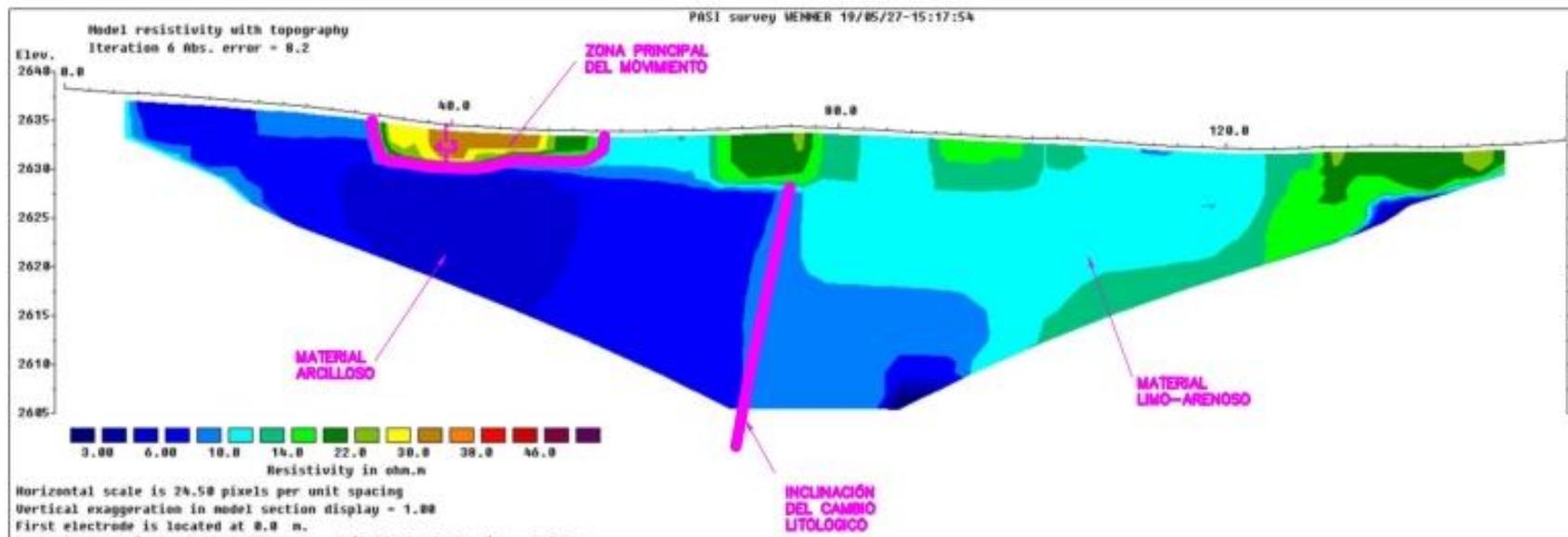
 <p>UNIVERSIDAD DE CUENCA</p>	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
Contiene: Tomografía Eléctrica LE-1	Escala: 1 : 000
MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR	Fecha: Julio 2019
Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84	Hoja: 2 de 21



TOMOGRAFIA ELECTRICA LE-2



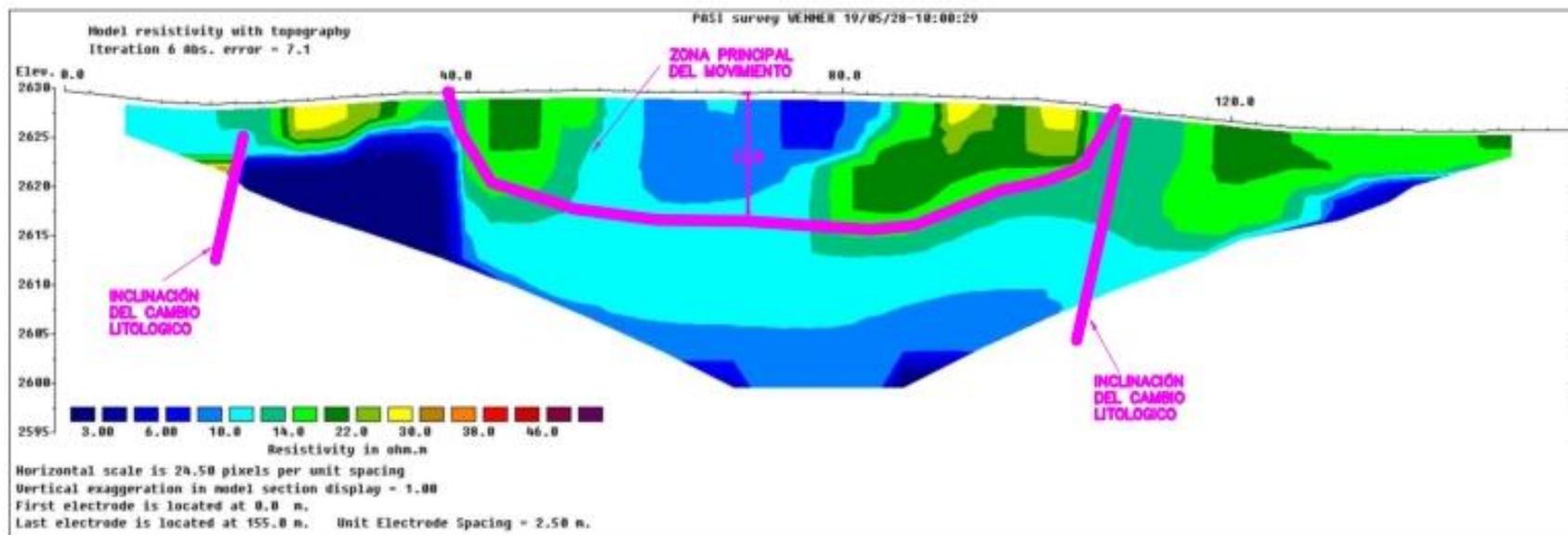
 UNIVERSIDAD DE CUENCA	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
Contiene: Tomografía Eléctrica LE-2 MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR	Escala: 1 : 000 Fecha: Julio 2019 Hoja: 3 de 21
<small>Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	



TOMOGRFIA ELECTRICA LE-3



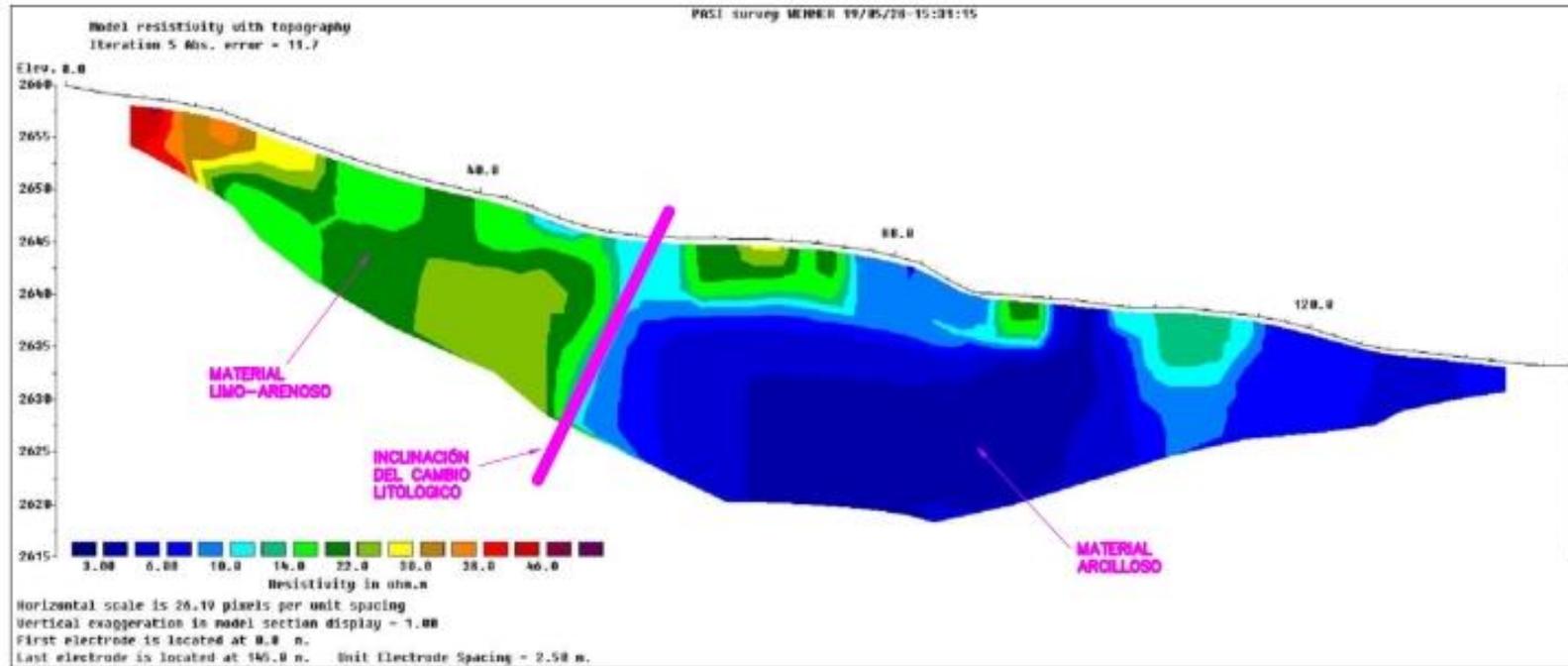
 <p>UNIVERSIDAD DE CUENCA</p>	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
Contiene: Tomografía Eléctrica LE-3	Escala: 1 : 000
MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR	Fecha: Julio 2019
<small>Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	Hoja: 4 de 21



TOMOGRFIA ELECTRICA LE-4



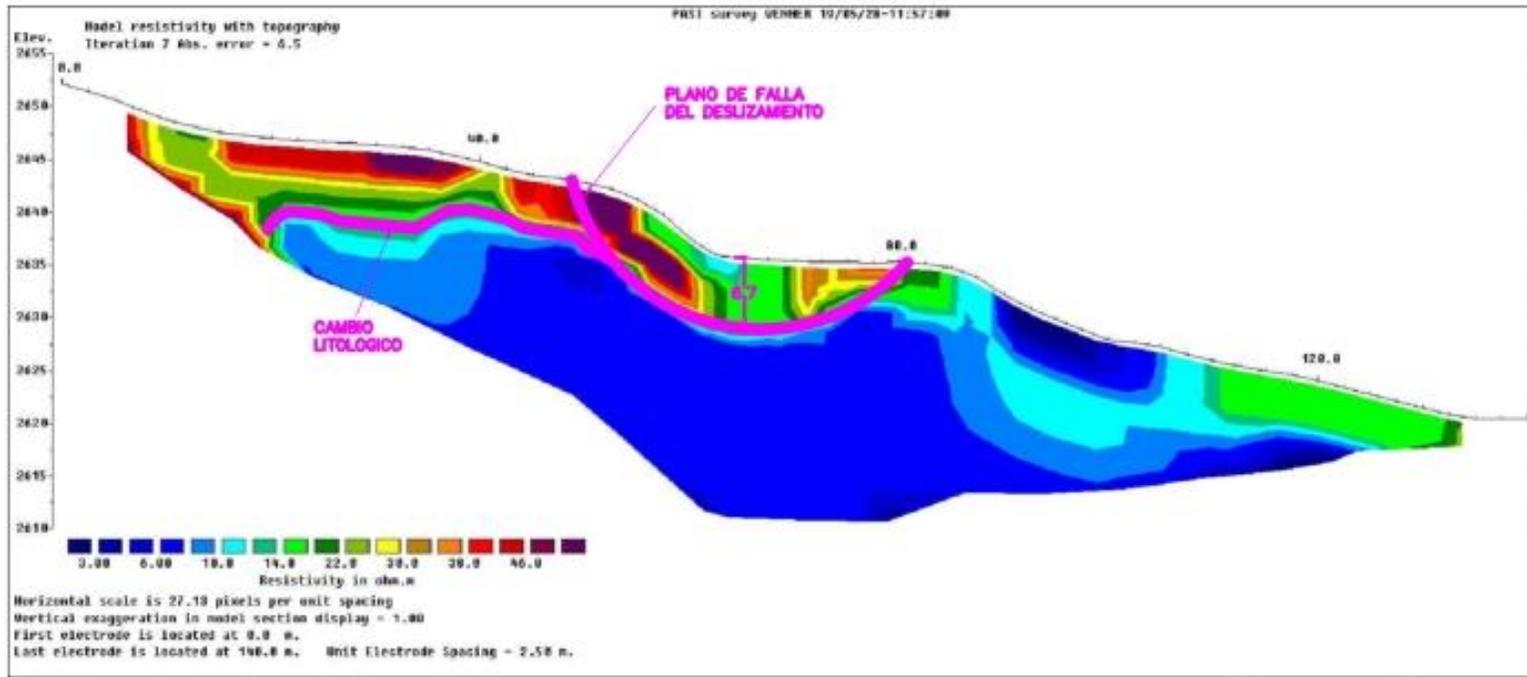
 <p>UNIVERSIDAD DE CUENCA</p>	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
Contiene: Tomografía Eléctrica LE-4	Escala: 1 : 600
MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR	Fecha: Julio 2019
<small>Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universidad Toruave-Mexico (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	Hoja: 5 de 21



TOMOGRFIA ELECTRICA LE-5



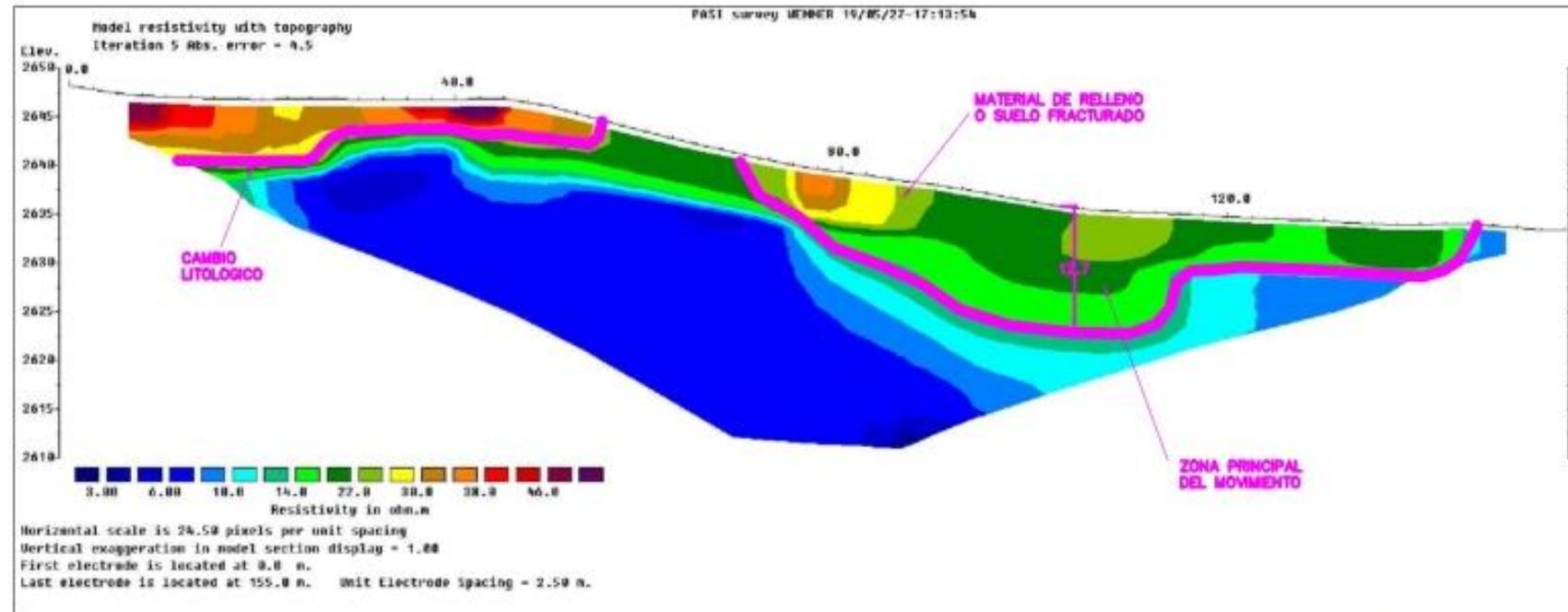
 <p>UNIVERSIDAD DE CUENCA</p>	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
Contiene: Tomografía Eléctrica LE-5 MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR <small>Este trabajo se realiza con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	Escala: 1 : 000
	Fecha: Julio 2019
	Hoja: 6 de 21



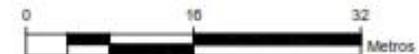
TOMOGRAFIA ELECTRICA LE-6



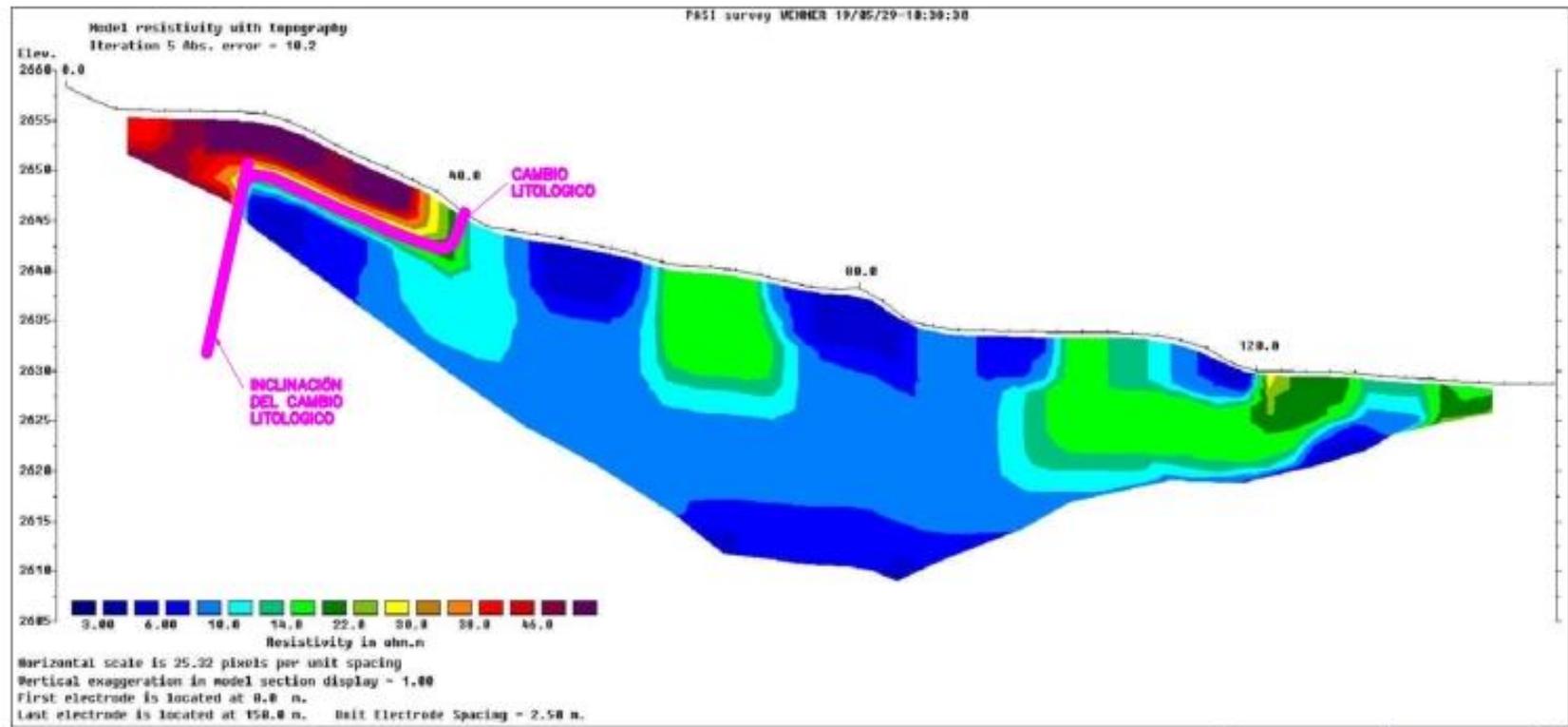
 <p>UNIVERSIDAD DE CUENCA</p>	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
Contiene: Tomografía Eléctrica LE-6 MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR <small>Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transversa Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	Escala: 1 : 000
	Fecha: Julio 2019
	Hoja: 7 de 21



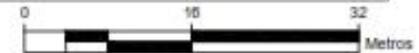
TOMOGRAFIA ELECTRICA LE-7



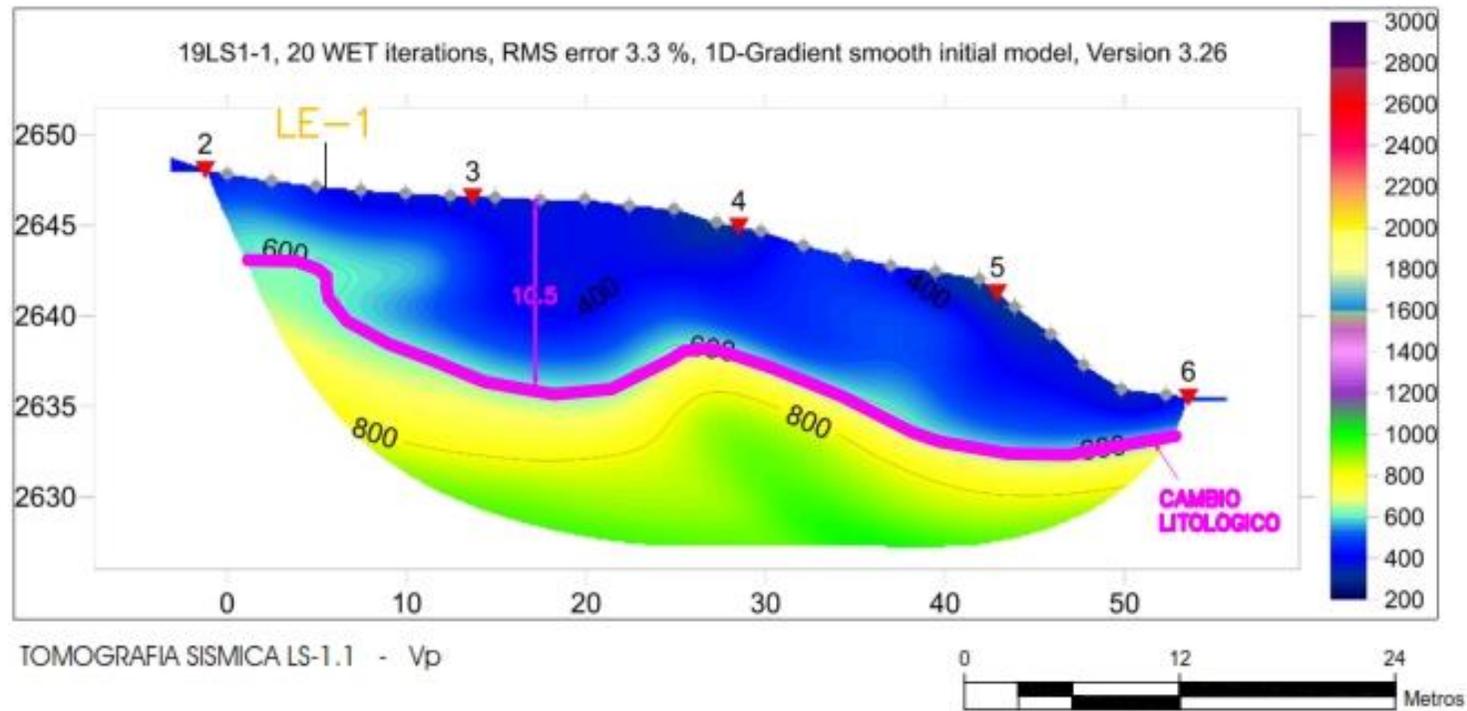
 <p>UNIVERSIDAD DE CUENCA</p>	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
Contiene: Tomografía Eléctrica LE-7 MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR <small>Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	Escala: 1 : 000
	Fecha: Julio 2019
	Hoja: 8 de 21



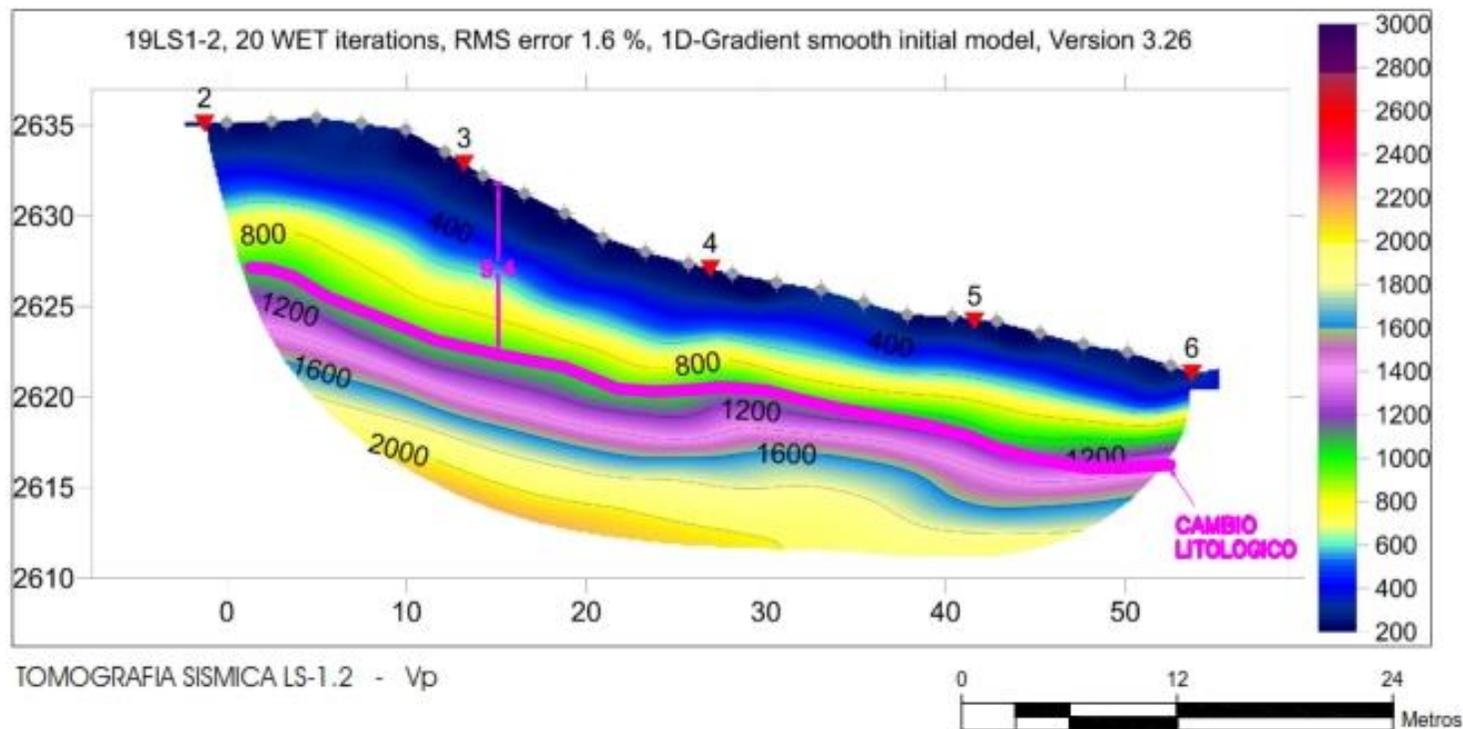
TOMOGRAFIA ELECTRICA LE-8



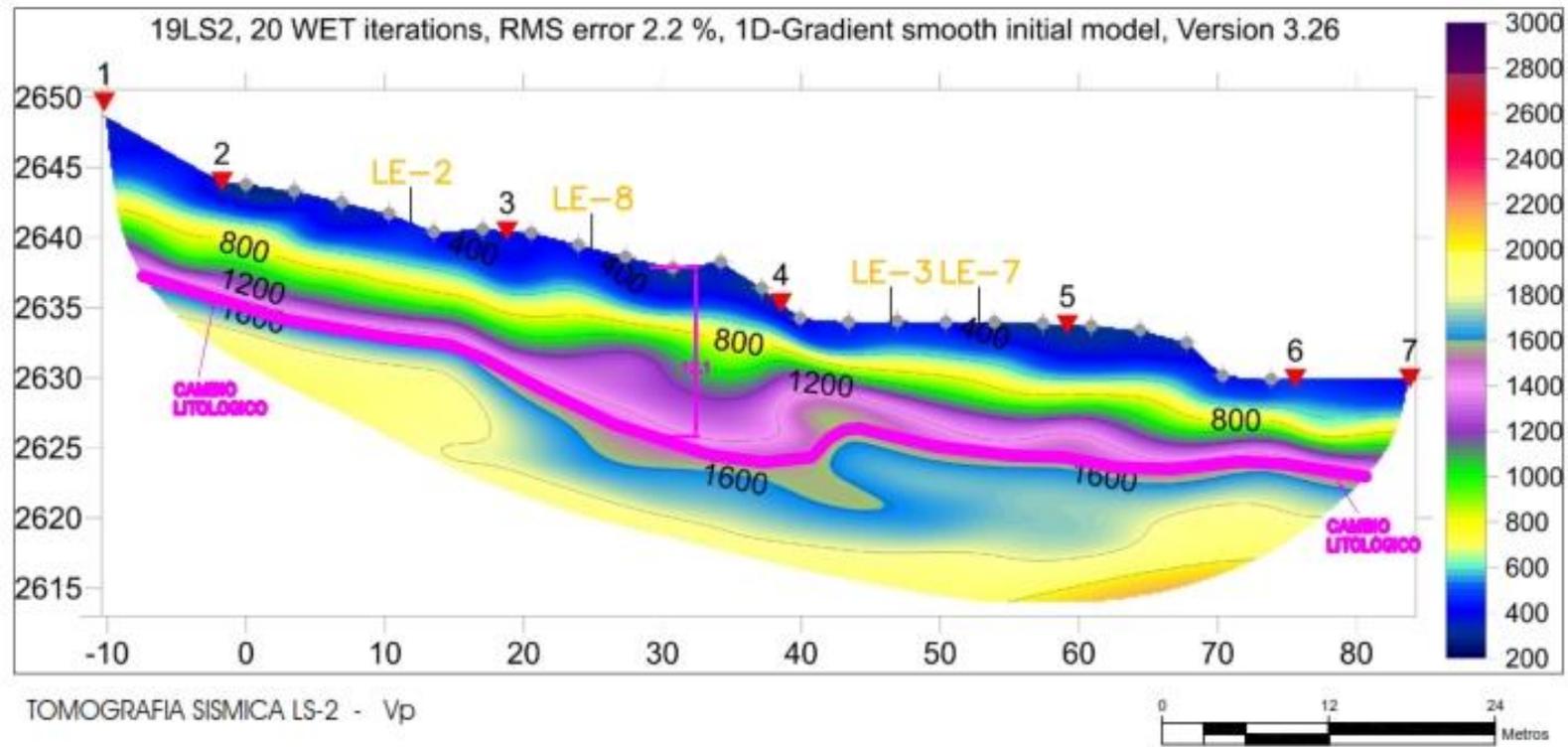
 <p>UNIVERSIDAD DE CUENCA</p>	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
Contiene: Tomografía Eléctrica LE-8 MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR <small>Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	Escala: 1 : 000 Fecha: Julio 2019 Hoja: 9 de 21



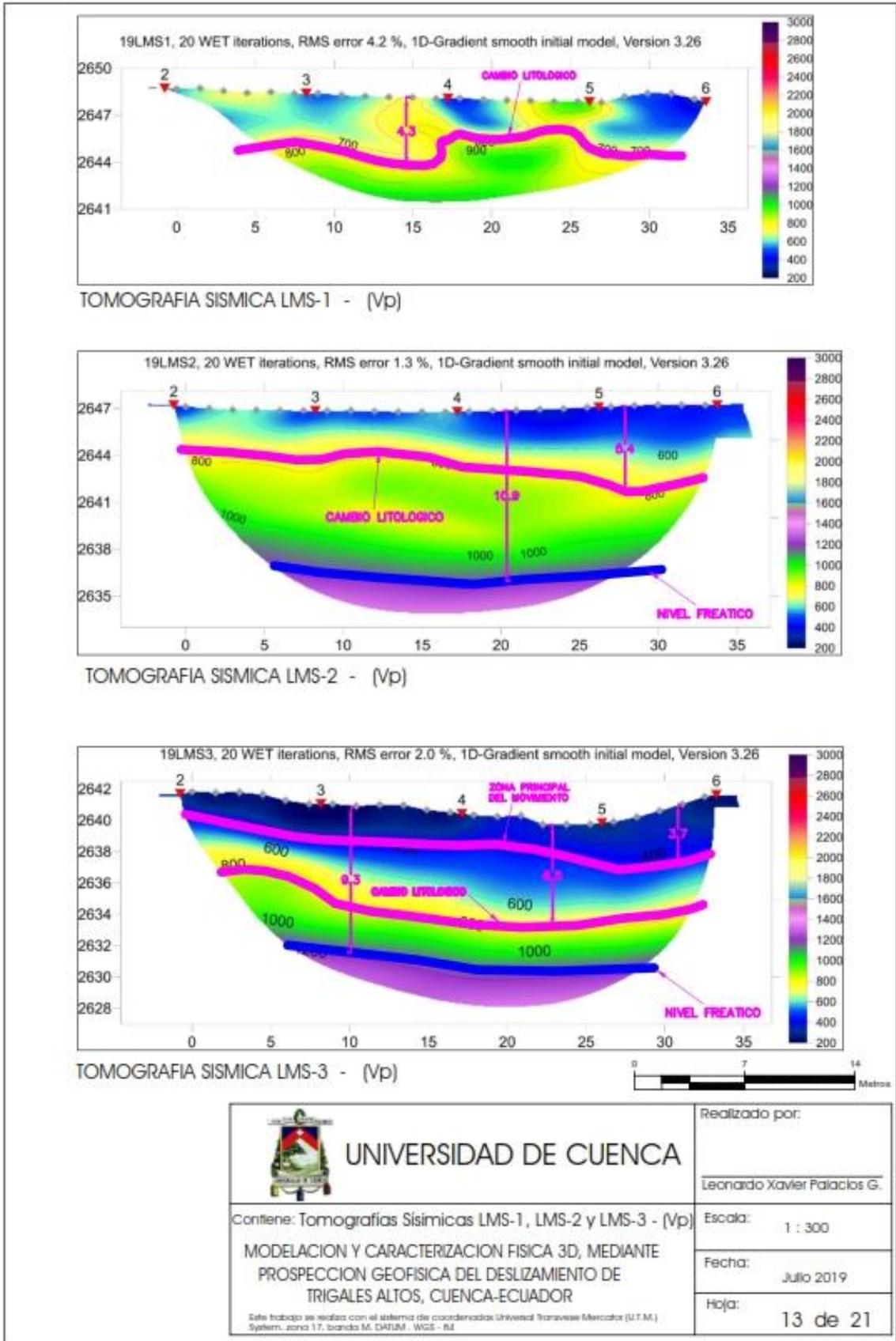
 UNIVERSIDAD DE CUENCA	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
	Escala: 1 : 350
	Fecha: Julio 2019
Contiene: Tomografía Sísmica LS-1.1 - Vp MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR <small>Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transversa Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	Hoja: 10 de 21

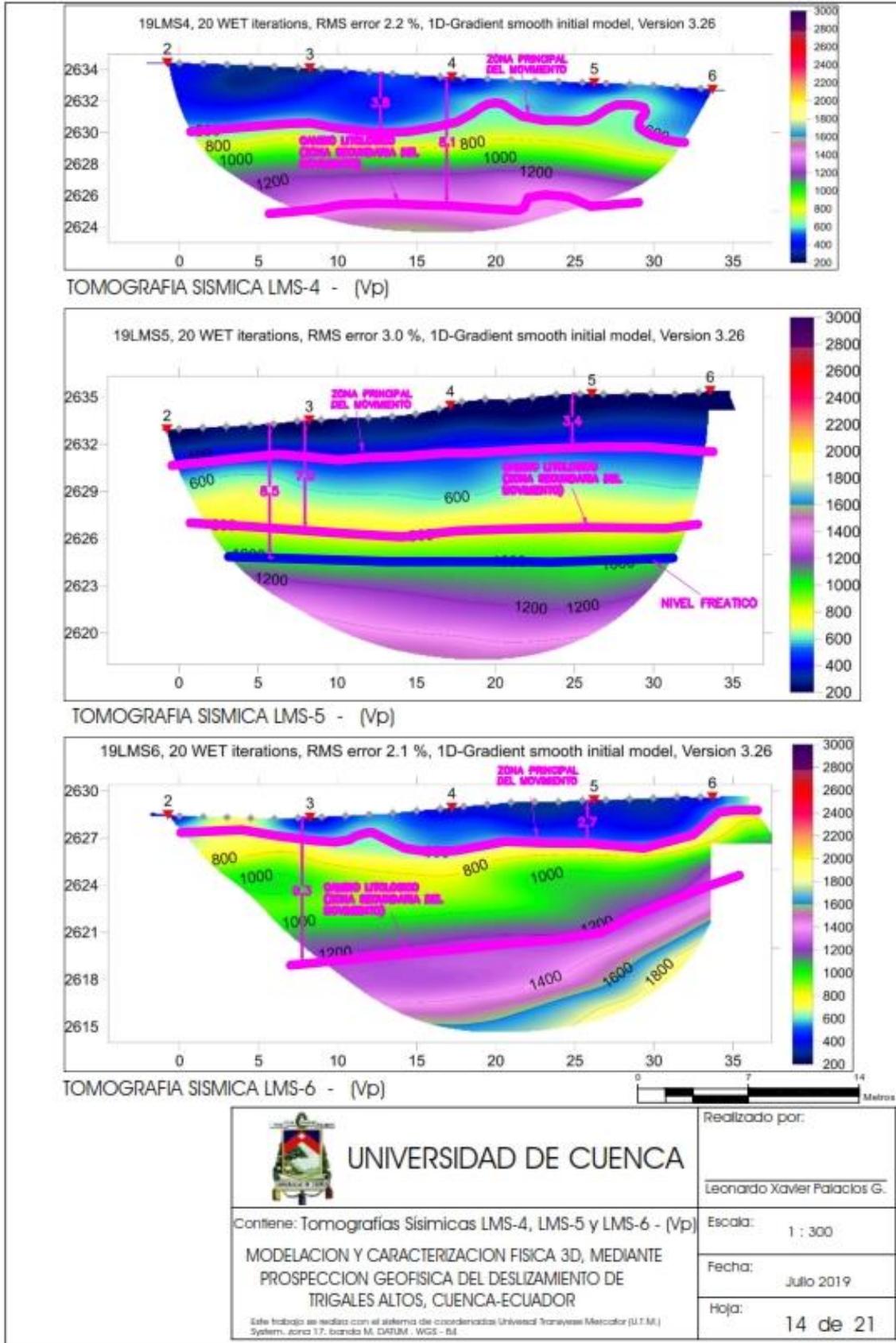


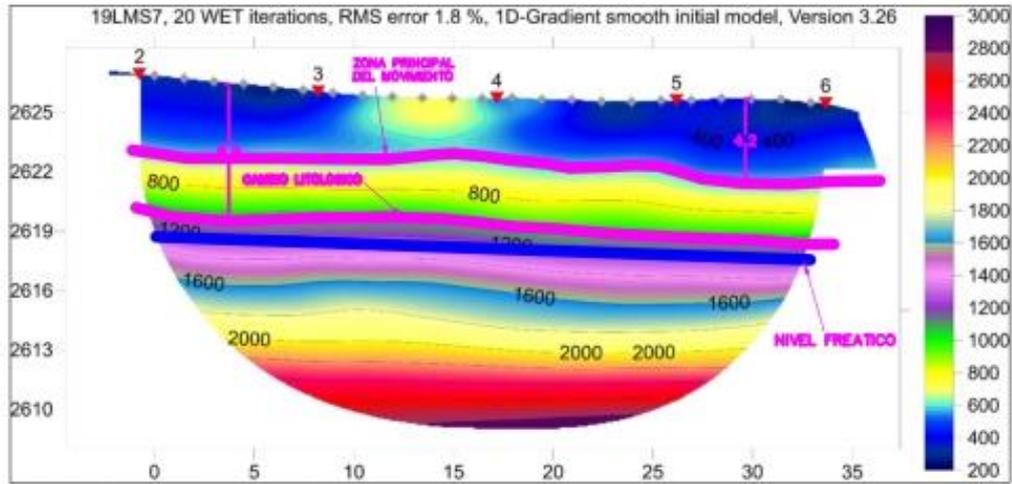
 UNIVERSIDAD DE CUENCA	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
	Escala: 1 : 350
	Fecha: Julio 2019
Contiene: Tomografía Sísmica LS-1.2 - Vp MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR	Hoja: 11 de 21
<small>Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transversa Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	



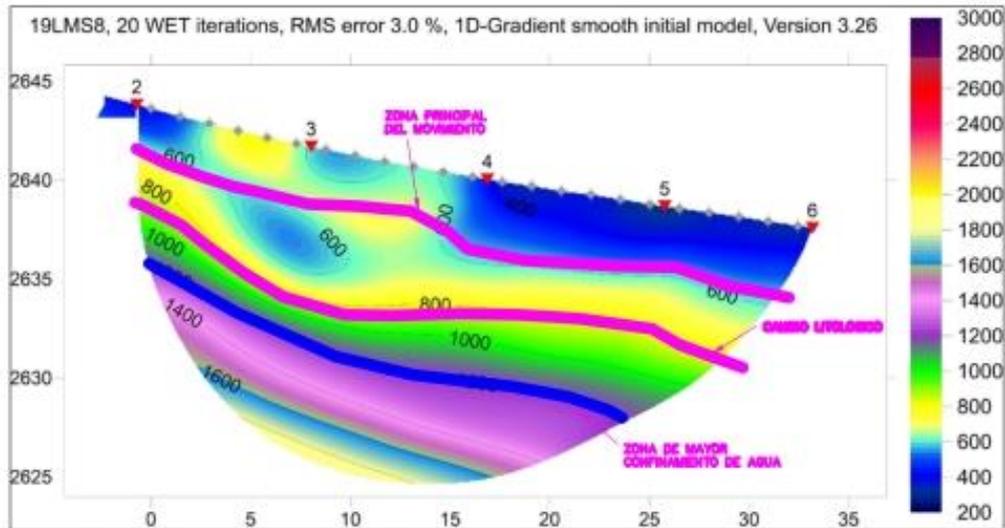
 UNIVERSIDAD DE CUENCA	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
	Escala: 1 : 450
	Fecha: Julio 2019
Contiene: Tomografía Sísmica LS-2 - Vp MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR <small>Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transversa Mercator (UTM), System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	Hoja: 12 de 21







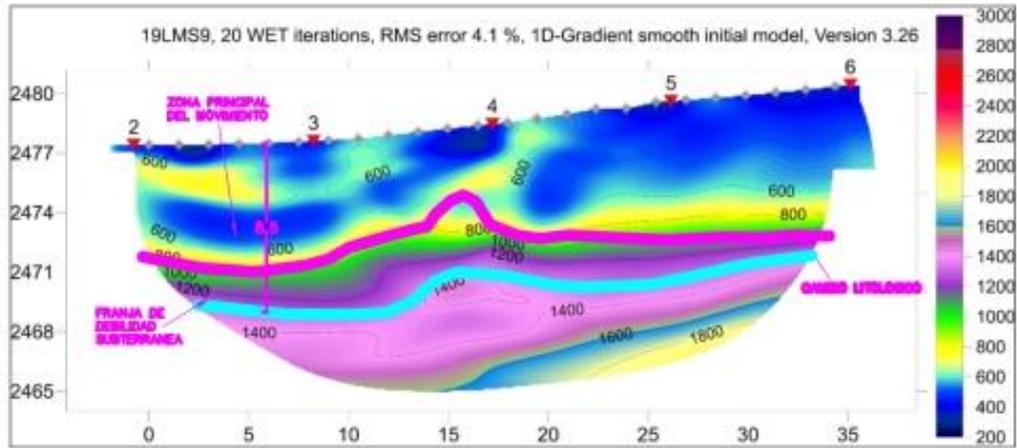
TOMOGRFIA SISMICA LMS-7 - (Vp)



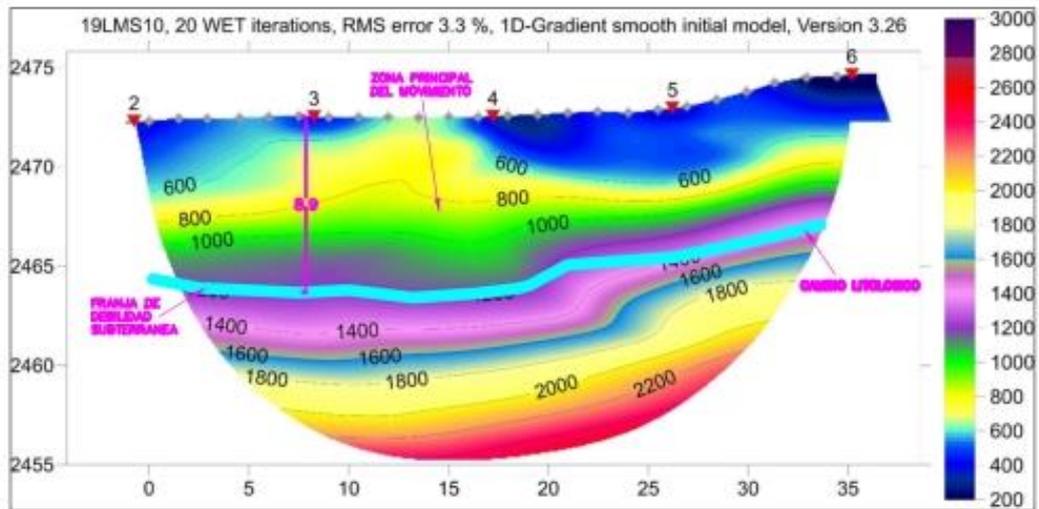
TOMOGRFIA SISMICA LMS-8 - (Vp)



 UNIVERSIDAD DE CUENCA	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
	Escala: 1 : 300
	Fecha: Julio 2019
Contiene: Tomografías Sísmicas LMS-7 y LMS-8 - (Vp) MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR <small>Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	Hoja: 15 de 21



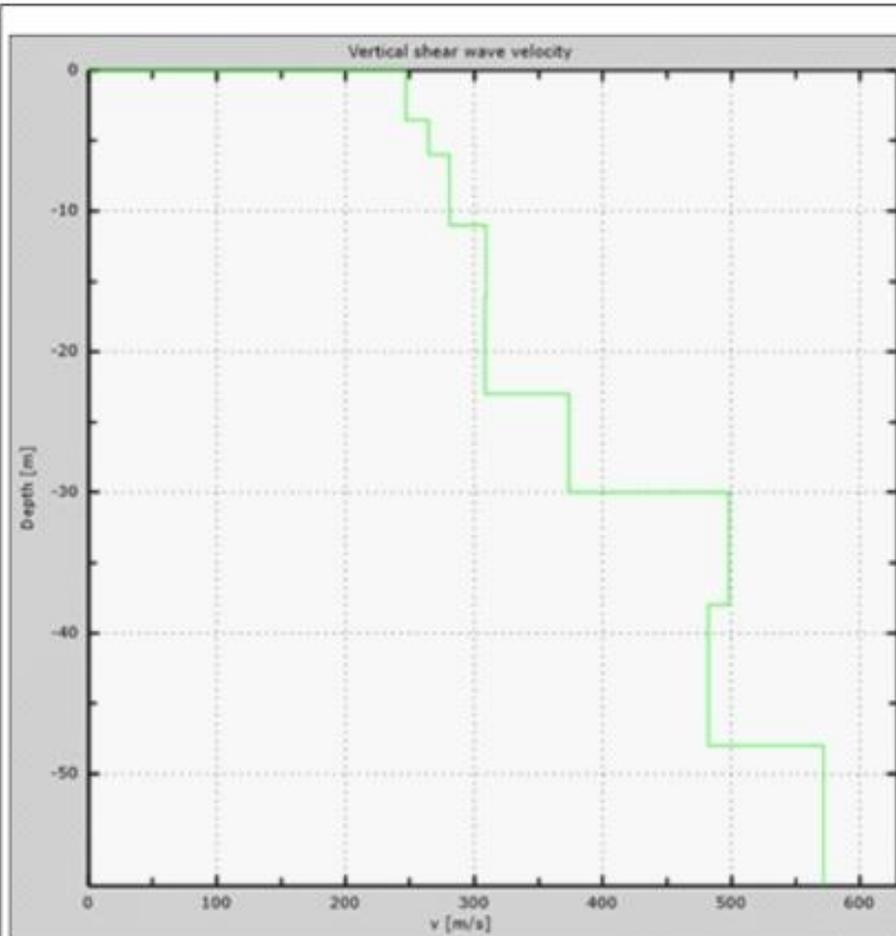
TOMOGRAFIA SISMICA LMS-9 - (Vp)



TOMOGRAFIA SISMICA LMS-10 - (Vp)

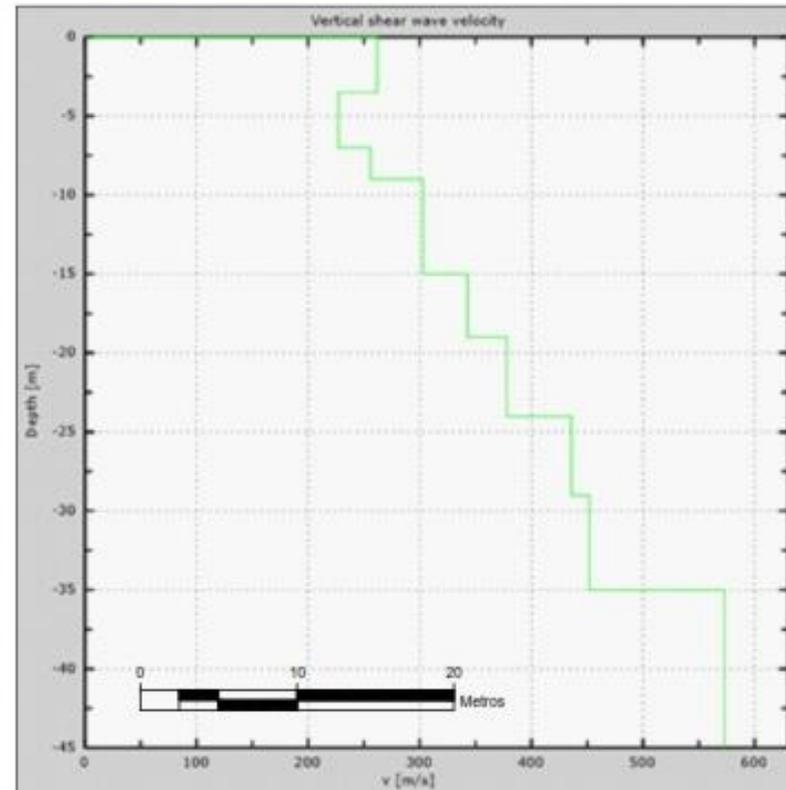


 UNIVERSIDAD DE CUENCA	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
	Escala: 1 : 300
	Fecha: Julio 2019
Contiene: Tomografías Sísmicas LMS-9 y LMS-10 - (Vp) MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR <small>Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universidad Transverse Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	Hoja: 16 de 21



PERFIL MASW LM-2 - (Vs)

Esc: 1:400



PERFIL MASW LM-1 - (Vs)

Esc: 1:400



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Realizado por:

Leonardo Xavier Palacios G.

Contiene: Perfiles MASW LM-1 y LM-2 - (Vs)

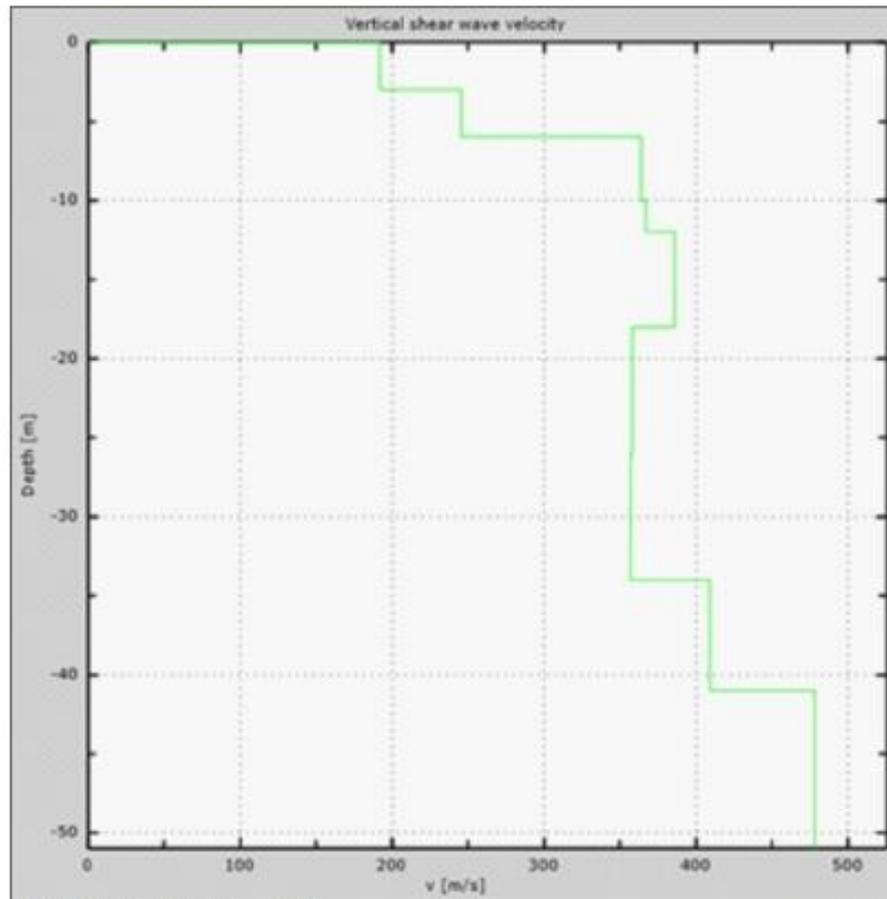
Escala: Indicadas

MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR

Fecha: Julio 2019

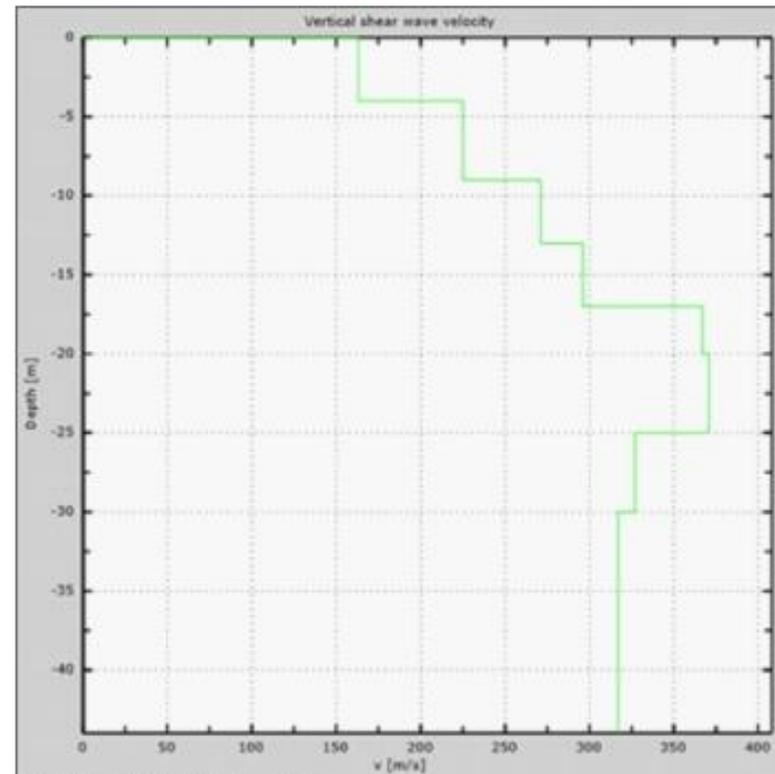
Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transversa Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84.

Hoja: 17 de 21



PERFIL MASW LM-3 - (Vs)

Esc: 1:400



PERFIL MASW LM-4 - (Vs)

Esc: 1:400



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Contiene: Perfiles MASW LM-3 y LM-4 - (Vs)

MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR

Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transversa Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84

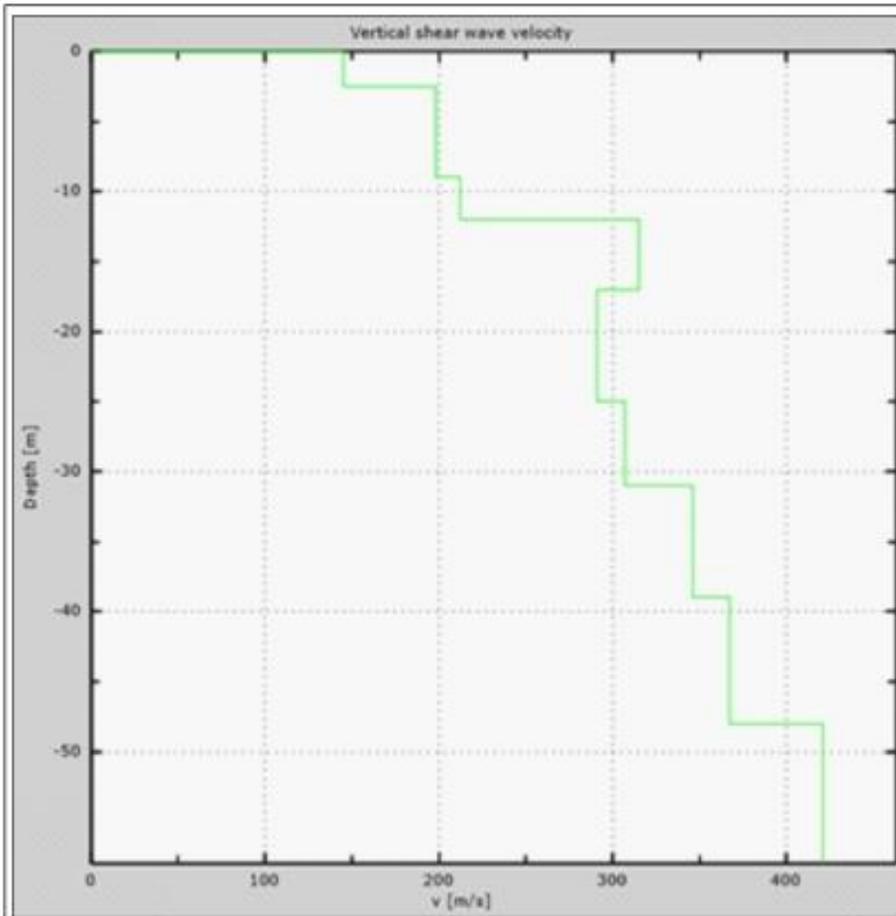
Realizado por:

Leonardo Xavier Palacios G.

Escala: 1:400

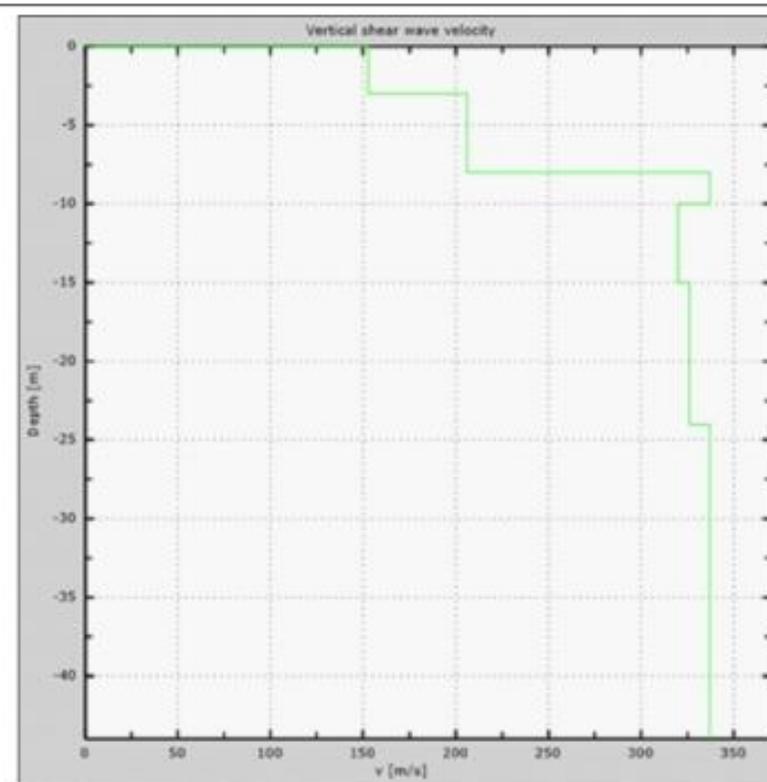
Fecha: Julio 2019

Hoja: 18 de 21



PERFIL MASW LM-6 - (Vs)

Esc: 1:450



PERFIL MASW LM-5 - (Vs)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Realizado por:

Leonardo Xavier Palacios G.

Contiene: Perfiles MASW LM-5 y LM-6 - (Vs)

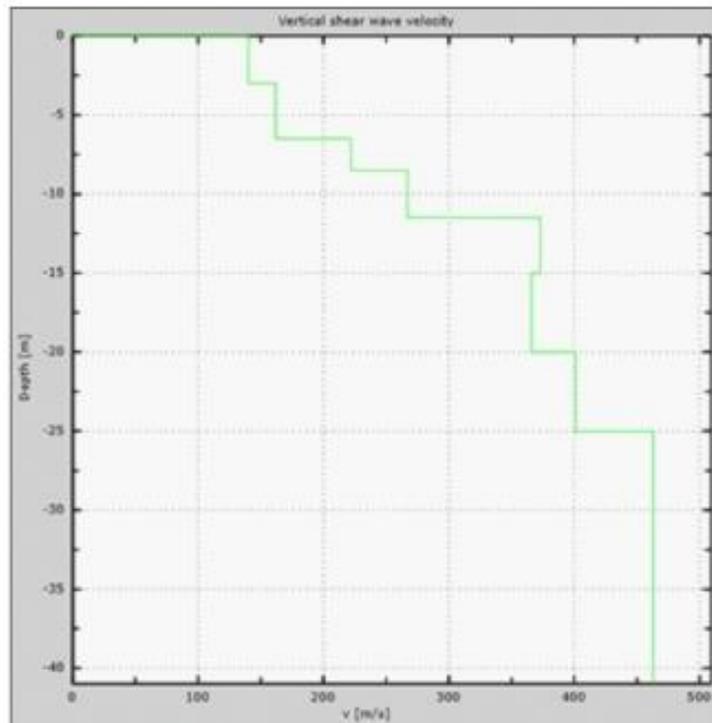
MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR

Escala: Indicadas

Fecha: Julio 2019

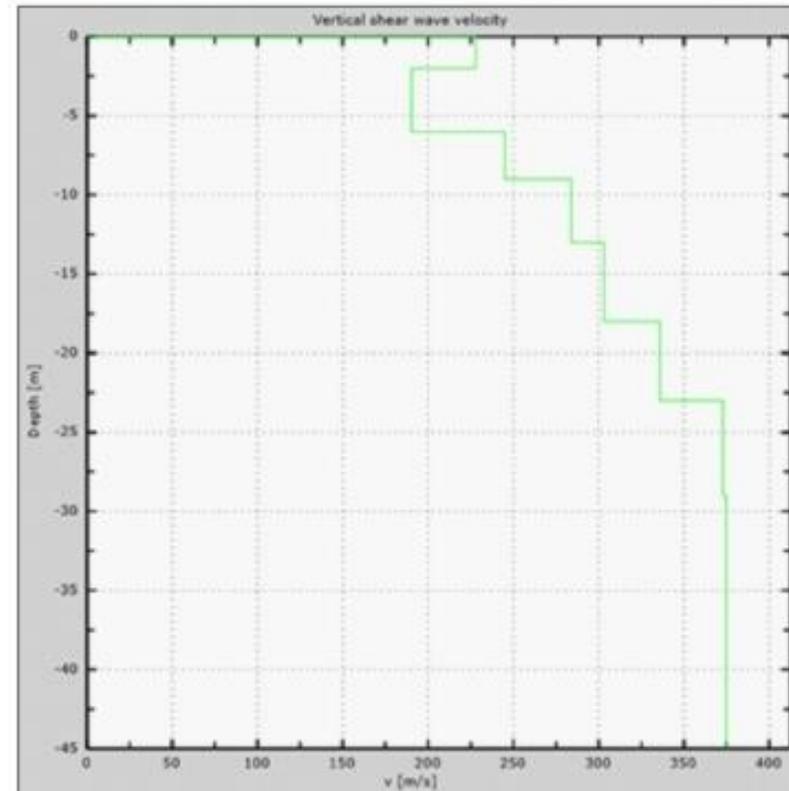
Hoja: 19 de 21

Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM: WGS - 84



PERFIL MASW LM-7 - (Vs)

Esc: 1:400



PERFIL MASW LM-8 - (Vs)

Esc: 1:400



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Contiene: Perfiles MASW LM-7 y LM-8 - (Vs)

MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE
PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE
TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR

Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM)
System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84

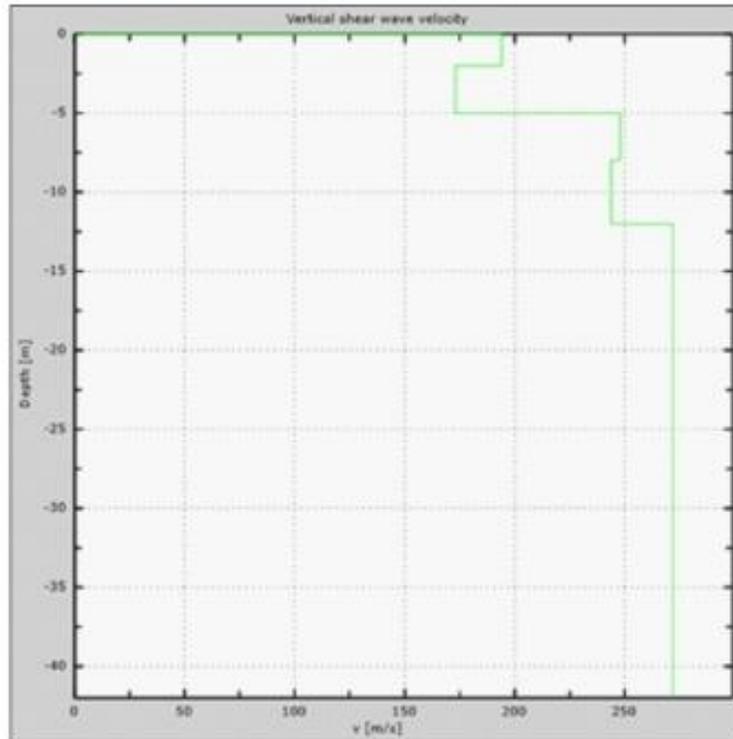
Realizado por:

Leonardo Xavier Palacios G.

Escala: 1:400

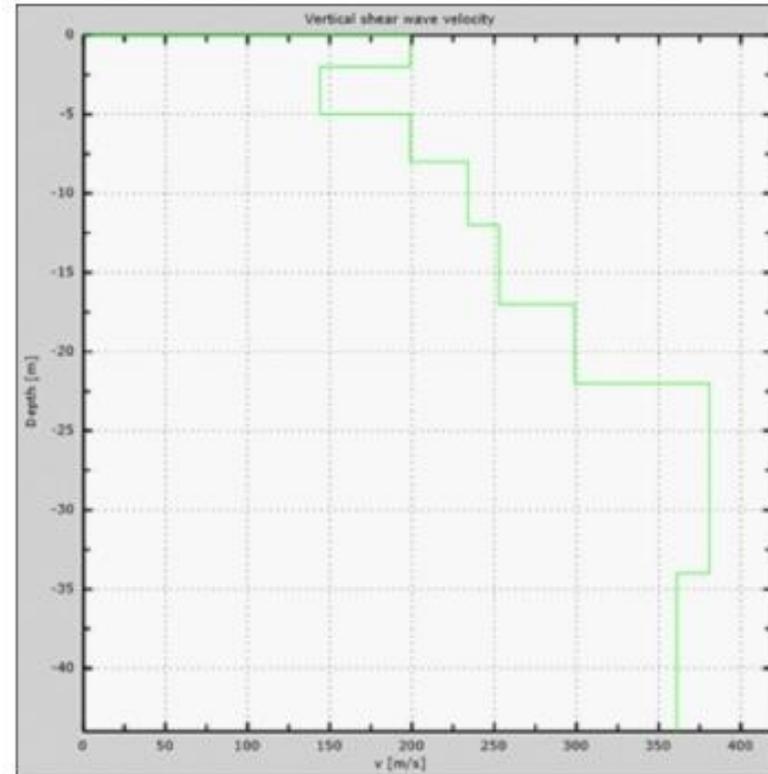
Fecha: Julio 2019

Hoja: 20 de 21



PERFIL MASW LM-9 - (Vs)

Esc: 1:400



PERFIL MASW LM-10 - (Vs)

Esc: 1:400



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Contiene: Perfiles MASW LM-9 y LM-10 - (Vs)

MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE
PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE
TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR

Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transversa Mercator (U.T.M.)
System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84.

Realizado por:

Leonardo Xavier Palacios G.

Escala: 1:400

Fecha: Julio 2019

Hoja: 21 de 21

9.3. TABLA RESUMEN DE RESULTADOS DE ANALISIS MULTICANAL MASW

9.3.1 LM-1

LINEA:	LM-1.0	ERROR:	8	%	Vs30:	345	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
1	-1	1667	No	0.4	244	No	175	366	598	No	244
4	-5	1828	No	0.34	353	No	177	530	717	No	353
1	-6	1856	No	0.38	375	No	188	563	852	No	375
4.5	-10.5	1716	No	0.46	274	No	151	411	1007	No	274
4.5	-15	1792	No	0.46	326	No	181	489	1198	No	326
5	-20	1788	No	0.46	323	No	182	485	1187	No	323
5	-25	1897	No	0.46	409	No	206	614	1503	No	409
6	-31	1951	No	0.46	458	No	229	687	1683	No	458
∞	-∞	2028	No	0.46	534	No	287	801	1962	No	534

LINEA:	LM-1.3D	ERROR:	8	%	Vs30:	315	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
3.5	-3.5	1697	No	0.39	262	No	165	393	617	No	262
3.5	-7	1637	No	0.47	227	No	136	341	954	No	227
2	-9	1687	No	0.47	256	No	128	384	1076	No	256
6	-15	1760	No	0.47	303	No	154	455	1274	No	303
4	-19	1815	No	0.47	343	No	177	515	1442	No	343
5	-24	1860	No	0.47	378	No	180	567	1589	No	378
5	-29	1928	No	0.47	436	No	233	654	1833	No	436
6	-35	1945	No	0.47	452	No	227	678	1900	No	452
∞	-∞	2064	No	0.47	573	No	286	860	2408	No	573

9.3.2 LM-2

LINEA:	LM-2.0	ERROR:	7	%	Vs30:	313	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
2.75	-2.75	1676	No	0.42	249	No	149	374	670	No	249
4.5	-7.25	1713	No	0.45	272	No	136	408	902	No	272
2.5	-9.75	1760	No	0.46	303	No	153	455	1113	No	303
5.25	-15	1769	No	0.46	309	No	155	464	1135	No	309
6	-21	1774	No	0.46	313	No	157	627	1150	No	313
7	-28	1849	No	0.46	369	No	185	554	1356	No	369
8	-36	1908	No	0.47	419	No	210	629	1761	No	419
9	-45	1958	No	0.47	464	No	205	696	1950	No	464
∞	-∞	2040	No	0.47	547	No	274	1094	2299	No	547



LINEA:	LM-2.3D	ERROR:	5	%	Vs30:	302	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
3.5	-3.5	1672	No	0.4	247	No	145	371	605	No	247
2.5	-6	1702	No	0.45	265	No	134	398	879	No	265
5	-11	1727	No	0.46	281	No	146	422	1032	No	281
5	-16	1769	No	0.46	309	No	159	464	1135	No	309
7	-23	1767	No	0.46	308	No	155	462	1132	No	308
7	-30	1854	No	0.46	373	No	186	560	1370	No	373
8	-38	1993	No	0.46	498	No	210	747	1830	No	498
10	-48	1977	No	0.46	482	No	205	723	1771	No	482
∞	-∞	2063	No	0.46	572	No	273	858	2102	No	572

9.3.3 LM-3

LINEA:	LM-3.3D	ERROR:	15	%	Vs30:	327	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
2	-2	1692	No	0.2	259	No	101	389	423	No	259
3	-5	1742	No	0.25	291	No	145	437	504	No	291
5	-10	1742	No	0.43	291	No	144	437	830	No	291
4	-14	1753	No	0.48	298	No	144	447	1520	No	298
3	-17	1807	No	0.48	337	No	171	506	1718	No	337
5	-22	1810	No	0.48	339	No	171	509	1729	No	339
9	-31	1903	No	0.48	414	No	208	621	2111	No	414
6	-37	1904	No	0.48	415	No	208	830	2116	No	415
∞	-∞	1904	No	0.48	415	No	208	623	2116	No	415

LINEA:	LM-3.4	ERROR:	6	%	Vs30:	321	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
3	-3	1570	No	0.3	192	No	96	288	359	No	192
3	-6	1671	No	0.39	246	No	110	369	579	No	246
4	-10	1843	No	0.41	364	No	152	546	932	No	364
2	-12	1846	No	0.46	367	No	177	551	1348	No	367
6	-18	1870	No	0.46	386	No	194	579	1418	No	386
8	-26	1835	No	0.46	358	No	172	537	1315	No	358
8	-34	1834	No	0.46	357	No	178	536	1312	No	357
7	-41	1897	No	0.46	409	No	205	614	1503	No	409
∞	-∞	1972	No	0.46	478	No	205	717	1756	No	478



9.3.4 LM-4

LINEA:	LM-4.1	ERROR:	7	%	Vs30:	277	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
2	-2	1507	No	0.34	163	No	103	245	331	No	163
5	-7	1659	No	0.44	239	No	120	359	730	No	239
4	-11	1684	No	0.48	254	No	117	381	1295	No	254
4	-15	1764	No	0.48	306	No	140	459	1560	No	306
6	-21	1786	No	0.48	321	No	161	482	1637	No	321
8	-29	1791	No	0.48	325	No	158	488	1657	No	325
6	-35	1843	No	0.48	364	No	182	546	1856	No	364
6	-41	1844	No	0.48	365	No	182	548	1861	No	365
∞	-∞	1881	No	0.48	395	No	182	593	2014	No	395

LINEA:	LM-4.4	ERROR:	5	%	Vs30:	267	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
4	-4	1507	No	0.46	163	No	85	245	599	No	163
5	-9	1634	No	0.47	225	No	92	338	946	No	225
4	-13	1712	No	0.48	271	No	113	407	1382	No	271
4	-17	1750	No	0.48	296	No	143	444	1509	No	296
3	-20	1846	No	0.48	367	No	162	551	1871	No	367
5	-25	1851	No	0.48	371	No	159	557	1892	No	371
5	-30	1794	No	0.48	327	No	159	491	1667	No	327
4	-34	1780	No	0.48	317	No	159	476	1616	No	317
∞	-∞	1780	No	0.48	317	No	159	476	1616	No	317

9.3.5 LM-5

LINEA:	LM-5.3D	ERROR:	6	%	Vs30:	270	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
3	-3	1484	No	0.39	153	No	76	230	360	No	153
5	-8	1598	No	0.44	206	No	91	309	629	No	206
2	-10	1807	No	0.43	337	No	117	506	962	No	337
5	-15	1784	No	0.46	320	No	134	480	1176	No	320
3	-18	1792	No	0.47	326	No	158	489	1370	No	326
6	-24	1792	No	0.47	326	No	163	489	1370	No	326
4	-28	1807	No	0.47	337	No	168	506	1416	No	337
6	-34	1807	No	0.47	337	No	168	674	1416	No	337
∞	-∞	1807	No	0.47	337	No	168	506	1416	No	337

9.3.6 LM-6

LINEA:	LM-6.3D	ERROR:	7	%	Vs30:	242	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
2.5	-2.5	1464	No	0.46	145	No	82	218	533	No	145
6.5	-9	1582	No	0.47	198	No	100	297	832	No	198
3	-12	1610	No	0.48	212	No	106	318	1081	No	212
5	-17	1777	No	0.48	315	No	111	473	1606	No	315
8	-25	1742	No	0.48	291	No	122	437	1484	No	291
6	-31	1766	No	0.48	307	No	154	461	1565	No	307
8	-39	1819	No	0.48	346	No	172	519	1764	No	346
9	-48	1846	No	0.48	367	No	188	551	1871	No	367
∞	-∞	1911	No	0.48	421	No	211	632	2147	No	421

LINEA:	LM-6.5	ERROR:	9	%	Vs30:	250	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
1	-1	1484	No	0.38	153	No	121	230	348	No	153
4	-5	1613	No	0.47	214	No	107	321	899	No	214
4	-9	1586	No	0.48	200	No	100	300	1020	No	200
8	-17	1682	No	0.48	253	No	111	380	1290	No	253
6	-23	1761	No	0.48	304	No	150	456	1550	No	304
5	-28	1769	No	0.48	309	No	160	464	1576	No	309
7	-35	1729	No	0.48	282	No	143	423	1438	No	282
7	-42	1826	No	0.48	351	No	176	527	1790	No	351
∞	-∞	1914	No	0.48	424	No	212	636	2162	No	424

9.3.7 LM-7

LINEA:	LM-7.3D	ERROR:	7	%	Vs30:	273	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
3	-3	1451	No	0.39	140	No	77	210	330	No	140
3.5	-6.5	1505	No	0.47	162	No	12	243	681	No	162
2	-8.5	1628	No	0.48	222	No	102	333	1132	No	222
3	-11.5	1705	No	0.48	267	No	143	401	1361	No	267
3.5	-15	1854	No	0.48	373	No	170	560	1902	No	373
5	-20	1845	No	0.48	366	No	180	549	1866	No	366
5	-25	1888	No	0.48	401	No	196	602	2045	No	401
6	-31	1957	No	0.48	463	No	202	695	2361	No	463
∞	-∞	1957	No	0.48	463	No	221	695	2361	No	463

9.3.8 LM-8

LINEA:	LM-8.1	ERROR:	8	%	Vs30:	300	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
3	-3	1730	No	0.27	282	No	129	423	502	No	282
4	-7	1643	No	0.46	229	No	115	344	841	No	229
3	-10	1682	No	0.47	253	No	127	380	1063	No	253
3	-13	1730	No	0.48	283	No	141	425	1443	No	283
4	-17	1761	No	0.48	304	No	152	456	1550	No	304
6	-23	1815	No	0.48	343	No	172	515	1749	No	343
5	-28	1860	No	0.48	378	No	189	567	1927	No	378
6	-34	1860	No	0.48	378	No	189	757	1927	No	378
∞	-∞	1860	No	0.48	378	No	189	567	1927	No	378

LINEA:	LM-8.4	ERROR:	9	%	Vs30:	282	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
2	-2	1662	No	0.2	228	No	117	342	372	No	228
4	-6	1566	No	0.45	190	No	96	285	630	No	190
3	-9	1669	No	0.46	245	No	122	368	900	No	245
4	-13	1817	No	0.46	284	No	145	426	1043	No	284
5	-18	1869	No	0.47	303	No	157	455	1274	No	303
5	-23	1806	No	0.47	336	No	168	504	1412	No	336
6	-29	1856	No	0.47	373	No	188	560	1568	No	373
6	-35	1856	No	0.47	375	No	188	751	1576	No	375
∞	-∞	1856	No	0.47	375	No	188	563	1576	No	375

9.3.9 LM-9

LINEA:	LM-9.4	ERROR:	11	%	Vs30:	257	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
2	-2	1617	No	0.32	216	No	108	432	420	No	216
2	-4	1554	No	0.42	184	No	97	276	495	No	184
3	-7	1570	No	0.46	192	No	106	288	705	No	192
2	-9	1484	No	0.48	153	No	122	230	780	No	153
4	-13	1626	No	0.48	221	No	139	332	1127	No	221
3	-16	1669	No	0.48	245	No	141	368	1249	No	245
5	-21	1855	No	0.48	374	No	187	748	1907	No	374
6	-27	1855	No	0.48	374	No	187	748	1907	No	374
∞	-∞	1855	No	0.48	374	No	187	748	1907	No	374



LINEA:	LM-9.0	ERROR:	8	%	Vs30:	245	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
2	-2	1574	No	0.41	194	No	97	389	497	No	194
3	-5	1556	No	0.45	173	No	92	260	574	No	173
3	-8	1674	No	0.45	248	No	124	497	823	No	248
4	-12	1667	No	0.48	244	No	122	487	1244	No	244
4	-16	1713	No	0.48	272	No	136	543	1387	No	272
5	-21	1713	No	0.48	272	No	136	543	1387	No	272
5	-26	1713	No	0.48	272	No	136	543	1387	No	272
6	-32	1713	No	0.48	272	No	136	543	1387	No	272
∞	-∞	1713	No	0.48	272	No	136	543	1387	No	272

9.3.10 LM-10

LINEA:	LM-10.1	ERROR:	5	%	Vs30:	282	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
2	-2	1521	No	0.3	169	No	85	338	316	No	169
3	-5	1539	No	0.4	177	No	88	353	434	No	177
3	-8	1582	No	0.4	198	No	99	396	485	No	198
4	-12	1660	No	0.42	240	No	120	480	646	No	240
4	-16	1783	No	0.48	394	No	160	591	2009	No	394
5	-21	1783	No	0.48	394	No	160	591	2009	No	394
5	-26	1879	No	0.48	394	No	197	788	2009	No	394
6	-32	1879	No	0.48	394	No	197	788	2009	No	394
∞	-∞	1951	No	0.48	458	No	229	917	2335	No	458

LINEA:	LM-10.4	ERROR:	11	%	Vs30:	248	m/s				
H (m)	Z (m)	Density (Kg/m3)	Water	Poisson	Vs (m/s)	Vs fixed	Vs min	Vs max	Vp (m/s)	Alluvional	Vs fin
2	-2	1584	No	0.41	199	No	121	299	510	No	199
3	-5	1461	No	0.47	144	No	84	216	605	No	144
3	-8	1584	No	0.48	199	No	100	299	1015	No	199
4	-12	1650	No	0.48	234	No	113	351	1193	No	234
5	-17	1682	No	0.48	253	No	156	380	1290	No	253
5	-22	1754	No	0.48	299	No	156	449	1525	No	299
6	-28	1864	No	0.48	381	No	195	572	1943	No	381
6	-34	1864	No	0.48	381	No	195	572	1943	No	381
∞	-∞	1839	No	0.48	361	No	195	542	1841	No	361



9.4. ESTABILIDAD DE TALUDES



PERFIL 1-1



ESCALA: 1:000 HORIZONTAL - 1:000 VERTICAL



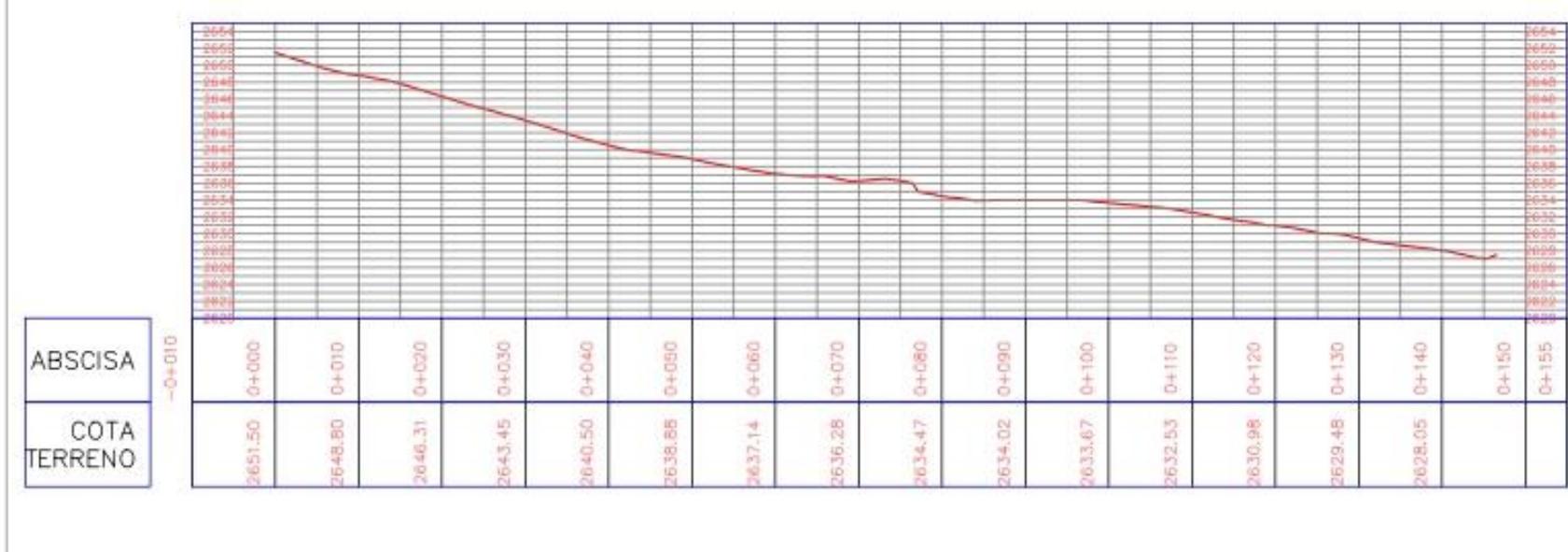
UNIVERSIDAD DE CUENCA

Contiene: Geometría del Perfil de Modelación 1-1
 MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE
 PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE
 TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR

Este trabajo se realiza con el sistema de coordenadas Universal Transversa Mercator (UTM),
 System: zona 17, banda M, DATUM: WGS - 84

Realizado por:	Leonardo Xavier Palacios G.
Escala:	1 : 000
Fecha:	Julio 2019
Hoja:	2 de 7

PERFIL 2-2



ESCALA: 1:700 HORIZONTAL - 1:700 VERTICAL



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Realizado por:

Leonardo Xavier Palacios G.

Contiene: Geometría del Perfil de Modelación 2-2

MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE
PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE
TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR

Escala: 1 : 700

Fecha: Julio 2019

Hoja: 3 de 7

Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transversal Mercator (UTM),
Sistema zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84

PERFIL 3-3



ESCALA: 1:000 HORIZONTAL - 1:000 VERTICAL



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Realizado por:

Leonardo Xavier Palacios G.

Contiene: Geometría del Perfil de Modelación 3-3

MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE
PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE
TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR

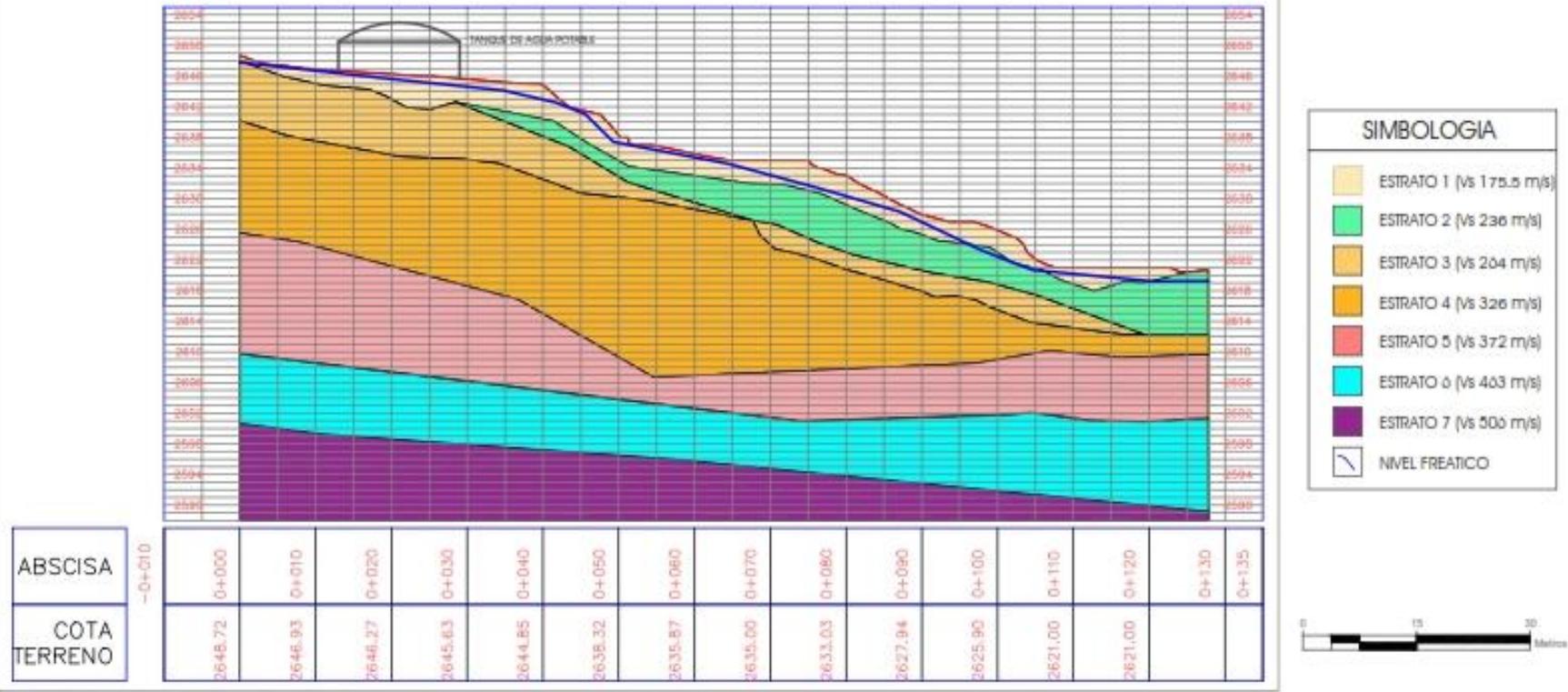
Escala: 1 : 000

Fecha: Julio 2019

Hoja: 4 de 7

Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transversa Mercator (UTM) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84

ESTRATIGRAFÍA PERFIL 1-1



SIMBOLOGIA

- ESTRATO 1 (Vs 175.5 m/s)
- ESTRATO 2 (Vs 236 m/s)
- ESTRATO 3 (Vs 204 m/s)
- ESTRATO 4 (Vs 326 m/s)
- ESTRATO 5 (Vs 372 m/s)
- ESTRATO 6 (Vs 463 m/s)
- ESTRATO 7 (Vs 506 m/s)
- NIVEL FREATICO

ESCALA: 1:750 HORIZONTAL - 1:750 VERTICAL

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kN/m ²)	Phi
Vs 185		15.65	18.74	3.93
Vs 222		16.86	28.72	4.71
Vs 263		17.34	46.54	30.26
Vs 319		18.27	67.31	13.94
Vs 372		18.88	82	18
Vs 463		19.95	101	27
Vs 506		20.39	120	30

UNIVERSIDAD DE CUENCA

Contiene: Estratigrafía del Perfil de Modelación 1-1

MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR

Este trabajo se realiza con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84

Realizado por:

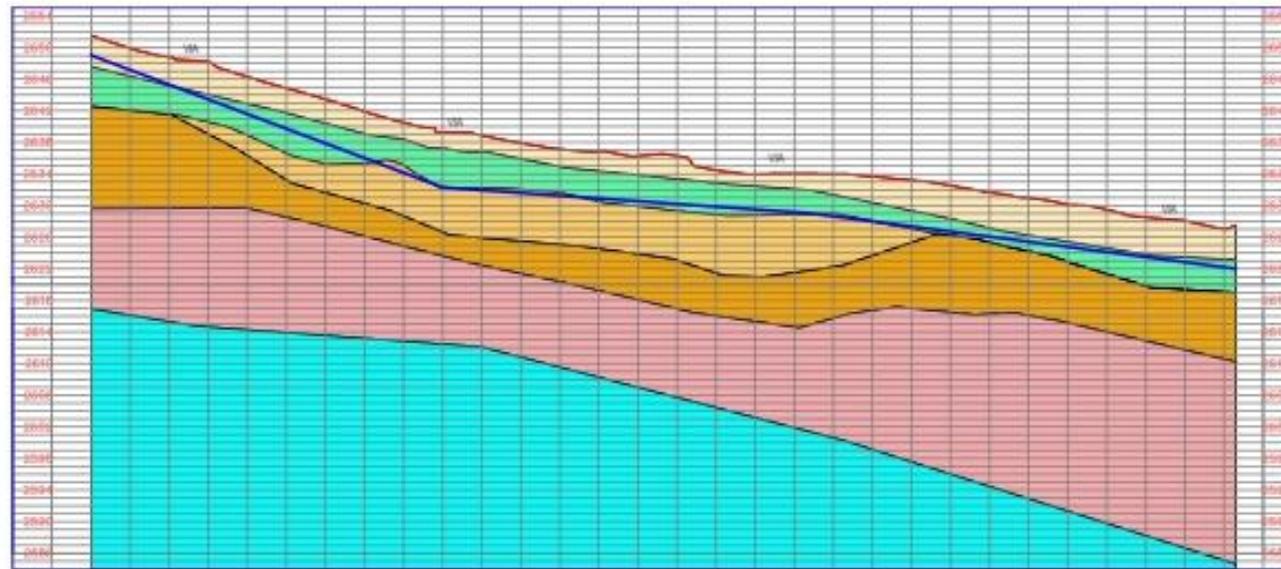
Leonardo Xavier Palacios G.

Escala: 1 : 750

Fecha: Julio 2019

Hoja: 5 de 7

ESTRATIGRAFIA PERFIL 2-2



SIMBOLOGIA	
	ESTRATO 1 (Vs 234 m/s)
	ESTRATO 2 (Vs 173 m/s)
	ESTRATO 3 (Vs 238 m/s)
	ESTRATO 4 (Vs 289 m/s)
	ESTRATO 5 (Vs 303 m/s)
	ESTRATO 6 (Vs 470 m/s)
	NIVEL FREÁTICO

ABSCISA	- 0+010															
COTA TERRENO	2651.50	2648.80	2646.31	2643.45	2640.50	2638.88	2637.14	2636.28	2634.47	2634.02	2633.67	2632.53	2630.98	2629.48	2628.05	
	0+000	0+010	0+020	0+030	0+040	0+050	0+060	0+070	0+080	0+090	0+100	0+110	0+120	0+130	0+140	0+150



ESCALA: 1:800 HORIZONTAL - 1:800 VERTICAL

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kN/m ²)	Phi
Vs 229		16.81	50.32	4.74
Vs 191		15.6	20.55	3.74
Vs 218		16.89	27.8	4.69
Vs 279		17.73	55.29	11.81
Vs 363		18.77	78	16
Vs 470		20.02	301	27



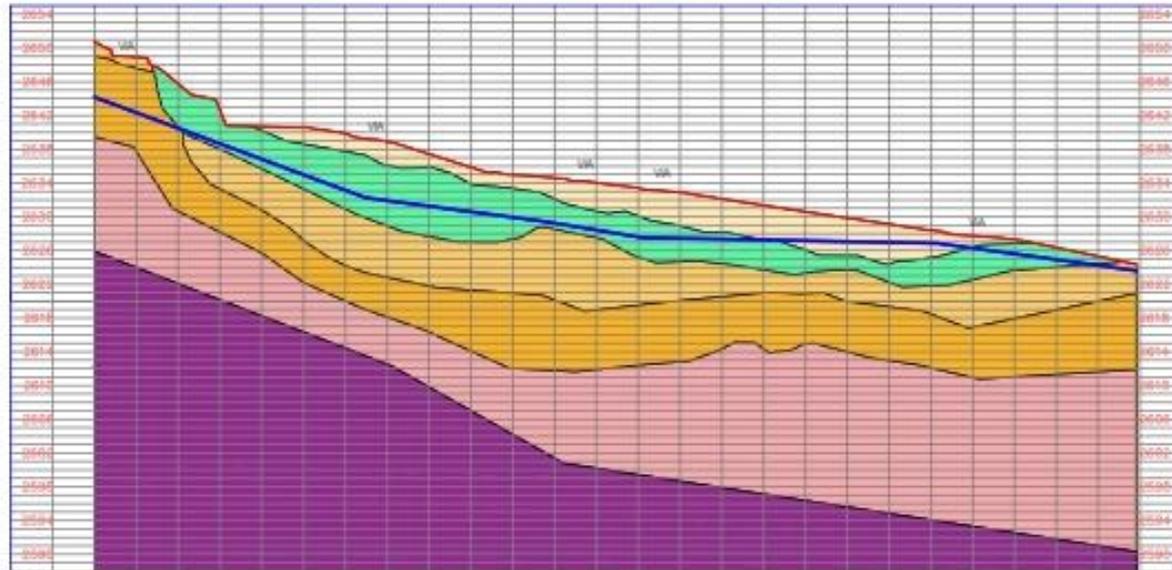
UNIVERSIDAD DE CUENCA

Contiene: Estratigrafía del Perfil de Modelación 2-2
 MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE
 PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE
 TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR

Este trabajo se realizó con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (U.T.M.)
 System, zona 17, banda M, DATUM: WGS - 84.

Realizado por:	Leonardo Xavier Palacios G.
Escala:	1 : 800
Fecha:	Julio 2019
Hoja:	6 de 7

ESTRATIGRAFIA PERFIL 3-3



SIMBOLOGIA	
	ESTRATO 1 (Vs 169 m/s)
	ESTRATO 2 (Vs 200 m/s)
	ESTRATO 3 (Vs 232 m/s)
	ESTRATO 4 (Vs 308 m/s)
	ESTRATO 5 (Vs 349 m/s)
	ESTRATO 6 (Vs 414 m/s)
	NIVEL FREATICO

ABSCISA	-0+010													
COTA TERRENO	0+000	0+010	0+020	0+030	0+040	0+050	0+060	0+070	0+080	0+090	0+100	0+110	0+120	0+130
	2650.79	2645.76	2640.69	2639.67	2637.64	2634.97	2634.01	2632.68	2631.34	2629.84	2628.40	2627.29	2625.30	



ESCALA: 1:750 HORIZONTAL - 1:750 VERTICAL

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kN/m ²)	Phi
Vs 189		15.51	20.06	3.7
Vs 204		16.17	23.76	4
Vs 232		16.78	31.01	4.75
Vs 301		18.02	47.11	10
Vs 356		18.68	78	16
Vs 434		19.4	93	22

 UNIVERSIDAD DE CUENCA	Realizado por:
	Leonardo Xavier Palacios G.
	Escala: 1 : 750
	Fecha: Julio 2019
Contiene: Estratigrafía del Perfil de Modelación 3-3 MODELACION Y CARACTERIZACION FISICA 3D, MEDIANTE PROSPECCION GEOFISICA DEL DESLIZAMIENTO DE TRIGALES ALTOS, CUENCA-ECUADOR	
<small>Este trabajo se realiza con el sistema de coordenadas Universal Transverse Mercator (U.T.M.) System, zona 17, banda M, DATUM - WGS - 84</small>	
Hoja: 7 de 7	



9.5. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LOS SUELOS



9.6. REGISTRO FOTOGRÁFICO



Foto N° 1 Levantamiento de la línea eléctrica LE-1



Foto N° 2 Levantamiento de la línea eléctrica LE-2



Foto N° 3 Levantamiento de la línea eléctrica LE-3

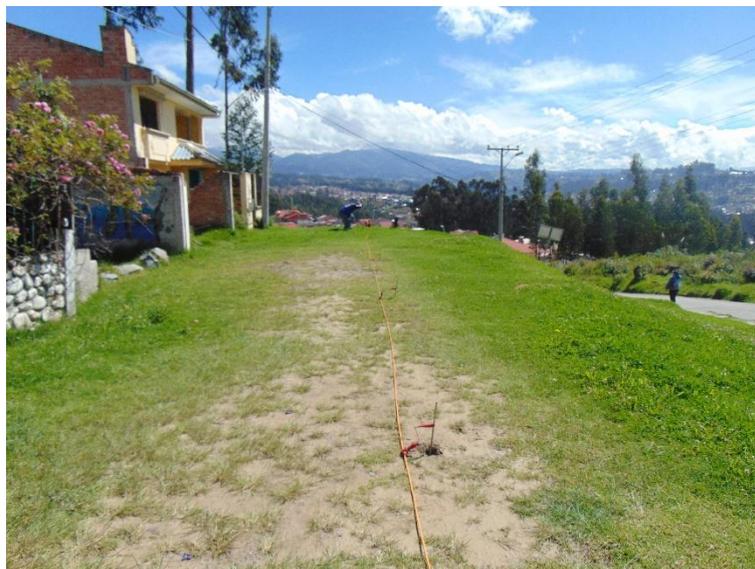


Foto N° 4 Levantamiento de la línea LE-4



Foto N° 5 Levantamiento de la línea eléctrica LE-8



Foto N° 6 Levantamiento de la línea sísmica LS-1-1



Foto N° 7 Levantamiento de la línea sísmica LS-2



Foto N° 8 Levantamiento de la línea sísmica LM-9



Foto N° 9 Levantamiento de la línea sísmica LM-6