

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra
con orientación en Geofísica Aplicada**

**Uso de métodos eléctricos y geotécnicos para
evaluar la estabilidad de un talud en Tijuana, B.C.**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Luis Guillermo Plascencia Arreola

Ensenada, Baja California, México

2020

Tesis defendida por

Luis Guillermo Plascencia Arreola

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Marco Antonio Pérez Flores
Director de tesis

Dra. Olga Sarychikhina

M.C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo

Dra. María del Carmen Maya Sánchez

Dra. Almendra Villela y Mendoza



Dr. Alejandro González Ortega
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Luis Guillermo Plascencia Arreola © 2020

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis

Resumen de la tesis que presenta Luis Guillermo Plascencia Arreola como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada.

Uso de métodos eléctricos y geotécnicos para evaluar la estabilidad de un talud en Tijuana, B.C.

Resumen aprobado por:

Dr. Marco Antonio Pérez Flores
Director de tesis

La ciudad de Tijuana, Baja California, presenta serios problemas relacionados con deslizamientos de suelo rotacionales y traslacionales, debido a que buena parte del crecimiento urbano se ha desarrollado en laderas, donde la inestabilidad del terreno es una amenaza latente. La caracterización de un deslizamiento y los análisis de riesgo requieren un enfoque multidisciplinario que conecte los procesos geológicos con los parámetros mecánicos del suelo. La conexión de estos factores generalmente no se realiza cuando se calcula la estabilidad de los taludes y laderas; en la práctica es común que las técnicas geofísicas y geotécnicas se analicen por separado. En este trabajo se emplearon modelos de resistividad eléctrica en 3D y 2D para complementar la información obtenida con pozos de exploración somera (perforados hasta 20 m de profundidad) y pruebas de laboratorio realizadas en muestras de suelo representativas del sitio de estudio, ubicado en la zona sur-central de la mancha urbana del municipio de Tijuana. Debido a la naturaleza sedimentaria de las formaciones litológicas del sitio de estudio, los contrastes de resistividad no fueron muy pronunciados. Sin embargo, la resolución de los modelos de resistividad, en conjunto con la información de los pozos y parámetros mecánicos obtenidos en laboratorio, permitió proponer modelos estratigráficos para realizar el cálculo de estabilidad de laderas y taludes existentes en el sitio de estudio, inclusive en áreas donde no se perforaron pozos. La estabilidad calculada se expresa por medio un factor de seguridad (FS) que relaciona la resistencia al corte de la masa de suelo con las fuerzas desestabilizadoras que actúan sobre el talud o ladera. Los resultados de los cálculos de estabilidad permitieron identificar áreas donde es necesario realizar obras de contención o rectificación geométrica para incrementar la estabilidad y así alcanzar el valor de FS requerido por normativa.

Palabras clave: Estabilidad de laderas, taludes, métodos eléctricos, resistividad eléctrica.

Abstract of the thesis presented by Luis Guillermo Plascencia Arreola as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Science with orientation in Applied Geophysics.

Electrical methods and geotechnical engineering to evaluate slope stability: case study for a site located in Tijuana metropolitan area.

Abstract approved by:

Dr.Marco Antonio Pérez Flores
Thesis Director

Rotational and translational landslides are a serious problem in the metropolitan area of Tijuana, Baja California; the urban development has occurred in areas where terrain instability is a latent threat. The characterization of a landslide requires a multi-disciplinary approach to relate geological processes with soil mechanical parameters. Connection between these factors is not common in slope stability modeling. The usual practice is to separately assess geophysical and geotechnical methods. In this study, electrical resistivity models in 3D, 2D were used to complement information from boreholes (drilled to a depth of 20 m) and laboratory tests conducted in representative soil samples recovered on site. The study area is located in the central south portion of Tijuana metropolitan area, its lithology has a sedimentary origin, therefore there was little variation in resistivity values. The coupling of resistivity models with borehole logs and soil mechanical parameters obtained from lab tests, made it possible to come up with stratigraphic profiles to compute slope stability, even in areas where boreholes were not drilled. Slope stability is expressed by a factor of safety (FS) which is a ratio between shear strength and shear stress. Results from our slope stability computations allowed us to identify areas where earthworks and other contention measurements are required to increase the FS to values required by regulation.

Keywords: Slope stability, electrical resistivity, geophysics.

Dedicatoria

A quienes incondicionalmente han estado conmigo desde el primer día, siempre han tenido fe en mí y con su sabiduría y amor me han acompañado a lo largo de esta aventura: Mis padres.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por brindarme la oportunidad de cursar mi posgrado en la división de Ciencias de la Tierra.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría No. de becario:893578

Al Consejo de Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra por el apoyo económico para la participación en la Reunión Anual 2020 de la Unión Geofísica Mexicana y en la Fall Meeting 2020 de la American Geophysical Union.

A mi director de tesis el Dr. Marco Antonio Pérez Flores por sus invaluable enseñanzas, apoyo y paciencia durante el desarrollo de este trabajo. Me llevo una grata experiencia al haber trabajado bajo su tutela.

A mi comité de tesis: Dra. Olga Sarychikhina, M.C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo, Dra. María del Carmen Maya Sánchez y Dra. Almendra Villela y Mendoza por el tiempo dedicado a realizar comentarios y aportaciones que mejoraron la calidad de este trabajo de investigación.

Al personal administrativo de la división de Ciencias de la Tierra, especialmente a Mónica Sánchez y a Melissa Corral.

Al personal técnico de Ciencias de la Tierra por compartir su experiencia y enseñanzas durante los trabajos de campo.

A mis amigos Jacqueline Morales y Erick García por su apoyo durante las campañas de recolección de datos, así como todos los agradables momentos que pasamos en Ensenada.

A quien me acompañó desde el examen de admisión hasta la redacción de este trabajo: Rebeca. Gracias por siempre creer en mi y por todo todo tu cariño y afecto para conmigo.

A mi mentor en mecánica de suelos: Ing. Marco Antonio Berumen. Gracias por su todo apoyo moral, material e intelectual durante el desarrollo de este trabajo.

A todas las maravillosas amistades que hice durante mi estancia en Ensenada: Sebastián, Carolina, Diana, Abril, Alejandra, Luz, Eliana, Erik, Karina, Nacho, Adrián, Maia, Manolo y Mayra.

Finalmente vuelvo a agradecer a mis padres. Primeramente por su cariño incondicional, en segundo término por todo el apoyo moral y espiritual no solamente durante mi estancia en el posgrado, sino a lo largo de toda mi vida.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xiv

Capítulo 1. Introducción

1.1. Deslizamientos de ladera en la ciudad de Tijuana	1
1.2. Antecedentes	2
1.2.1. Métodos eléctricos para caracterizar movimientos de ladera ..	2
1.2.2. Correlación entre resistividad y propiedades mecánicas del suelo	2
1.3. Localización y descripción de la zona de estudio	3
1.3.1. Propuesta de urbanización y trabajos previos en el sitio de es-	
tudio	3
1.3.2. Marco geológico	4
1.4. Hipótesis	6
1.5. Objetivos	6
1.5.1. Objetivo general	6
1.5.2. Objetivos específicos	6

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Resistividad en corriente directa	7
2.2. Inversión para datos de corriente directa	9
2.2.1. Caso 2D	11
2.2.2. Caso 3D	13
2.2.3. Método de minimización	13
2.3. Deslizamientos de ladera	15
2.3.1. Clasificación de los movimientos de ladera	16
2.3.2. Factores promotores del movimiento de ladera	17
2.4. Propiedades mecánicas del suelo	18
2.4.1. Granulometría y propiedades índice	18
2.4.2. Resistencia al esfuerzo cortante	20
2.5. Análisis de estabilidad de ladera	22
2.5.1. Factor de seguridad	23
2.5.2. Método de equilibrio límite	24
2.5.3. Método de Spencer	24

Capítulo 3. Resultados e interpretación

3.1. Variación del relieve con el tiempo	29
3.2. Modelos de resistividad	32

Tabla de contenido (continuación)

3.3.	Modelos de resistividad en 3D	33
3.3.1.	Modelo 3D en temporada seca	33
3.3.2.	Modelo 3D en temporada de lluvias	37
3.4.	Modelos de resistividad en 2D	39
3.4.1.	Tendidos 1 y 1a	39
3.4.2.	Tendidos 2 y 2a	42
3.4.3.	Tendidos 3 y 3a	44
3.4.4.	Tendidos 4 y 4a	46
3.5.	Modelos de resistividad en 2D para detalle superficial	48
3.5.1.	Tendido 5	48
3.5.2.	Tendido 6	50
3.5.3.	Tendido 7	51
3.5.4.	Tendido 8	53
3.5.5.	Tendido 9	53
3.6.	Parámetros mecánicos del suelo	54
3.6.1.	Propiedades índice de la masa de suelo	54
3.6.2.	Resistencia al corte	56
3.7.	Estabilidad de laderas y taludes en el sitio de estudio	58
3.7.1.	Análisis de estabilidad para condición seca	60
3.7.2.	Análisis de estabilidad para condición húmeda	62
3.8.	Correlación entre resistividad y propiedades mecánicas del suelo	64
 Capítulo 4. Discusión		
4.1.	Relación entre modelos geofísicos y litología	66
4.1.1.	Limitaciones de los modelos estratigráficos	68
4.1.2.	Cambios entre temporadas seca y de lluvias	69
4.2.	Variación del factor de seguridad	72
4.3.	Correlaciones con los valores de resistividad	73
 Capítulo 5. Conclusiones		
Literatura citada		78
Anexo 1		81

Lista de figuras

Figura	Página
1. Mapa de susceptibilidad por inestabilidad de laderas del municipio de Tijuana, modificada de (CENAPRED, 2015), el polígono azul representa el sitio de estudio.	1
2. Trazo del lineamiento inferido por Díaz García (2007) utilizando fotointerpretación; la topografía presentada corresponde al año 2005.	3
3. Carta geológica con clave I11-11 para la ciudad de Tijuana. Los deslizamientos presentados fueron reportados por Dirección de Protección Civil de Tijuana (2016).	5
4. Esquema de la distribución de electrodos y los patrones de corriente eléctrica para los arreglos tetrapolares más comunes: a) Dipolo-dipolo, b) Schlumberger y c) Wenner.	7
5. Esquema de la distribución de electrodos para el arreglo polo-polo. Se considera que los electrodos B y N están en el infinito, porque están colocados a una distancia muy grande con respecto al par de electrodos A y M.	12
6. Nomenclatura empleada para describir las partes que conforman un deslizamiento de suelo, tomado de (Suárez Díaz, 2009).	15
7. Esquema de un deslizamiento traslacional, tomado de (Highland <i>et al.</i> , 2008).	17
8. Esquema del acomodo de tamices para obtener la granulometría de una muestra de suelo.	18
9. Esquema ilustrativo de la definición de los límites de Atterberg, modificado de (Das y Sivakugan, 2019)	19
10. Prueba de corte directo: a) esquema de la muestra ensayada, b) gráfica para obtener el ángulo de fricción interna, modificada de (Das, 2019) . . .	21
11. Esfuerzos de corte que actúan en una superficie de falla, τ_f representa la resistencia al corte de la masa de suelo, mientras que τ indica el esfuerzo cortante que propicia la falla del talud.	23
12. Fuerzas actuantes sobre una dovela analizada mediante el método de Spencer: W representa el peso de la dovela, X_R y X_L son fuerzas de corte vertical entre dovelas, E_R y E_L son fuerzas normales que actúan entre dovelas, N es una fuerza normal que se presenta en la base de la dovela, S es la fuerza resistente al corte y D representa las cargas externas que actúan sobre la dovela.	25
13. Gráfico de convergencia del factor de seguridad para las condiciones de equilibrio consideradas por el método de Spencer.	28
14. Superficie topográfica del sitio de estudio en el año 2005.	29
15. Superficie topográfica del sitio de estudio en el año 2010.	30
16. Superficie topográfica del sitio de estudio en el año 2017.	30

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
17. Resultado de la comparación entre las superficies topográficas de los años 2017 y 2005. La zonas de corte se indican en color rojo mientras que el color azul corresponde a zonas terreprenadas (relleno).	31
18. Ubicación de los tendidos de resistividad eléctrica medidos en el sitio de estudio	32
19. Pseudosecciones de resistividad aparente crudas y editadas: a) dipolo-dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner, d) dipolo-dipolo depurado, e) Schlumberger depurado, f) Wenner depurado.	33
20. Secciones horizontales georeferenciadas del modelo 3D obtenido a partir de datos recolectados a finales de agosto del año 2019, mes correspondiente a la temporada seca del municipio de Tijuana.	35
21. Columnas estratigráficas de los pozos de exploración reportadas en el estudio de mecánica de suelos realizado en agosto de 2017.	36
22. Secciones horizontales georeferenciadas del modelo 3D obtenido con datos medidos en marzo de 2020. La temporada de lluvias en el municipio de Tijuana comprende desde noviembre hasta abril.	38
23. Datos de precipitación recolectados por la estación climatológica Presa Abelardo L. Rodríguez: a) Precipitación acumulada para los meses de enero a marzo de 2020, b) Precipitación diaria para los meses de enero a marzo de 2020.	39
24. Modelos de resistividad en 2D: a) modelo 2D obtenido con datos medidos en temporada seca, b) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada seca c) modelo 2D obtenido con datos medidos durante la temporada de lluvia d) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada de lluvia.	40
25. Modelo estratigráfico propuesto a partir de los modelos de resistividad de los tendidos 1 y 1a, así como de las ortoimágenes de los modelos 3D. . . .	41
26. Modelos de resistividad en 2D: a) modelo 2D obtenido con datos medidos en temporada seca, b) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada seca c) modelo 2D obtenido con datos medidos durante la temporada de lluvia d) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada de lluvia.	42
27. Modelo estratigráfico propuesto a partir de los modelos de resistividad de los tendidos 2 y 2a, así como de las ortoimágenes de los modelos 3D. . . .	44

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
28. Modelos de resistividad en 2D: a) modelo 2D obtenido con datos medidos en temporada seca, b) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada seca c) modelo 2D obtenido con datos medidos durante la temporada de lluvia d) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada de lluvia.	45
29. Modelo estratigráfico propuesto a partir de los modelos de resistividad de los tendidos 3 y 3a, así como de las ortoimágenes de los modelos 3D. . . .	46
30. Modelos de resistividad en 2D: a) modelo 2D obtenido con datos medidos en temporada seca, b) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada seca c) modelo 2D obtenido con datos medidos durante la temporada de lluvia d) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada de lluvia.	47
31. Modelo estratigráfico propuesto a partir de los modelos de resistividad de los tendidos 4 y 4a, así como de las ortoimágenes de los modelos 3D. . . .	48
32. Modelos de resistividad en 2D para el tendido 5.	49
33. Modelo estratigráfico propuesto a partir del modelo de resistividad 2D del tendido 5.	49
34. Modelo de resistividad en 2D obtenido para el perfil 6.	50
35. Modelo estratigráfico propuesto a partir del modelo de resistividad 2D del tendido 6.	51
36. Modelo de resistividad en 2D obtenido para el tendido 7.	52
37. Modelo estratigráfico propuesto a partir del modelo de resistividad 2D del tendido 7.	52
38. Modelo de resistividad 2D del tendido 8.	53
39. Modelo de resistividad 2D del tendido 9.	54
40. Resultados de la prueba de corte directo para muestras de arena tobacea.	57
41. Resultados de la prueba de corte directo para muestras de toba arenosa.	57
42. Resultados de la prueba de corte directo para muestras de toba arcillosa.	58
43. Trazo de los perfiles considerados para cálculo de estabilidad de laderas y taludes.	59
44. Mapa de contornos generados a partir del valor de FS en los análisis de los perfiles 1 a 4, en condición seca y sin sobrecargas adicionales	61

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
45. Mapa de contornos generados a partir del valor de FS en los análisis de los perfiles 1 a 4, en condición seca considerando sobrecargas por edificación.	61
46. Mapa de contornos generados a partir del valor de FS en los análisis de los perfiles 1 a 4, para la condición húmeda sin imposición de sobrecargas.	63
47. Mapa de contornos generados a partir del valor de FS en los análisis de los perfiles 1 a 4, en condición húmeda considerando sobrecargas adicionales	63
48. Correlación entre resistividad y el contenido de arena.	64
49. Correlación entre resistividad y el contenido de finos (limos y arcillas). . . .	65
50. Carta de plasticidad de Casagrande para las muestras recolectadas en el sitio de estudio que presentan mayormente material de grano fino (limos y arcillas).	67
51. Contacto entre los miembros inferior y superior de la Fm. San Diego. El miembro inferior se conforma por arenas finas, mientras que el superior se caracteriza por areniscas y conglomerados.	67
52. Resultado de la comparación entre los modelos 3D antes y después de lluvias.	70
53. Esquema de un muestreador tipo Shelby, las medidas estandarizadas de los diámetros interior (D_i) y exterior (D_o) de la tubería se encuentran en la norma (ASTM D1587, 2012).	74
54. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 2: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger. Modelos inversos individuales en 2D: c) Dipolo-dipolo d) Schlumberger.	81
55. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 3: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger. Modelos inversos individuales en 2D: c) Dipolo-dipolo d) Schlumberger.	81
56. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 4: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger. Modelos inversos individuales en 2D: c) Dipolo-dipolo d) Schlumberger.	82
57. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 1a: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner	82
58. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 2a: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner	83

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
59. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 3a: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner	83
60. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 4a: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner	84
61. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 5: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner	84
62. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 6: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner	85
63. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 7: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner	85
64. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 8: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner	86
65. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 9: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner	87

Lista de tablas

Tabla		Página
1.	Resumen de resultados para muestras recolectadas en el sitio de estudio durante noviembre de 2019	55
2.	Granulometría y propiedades índice de muestras recuperadas en los pozos exploratorios perforados para el estudio previo realizado en 2017.	55
3.	Resumen de parámetros mecánicos calculados a partir de la prueba de corte directo	58
4.	Valores del FS obtenidos en los dos casos analizados para la condición seca	60
5.	Valores del FS obtenidos en los dos casos analizados para la condición húmeda	62

Capítulo 1. Introducción

1.1. Deslizamientos de ladera en la ciudad de Tijuana

Como se puede observar en la figura 1, la ciudad de Tijuana presenta serios problemas relacionados con procesos de deslizamientos de tierra gravitacionales debido a que una buena parte del crecimiento urbano se ha desarrollado en laderas. En González *et al.* (2014) reportan que el 30 % de la población tijuanense reside en laderas donde la inestabilidad del terreno es una amenaza latente. La geología del sitio, la modificación de la pendiente natural, así como la imposición de sobrecargas generadas por las edificaciones han sido la causa principal en el desencadenamiento de este problema, particularmente durante la temporada de lluvias.

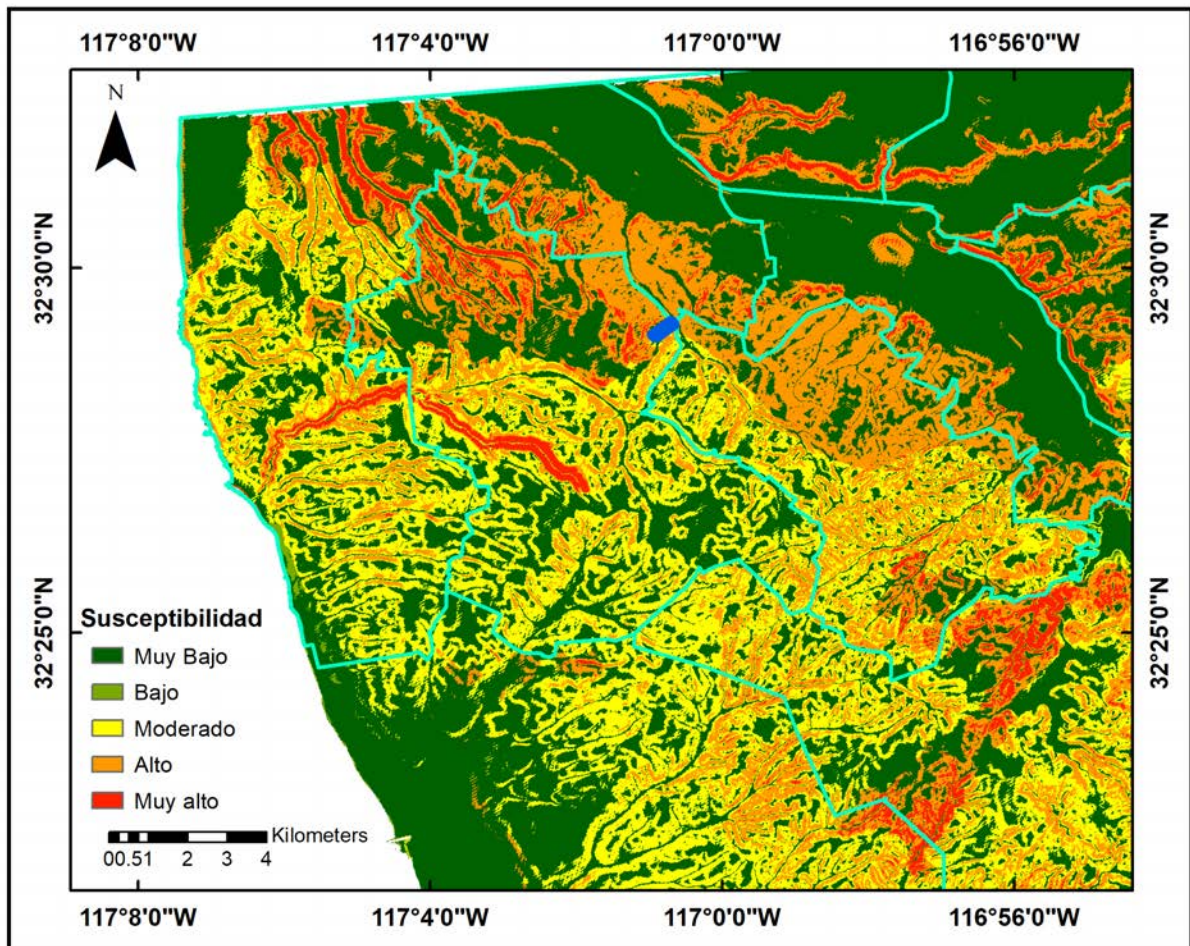


Figura 1. Mapa de susceptibilidad por inestabilidad de laderas del municipio de Tijuana, modificada de (CENAPRED, 2015), el polígono azul representa el sitio de estudio.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Métodos eléctricos para caracterizar movimientos de ladera

Una ventaja de emplear geofísica es en el volumen de información obtenida si se compara con los métodos de exploración geotécnica, como la perforación de pozos y las pruebas de penetración estándar, pues estas últimas solamente brindan información puntual. Crawford y Bryson (2018) señalan que el uso de métodos eléctricos provee una gran cantidad de datos para caracterizar el subsuelo, pero por si solos no aportan información para obtener la resistencia al corte. Para determinarla se requiere ensayar muestras de suelo en laboratorio.

El método de resistividad en corriente directa ha sido empleado en los estudios de deslizamientos de ladera. Lo común es utilizar el método cuando ya se ha presentado el movimiento de la masa de suelo. Bellanova *et al.* (2018) emplearon tomografías de resistividad eléctrica (TRE) para delimitar la masa de suelo desplazada en un deslizamiento de ladera ocurrido en el sur de Italia. Un ejemplo del uso conjunto de geofísica y geotecnia es el estudio realizado por Khan *et al.* (2017) para un deslizamiento ocurrido en Forth Worth Texas. El estudio empleó TRE, perforaciones y análisis de muestras de suelo en laboratorio para determinar las causas que llevaron a la falla del talud.

El método también se ha empleado para monitorear cambios de humedad en las unidades litológicas involucradas en los deslizamientos de ladera. Gance *et al.* (2016) emplearon modelos de resistividad en 2D generados a partir de datos recolectados a lo largo de un año para observar cambios en el contenido de humedad del suelo.

1.2.2. Correlación entre resistividad y propiedades mecánicas del suelo

Se han hecho varios intentos por correlacionar parámetros geotécnicos del suelo con propiedades geofísicas, esto con el fin de predecir el comportamiento ingenieril de los suelos a partir de mediciones geofísicas. Primeramente, Braga *et al.* (1999) obtuvieron relaciones empíricas que relacionan resistividad con los resultados de la prueba de penetración estándar. Posteriormente Sudha *et al.* (2009) estudiaron el impacto de la granulometría en los valores de resistividad y, finalmente, Abidin *et al.*

(2014) observaron el impacto de las propiedades índice del suelo en los valores de resistividad.

1.3. Localización y descripción de la zona de estudio

El sitio de estudio de esta tesis se ubica en la zona sur-central de la mancha urbana de la ciudad de Tijuana sobre la carretera libre Tijuana - Ensenada. El predio cuenta con una superficie del orden de 65,981 m².

1.3.1. Propuesta de urbanización y trabajos previos en el sitio de estudio

En el año 2007 se proyectó la urbanización del predio mediante la construcción de un fraccionamiento residencial. Se realizaron estudios geológicos y de mecánica de suelos para obtener los permisos de movimiento de tierras. Sin embargo, se identificaron algunos factores que podrían desencadenar la ocurrencia de deslizamientos de laderas, tanto al realizar trabajos de corte y terraplén como durante la vida útil del fraccionamiento.

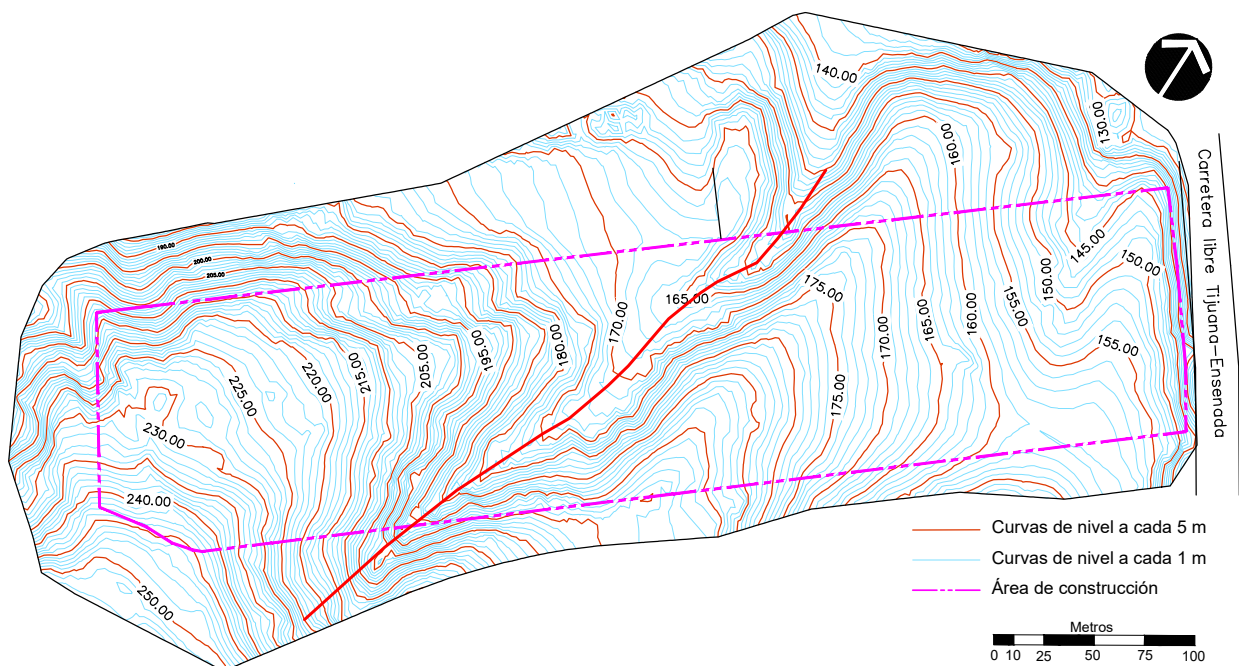


Figura 2. Trazo del lineamiento inferido por Díaz García (2007) utilizando fotointerpretación; la topografía presentada corresponde al año 2005.

El estudio geológico, realizado por Díaz García (2007) en octubre de 2007 presenta observaciones de rasgos geológicos superficiales visibles en el sitio y rasgos inferidos a partir de fotointerpretación. Díaz García (2007) reportó la presencia de un posible lineamiento o falla (no especifica cual) con orientación ligeramente hacia el noroeste que coincide con el cauce de un cañón (Figura 2). No se reporta evidencia de actividad reciente en ninguno de los rasgos geológicos inferidos.

El estudio de mecánica de suelos fue realizado en octubre de 2017 por Berumen Rodríguez (2017). Los alcances del estudio contemplaron realizar una evaluación de los factores desencadenantes de inestabilidad de las laderas y taludes existentes en el sitio. La estrategia de exploración fue la perforación de pozos para revisar la estratigrafía haciendo inspección visual. La identificación de condiciones geológicas desfavorables, tales como: presencia de interestratificaciones delgadas de material limoso y arcilloso con inclinación a favor de la pendiente en las laderas y taludes, así como su configuración topográfica actual y la posible presencia de un lineamiento o falla dentro del predio, provocó que se descartara el proyecto de urbanización. Llevarlo a cabo implicaba realizar obras de estabilización y se reducía el área aprovechable.

1.3.2. Marco geológico

En la mayor parte del municipio de Tijuana los materiales naturales expuestos son de origen sedimentario, de ambientes marino, fluvial y aluvial (Gastil *et al.*, 1975). De acuerdo a estudios realizados por Delgado-Argote *et al.* (2012a) en el extremo oriente de la ciudad es el área donde afloran formaciones de origen volcánico. Cabe mencionar que el extremo poniente de la ciudad también afloran rocas de origen volcánico, pertenecientes a la Formación (Fm.) Rosarito Beach (Minch, 1967).

Trabajos realizados por Minch *et al.* (1984) describen que durante el Plio-Pleistoceno en los alrededores de Tijuana se depositó la Fm. San Diego sobre las tobas de la Fm. Rosarito Beach. La Fm. San Diego esta constituida por arenas finas en la base, arenas y conglomerados en la cima (Minch *et al.*, 1984). La Fm. San Diego está sobreyacida discordantemente por la Fm. Lindavista conformada por areniscas y conglomerados que, en el Sur de Tijuana, coronan los cerros y las mesetas (Gastil *et al.*, 1975). Delgado-Argote *et al.* (2012a) establecen que la ciudad de Tijuana está edificada sobre estas

dos últimas formaciones.

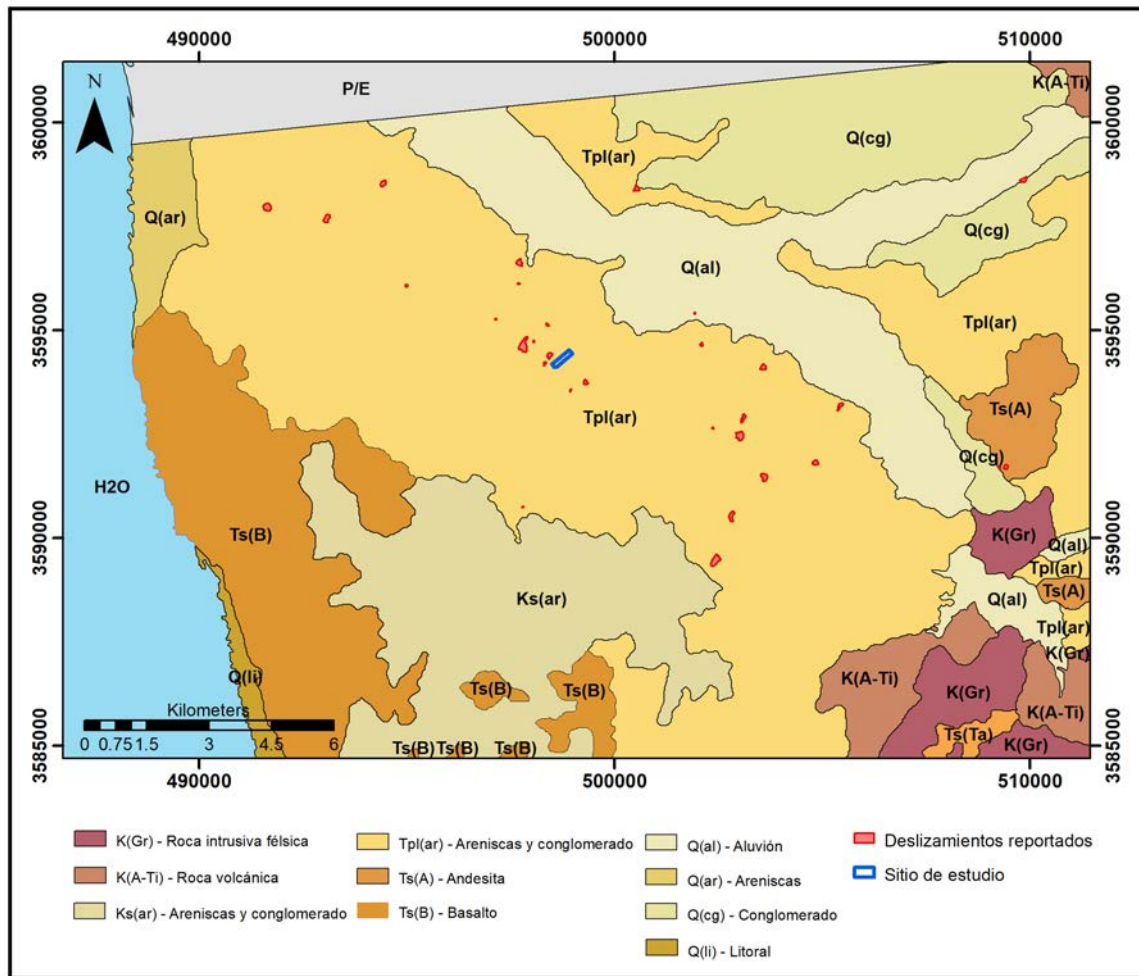


Figura 3. Carta geológica con clave I11-11 para la ciudad de Tijuana. Los deslizamientos presentados fueron reportados por Dirección de Protección Civil de Tijuana (2016).

La carta geológica presentada en la figura 3 ubica al sitio de estudio sobre una formación conformada por areniscas y conglomerados. Este tipo de materiales corresponde a la descripción hecha por Minch *et al.* (1984) para el miembro superior de la Fm. San Diego. Los registros de los pozos de exploración perforados por un estudio previo y las pruebas de laboratorio de mecánica de suelos, indican que en el sitio de estudio predominan materiales arenosos de grano fino con intercalaciones de limos y arcillas. Tomando esto en cuenta, así como la ubicación del sitio de estudio (figura3), los reportes geológicos elaborados en la ciudad de Tijuana y las observaciones hechas en campo, se concluye que el sitio de estudio queda alojado en el miembro inferior de la Fm. San Diego.

1.4. Hipótesis

El uso conjunto de modelos de resistividad eléctrica, pruebas de laboratorio e información de pozos, permitirá mejorar los análisis de estabilidad de laderas y taludes del sitio de estudio, haciendo posible el cálculo de estabilidad en zonas donde no se perforaron los pozos.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Con base en modelos geofísicos e información recolectada con técnicas de exploración geotécnica poder identificar las discontinuidades entre las unidades litológicas del sitio de estudio, la presencia de paleocauces y zonas con potencial de infiltración de humedad para refinar el cálculo de estabilidad de laderas y taludes existentes en el sitio de estudio.

1.5.2. Objetivos específicos

- Obtener los modelos geofísicos para trazar perfiles estratigráficos que permitan calcular la estabilidad de laderas y taludes en zonas donde no se perforaron pozos.
- Evaluar la estabilidad de laderas y taludes para diferentes escenarios, considerando cargas por edificación y variación en el contenido de humedad.
- Correlacionar valores de resistividad con parámetros mecánicos del suelo para establecer relaciones empíricas entre ambas propiedades.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Resistividad en corriente directa

Los métodos geofísicos tienen como objetivo la obtención de modelos que permitan inferir la estructura geológica del sitio de estudio a partir de la medición de las propiedades físicas del subsuelo, tales como: la densidad, la velocidad de propagación de ondas, la permeabilidad magnética, la resistividad eléctrica, entre otras.

El método de exploración geofísica con corriente directa (DC) trabaja con la resistividad eléctrica (ρ) porque ésta es una propiedad intrínseca de los materiales. A diferencia de la resistencia, ρ no depende de los parámetros geométricos del material (longitud y área) o del medio por donde circula la corriente eléctrica. ρ representa el grado de dificultad que experimentan los electrones al desplazarse a través de un determinado material, que para el caso de la exploración geofísica es el subsuelo.

El método se basa en la inyección de una corriente eléctrica continua en el subsuelo por medio de dos electrodos metálicos, mientras que con otro par de electrodos se mide la diferencia de potencial en superficie. A esta disposición de electrodos se le denomina arreglo tetrapolar. Existen diferentes configuraciones para el acomodo de los electrodos pero las más comunes se presentan en la figura 4 y son: Dipolo-dipolo, Schlumberger y Wenner. Con los nuevos equipos automáticos, es posible hacer los tres arreglos con un solo tendido de electrodos en poco tiempo.

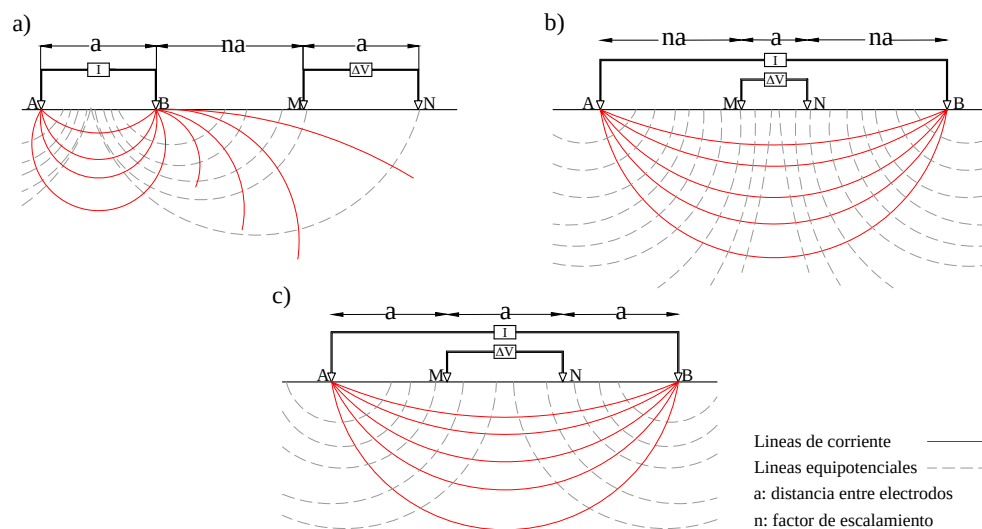


Figura 4. Esquema de la distribución de electrodos y los patrones de corriente eléctrica para los arreglos tetrapolares más comunes: a) Dipolo-dipolo, b) Schlumberger y c) Wenner.

Cada uno de los arreglos tetraelectródicos presentados en la figura 4 mide la diferencia de potencial del patrón de corrientes generado por la disposición de los electrodos, esto implica que cada arreglo tendrá una visión diferente de la estructura del subsuelo. Considerando un par de electrodos fuente (A y B) los electrodos receptores (M y N) detectarán dos potenciales, uno por cada fuente. A la resta de ambos potenciales se le llama diferencia de potencial (ΔV), para un arreglo tetraelectródico y colineal matemáticamente se expresa como:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (1)$$

donde:

AM, BM, AN y BN : distancia entre electrodos

ΔV : diferencia de potencial (Volts)

I : corriente eléctrica inyectada en el subsuelo (Amperes)

Resolviendo la ecuación 1 para ρ se obtiene:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

La ecuación 2 solamente es válida para un semiespacio homogéneo, sin embargo el subsuelo realmente es heterogéneo, por lo que las resistividades medidas en campo no son los valores reales del subsuelo. Por esta razón a los valores medidos en campo se les llama resistividades aparentes (ρ_a), considerando esto, la ecuación 2 se reescribe como:

$$\rho_a = 2\pi \frac{\Delta V}{I} g^{-1} = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

donde:

ρ : resistividad para un medio homogéneo

ρ_a : resistividad aparente para un medio heterogéneo

g^{-1} : Factor geométrico o factor que contiene la posición de los electrodos

2.2. Inversión para datos de corriente directa

Para conocer los valores reales de las resistividades eléctricas del subsuelo y por consecuente obtener un modelo de resistividad, es necesario realizar la inversión de los datos medidos en campo (resistividades aparentes). Vauhkonen *et al.* (2016) indican que este procedimiento es necesario cuando se hacen observaciones indirectas de la magnitud que es objeto de estudio, en este caso la resistividad del medio. Menke (2018) define la teoría de inversión como el conjunto de algoritmos matemáticos utilizados para recuperar información de interés del objeto de estudio, partiendo de observaciones indirectas. El objetivo final de la inversión de datos es obtener un modelo de resistividad que ofrezca una respuesta similar (resistividad aparente calculada) a los valores medidos en campo (resistividad aparente medida).

Para obtener modelos de resistividad bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) en medios heterogéneos e isotrópicos se debe resolver la ecuación de Poisson:

$$\nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (4)$$

Existen diversos métodos para resolver la ecuación 4, por ejemplo: diferencias finitas, elemento finito y ecuación integral. Este último es el método empleado en este trabajo. El método de ecuación integral trabaja con la aproximación de contrastes pequeños en resistividad, lo que supone que el campo eléctrico dentro del cuerpo inmerso en el subsuelo es muy cercano al de un semiespacio homogéneo.

La solución del problema inverso para datos de DC parte de la ecuación integral desarrollada por Gómez-Treviño (1987) para el campo eléctrico:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}_M, \mathbf{r}_A) = \int_V \mathbf{G}(\mathbf{r}_M, \mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_A) \rho(\mathbf{r}) dV \quad (5)$$

donde:

$\mathbf{E}(\mathbf{r}_M, \mathbf{r}_A)$: campo eléctrico medido en la superficie.

$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_A)$: campo eléctrico en el subsuelo debido a la fuente.

$\mathbf{G}(\mathbf{r}_M, \mathbf{r})$: es una función de Green que considera el campo eléctrico medido en el subsuelo debido a una fuente ficticia colocada en el receptor.

$\mathbf{r}$: vector de posición del punto de medición.

Pérez-Flores *et al.* (2001) adecuan la ecuación 5 para inversión de datos de DC:

$$\log_{10}\rho_a(\mathbf{r}_M, \mathbf{r}_A) = - \int_V \mathbf{G}(\mathbf{r}_M, \mathbf{r}, \rho) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_A, \rho) \log_{10}\rho(\mathbf{r}) dV \quad (6)$$

donde:

$\rho_a(\mathbf{r}_M, \mathbf{r}_A)$: son los datos medidos en superficie.

$\mathbf{G}(\mathbf{r}_M, \mathbf{r}, \rho)$: función de Green que representa un campo eléctrico medido en el subsuelo debido a una fuente ficticia colocada en el electrodo receptor M.

$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_A, \rho)$: campo eléctrico medido en el subsuelo debido al electrodo fuente A ($\mathbf{r}_A$).

$\rho(\mathbf{r})$: resistividades reales del subsuelo.

En la solución del problema inverso de la ecuación 6, con excepción de los datos medidos en superficie, todos los términos son incógnitas. Por lo tanto, para resolver la ecuación se deben suponer bajos contrastes de resistividad, además el campo eléctrico y la función de Green se deben evaluar para un semiespacio homogéneo. Bajo estas suposiciones la ecuación 6 se convierte en una aproximación:

$$\log_{10}\rho_a(\mathbf{r}) \cong \int_V \mathbf{G}(\mathbf{r}_M, \mathbf{r}, \rho_0) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_A, \rho_0) \log_{10}\rho(\mathbf{r}) dV \quad (7)$$

donde:

$\mathbf{r}$: posición de la medición en el semiespacio (x,y,z)

$\mathbf{r}_A$: posición del electrodo fuente ($x_A, y_A, 0$)

$\mathbf{r}_M$: posición del electrodo receptor ($x_M, y_M, 0$)

ρ_0 : resistividad del semiespacio homogéneo

Bajo esta aproximación, las resistividades observadas en campo son un promedio de las resistividades reales del subsuelo. A cada medición se le asigna un peso cuya

magnitud depende de la cercanía del punto de atribución a los electrodos. Al realizar la inversión de los datos es como des-promediar las resistividades aparentes y se obtiene las resistividades inferidas del subsuelo.

Para analizar el Kernel dentro de la integral, habremos de suponer que medimos sobre un semiespacio homogéneo y que por lo tanto, el término de resistividad sale de la integral porque es una constante, quedando:

$$\log_{10}\rho_a(\mathbf{r}) = \rho_0 \int_V \mathbf{G}(\mathbf{r}_M, \mathbf{r}, \rho_0) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_A, \rho_0) dV \quad (8)$$

Como $\rho_a = \rho_0$, el integrando de la ecuación 8 deber ser igual a la unidad, esto es un gran control de la exactitud numérica de la integral. El integrando también nos da información de la resolución de cada dato observado.

La ecuación empleada para la inversión de los datos de resistividad medidos en campo fue obtenida por Pérez-Flores *et al.* (2001), para un arreglo polo-polo y la expresión es:

$$\log_{10}\rho_a(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_M) = \frac{g^{-1}}{2\pi} - \int_V \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_A) \cdot (\mathbf{r}_M - \mathbf{r})}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_A|^3 |\mathbf{r}_M - \mathbf{r}|^3} \log_{10}\rho(\mathbf{r}) dV \quad (9)$$

2.2.1. Caso 2D

Para recuperar estructuras eléctricas bidimensionales se parte del arreglo polo-polo, siendo este el arreglo base, pues los arreglos tetraelectródicos son el resultado de la suma de cuatro arreglos polo-polo. El arreglo polo-polo es la configuración electródica más simple; cada electrodo actúa como un polo individual. El arreglo consiste en colocar un electrodo de corriente y un electrodo de potencial a una distancia tan grande que se puede considerar el infinito, ver figura (5).

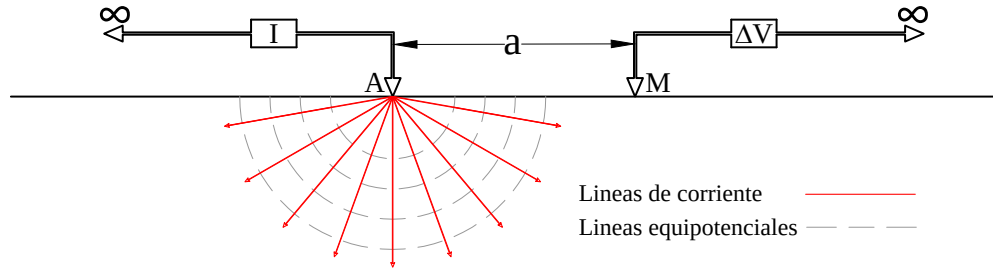


Figura 5. Esquema de la distribución de electrodos para el arreglo polo-polo. Se considera que los electrodos B y N están en el infinito, porque están colocados a una distancia muy grande con respecto al par de electrodos A y M.

Para obtener la ecuación que resuelve el problema inverso en 2D se parte del desarrollo del producto punto de la ecuación 9 colocando el polo fuente en la coordenada $(x_A, 0, 0)$ y polo receptor en $(x_M, 0, 0)$:

$$\log_{10}\rho_a(x_A, x_M) = \frac{|x_A - x_M|}{2\pi} \iint N(x_A, x_M, x, z) \log_{10}\rho(x, z) dx dz \quad (10)$$

donde:

$$N(x_A, x_M, x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x - x_M)(x_A - x) - y^2 - z^2}{\sqrt{(y^2 + (x - x_A)^2 + z^2)^3 + (y^2 + (x_M - x)^2 + z^2)}} dy$$

Para un arreglo tetrapolar colineal, la ecuación se obtiene sumando las fuentes y receptores actuantes, quedando expresada como:

$$\log_{10}\rho_a(x_A, x_M, x, z) = \frac{g^{-1}}{2\pi} \iint [N(x_A, x_M, x, z) - N(x_B, x_M, x, z) - N(x_A, x_N, x, z) + N(x_B, x_N, x, z)] \log_{10}\rho(x, z) dx dz \quad (11)$$

La ecuación 11 solamente es válida cuando los cuatro electrodos son colineales entre sí, con un solo electrodo que se encuentre fuera de la línea recta la ecuación ya no puede ser aplicada, de ahí la importancia que se le debe dar en campo a que los electrodos queden colocados sobre una línea lo más recta posible.

2.2.2. Caso 3D

Para este caso la ecuación 9 fue desarrollada por Antonio-Carpio (2003), considerando que los electrodos no están sobre una línea recta. También considera una sola fuente y un solo receptor localizados en x_A, y_A & x_M, y_M , respectivamente, desarrollando el producto punto obtiene:

$$\log_{10}\rho_a(r_A, r_B, r_M, r_N) = \frac{g^{-1}}{2\pi} \iiint (K_{AM} - K_{BM} - K_{AN} + K_{BN}) \log_{10}\rho(x, y, z) dx dy dz \quad (12)$$

donde:

$$K_{AM} = \frac{(x - x_A)(x_M - x) + (y - y_A)(y_M - y) + (-z)^2}{\left((x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + z^2\right)^{\frac{3}{2}} \left((x_M - x)^2 + (y_M - y)^2 + z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$K_{BM} = \frac{(x - x_B)(x_M - x) + (y - y_B)(y_M - y) + (-z)^2}{\left((x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + z^2\right)^{\frac{3}{2}} \left((x_M - x)^2 + (y_M - y)^2 + z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$K_{AN} = \frac{(x - x_A)(x_N - x) + (y - y_A)(y_N - y) + (-z)^2}{\left((x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + z^2\right)^{\frac{3}{2}} \left((x_N - x)^2 + (y_N - y)^2 + z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$K_{BN} = \frac{(x - x_B)(x_N - x) + (y - y_B)(y_N - y) + (-z)^2}{\left((x - x_B)^2 + (y - y_N)^2 + z^2\right)^{\frac{3}{2}} \left((x_B - x)^2 + (y_N - y)^2 + z^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$g^{-1} = \frac{1}{\sqrt{(x_A - x_M)^2 + (y_A - y_M)^2} - \sqrt{(x_B - x_M)^2 + (y_B - y_M)^2} - \sqrt{(x_A - x_N)^2 + (y_A - y_N)^2} + \sqrt{(x_B - x_N)^2 + (y_B - y_N)^2}}$$

2.2.3. Método de minimización

Las ecuaciones 11 y 12 se pueden representar como un sistema de ecuaciones lineales:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{AX} \quad (13)$$

donde:

Y : conjunto de datos observados (ρ_a en logaritmo base 10)

A : Es la matriz de peso, cada elemento de la matriz depende de la posición de los electrodos y la discretización prismática del subsuelo.

X : resistividades reales del subsuelo (en logaritmo base 10).

Para encontrar el valor de **X** se plantea una función objetivo la cual trabaja con programación cuadrática. La función objetivo minimiza la norma L_2 de los residuales:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{Y} - \mathbf{AX}\|^2 + \frac{1}{2} \beta \|\mathbf{DX}\|^2 \quad (14)$$

donde:

$\|\mathbf{Y} - \mathbf{AX}\|$: representa el ajuste de los datos

Y : datos observados (ρ_a en logaritmo base 10)

A : función de peso

X : incógnitas (resistividades reales en logaritmo base 10)

D : matriz que contiene las derivadas espaciales de la resistividad del subsuelo.

β : es el factor de suavizamiento que penaliza a la derivada espacial

El factor β controla la suavidad del modelo, si fuera cero los datos quedan sobreajustados porque se estaría despreciando el segundo término de la ecuación 14, dando como resultado un modelo muy rugoso o con mucha estructura. En cambio si se elige un β muy grande, el primer término se desprecia ya que el factor de suavizamiento cobra mayor importancia, esto se traduce en un modelo tendiendo a un semiespacio homogéneo pero con un ajuste de datos deficiente. Además de controlar la suavidad de los modelos, el factor β brinda estabilidad numérica al problema de inversión.

En Pérez-Flores *et al.* (2001) comentan que la aproximación de contrastes pequeños de resistividad preserva la linealidad del problema inverso, por lo tanto, el problema

se resuelve en una sola iteración.

2.3. Deslizamientos de ladera

Un talud o ladera es una masa de suelo cuya topografía no es plana, sino que presenta una pendiente o cambio significativo de altura. Suárez Díaz (2009) establece que la diferencia entre talud y ladera reside en el origen de la configuración topográfica actual de la masa de suelo. Cuando la conformación actual proviene de un proceso natural se trata de una ladera, en cambio si corresponde a una conformación artificial producto de trabajos de movimiento de tierras se trata de un talud.

Cruden y Varnes (1996) definen el deslizamiento de ladera o talud como un movimiento descendente a lo largo de una pendiente, experimentado por una masa de suelo o roca y que generalmente se presenta sobre una superficie de ruptura o en una zona relativamente delgada que ofrece poca resistencia al corte. En la figura 6 se presenta un esquema de un deslizamiento rotacional con la nomenclatura de sus componentes.

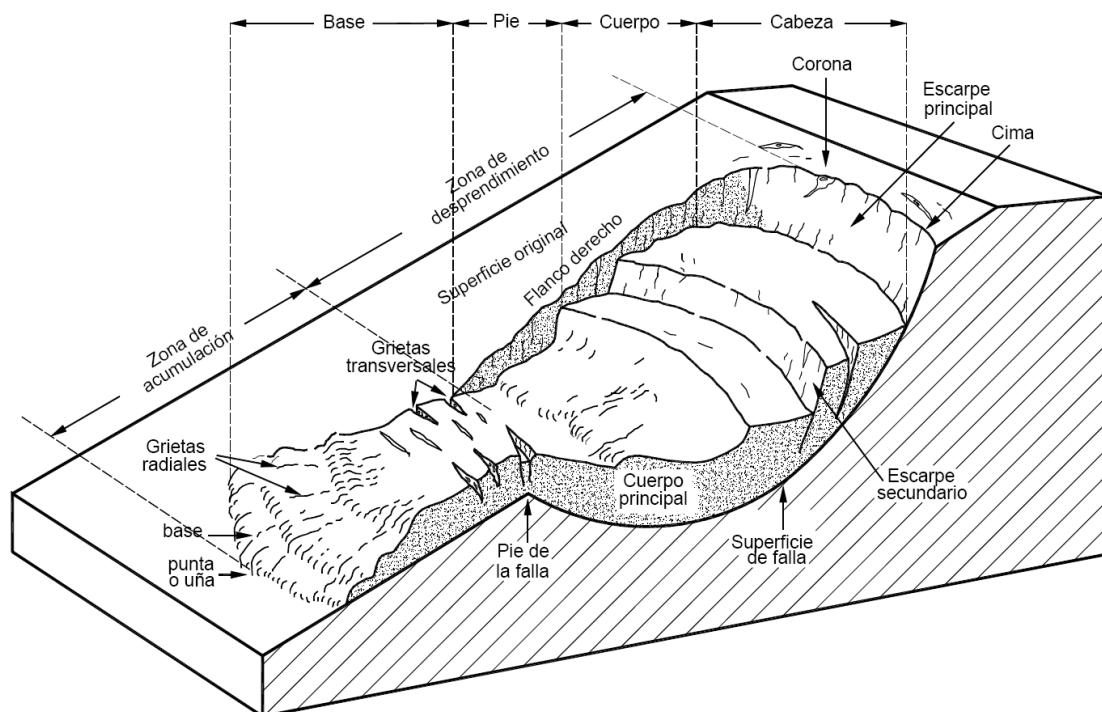


Figura 6. Nomenclatura empleada para describir las partes que conforman un deslizamiento de suelo, tomado de (Suárez Díaz, 2009).

Terzaghi *et al.* (1996) proponen que los deslizamientos pueden ocurrir en prácticamente cualquier escenario imaginable, ya sea de forma gradual o repentina y se puede presentar alguna o ninguna provocación aparente. El análisis teórico de estabilidad de laderas y taludes es complejo debido a la extensa variedad de factores y procesos que pueden causar la falla, las causas más comunes de falla se mencionan en la sección 2.3.2.

2.3.1. Clasificación de los movimientos de ladera

Los deslizamientos se pueden clasificar en base a varios criterios, como puede ser el tipo de movimiento o el tipo de material involucrado. En la práctica es más común clasificarlos con respecto al tipo de movimiento, generalmente se emplea el criterio y nomenclatura propuestos por Cruden y Varnes (1996). Los deslizamientos de suelo se pueden presentar como el movimiento de una sola masa o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes (Suárez Díaz, 2009). Varnes (1978) hace énfasis en la importancia de catalogar los deslizamientos en 2 tipos: rotacional y traslacional, ésto con el fin de realizar un análisis de estabilidad acertado y de ser necesario proponer las medidas de corrección adecuadas.

Los deslizamientos rotacionales, como el que se presenta en la figura 6, ocurren cuando la superficie de falla tiene una forma curva o cóncava. El movimiento es rotacional con respecto al eje paralelo a la superficie de falla. De acuerdo con Suárez Díaz (2009), el centro de giro de la masa de suelo se encuentra por encima del centro de gravedad de la masa deslizada. En la cabeza del movimiento el desplazamiento aparentemente es semi-vertical. Este tipo de deslizamiento es muy común en materiales homogéneos, por lo que suele presentarse en taludes conformados con material terraplenado (Cruden y Varnes, 1996). En la ciudad de Tijuana son dominantes los deslizamientos rotacionales (Delgado-Argote *et al.*, 2012b).

Los deslizamientos traslaciones se caracterizan porque la masa de suelo se desliza hacia afuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie relativamente plana, tal como se puede observar en la figura 7. La componente rotacional en este tipo de deslizamiento es prácticamente nula (Highland *et al.*, 2008). Este tipo de deslizamiento se puede prolongar a distancia considerable si la superficie de falla está suficientemente

inclinada, caso contrario a los deslizamientos rotacionales, donde una vez ocurrido el movimiento, la masa de suelo regresa nuevamente a su condición de equilibrio (Crudden y Varnes, 1996).

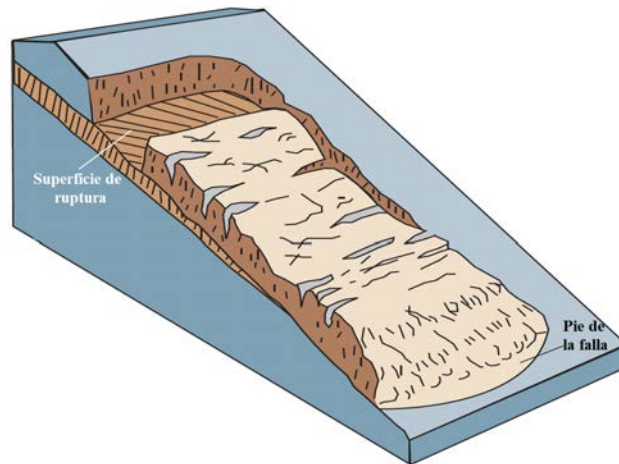


Figura 7. Esquema de un deslizamiento traslacional, tomado de (Highland et al., 2008).

2.3.2. Factores promotores del movimiento de ladera

La falla de una ladera o de un talud ocurre cuando las fuerzas desestabilizadoras superan la resistencia al corte de la masa de suelo. Los factores que pueden incrementar las fuerzas desestabilizadoras se clasifican en desencadenantes y condicionantes. Los factores condicionantes o pasivos son aquellos que dependen de la naturaleza, estructura y forma del terreno, tales como: las condiciones topográficas, litológicas, hidrogeológicas, los estados tenso-deformacionales, así como el grado de alteración o meteorización de los materiales y la cobertura vegetal. Los factores desencadenantes o activos, son considerados acciones externas, que provocan inestabilidad y desencadenan movimientos en masa al modificar las condiciones preexistentes. Estos son: precipitación, sismicidad, vibración, erosión, agrietamiento por resequedad del suelo y acciones antrópicas, principalmente.

Entre las actividades antrópicas que propician la inestabilidad de laderas y taludes destaca:

- Modificar la pendiente natural como parte del proyecto de movimiento de tierras para urbanización o para explotación de agregados pétreos.

- Aumentar las sobrecargas a causa de la construcción de obras civiles.
- Facilitar el proceso de erosión en materiales que quedan expuestos al realizar trabajos de corte.
- Cambiar el cauce natural superficial y/o subterráneo del agua.

2.4. Propiedades mecánicas del suelo

2.4.1. Granulometría y propiedades índice

Para clasificar los suelos que serán empleados en obras civiles es necesario conocer la distribución del tamaño del grano de una masa de suelo (Das, 2002). Esta distribución recibe el nombre de granulometría y se obtiene realizando una prueba de laboratorio que consiste en pasar una muestra de suelo a través de varios tamices. Cada tamiz tiene una apertura estandarizada y para realizar la prueba se apilan verticalmente de mayor a menor, tal como se muestra en la figura 8.

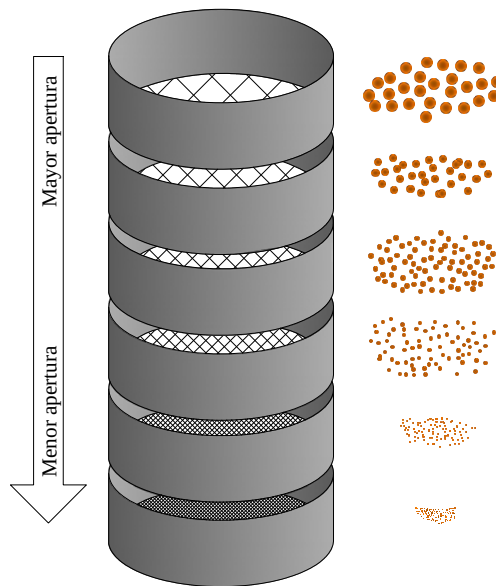


Figura 8. Esquema del acomodo de tamices para obtener la granulometría de una muestra de suelo.

El resultado de la prueba permite conocer los porcentajes de grava, arena y finos (limos y arcillas) de una muestra. El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) asigna el tipo de suelo con base en estos porcentajes y en las propiedades índice de

la muestra (Kalinski *et al.*, 2011). Todas las pruebas de laboratorio realizadas en este trabajo se hicieron de acuerdo a los procedimientos estandarizados de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) El procedimiento para obtener la granulometría de una muestra de suelo está indicado en la norma ASTM D422-63e2 (2007).

Las propiedades índice también conocidas como los límites de Atterberg, describen el comportamiento de los suelos limosos y arcillosos expuestos a diferentes contenidos de humedad. Los suelos arcillosos y limosos pueden presentar cuatro estados en función de su contenido de humedad: semi-líquido, plástico, semi-sólido y sólido según Das y Sivakugan (2019). El contenido de humedad expresado como porcentaje, donde el suelo pasa del estado plástico al estado líquido se denomina límite líquido (LL). Al contenido de humedad necesario para que el suelo cambie de estado semi-sólido a plástico se le llama límite plástico (LP), ver figura 9.

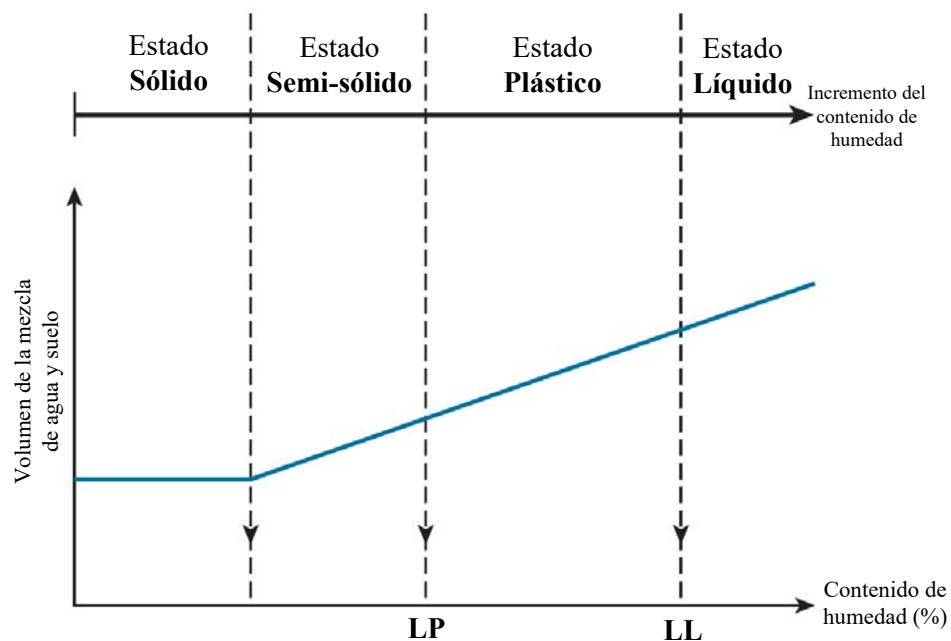


Figura 9. Esquema ilustrativo de la definición de los límites de Atterberg, modificado de (Das y Sivakugan, 2019)

Para obtener el porcentaje de humedad que define al LL y al LP se realizan dos pruebas de laboratorio:

1. Para determinar LL se utiliza un dispositivo llamado Copa de Casagrande. La prue-

ba consiste en determinar el porcentaje de humedad necesario para rellenar un surco de 12.7 mm de ancho previamente cortado en la muestra. El procedimiento a detalle se indica en la norma (ASTM D4318, 2005).

2. Para obtener el LP se forman cilindros de 3mm de diámetro con la muestra de suelo. La prueba consiste en determinar el contenido de humedad con el cual ya no se pueden formar los cilindros. El procedimiento también se detalla en la norma ASTM D4318 (2005).

2.4.2. Resistencia al esfuerzo cortante

La resistencia al corte de los suelos es un factor muy importante para el diseño de cimentaciones y demás problemas ingenieriles, como la capacidad de carga, los empujes de tierra y la estabilidad de taludes (Das, 2019). En mecánica de suelos el concepto de resistencia se refiere a un estado límite que de ser rebasado producirá algún tipo de falla. La resistencia al corte de un suelo es la capacidad que éste tiene para soportar los esfuerzos de cizalla. Kaliakin (2017) propone que es una medida de la resistencia del suelo ante la deformación producida por el desplazamiento continuo de sus partículas.

La resistencia al corte de un suelo se puede obtener mediante la prueba de cortante directo. El procedimiento para realizar la prueba en laboratorio se indica en la norma ASTM D3080 (2011). Para realizar esta prueba de laboratorio se requiere fraccionar una muestra del mismo tipo de suelo en tres partes iguales, las cuales se ensayan por separado. La prueba consiste en aplicar dos fuerzas sobre la fracción de muestra de suelo, la primera es una fuerza normal y en sentido vertical cuya magnitud se mantiene constante, a la par se aplica una fuerza cortante que varía con el tiempo. Conforme se aplican ambas fuerzas se mide el desplazamiento producido (Gratchev *et al.*, 2018). A cada fracción de la muestra se le aplica una carga normal distinta (se incrementa en cada ensayo). Los resultados de la prueba se presentan en una gráfica como la de la figura 10b, donde cada uno de los puntos color azul representa los valores máximos de los esfuerzos normal y cortante aplicados sobre cada fracción de la muestra que se analizó en laboratorio.

La resistencia al corte de un suelo se expresa con la ecuación de Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (15)$$

donde:

τ_f : resistencia al corte

c : cohesión

σ : esfuerzo normal

ϕ : ángulo de fricción interna

La ecuación 15 es una función de primer grado, por lo tanto, al graficarla se obtiene una línea recta, tal como se puede apreciar en la figura 10b. En la ecuación 15, el término $\tan \phi$ representa la pendiente de la recta, mientras que el término c es la ordenada al origen. Para obtener la recta descrita por la ecuación 15, se realiza un ajuste lineal por mínimos cuadrados a los resultados obtenidos para cada fracción de la muestra ensayada (los puntos de color azul en la figura 10b).

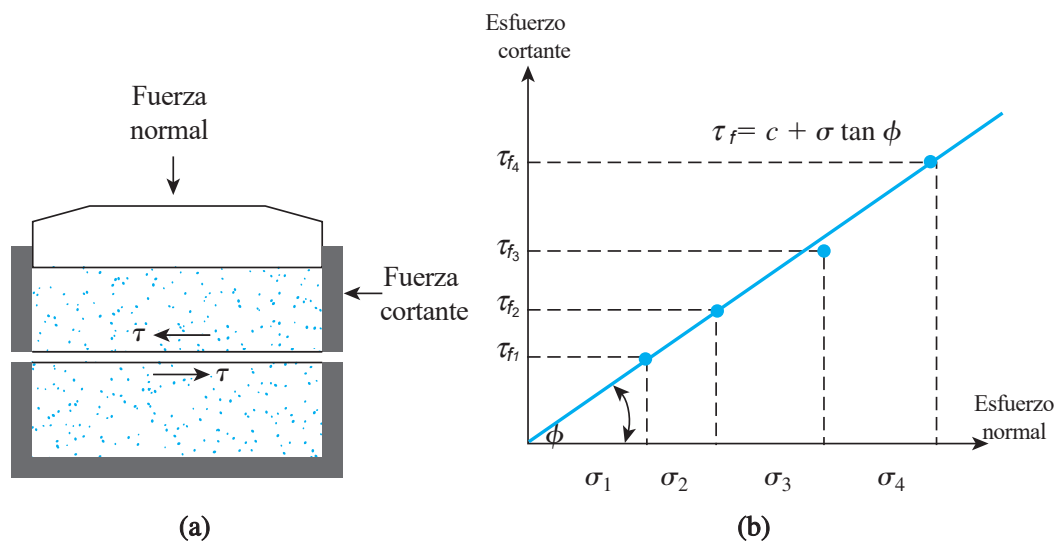


Figura 10. Prueba de corte directo: a) esquema de la muestra ensayada, b) gráfica para obtener el ángulo de fricción interna, modificada de (Das, 2019)

Para analizar la estabilidad de una ladera o de un talud, se requiere conocer la cohesión (c) y en ángulo de fricción interna (ϕ) de las unidades litológicas que los conforman. Como se mencionó en el párrafo anterior, c se obtiene encontrando la ordenada al origen de la recta ajustada por mínimos cuadrados. Mientras que el ángulo de fricción interna se obtiene con la ecuación:

$$\phi = \arctan(m) \quad (16)$$

donde:

ϕ : ángulo de fricción interna

m : pendiente de la recta obtenida con ajuste lineal por mínimos cuadrados

2.5. Análisis de estabilidad de ladera

Una vez que se conoce la geometría del talud, las propiedades mecánicas del suelo y se ha establecido un modelo estratigráfico, se puede proceder con el cálculo de estabilidad. La mayoría de los programas computacionales empleados para el cálculo de estabilidad de laderas se basan en las formulaciones de equilibrio límite en dos dimensiones (Abramson *et al.*, 2001).

El objetivo de calcular la estabilidad de un talud es determinar si las fuerzas resistentes, es decir aquellas que oponen resistencia al deslizamiento, son mayores que las fuerzas que favorecen la falla del talud. La relación entre fuerzas resistentes y aquellas que promueven la falla del talud (fuerzas desestabilizadoras) suele expresarse por medio de un factor de seguridad (FS).

Todos los métodos de análisis de estabilidad de taludes emplean la definición de factor de seguridad, la diferencia está en las condiciones de equilibrio estático consideradas en los cálculos para determinarlo (Duncan *et al.*, 2014).

2.5.1. Factor de seguridad

El factor de seguridad (FS) es una relación entre la resistencia al corte τ_f de un suelo a lo largo de una posible superficie de falla y el esfuerzo cortante τ que actúa sobre la misma superficie de falla, tal como se aprecia en la figura 11.

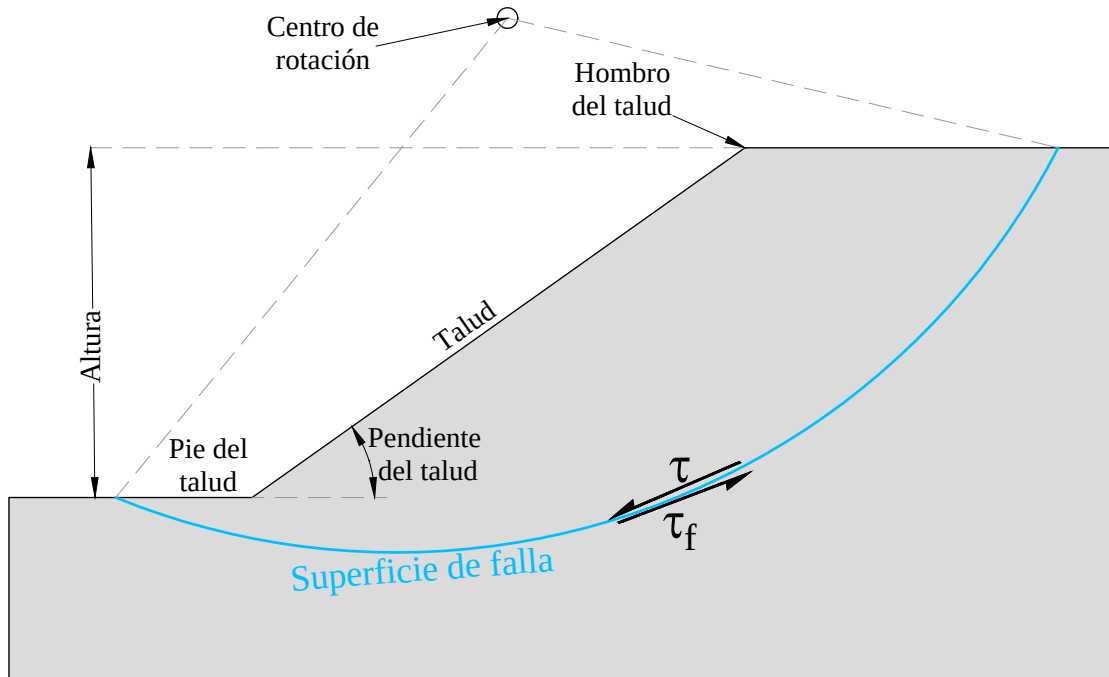


Figura 11. Esfuerzos de corte que actúan en una superficie de falla, τ_f representa la resistencia al corte de la masa de suelo, mientras que τ indica el esfuerzo cortante que propicia la falla del talud.

Empleando la figura 11, FS queda expresado por la relación

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (17)$$

De la ecuación 17 se puede ver que mientras más grande sea τ_f con respecto a τ , el talud es más estable. Como se mencionó en la sección 2.4.2, la resistencia al corte (τ_f) de la masa de suelo depende de: la cohesión (c), el esfuerzo normal (σ) y el ángulo de fricción interna (ϕ). La correlación entre estos parámetros se expresa con la ecuación 15, también llamada ecuación de Mohr-Coulomb.

Si sustituimos 15 en 17, FS queda definido como:

$$FS = \frac{c + \sigma \tan \phi}{\tau} \quad (18)$$

2.5.2. Método de equilibrio límite

Gratchev *et al.* (2018) definen los métodos de equilibrio límite como un análisis complejo en el que la masa de suelo se divide en rebanadas verticales llamadas dovelas para analizar la contribución de las fuerzas existentes entre dovelas a la estabilidad del talud. En este tipo de análisis solamente se aplican los conceptos de la estática, aún así la mayoría de los problemas de estabilidad son estáticamente indeterminados, porque el número de ecuaciones no es suficiente para satisfacer el número de incógnitas (Huang, 2014). Para resolver este problema y simplificar el análisis se hacen las siguientes suposiciones:

- Se asume que la falla ocurre a lo largo de una superficie
- La masa deslizada se mueve como un cuerpo rígido
- El criterio de falla de Mohr-Coulomb se satisface en la superficie de falla

Aun bajo esas suposiciones es complicado definir las fuerzas que actúan entre dovelas por lo que han surgido diferentes métodos que hacen suposiciones adicionales para calcular la magnitud de dichas fuerzas. En este trabajo se empleó el método propuesto por Spencer (1967) para calcular la estabilidad de los taludes y laderas existentes en el sitio de estudio.

2.5.3. Método de Spencer

Spencer (1967) propuso un método para calcular la estabilidad de un talud que satisface totalmente las condiciones de equilibrio (Huang, 2014). El método supone que de las fuerzas verticales X_R , X_L y las fuerzas normales E_L , E_R que interactúan entre las dovelas surge una componente de empuje con ángulo de inclinación θ constante

a lo largo de la superficie de deslizamiento (Duncan *et al.*, 2014). En la figura 12 se presenta un esquema con las fuerzas consideradas para cada dovela analizada con este método.

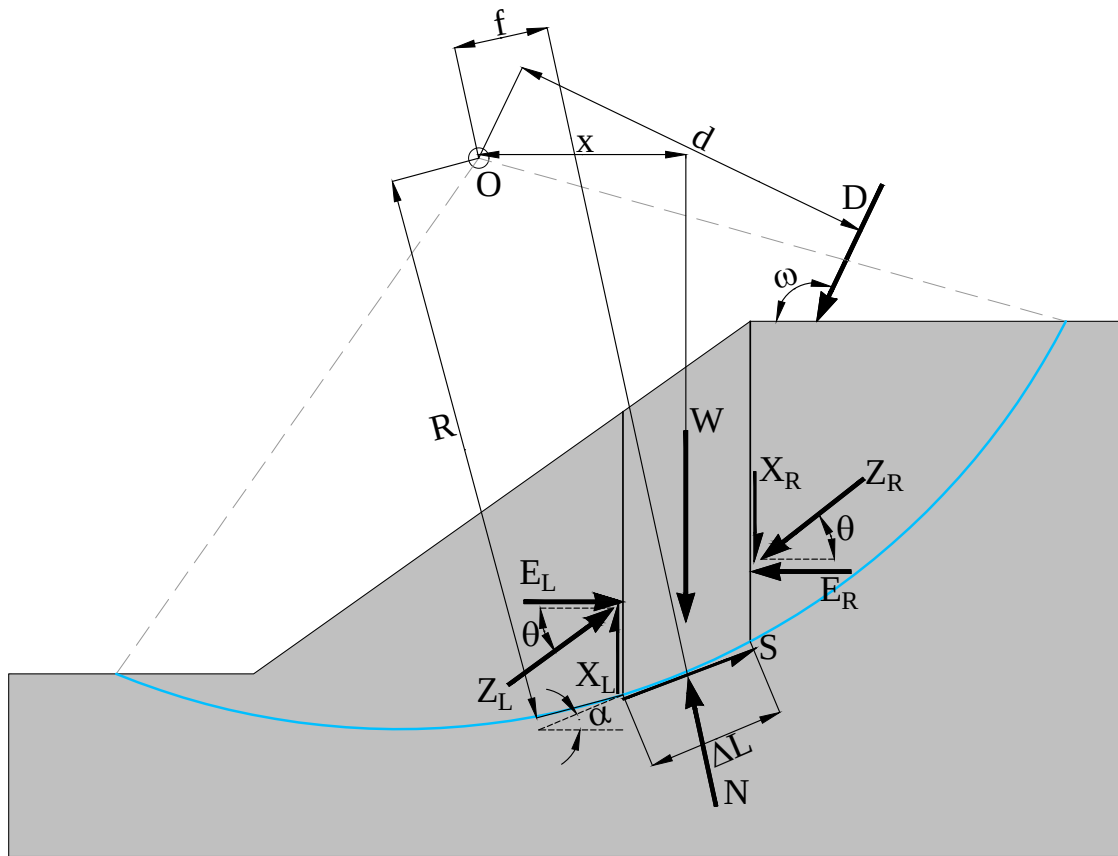


Figura 12. Fuerzas actuantes sobre una dovela analizada mediante el método de Spencer: W representa el peso de la dovela, X_R y X_L son fuerzas de corte vertical entre dovelas, E_R y E_L son fuerzas normales que actúan entre dovelas, N es una fuerza normal que se presenta en la base de la dovela, S es la fuerza resistente al corte y D representa las cargas externas que actúan sobre la dovela.

Para calcular el equilibrio límite de fuerzas y momentos en cada dovela el método de Spencer hace las siguientes suposiciones:

- La división de los planos entre dovelas es siempre vertical.
- La línea de acción del peso W de cada dovela pasa a través del centro de la misma.
- La fuerza normal N está activa en el centro de la dovela analizada.
- El ángulo inclinación θ es constante para todas las dovelas.

Dado que este método de análisis satisface el equilibrio global de fuerzas y momentos se determinan dos valores de factor de seguridad, uno para cada condición de equilibrio, el problema de estabilidad se resuelve cuando ambos factores de seguridad convergen a un mismo valor.

Para obtener una ecuación que permita calcular el factor de seguridad para la condición de equilibrio de momentos (FS_M), se realiza una sumatoria de momentos respecto al punto O presentado en la figura 12:

$$\sum Wx - \sum SR - \sum Nf \pm \sum Dd = 0 \quad (19)$$

Donde R, f y d son distancias perpendiculares desde el punto de aplicación de las fuerzas consideradas por la ecuación 19 al punto O.

La fuerza cortante S que actúa en la base de la dovela se obtiene a partir de la ecuación de Mohr-Coulomb, quedando expresada como:

$$S = \frac{c \Delta L + N \tan \phi}{FS} \quad (20)$$

Sustituyendo la ecuación 20 en la ecuación 19 y reacomodando términos, FS_M queda expresado como:

$$FS_M = \frac{\sum (c \Delta L R + N R \tan \phi)}{\sum Wx - \sum Nf \pm \sum Dd} \quad (21)$$

El factor de seguridad para la condición de equilibrio de fuerzas (FS_F) se obtiene a partir de una sumatoria de las fuerzas horizontales que actúan en cada dovela, ver figura 12. Cabe recalcar, que cada dovela no es homogénea. Sino que es un conjunto de masas sobrepuestas de acuerdo al modelo estratigráfico del perfil que se está analizando.

$$\sum (E_L - E_R) - \sum N \sen \alpha + \sum S_m \cos \alpha + \sum D \cos \omega = 0 \quad (22)$$

La ecuación 22 también se puede resolver para obtener el valor de las fuerzas normales que actúan sobre las dovelas:

$$E_R = E_L + \frac{c \Delta L \tan \phi \cos \alpha}{FS} + N \left(\frac{\tan \phi \cos \alpha}{FS} - \sin \alpha \right) + D \cos \omega \quad (23)$$

El cálculo de las fuerzas normales se realiza de derecha a izquierda, en la primer dovela la fuerza normal izquierda equivale a cero ($E_L = 0$). Bajo esta consideración el resto de las fuerzas normales pueden ser calculadas. Una vez que se conoce la magnitud de las fuerzas normales se procede a calcular el valor de las fuerzas cortantes verticales que actúan entre dovelas empleando la relación:

$$X = E \tan \theta \quad (24)$$

Sustituyendo 20 en 22 y re-acomodando términos, se obtiene la ecuación para calcular FS_F :

$$FS_F = \frac{\sum (c \Delta L R + N R \tan \phi)}{\sum N \sin \alpha - \sum D \cos \omega} \quad (25)$$

Para resolver las ecuaciones 21 y 25 es necesario conocer la magnitud de la fuerza normal N . Ésta se obtiene a partir de una sumatoria de fuerzas en sentido vertical:

$$(X_L - X_R) - W + N \cos \alpha + S \sin \alpha - D \sin \omega = 0 \quad (26)$$

Sustituyendo 20 en 26 y resolviendo para N se obtiene:

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \left[\frac{c \Delta L \sin \alpha - \tan \phi \sin \alpha}{FS} \right]}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{FS}} \quad (27)$$

Para resolver la ecuación 27 se requiere el valor de FS , este factor depende de la condición de equilibrio que se esté resolviendo, si es equilibrio de fuerzas se utiliza FS_F , en cambio si se está trabajando equilibrio de momentos se emplea FS_M . Dado que los factores de seguridad son incógnitas al igual que las fuerzas entre dovelas (X_L

y X_L), la ecuación 27 se tiene que resolver por iteraciones.

Para comenzar la solución del problema las fuerzas normales y cortantes que actúan en las dovelas son ignoradas, por lo que la ecuación 27 se simplifica:

$$N = W \cos \alpha + D \cos(\omega + \alpha - 90) \quad (28)$$

La ecuación 28 permite obtener un valor preliminar para el FS y de este modo comenzar a resolver el problema de estabilidad, por medio de un proceso iterativo se irá actualizando FS y las magnitudes de las fuerzas entre dovelas, el problema se considera resuelto cuando el FS para momentos y fuerzas converge a un solo valor, ver figura 13.

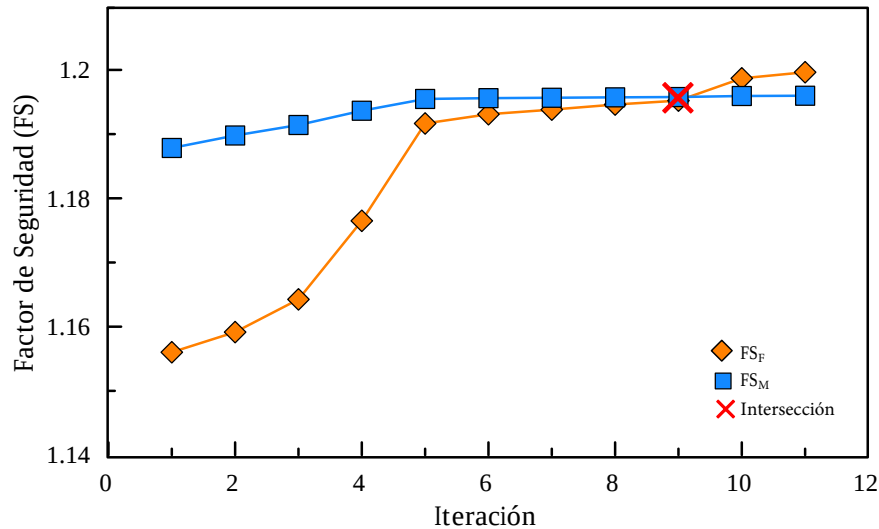


Figura 13. Gráfico de convergencia del factor de seguridad para las condiciones de equilibrio consideradas por el método de Spencer.

Capítulo 3. Resultados e interpretación

3.1. Variación del relieve con el tiempo

En el sitio de estudio se había proyectado la construcción de un fraccionamiento residencial, inclusive se realizaron trabajos de movimiento de tierras para conformar plataformas para desplante de las viviendas. Para determinar en que zonas se colocaron terraplenes (relleno) y en donde se cortó material, se hizo un análisis comparativo de la superficie topográfica del sitio de estudio en tres años diferentes: 2005, 2010 y 2017.

La topografía del 2005 se obtuvo a partir de un modelo digital de elevación (MDE) de alta resolución generado con datos LiDAR publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la clave del MDE que corresponde al sitio de estudio es I11C79C2. La superficie topográfica del año 2005 se presenta en la figura 14. Para ese periodo aún no existía el proyecto de urbanización, éste se propuso en el año 2007.

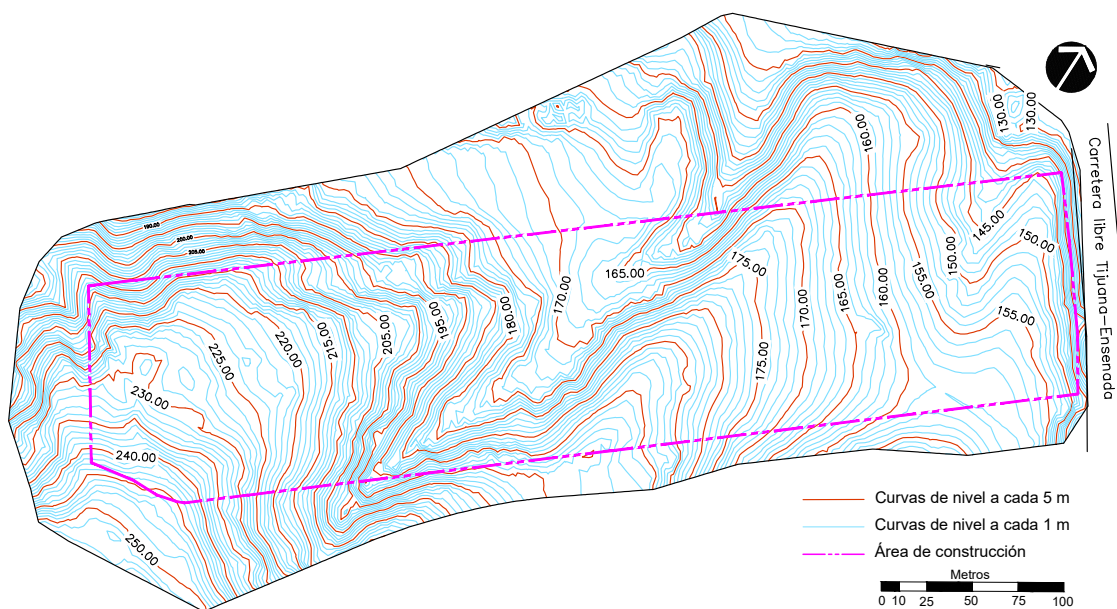


Figura 14. Superficie topográfica del sitio de estudio en el año 2005.

La segunda superficie topográfica corresponde al año 2010, durante este periodo ya se había realizado movimiento de tierras, destaca la colocación de relleno en el cauce de un cañón y el corte de material en el lindero Oeste del predio, ver figura 15.

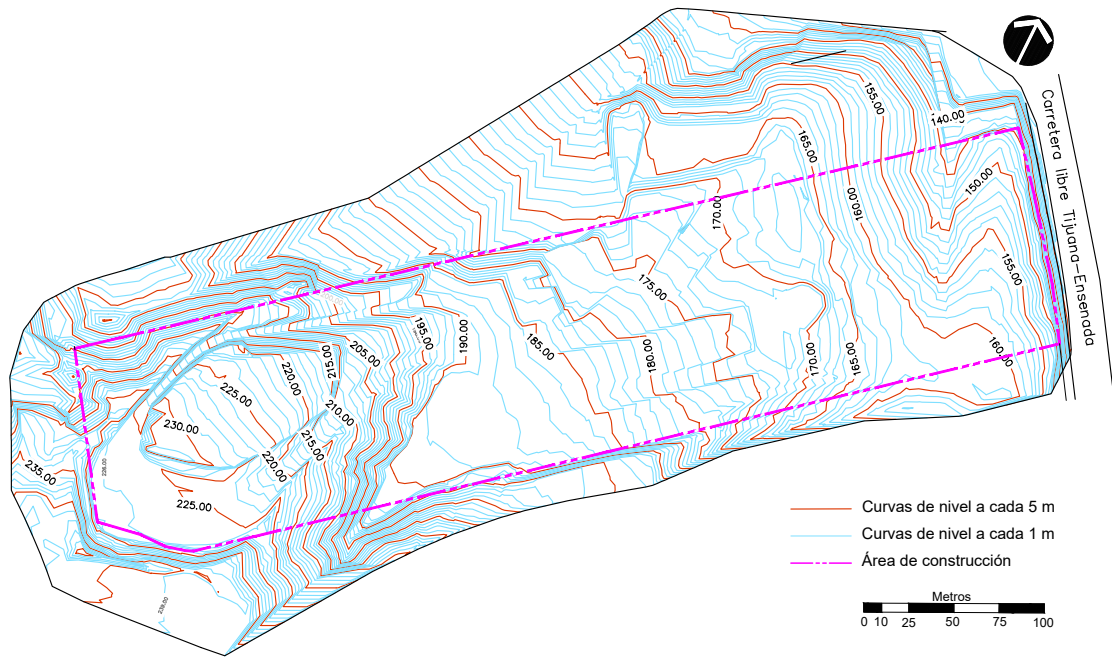


Figura 15. Superficie topográfica del sitio de estudio en el año 2010.

La tercer superficie corresponde al año 2017. Para esta fecha ya se había incrementado el área donde se realizaron cortes, inclusive ya se habían conformado algunas plataformas de desplante para viviendas. La topografía del 2017 se presenta en la figura 16.

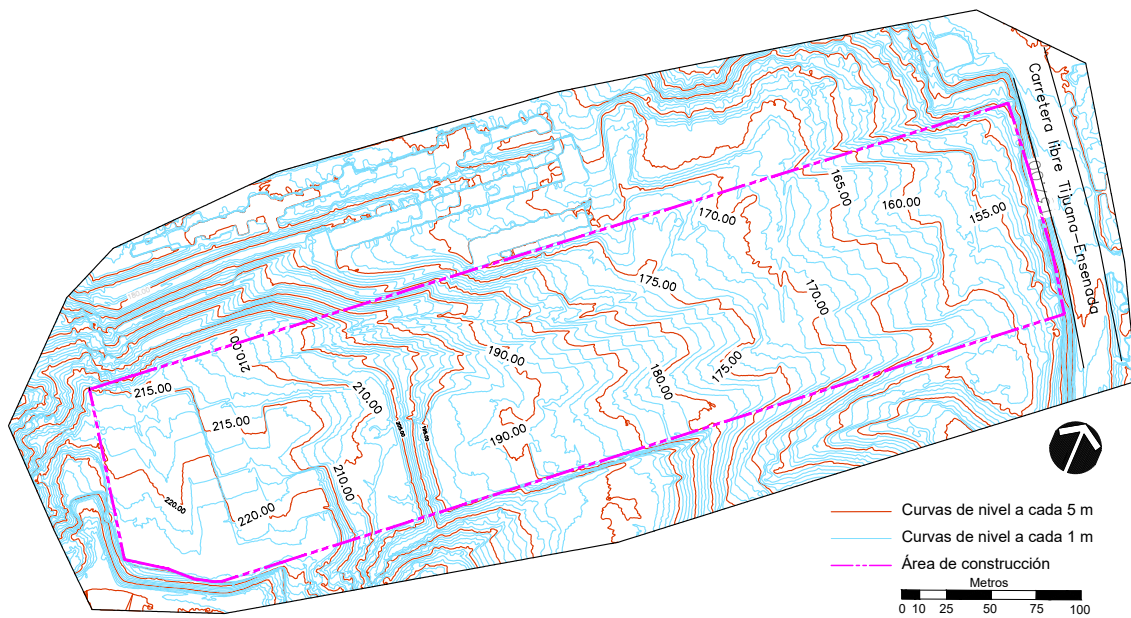


Figura 16. Superficie topográfica del sitio de estudio en el año 2017.

Para determinar los espesores y áreas terraplenadas, así como las zonas donde se removió material, se realizó una comparación entre las superficies. Se tomó como base la topografía del 2017 y se le restaron las elevaciones de la topografía de 2005. Donde se colocó relleno el resultado de la comparación es un número positivo, mientras que un número negativo indica que en esa zona se removió material. La superficie resultante al realizar la comparación se presenta en la figura 17. Realizar este análisis fue útil tanto para la interpretación de los modelos de resistividad, como para la propuesta de los modelos estratigráficos necesarios para los cálculos de estabilidad de laderas y taludes.

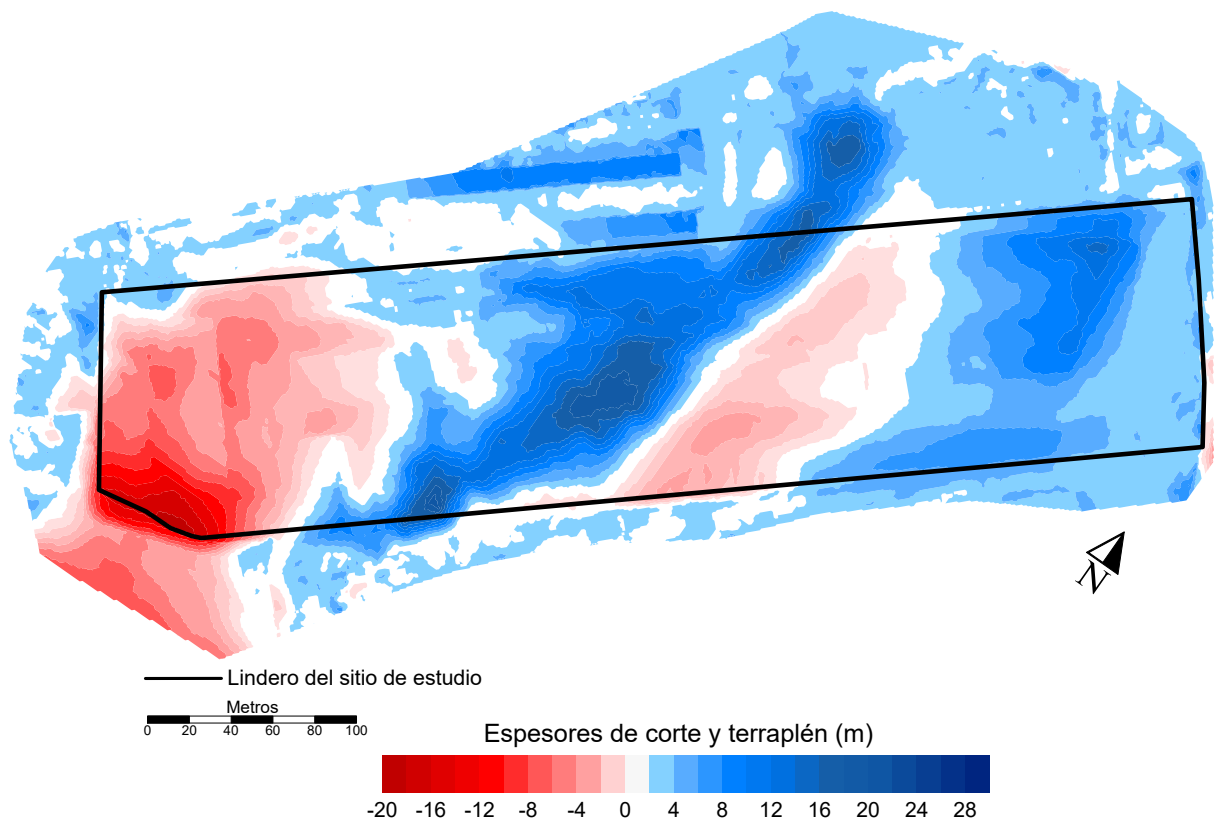


Figura 17. Resultado de la comparación entre las superficies topográficas de los años 2017 y 2005. La zonas de corte se indican en color rojo mientras que el color azul corresponde a zonas terraplenadas (relleno).

En los linderos norte, sur y oeste del sitio de estudio se modificó la pendiente durante los trabajos de movimiento de tierras, por lo tanto, estas áreas corresponden a taludes. En el lindero paralelo a la carretera no se ha modificado la pendiente, por lo tanto el desnivel topográfico de esta zona corresponde a una ladera.

3.2. Modelos de resistividad

Los modelos de resistividad que se presentan en este capítulo fueron obtenidos con los algoritmos de inversión desarrollados por Pérez-Flores *et al.* (2001) y Pérez-Flores *et al.* (2012) para los casos 2D y 3D, respectivamente. Para construir los modelos 3D se tomaron datos en dos campañas, la primera a finales del mes de agosto del 2019 que corresponde a la temporada con marcada ausencia de lluvia, mientras que la segunda se realizó en marzo del 2020, en temporada de lluvias. La temporada de lluvias en el municipio de Tijuana comprende los meses de noviembre a abril.

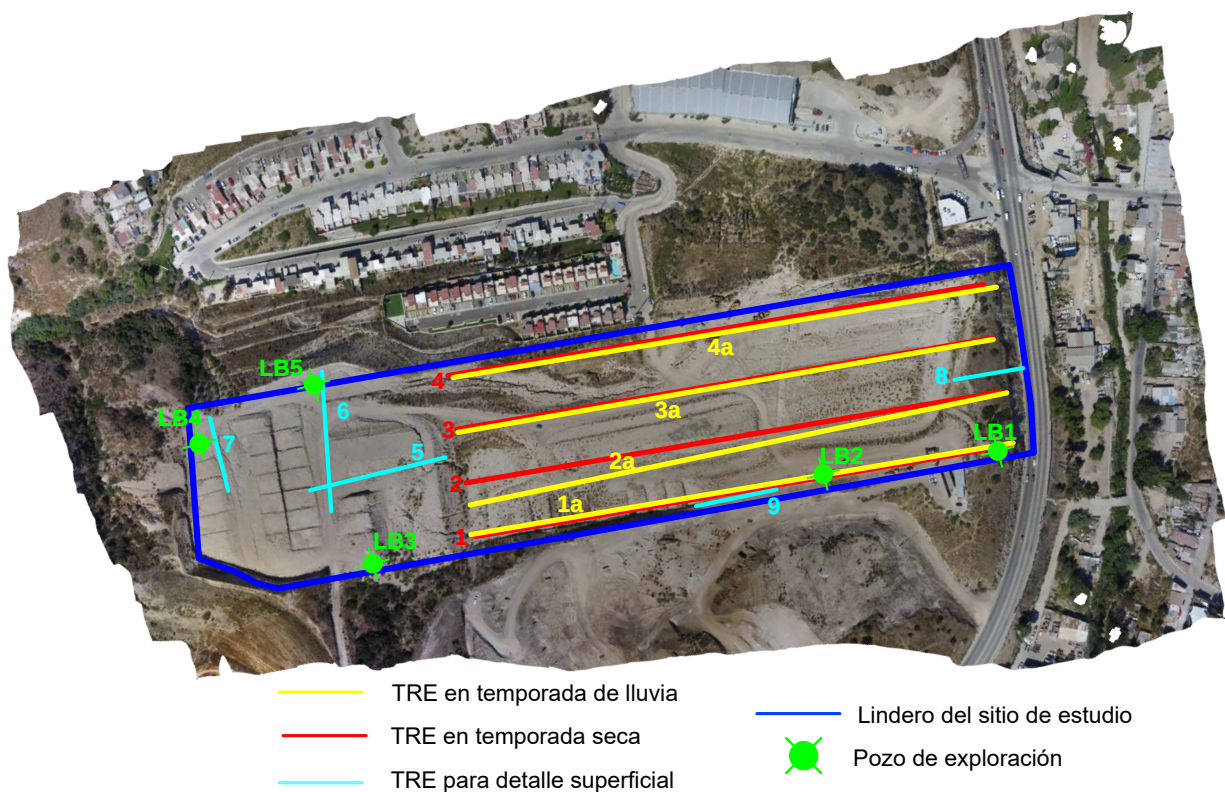


Figura 18. Ubicación de los tendidos de resistividad eléctrica medidos en el sitio de estudio

También se presentan resultados de datos recolectados en 5 tendidos de menor longitud, ésto con el fin de obtener modelos de resistividad en 2D con mayor detalle superficial. A partir de las resistividades observadas en estos modelos, se eligieron puntos de interés para recolectar muestras de suelo que posteriormente se trabajaron en laboratorio. Los puntos donde se recolectaron muestras de suelo se indican con un rombo de color azul en las figuras 32 a 34. La ubicación de los tendidos donde se

tomaron datos de resistividad se presentan en la figura 18.

En la figura 18 también se presenta la ubicación de los pozos de exploración (LB por sus siglas en inglés) que se perforaron como parte de los alcances del estudio de mecánica de suelos realizado en 2017.

3.3. Modelos de resistividad en 3D

3.3.1. Modelo 3D en temporada seca

Este modelo se obtuvo con la información de los tendidos 1 a 4, cada tendido tiene una longitud de 350 m y están separados 35 m entre sí. La distancia entre electrodos fue de 10 m. En cada perfil se tomaron datos con los arreglos dipolo - dipolo, Schlumberger y Wenner. El procesamiento para obtener este modelo comenzó con la verificación de la coherencia y calidad de los datos, ésto se puede comprobar con una gráfica de los datos obtenidos en campo, llamada pseudosección. La pseudosección es una representación de como varía la resistividad aparente en el subsuelo. Este tipo de gráficas dependen no solo de la distribución de resistividades aparentes, sino también, de la geometría de los electrodos. Para obtener un modelo es necesario realizar un proceso de inversión de datos, no es correcto realizar interpretaciones sobre una pseudosección.

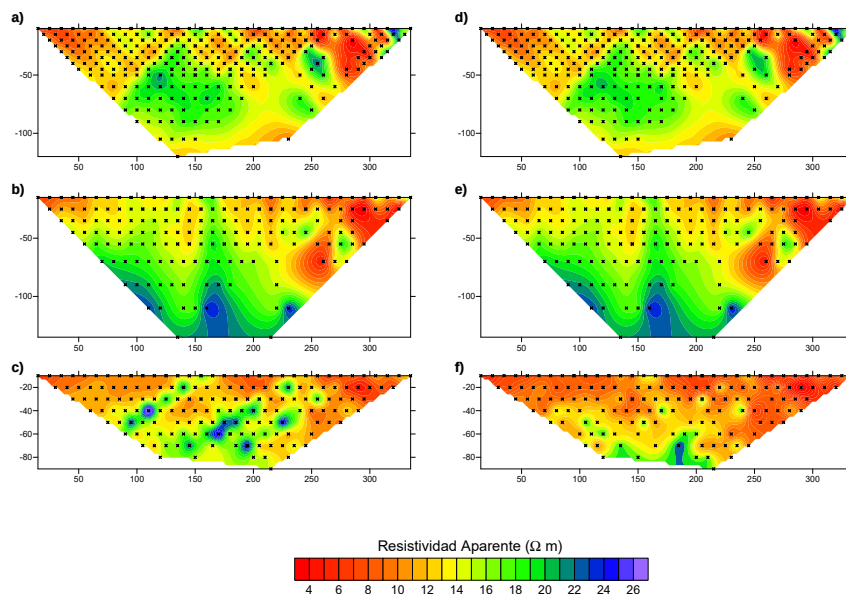


Figura 19. Pseudosecciones de resistividad aparente crudas y editadas: a) dipolo-dipolo, b) Schlumberger, c) Wenner, d) dipolo-dipolo depurado, e) Schlumberger depurado, f) Wenner depurado.

A partir de las pseudosecciones se eliminaron datos anómalos (resistividades aparentes muy diferentes entre puntos de atribución cercanos). Una vez depurados (los datos), se repitió la gráfica de las pseudosecciones y, en algunos casos, fue necesario hacer un segundo depurado. Para cada perfil solamente se conservaron datos coherentes. Debido a la forma de sus patrones de corriente eléctrica(ver figura

El modelo presentado en esta sección, al igual que el resto de los modelos de este capítulo, son el resultado final de un proceso de refinamiento de los parámetros que requiere el algoritmo de inversión, estos son: el tamaño de los prismas y el número de capas en la discretización del subsuelo así como el valor del factor de suavizamiento (β). En la discretización del subsuelo para los modelos 3D el tamaño de los prismas fue de 10 m en dirección X, 22 m en dirección Y, mientras que en Z se optó por utilizar 12 capas. El tamaño de los prismas se eligió en función de la cantidad de datos para cada dirección; por esto en la dirección X los prismas son mas chicos. Cabe recalcar que el número de prismas afecta al costo computacional para obtener el modelo. Una discretización muy refinada (muchos prismas) demanda mayor tiempo y recursos computacionales.

El algoritmo de inversión de Pérez-Flores *et al.* (2012) permite realizar inversión individual y conjunta para datos de resistividad de los diferentes arreglos electródicos. Esta última fue la opción que se empleó para obtener el modelo 3D, pues se combinó la información de los arreglos dipolo-dipolo y Schlumberger. La ventaja de realizar inversión conjunta es que el modelo es más cercano a la realidad, porque cada arreglo es sensible a diferentes cambios de resistividad en el subsuelo debido a que cada uno tiene un patrón de corrientes eléctricas diferente.

El modelo 3D para temporada seca se presenta en la figura 20 por medio de secciones horizontales a diferentes profundidades. Este modelo se obtuvo con datos medidos a finales de agosto del año 2019. Cabe resaltar que durante los meses de mayo hasta septiembre hay una marcada ausencia de lluvia en el municipio de Tijuana. En las primeras tres secciones que corresponden a un rango de profundidades de 1 a 10 metros, se observa que predominan los valores de resistividad de 14 a 20 ohms-m, estos valores se asocian a la unidad litológica de arena tobacea, las pruebas de laboratorio realizadas en muestras de esta unidad revelaron que se compone mayormente por arenas finas. Para estas mismas secciones, en la porción sureste destaca la presencia

de un cuerpo conductor cuyos valores de resistividad oscilan entre de 6 y 13 ohms-m, asociado a la interestratificación de dos unidades litológicas: tobas arcillosas y tobas arenosas. Pruebas granulométricas realizadas en muestras de estas 2 unidades indican que en estos suelos predomina porcentaje de material limoso y arcilloso.

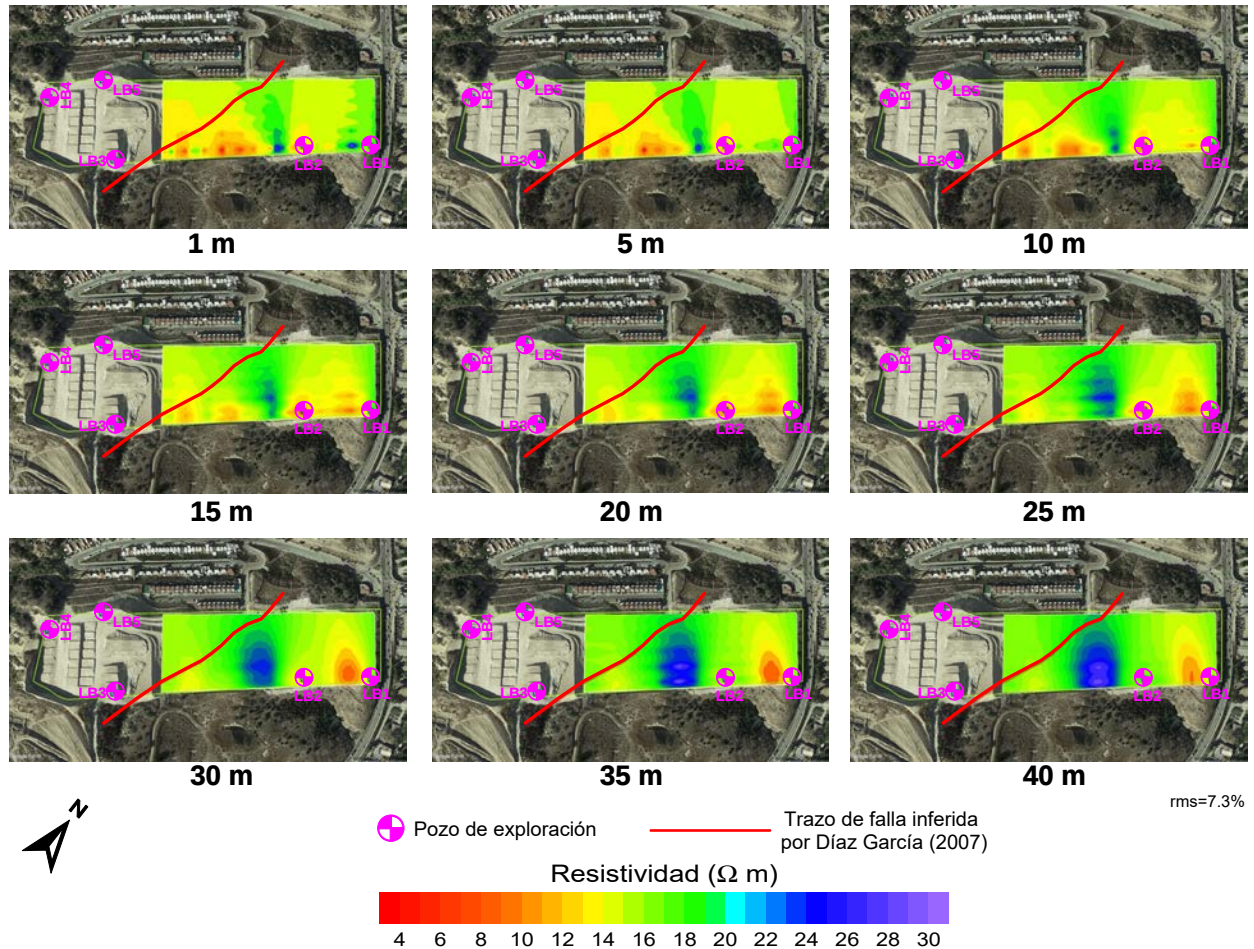


Figura 20. Secciones horizontales georeferenciadas del modelo 3D obtenido a partir de datos recolectados a finales de agosto del año 2019, mes correspondiente a la temporada seca del municipio de Tijuana.

Cerca de la esquina noreste del predio, en la sección correspondiente a los 10 m de profundidad, se observa un cuerpo conductor, este se intensifica entre los 15 y 35 m de profundidad. Los valores de resistividad del cuerpo conductor van de 8 a 14 Ω m, por lo que se asocian a la presencia de intercalaciones de tobas arenosas y tobas arcillosas. La columna estratigráfica de los pozos LB1 y LB2, presentadas en la figura 21 reporta intercalaciones de estas unidades en el rango de profundidades de 14.50 a 18.90 m en el LB1 y 15.70 a 16.20 m en el LB2, lo que coincide con la presencia de este cuerpo conductor que inclusive se observa en las secciones de 30, 35 y 40m

de profundidad. Cabe resaltar que los pozos de exploración solamente alcanzaron una profundidad máxima entre 20 y 21 m.

En todas las secciones horizontales se observa un cuerpo con resistividades del orden de 25 a 30 Ω m, ubicado a la mitad del lindero Sur. A mayor profundidad el cuerpo se torna de mayor longitud e incrementa su resistividad. Este cuerpo puede indicar dos cosas, la primera es una disminución de la humedad en la unidad de arenas tobaceas, la segunda es un incremento en el tamaño del grano de la matriz arenosa, esto último representaría también un incremento en la porosidad.

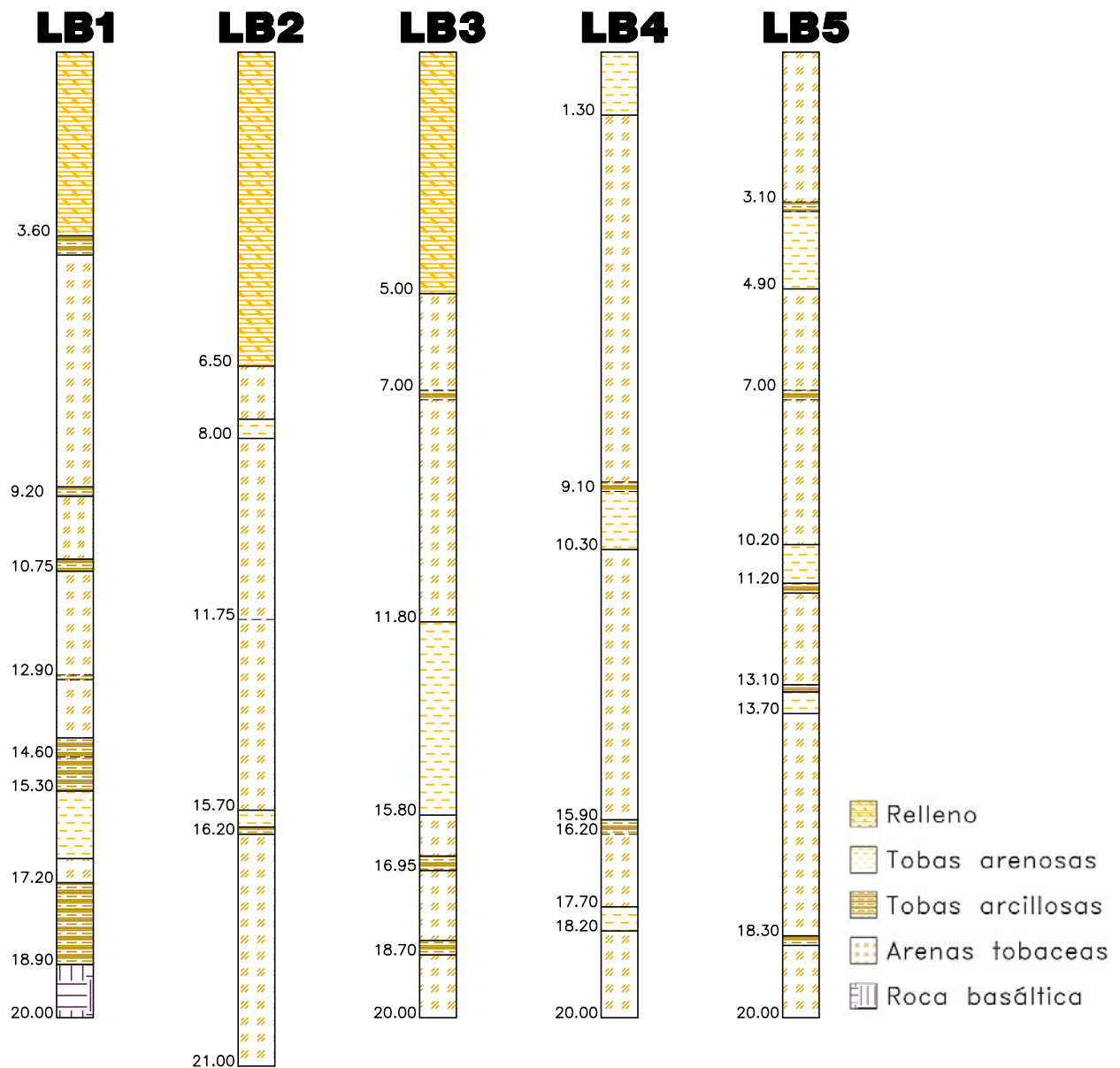


Figura 21. Columnas estratigráficas de los pozos de exploración reportadas en el estudio de mecánica de suelos realizado en agosto de 2017.

La línea roja que se dibujó en cada sección horizontal de la figura 20 indica el trazo de la falla o posible lineamiento reportado por el estudio geológico realizado por Díaz García (2007), su trazo coincide con el cauce de un cañón que posteriormente fue rellenado. En este modelo de resistividad no hay ningún indicio que confirme presencia de una falla. Lo que se puede inferir a partir de este modelo es que el material con el que se rellenó la cañada es producto de corte de materiales del sitio, mayormente de la unidad litológica arena tobacea, cuyos valores de resistividad asociados van de 15 a 20 Ωm .

3.3.2. Modelo 3D en temporada de lluvias

Este modelo se construyó con datos recolectados en marzo del 2020 y que corresponden a los tendidos 1a, 2a, 3a y 4a. Se trató de seguir el trazo de los tendidos realizados durante la temporada seca. Nuevamente se tomaron datos con los arreglos dipolo-dipolo, Schlumberger y Wenner. En este modelo si hubo congruencia entre los datos de los arreglos Schlumberger y Wenner, al emplear los 3 métodos en el proceso de inversión de datos, se incrementó la resolución del modelo. Se empleó la misma discretización y parámetros de inversión que en el modelo 3D de la temporada seca. Las secciones horizontales obtenidas para este modelo que corresponde a la temporada de lluvia en el municipio de Tijuana, se presentan en la figura 23.

En todas las secciones horizontales se puede apreciar una disminución de resistividad en el lindero paralelo a la carretera libre Tijuana - Ensenada. El mismo comportamiento se observa en el lindero opuesto. Para ambos casos la disminución en la resistividad se atribuye a un incremento en el contenido de humedad del suelo. Los estratos limosos y arcillosos se caracterizan por tener poca permeabilidad, por lo tanto, en ellos se vuelve más notorio el cambio en la resistividad. En materiales donde la resistividad en la temporada seca era de 15 a 20 Ωm , se observa una reducción menor.

En el área cercana al pozo LB1 se observa una disminución de resistividad en la sección horizontal de los 10 m de profundidad, la columna estratigráfica del LB1 indica que a 10.60 m hay una intercalación de toba arcillosa, la cual al aumentar su contenido de humedad se torna más conductora. En las secciones horizontales correspondientes a los 15 y 20 m de profundidad se aprecia el mismo comportamiento, que también se

atribuye a un incremento de humedad en las tobas arenosas y arcillosas reportadas por el pozo LB1 a partir de los 14.5 m de profundidad y que se extienden hasta 18.9 m.

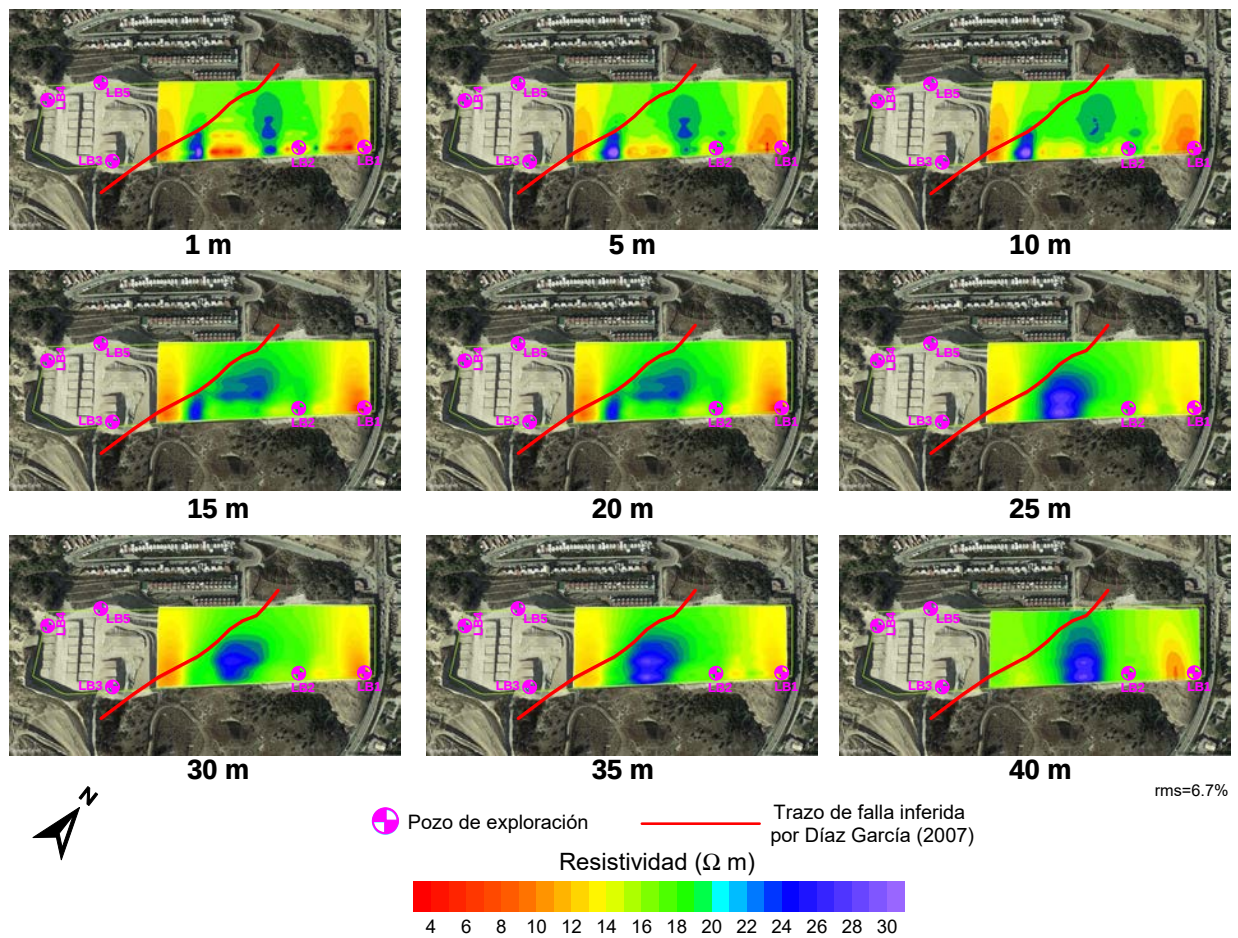


Figura 22. Secciones horizontales georeferenciadas del modelo 3D obtenido con datos medidos en marzo de 2020. La temporada de lluvias en el municipio de Tijuana comprende desde noviembre hasta abril.

En todas las secciones se puede observar un cuerpo resistivo cuya ubicación prácticamente no cambia al comparar con el modelo 3D de la temporada seca, sus valores de resistividad van de 25 a 30 Ω m. Estos valores de resistividad se asocian a la presencia de arenas de grano grueso, por lo que tendrían mayor permeabilidad. Esto último explica la poca variación en los valores de resistividad obtenidos para las temporadas seca y de lluvias en estos materiales. En los pozos no se reportan arenas de grano grueso, por lo que la presencia de este tipo de suelo se infiere a partir de los valores de resistividad recuperados por ambos modelos 3D.

Para tener una idea de la magnitud en la precipitación que se presentó en parte de la temporada de lluvia, se descargaron datos climatológicos de la estación Presa Abelardo L. Rodríguez. Los datos se obtuvieron del portal web del Servicio Meteorológico Nacional; el portal solo permite descargar datos de los 90 días anteriores a partir de la fecha de consulta.

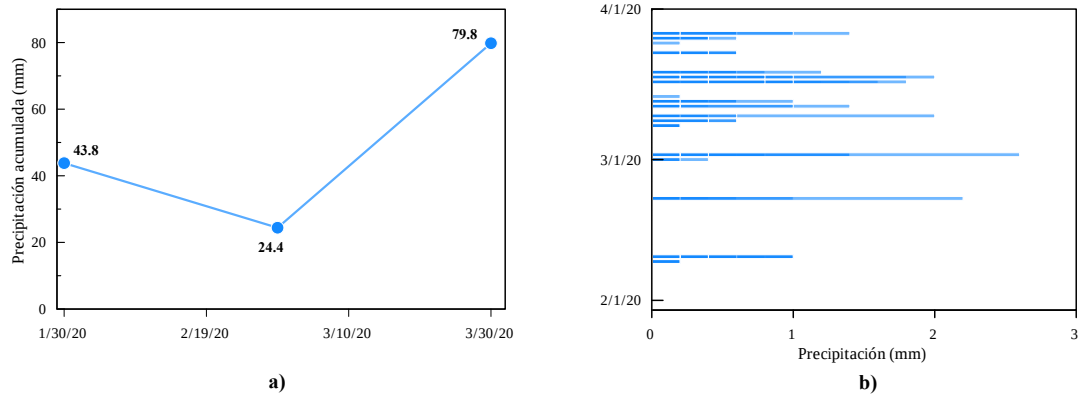


Figura 23. Datos de precipitación recolectados por la estación climatológica Presa Abelardo L. Rodríguez: a) Precipitación acumulada para los meses de enero a marzo de 2020, b) Precipitación diaria para los meses de enero a marzo de 2020.

3.4. Modelos de resistividad en 2D

3.4.1. Tendidos 1 y 1a

En la figura 24a y 24c se presentan los modelos inversos en 2D correspondientes a los tendidos 1 y 1a, respectivamente. Las figuras 24b y 24d, corresponden a ortoimágenes del plano XZ de los modelos 3D para temporada seca y de lluvia obtenidas con el software Voxler.

En los modelos predominan materiales con valores de resistividad de 16 a 19 Ωm , de acuerdo a las columnas estratigráficas de los pozos LB1 y LB2. Estos valores de resistividad se asocian a la presencia de la unidad litológica de arenas tobaceas. Las pruebas de laboratorio realizadas en muestras de esta unidad y que se presentan en la sección 3.6.1, confirman que su composición granulométrica corresponde a un porcentaje de arena mayor o igual a 50 %. En los primeros 100 metros de longitud, extendiéndose hasta 30 metros de profundidad se observan cuerpos con resistividades

en el rango de 6 a 12 Ωm , de acuerdo a la estratigrafía reportada en LB1 y LB2, el cuerpo conductor coincide con la presencia de intercalaciones de las unidades litológicas de tobas arenosas y tobas arcillosas. Se pueden apreciar cuerpos con características similares en el rango de 190 a 270 metros de longitud, éstos últimos van desde la superficie y alcanzan una profundidad que oscila entre los 14 y 22 m.

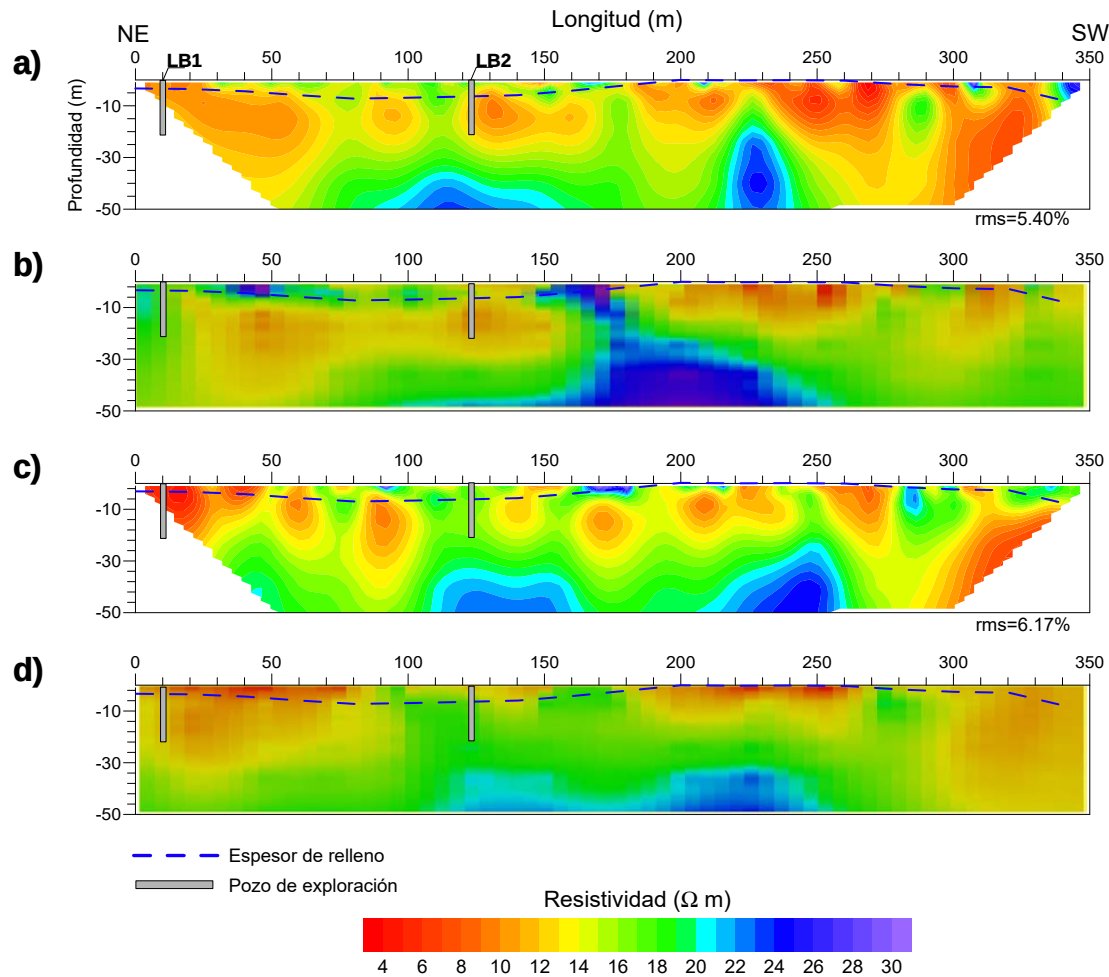


Figura 24. Modelos de resistividad en 2D: a) modelo 2D obtenido con datos medidos en temporada seca, b) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada seca c) modelo 2D obtenido con datos medidos durante la temporada de lluvia d) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada de lluvia.

En los modelos presentados en la figura 24, también se pueden apreciar cuerpos con valores de resistividad de 20 a 30 Ωm , estos valores se asocian con un posible aumento en el tamaño del grano del material arenoso, lo que implicaría una mayor permeabilidad. También se puede asociar a una disminución del contenido de humedad en las arenas tobaceas.

En las figuras correspondientes a la temporada de lluvias 24c y 24d se pueden apreciar zonas donde disminuye la resistividad, lo que se atribuye a un incremento en el contenido de humedad. Las zonas donde la disminución es mayor coinciden con áreas donde se colocaron terraplenes y donde los pozos reportan presencia de suelos limosos y arcillosos.

Para hacer los cálculos de estabilidad de laderas y taludes se requiere un modelo estratigráfico, no es necesario realizarlo para toda la extensión del modelo 2D, basta con los primeros 190 metros. El modelo estratigráfico para los tendidos 1 y 1a se presenta en la figura 25.

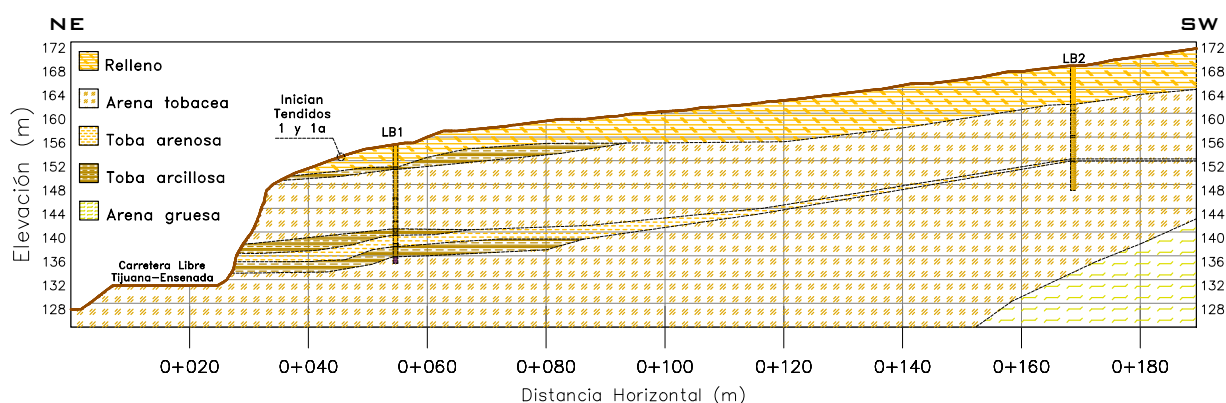


Figura 25. Modelo estratigráfico propuesto a partir de los modelos de resistividad de los tendidos 1 y 1a, así como de las ortoimágenes de los modelos 3D.

Los estratos de tobas arcillosas y tobas arenosas de este modelo estratigráfico se dibujaron tomando en cuenta: la estratigrafía observada en los pozos LB1 y LB2, así como la presencia de cuerpos con valores de resistividad de 6 a 12 Ωm . Los estratos de arenas tobaceas se dibujaron considerando cuerpos con valores de resistividad de 13 a 20 Ωm . Hay zonas donde los pozos reportan la presencia de esta unidad litológica pero los valores de resistividad disminuyen hasta los 10 Ωm , esto es un indicador de una disminución en el contenido de arena y un posible aumento en el contenido de humedad. Los cuerpos con valores de resistividad mayor a 20 Ωm se dibujan como un estrato arenoso de grano grueso. Las limitaciones de los modelos estratigráficos propuestos en este trabajo se discuten en la sección 4.1.1.

3.4.2. Tendidos 2 y 2a

En los primeros 70 m de longitud de los modelos obtenidos para los tendidos 2 y 2a presentados en las figuras 26a y 26c (modelos 2D en temporada seca y lluvia respectivamente), se observan cuerpos conductores con valores de resistividad de 6 a 11 Ωm , valores que se asocian con la presencia de suelos con alto contenido de limos y arcillas. En esta zona, las ortoimágenes o sección xz de los modelos 3D presentan resistividades entre 8 y 13 Ωm , ver figuras 26b y 26d. Es de observar que las secciones xz se parecen entre los perfiles 1 y 2, mientras que los modelos 2D no están obligados a parecerse, pues son independientes en la coordenada (y).

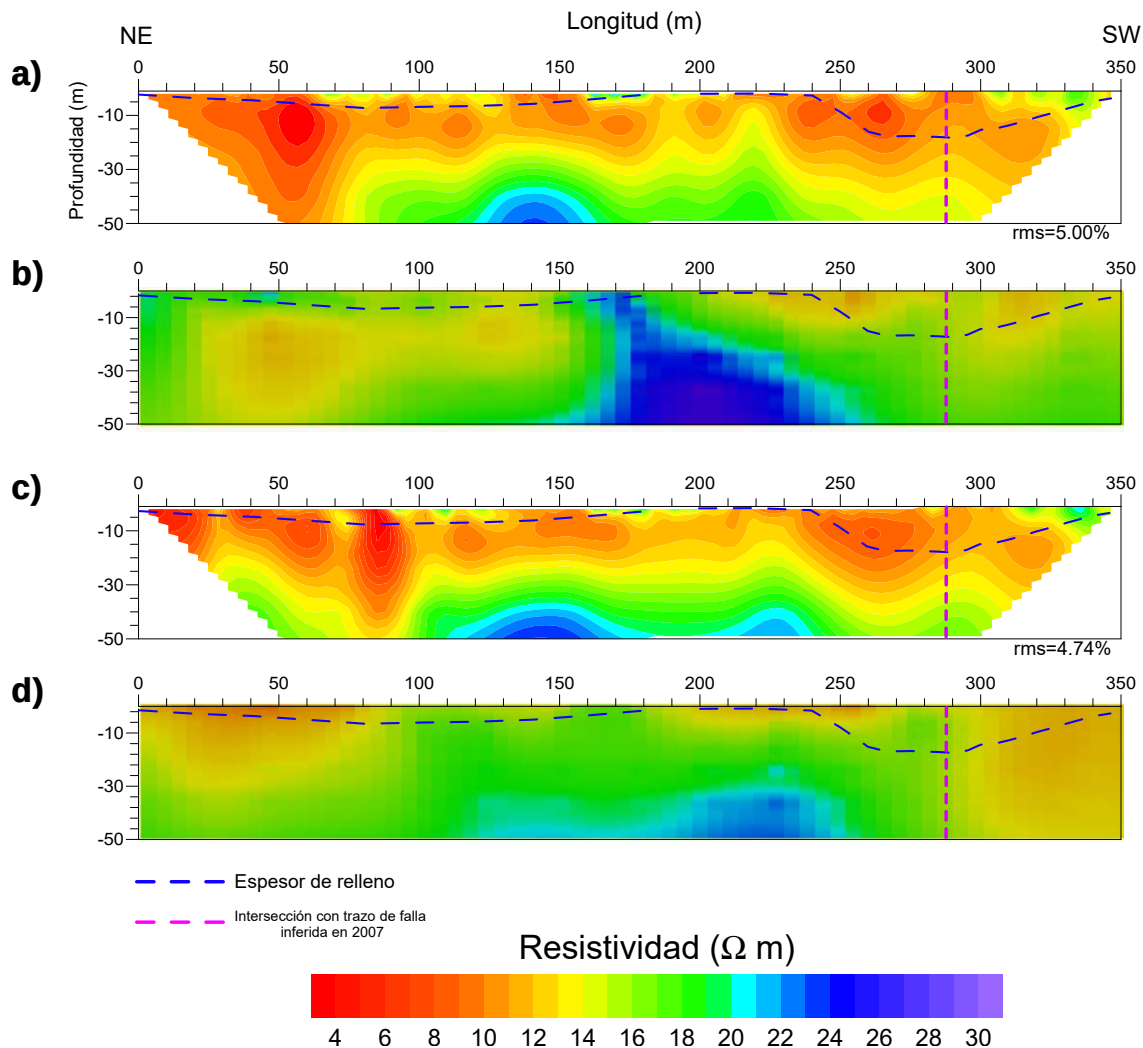


Figura 26. Modelos de resistividad en 2D: a) modelo 2D obtenido con datos medidos en temporada seca, b) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada seca c) modelo 2D obtenido con datos medidos durante la temporada de lluvia d) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada de lluvia.

En los modelos 2D entre 100 y 220 m de longitud, extendiéndose hasta una profundidad de 25 metros se observan cuerpos con valores de resistividad de 10 a 13 Ωm , valores asociados a la unidad de tobas arenosas. A partir de los 240 metros de longitud en ambos perfiles se observa que aumenta el espesor de estos materiales, hasta alcanzar los 40 metros de profundidad. Debido quizá a la zona de relleno.

Ambos modelos 2D recuperan un cuerpo con resistividades del orden de 20 a 25 Ωm en el rango de longitudes de 120 a 170 m y a una profundidad de 40 a 50 metros, la presencia de este cuerpo se atribuye a un estrato de arena de grano grueso y de alta permeabilidad. Las ortoimágenes de los modelos 3D ubican este cuerpo en el rango de longitudes de 150 a 250 m, en la figura 26d se puede apreciar que los valores de resistividad de este cuerpo han disminuido. Un posible indicador de infiltración de humedad.

En la intersección de los perfiles con el trazo de la supuesta falla reportada por Díaz García (2007) se esperaría que tras la temporada de lluvia se observaran cambios notorios en la resistividad, sin embargo, al comparar los modelos no se observa este comportamiento. Lo cual nos indica que el relleno se ha compactado a un grado similar al del terreno natural. Entre los 80 a 90 m de longitud de la figura 26c se puede observar una disminución de resistividad, la cual también se asocia a un incremento de humedad.

El modelo estratigráfico correspondiente a estos modelos de resistividad se presenta en la figura 27. Para este caso no se cuenta con información de pozos, la presencia de estratos de tobas arenosas y arcillosas se sustenta en los cuerpos con resistividades de 6 a 12 Ωm , pero su grosor se extrapola de los pozos más cercanos. El estrato de arena tobacea se le atribuye a los valores de resistividad de 15 a 20 Ωm .

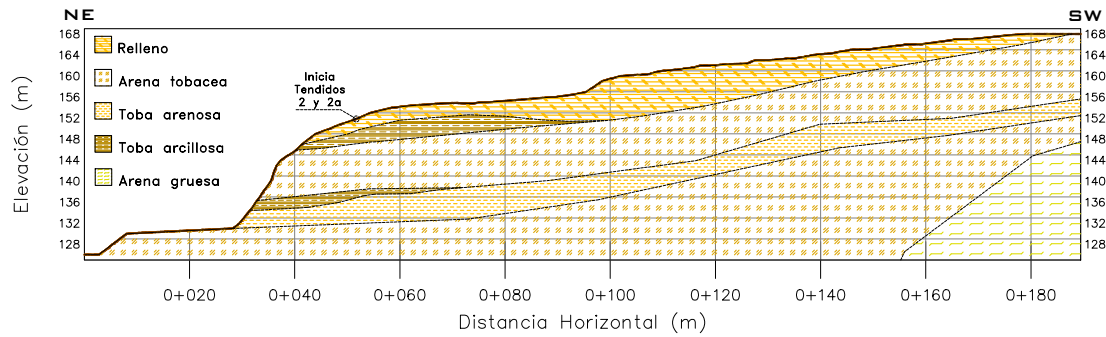


Figura 27. Modelo estratigráfico propuesto a partir de los modelos de resistividad de los tendidos 2 y 2a, así como de las ortoimágenes de los modelos 3D.

3.4.3. Tendidos 3 y 3a

En los modelos obtenidos para los tendidos 3 y 3a, presentados en las figuras 28a y 28c (modelos 2D en temporada seca y de lluvia, respectivamente), se observa que predominan valores de resistividad de 9 a 14 Ωm , presentando una distribución más o menos uniforme desde el inicio del perfil hasta aproximadamente 230 m de longitud. En la figura 28c se observa una disminución en el espesor de estos cuerpos, siendo muy notorio en el rango de longitudes de 100 a 155 m. Los valores de resistividad de 9 a 14 Ωm se asocian a la intercalación de tobas arenosas entre las arenas tobaceas, un rasgo común para el miembro inferior de la Fm. San Diego.

A partir de una profundidad que varía de 30 a 35 metros se observan materiales con valores de resistividad de 15 a 20 Ωm , asociados a la unidad de arenas tobaceas. Entre ambos perfiles existe una discrepancia en la ubicación de un cuerpo con valores de resistividad de 20 a 25 Ωm . El tendido 3 lo presenta en el rango de 50 a 100 m de longitud, mientras que en el tendido 3a se ubica en el rango de 100 a 155 m. Este cuerpo se asocia a la presencia de material arenoso de grano grueso y de alta permeabilidad.

En la figura 28 se presenta la intersección entre el trazo de la supuesta falla inferida por Díaz García (2007) y los perfiles de resistividad. No se observan cambios significativos en la resistividad. La zona con mayor espesor de material terraplenado corresponde al cauce del cañón, en esta área durante la temporada de lluvia se observa una ligera disminución de resistividad, pasando de 9 a 8 Ωm en los modelos 2D y

de 17 a 14 Ωm en las ortoimágenes del modelo 3D.

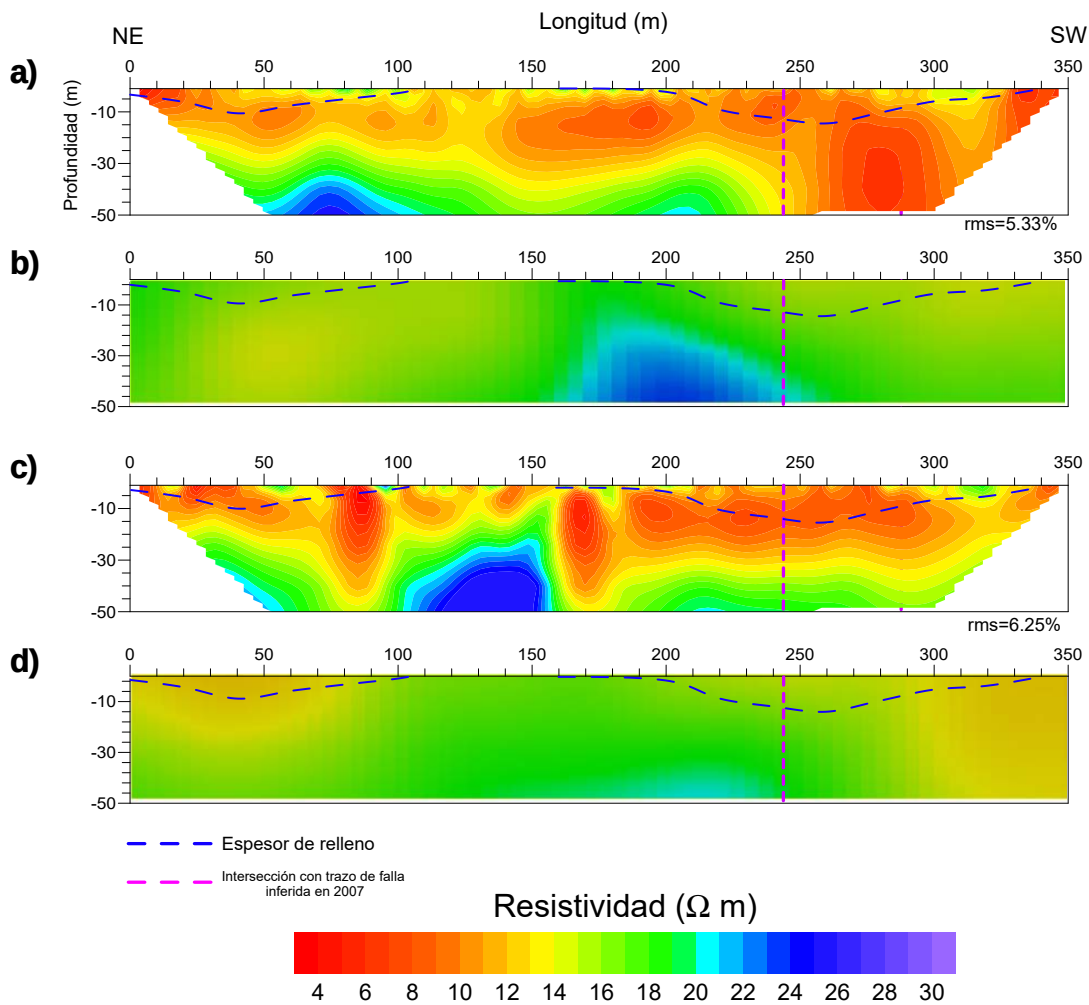


Figura 28. Modelos de resistividad en 2D: a) modelo 2D obtenido con datos medidos en temporada seca, b) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada seca c) modelo 2D obtenido con datos medidos durante la temporada de lluvia d) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada de lluvia.

El modelo estratigráfico propuesto a partir de los modelos 2D y ortoimágenes 3D se presenta en la figura 29. Dado que en la longitud considerada (los primeros 130 m) no hay cuerpos con resistividades menores a 9 Ωm , no se dibujaron estratos de tobas arcillosas. Tanto en los modelos 2D como en las ortoimágenes de los modelos 3D, para el rango considerado en el modelo estratigráfico, los valores de resistividad predominantes van de 15 a 17 Ωm , lo que se relaciona con la unidad de arena toba-cea. Cuerpos con resistividades menores a este rango se asocian al estrato de tobas arenosas.

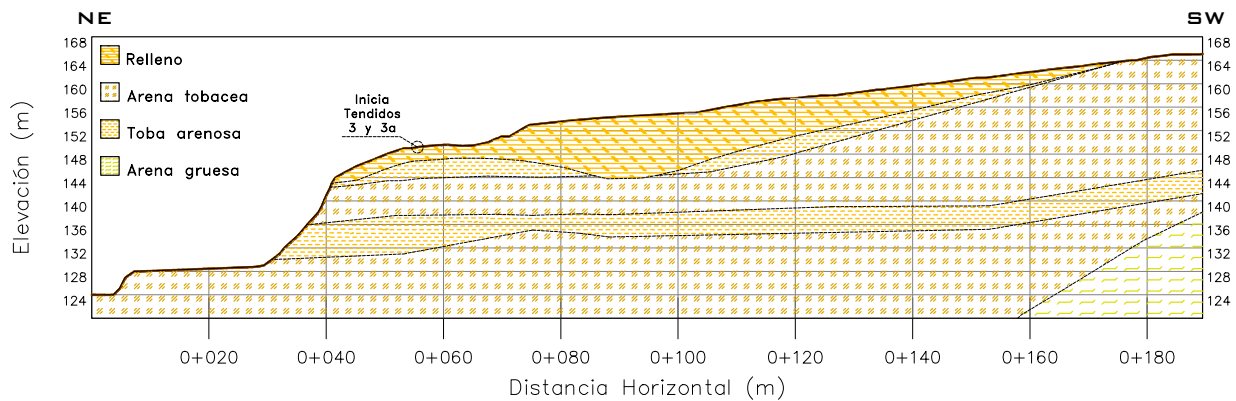


Figura 29. Modelo estratigráfico propuesto a partir de los modelos de resistividad de los tendidos 3 y 3a, así como de las ortoimágenes de los modelos 3D.

3.4.4. Tendidos 4 y 4a

En los modelos 2D de los tendidos 4 y 4a presentados en las figuras 31a y 31c (modelos 2D en temporada seca y de lluvia, respectivamente), se puede observar que en los primeros 150 m de longitud predomina material con resistividades del orden de 15 a 19 Ωm , asociado a la presencia de arenas tobaceas. Para este mismo rango de longitud se observa que sobreyaciendo a las arenas tobaceas hay cuerpos conductores, con valores de resistividad de 6 a 14 Ωm , asociados con intercalaciones de material limoso y arcilloso.

A partir de los 160 m de longitud en ambos modelos 2D es notorio el incremento de material con valores de resistividad de 9 a 14 Ωm , indicativo de un incremento en la presencia de suelos limosos. Para el mismo intervalo de longitud, las ortoimágenes de los modelos 3D presentan valores de resistividad de 12 a 17 Ωm . Cabe volver a recalcar que los modelos 2D no están obligados a parecerse a las ortoimágenes del modelo 3D, pues son independientes de la coordenada (y).

Ambos modelos 2D muestran un cuerpo con valores de resistividad de 20 a 30 Ωm , ubicado a 35 metros de profundidad, entre los modelos varía un poco la ubicación de este cuerpo, en el modelo para el perfil 4 se ubica entre los 110 y 160 metros de longitud, mientras que en el modelo del perfil 4a se ubica entre los 90 y 170 metros del perfil. El perfil 4a recupera un segundo cuerpo con estos valores de resistividad,

ubicado entre los 180 y 200 m de longitud. Un cuerpo con valores de resistividad similares es mostrado en la ortoimagen del modelo 3D para temporada seca, ver figura 31b.

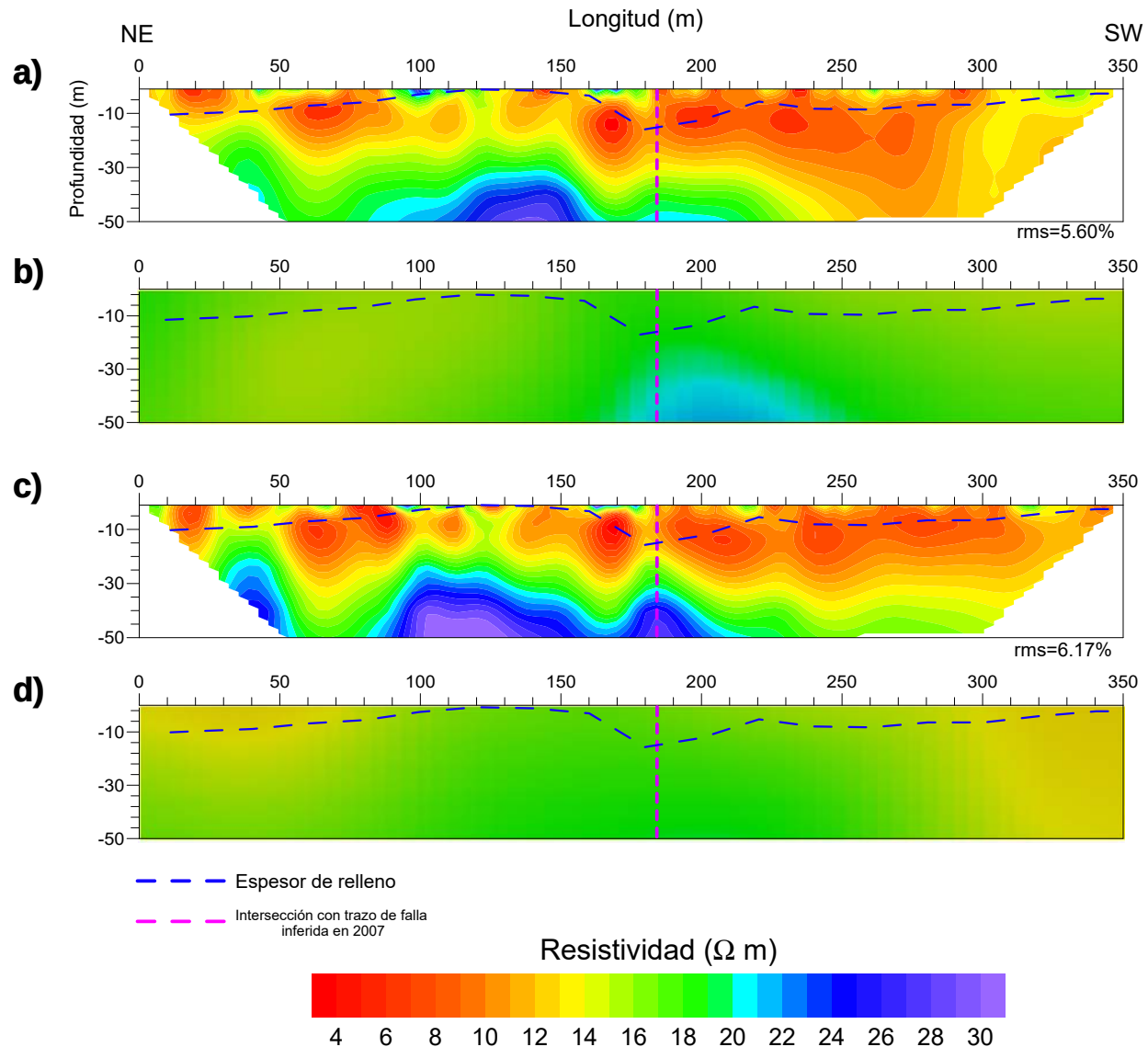


Figura 30. Modelos de resistividad en 2D: a) modelo 2D obtenido con datos medidos en temporada seca, b) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada seca c) modelo 2D obtenido con datos medidos durante la temporada de lluvia d) ortoimagen del plano XZ del modelo 3D para la temporada de lluvia.

En el modelo estratigráfico propuesto a partir de los modelos de los perfiles 4 y 4a y sus respectivas ortoimágenes de los modelos 3D, ocurre el mismo caso en el perfil estratigráfico de la figura 29, no hay cuerpos con resistividades menores a $9 \Omega\text{m}$, por lo tanto, tampoco se dibujan estratos de tobas arcillosas. Los estratos de toba arenosa se proponen en base a los cuerpos con resistividades de 9 a $14 \Omega\text{m}$.

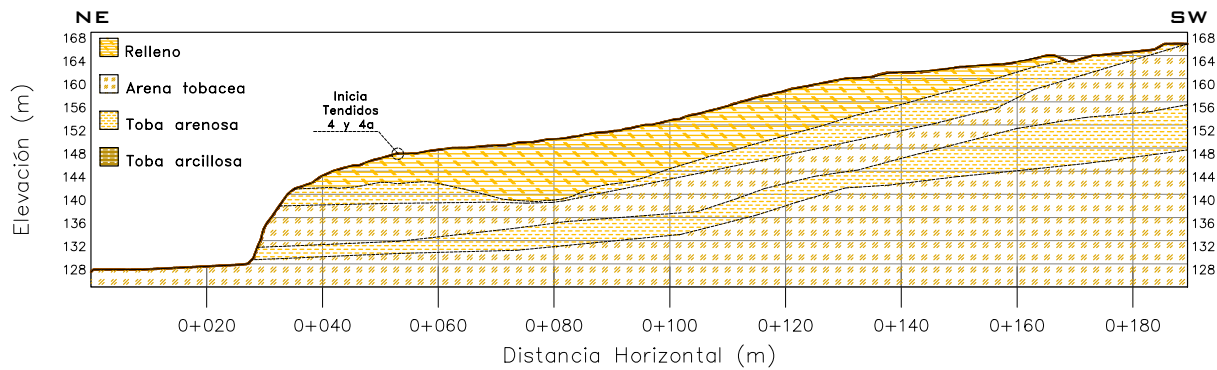


Figura 31. Modelo estratigráfico propuesto a partir de los modelos de resistividad de los tendidos 4 y 4a, así como de las ortoimágenes de los modelos 3D.

3.5. Modelos de resistividad en 2D para detalle superficial

Se realizaron 5 tendidos para obtener detalle superficial de la estructura del subsuelo (ver figura 18), la profundidad de exploración es menor porque se utilizó una separación entre electrodos de 2 m. De los cinco perfiles, dos tienen una longitud de 90 m, los tres restantes tienen una longitud de 54 metros. El objetivo de estos modelos es ver detalles superficiales para poderlos correlacionar con parámetros mecánicos del suelo obtenidos en laboratorio.

3.5.1. Tendido 5

Este perfil se midió en la corona de un talud cuya cara está conformada con material de terraplén (ver figura 18). En la figura 32 se presenta el modelo de resistividad para este perfil, se puede observar que el material con el que se conformó el terraplén es mayormente conductor.

El material que predomina bajo este perfil presenta valores de resistividad de 5 a 11 Ωm . Esto indica que es material de grano fino, este tipo de suelo y resistividades se asocian con la presencia de tobas arenosas y tobas arcillosas. En el rango de longitudes de 42 a 62 m, se observa un cuerpo con valores de resistividad de 17 a 25 Ωm , este cuerpo se atribuye a la presencia de un estrato de arenas tobaceas.

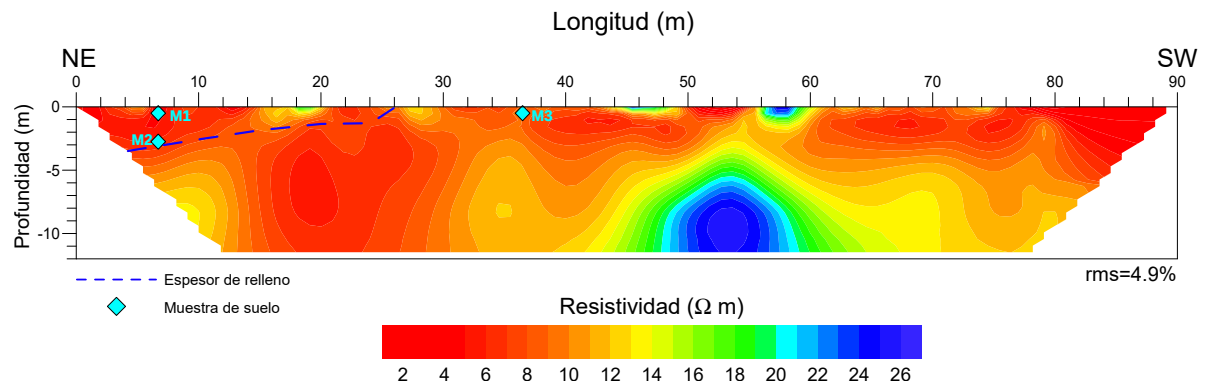


Figura 32. Modelos de resistividad en 2D para el tendido 5.

El modelo estratigráfico para este perfil se presenta en la figura 33, el estrato de toba arcillosa se atribuye a los valores de resistividad que van de 5 a 8 Ω m. Subyaciendo al estrato de toba arcillosa hay un estrato de toba arenosa, este se asocia al incremento en la resistividad, específicamente a valores de 9 a 14 Ω m. La geometría del relleno se obtuvo a través de la comparación de superficies topográficas.

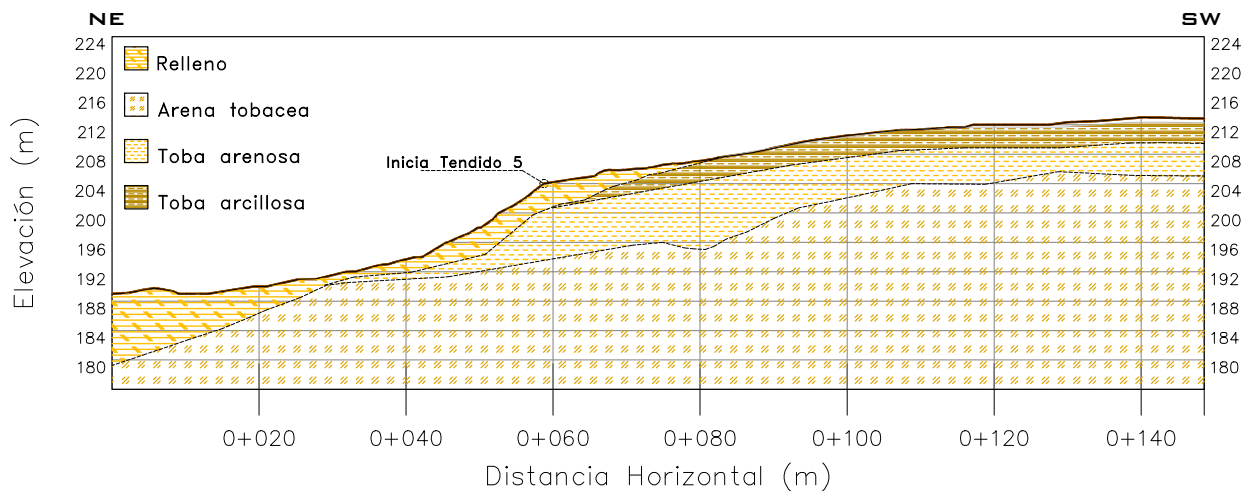


Figura 33. Modelo estratigráfico propuesto a partir del modelo de resistividad 2D del tendido 5.

En la figura 32 se puede observar que el tendido 5 tiene 90 m de longitud, mientras que el perfil estratigráfico tiene 150 m de longitud. En los tendidos 6 y 7 se presenta un caso similar, por lo que en la sección 4.1.1 se discute la asignación de unidades litológicas en las distancias que no están cubiertas por el tendido de resistividad eléctrica.

3.5.2. Tendido 6

El modelo de resistividad correspondiente al tendido 6 se presenta en la figura 34, en los primeros 25 m de longitud, se observa material conductor cuyos valores de resistividad van de 5 a 8 Ωm . El pozo cercano a este perfil (LB5) indica la presencia de un estrato de toba arcillosa a 3.10 metros de profundidad seguido de un estrato de toba arenosa que alcanza 4.90 metros de profundidad. Desde los 40 m de longitud hasta el final del perfil se observan cuerpos conductores. Los valores más bajos de resistividad son cercanos a la superficie.

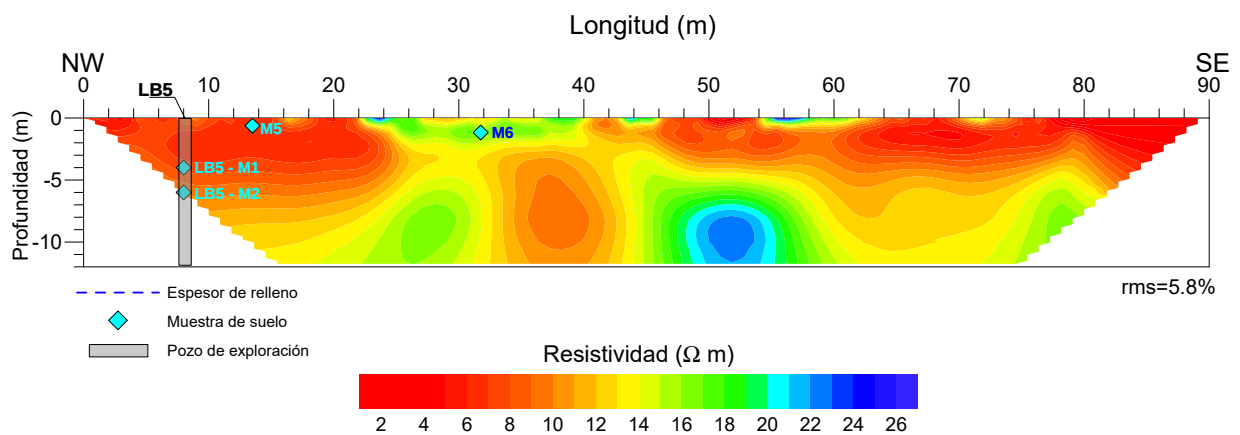


Figura 34. Modelo de resistividad en 2D obtenido para el perfil 6.

En el rango de 45 a 55 m de longitud a una profundidad de 7.50 m se observa un cuerpo con valores de resistividad de 18 a 23 Ωm , la ubicación de este cuerpo coincide con otro cuerpo con valores de resistividad similares detectado en el tendido 5.

El modelo estratigráfico para este perfil se elaboró considerando la columna estratigráfica del pozo LB5 y el modelo de resistividad 2D. Las intercalaciones de tobas arcillosas y tobas arenosas se asocian a los valores más bajos de resistividad. El modelo 2D solamente brinda información hasta 12 metros de profundidad, por lo que el resto del modelo estratigráfico se elaboró con la estratigrafía del pozo LB5.

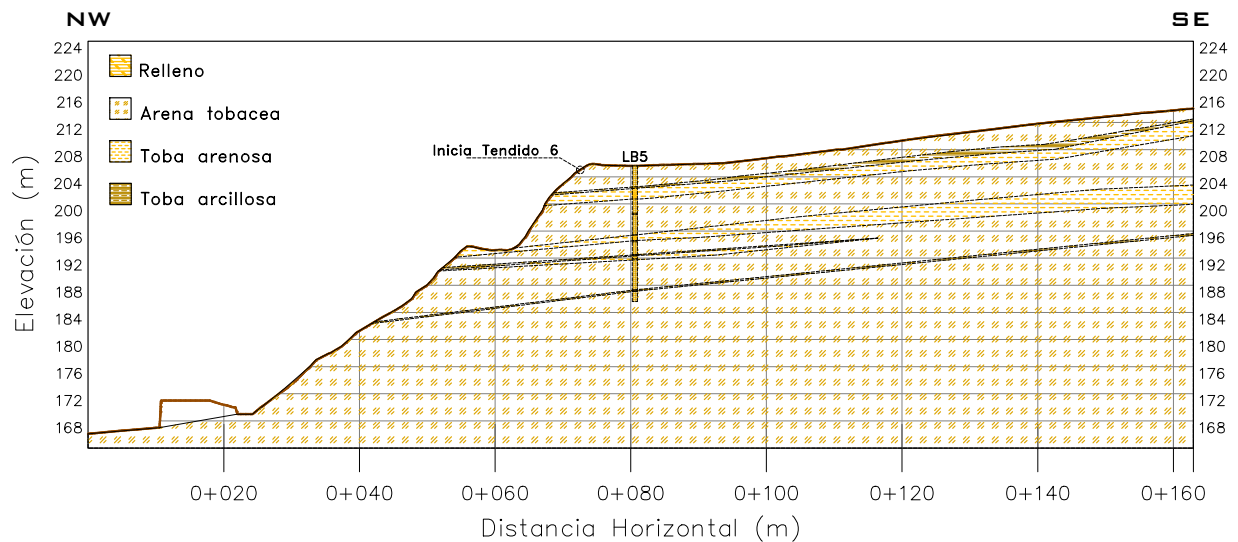


Figura 35. Modelo estratigráfico propuesto a partir del modelo de resistividad 2D del tendido 6.

3.5.3. Tendido 7

En los primeros 24 m del tendido 7 cuyo modelo de resistividad se presenta en la figura 36 se puede apreciar que predomina material con valores de resistividad de 15 a 20 Ωm , valores asociados a la unidad de arena tobacea, el pozo LB4 confirma la presencia de esta unidad litológica desde 1.30 hasta 9 m de profundidad. La unidad litológica sobreyacente corresponde a tobas arenosas, esto se asocia con dos cuerpos conductores que presentan valores de resistividad de 9 a 14 Ωm , el primero se ubica en los primeros 9 m de longitud, el segundo se observa en el rango de 17 a 21 m de longitud.

A partir de los 26 m de longitud y hasta el final del perfil, resalta la presencia de material conductor con valores de resistividad que oscilan entre los 3 a 8 Ωm , esto último denota la presencia de suelos arcillosos. Subyaciendo al material conductor, se observa un incremento en los valores de resistividad, esto se interpreta como un aumento en el porcentaje de material arenoso y una disminución de la humedad.

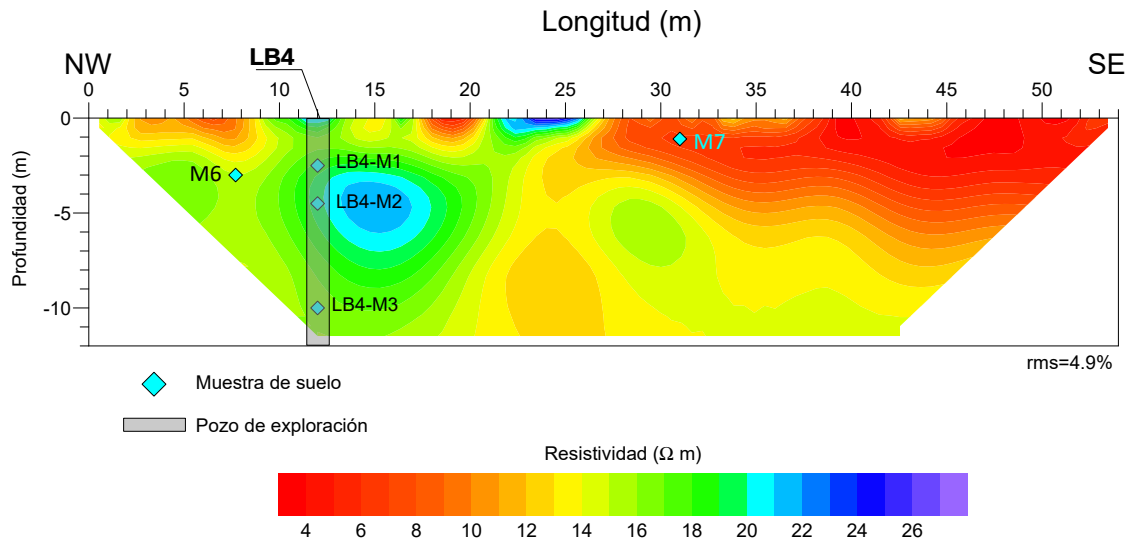


Figura 36. Modelo de resistividad en 2D obtenido para el tendido 7.

El modelo estratigráfico para este perfil se presenta en la figura 37, el modelo de resistividad aporta información hasta una profundidad de 12m. Los estratos de toba arenosa se asocian a valores bajos de resistividad, la columna estratigráfica del pozo LB5 indica que el material predominante es la arena tobacea, esto se confirma con los valores de resistividad de 14 a 20 Ω que se recuperaron en el modelo 2D.

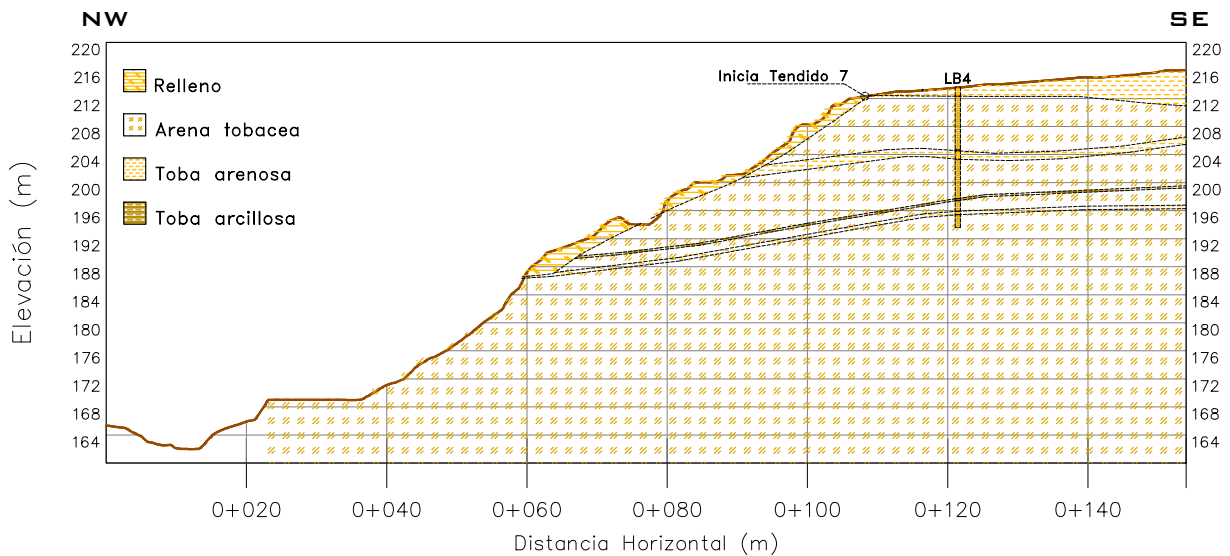


Figura 37. Modelo estratigráfico propuesto a partir del modelo de resistividad 2D del tendido 7.

3.5.4. Tendido 8

En la mayor parte del modelo obtenido para el tendido 8 se observan valores de resistividad de 3 a 8 Ωm , los cuales se asocian a la presencia de tobas arcillosas, también se observan valores de resistividad de 9 a 14 Ωm , asociados a la presencia de tobas arenosas en los primeros 25 m de longitud, subyaciendo al espesor de relleno.

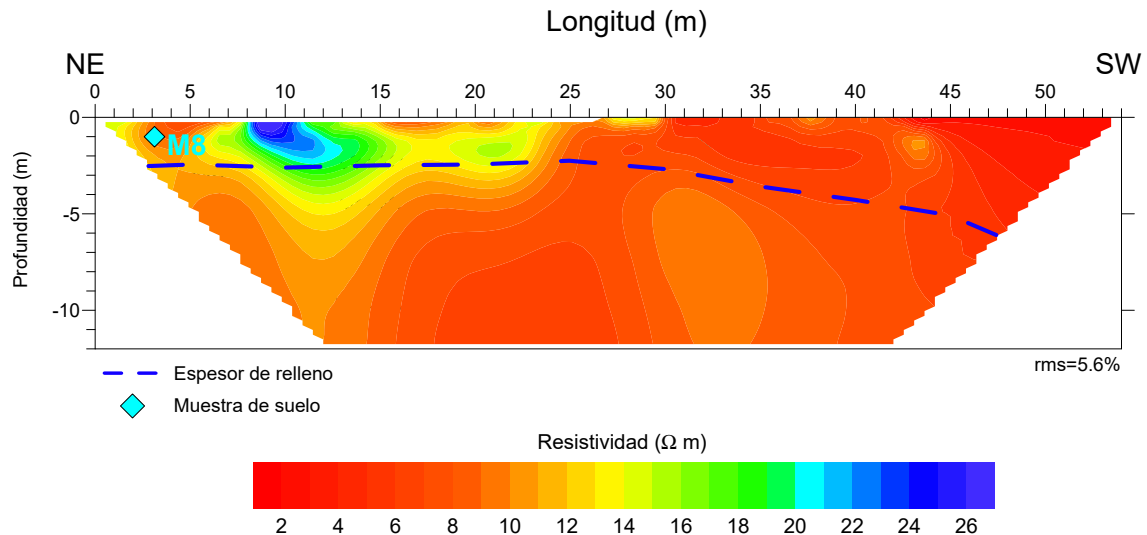


Figura 38. Modelo de resistividad 2D del tendido 8.

El material que se encuentra por encima de línea punteada de color azul presentada en la figura 38, corresponde a material terraplenado. Esto explica la variación lateral que se observa en los valores de resistividad.

3.5.5. Tendido 9

En este perfil resalta la presencia de suelos con valores de resistividad de 14 a 20 Ωm , indicando la presencia de arenas tobaceas, también resalta la presencia de un cuerpo con valores de resistividad de 21 a 26 Ωm , ubicado en el rango de longitud de 18 a 31 m, este tipo de cuerpos se asocia a un estrato de arena de grano grueso y permeable. En la figura 39 se presenta el modelo de resistividad correspondiente a los datos del tendido 9. Debido a la orientación tanto de este tendido, como la del tendido 8 (presentado en la sección 3.5.4) no se propusieron modelos estratigráficos

para posteriormente analizar estabilidad. La ubicación de ambos tendidos se basó en valores de resistividad observados en el modelo 3D obtenido para la temporada seca, presentado en la sección 3.3.1.

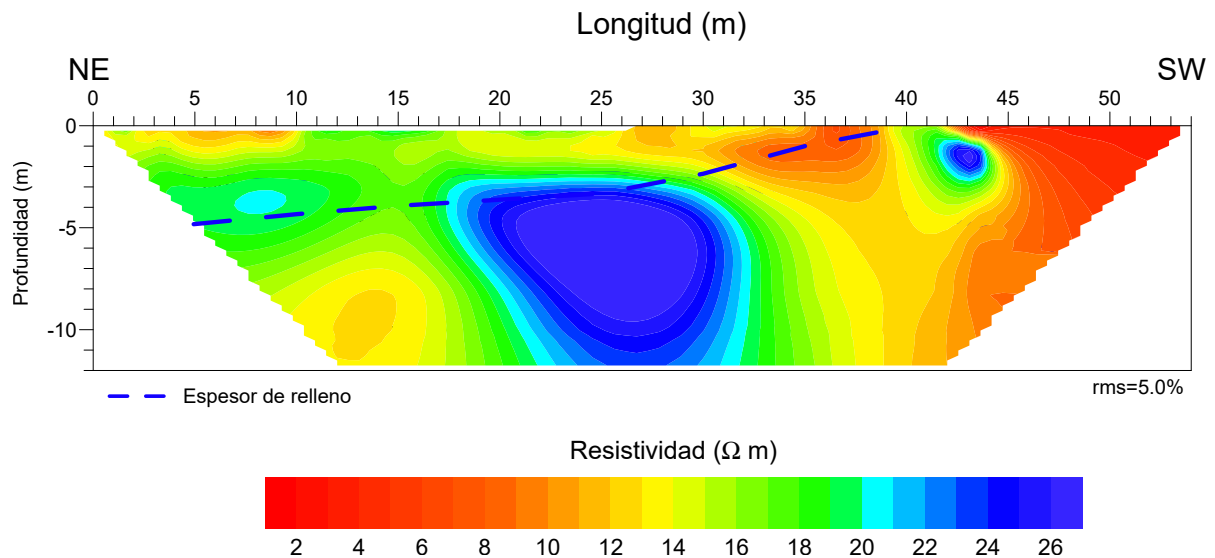


Figura 39. Modelo de resistividad 2D del tendido 9.

3.6. Parámetros mecánicos del suelo

3.6.1. Propiedades índice de la masa de suelo

Los resultados que se presentan en este apartado corresponden al trabajo realizado en laboratorio para obtener la composición granulométrica de las muestras de suelo que se recolectaron en el sitio de estudio. El muestreo se realizó en puntos de interés seleccionados a partir de los modelos 2D con mayor detalle superficial (separación de 2 metros entre electrodos). La prueba de laboratorio para obtener la granulometría se realizó de acuerdo al procedimiento indicado en la norma ASTM D422-63e2 (2007) mientras que para obtener las propiedades índice se siguió el procedimiento ASTM D4318 (2005).

En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para las muestras que se recolectaron en los puntos de interés. Además de apoyar en la interpretación de los modelos, estas muestras se correlacionaron con valores de resistividad para obtener relaciones empíricas entre las propiedades mecánicas y la resistividad del subsuelo. Para asignar un tipo de suelo a cada muestra se siguió el criterio de la norma ASTM

D2487 (2008), también conocido como el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Tabla 1. Resumen de resultados para muestras recolectadas en el sitio de estudio durante noviembre de 2019

Muestra	Profundidad (m)	Unidad litológica	% Arena	% Finos	% Humedad	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice Plástico	SUCS
Perfil 5: M1	0.6	Toba arcillosa	35.6	65.4	9.5	37.0	19.8	17.2	CL
Perfil 5: M2	3.0	Toba arcillosa	35.2	64.8	22.2	41.2	28.3	12.9	CL
Perfil 5: M3	0.5	Arena tobacea	68.3	31.7	5.0	30.1	25.1	5.0	SM
Perfil 6: M4	0.6	Toba arenosa	22.6	77.4	15.0	32.6	25.7	6.9	ML
Perfil 6: M5	1.2	Arena tobacea	83.6	16.4	4.5	23.7	NP	NP	SM
Perfil 7: M6	3.0	Arena tobacea	78.4	21.6	6.9	27.7	22.6	5.1	SM
Perfil 7: M7	1.5	Toba arenosa	50.6	49.4	26.8	31.5	24.7	6.8	SM
Perfil 8: M8	1.0	Relleno	58.3	41.7	8.0	29.2	24.1	5.1	SM

Para fines de apoyar en la interpretación de los modelos tanto 3D como 2D se presentan los resultados de pruebas granulométricas y de propiedades índice realizadas por el estudio de mecánica de suelos del año 2017. Los resultados de las muestras recuperadas y analizadas en laboratorio se presentan en la tabla 2.

Los tipos de suelo que asigna el SUCS son: arena limosa (SM), arena arcillosa (SC), limo de baja plasticidad (ML), limo de alta plasticidad (MH), arcillas de baja plasticidad (CL) y arcillas de alta plasticidad (CH). Con base en los resultados de las granulometrías, la relación entre las unidades litológicas del sitio y el SUCS es la siguiente. La unidad de arenas tobaceas presenta el mayor porcentaje de arena, por lo que su clasificación SUCS es SM o SC. A la unidad de toba arenosa le corresponde la clasificación SUCS de ML, mientras que las tobas arcillosas se clasifican como MH o CL.

Tabla 2. Granulometría y propiedades índice de muestras recuperadas en los pozos exploratorios perforados para el estudio previo realizado en 2017.

Muestra	Profundidad (m)	Unidad litológica	% Arena	% Finos	% Humedad	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice Plástico	SUCS
LB1:M1	5.40	Arena tobacea	81.3	18.7	9.5	25.5	20.4	5.10	SC-SM
LB1:M2	8.00	Arena tobacea	75.6	24.4	9.5	23.9	NP	NP	SM
LB1:M3	12.0	Arena tobacea	63.1	36.9	9.5	31.3	20.7	10.6	SC
LB1:M4	15.0	Toba arcillosa	13.8	86.2	9.5	75.4	47.0	28.4	MH
LB1:M6	17.5	Toba arcillosa	6.00	94.0	9.5	71.4	38.3	33.1	MH
LB2:M2	4.20	Relleno	65.8	34.2	9.5	29.5	22.5	7.00	SC-SM
LB2:M3	6.00	Relleno	65.5	34.5	9.5	27.0	22.1	4.90	SM
LB2:M4	8.00	Toba arenosa	36.9	63.1	9.5	40.0	27.9	12.1	ML
LB2:M5	10.0	Arena tobacea	72.1	27.9	9.5	29.7	24.1	5.60	SM
LB4:M1	2.50	Arena tobacea	80.6	19.4	9.5	22.8	NP	NP	SM
LB4:M2	4.50	Arena tobacea	81.9	18.1	9.5	26.2	21.1	5.10	SC-SM
LB4:M3	10.0	Toba arenosa	22.6	77.4	9.5	32.6	25.7	6.90	ML
LB4:M4	14.5	Arena tobacea	65.3	34.7	9.5	31.1	24.5	6.60	SM
LB4:M5	18.5	Arena tobacea	81.6	18.4	9.5	24.5	19.5	5.00	SC-SM
LB4:M6	20.0	Arena tobacea	78.4	21.6	9.5	27.7	22.6	5.10	SM
LB5:M1	4.00	Toba arenosa	49.1	50.9	9.5	40.7	27.6	13.1	ML
LB5:M2	6.00	Arena tobacea	58.4	41.6	9.5	32.8	26.1	6.10	SM
LB5:M3	8.00	Arena tobacea	61.7	38.3	9.5	31.5	25.5	25.5	SM
LB5:M4	10.0	Arena tobacea	83.5	16.5	9.5	31.7	25.1	6.60	SM
LB5:M5	12.0	Arena tobacea	72.3	27.7	9.5	30.8	24.5	6.30	SM
LB5:M6	16.0	Arena tobacea	68.2	31.8	9.5	35.0	24.9	10.1	SM
LB5:M7	18.0	Arena tobacea	70.0	30.0	9.5	27.4	21.2	6.20	SC-SM

3.6.2. Resistencia al corte

Los resultados de las pruebas de corte directo realizadas en las muestras recuperadas del sitio se presentan de acuerdo a la unidad litológica a la que pertenecen. En laboratorio se realizaron un total de 12 pruebas, de las cuales 7 corresponden a la unidad de arena tobacea, 2 a la unidad de tobas arenosas y 3 a la unidad de tobas arcillosas. Para realizar la prueba en laboratorio se siguió el procedimiento indicado en la norma ASTM D3080 (2011). De esta prueba se obtienen los valores de cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ), ambos valores son necesarios para los cálculos de estabilidad de laderas y taludes.

Como se mencionó en la sección 2.4.2, en cada prueba la muestra que se ensaya en laboratorio se divide en tres partes. En las figuras 40, 41 y 42 cada color indica los resultados obtenidos para cada una de las pruebas realizadas en laboratorio. Además de representar una prueba diferente, cada color también indica el contenido de humedad que presentaron las fracciones de muestra ensayadas en laboratorio, esto con el fin de resaltar el impacto que tiene el contenido de humedad en los valores de c y ϕ . Por ejemplo, en la figura 40, los 3 triángulos de color morado corresponden a una sola prueba realizada en una muestra de arena tobacea que presentó un contenido de humedad del 12.8%. El mismo criterio de clasificación se utilizó en las figuras 41 y 42.

En la sección 2.4.2, también se mencionó que matemáticamente la resistencia al corte de un suelo se expresa con la ecuación de Mohr-Coulomb. Dicha ecuación es de primer grado, por lo que al graficarla se obtiene una recta. En las figuras 40, 41 y 42 las líneas punteadas representan la recta ajustada por mínimos cuadrados a los datos obtenidos en cada prueba. También se presentan las ecuaciones lineales ajustadas a los datos obtenidos en cada prueba, el color del texto indica a que prueba pertenece la ecuación. Con base en los ajustes lineales realizados para cada prueba se determinan los valores de c y ϕ . Como se mencionó en la sección 2.4.2 el valor de c corresponde a la ordenada al origen de la recta ajustada, mientras que el valor de ϕ se obtiene aplicado la ecuación 16.

Primeramente en la figura 40, se presentan los resultados obtenidos para la unidad litológica de arenas tobaceas. De acuerdo con las granulometrías realizadas y las reportadas por estudios previos, esta unidad litológica presenta un contenido de arena

mayor al 50 %. Al ser materiales mayormente arenosos, el término ϕ de la ecuación 15 adquiere mayor relevancia. Por esto es que para esta unidad litológica se obtuvieron los valores más grandes de ϕ , ver tabla 3.

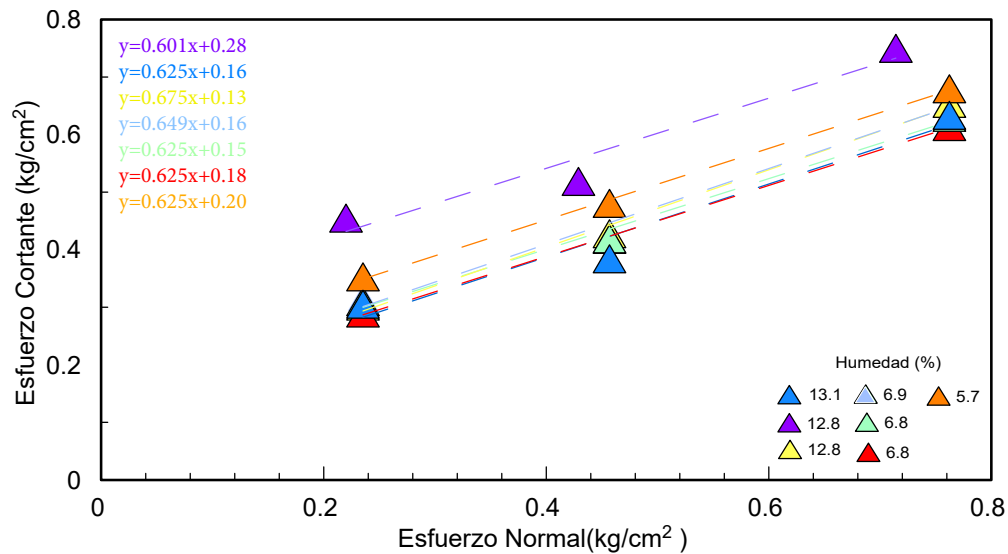


Figura 40. Resultados de la prueba de corte directo para muestras de arena tobacea.

Los resultados obtenidos para la unidad de tobas arenosas se presentan en la figura 41. La granulometría de esta unidad consiste en un contenido de finos entre 50 y 70 %. La predominancia de material con grano fino representa un aumento en el valor de c , sin embargo hay una disminución en el valor de ϕ . Los valores de c y ϕ se presentan en la tabla 3.

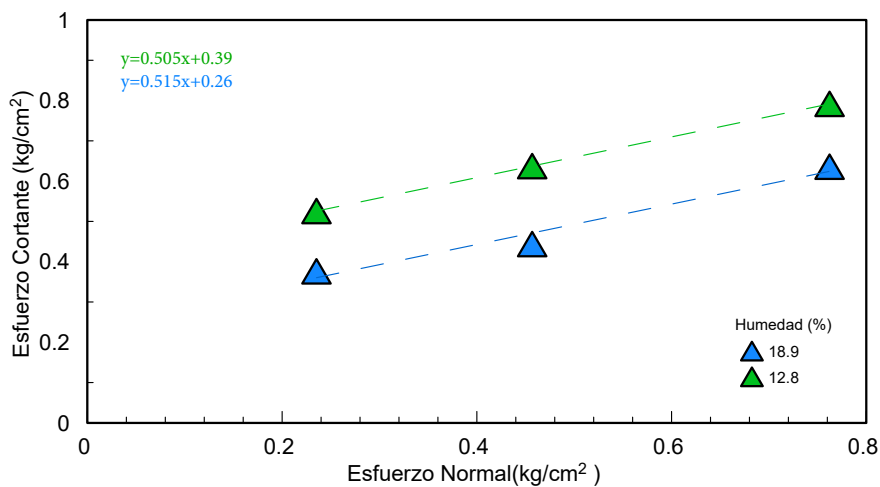


Figura 41. Resultados de la prueba de corte directo para muestras de toba arenosa.

Finalmente, la unidad litológica de tobas arcillosas se caracteriza por presentar

un contenido de finos mayor al 70 %. La predominancia de material de grano fino se traduce en un aumento en el valor de c , mientras que ϕ disminuye considerablemente, ver tabla 3. Los resultados de la prueba de corte directo en esta unidad se presentan en la figura 42.

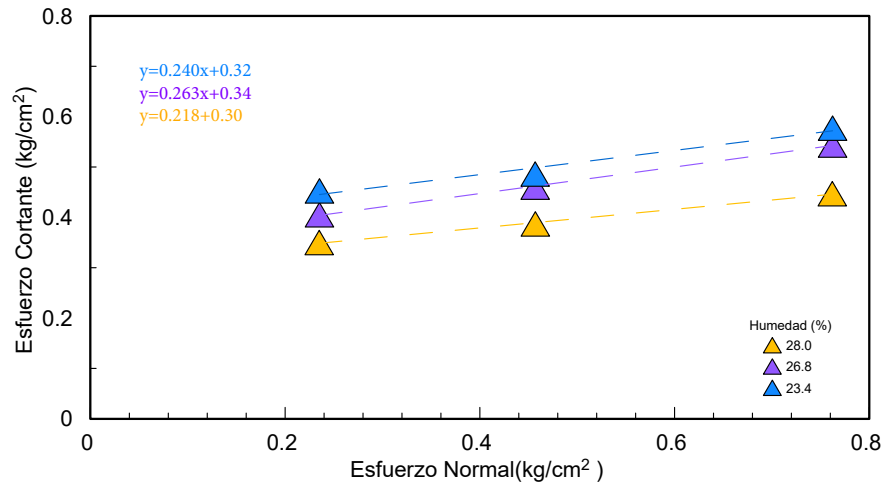


Figura 42. Resultados de la prueba de corte directo para muestras de toba arcillosa.

Tabla 3. Resumen de parámetros mecánicos calculados a partir de la prueba de corte directo

Unidad litológica	% Humedad	$c(\text{kg cm}^{-2})$	ϕ
Arena tobacea	5.7	0.2	32
Arena tobacea	6.8	0.18	32
Arena tobacea	6.8	0.15	32
Arena tobacea	6.9	0.16	33
Arena tobacea	12.8	0.28	31
Arena tobacea	13.1	0.16	32
Toba arenosa	12.8	0.39	27
Toba arenosa	18.9	0.26	27
Toba arcillosa	23.4	0.32	14
Toba arcillosa	26.8	0.34	15
Toba arcillosa	28.0	0.31	12

3.7. Estabilidad de laderas y taludes en el sitio de estudio

Para analizar la estabilidad de las laderas y taludes del sitio de estudio, se trazaron 7 perfiles, su ubicación se presenta en la figura 43. Los perfiles 1 a 4 corresponden a la ladera que colinda con la carretera libre Tijuana-Ensenada, el perfil 5 corresponde a un talud en terraplén (construido con material de relleno), mientras que los perfiles 6 y 7 corresponden a taludes colindantes con un desarrollo habitacional ubicado aguas

abajo del sitio de estudio. No se calculó la estabilidad del talud que colinda con el tren de viviendas más cercano al sitio de estudio, debido a que en ese lindero se realizaron bermas y la pendiente promedio de los taludes es esta zona oscila entre 18 a 33 grados. La combinación de bermas y pendientes poco pronunciadas se traduce en una mayor estabilidad del talud.

El cálculo de estabilidad de laderas y taludes se realizó con el software comercial SLOPE \ W versión 2012. El programa permite elegir entre varios métodos de equilibrio límite (entre ellos el Método de Spencer) para calcular la estabilidad de laderas y taludes. Como se mencionó en el capítulo 2 los análisis de estabilidad se realizaron con el método de Spencer (1967). Dicho método se describió en la sección 2.5.3. Para calcular el valor del FS el programa requiere ser alimentado con los siguientes datos: perfil topográfico (en dirección perpendicular al talud o ladera de interés), modelo estratigráfico y los parámetros de resistencia al corte para cada una de las unidades litológicas. La obtención de los modelos estratigráficos y los parámetros mecánicos del suelo se presentó en las secciones 3.4 y 3.6, respectivamente. Las ecuaciones que permiten obtener el FS se presentaron en la sección 2.5.3.

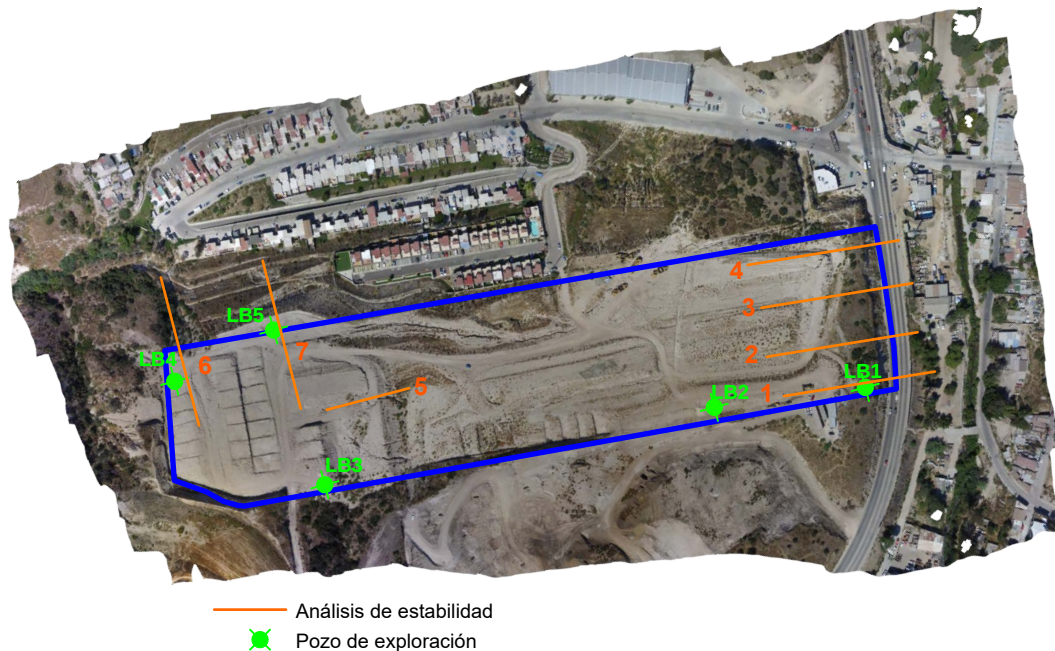


Figura 43. Trazo de los perfiles considerados para cálculo de estabilidad de laderas y taludes.

Los análisis de estabilidad de laderas se realizaron considerando dos escenarios, cada escenario corresponde a las condiciones de humedad de las muestras que fueron

sometidas a la prueba de corte directo. La condición seca consideró los parámetros de resistencia de las muestras con menor contenido de humedad, mientras que la condición húmeda empleó los parámetros obtenidos en muestras con mayor contenido de humedad.

De manera adicional, para cada escenario se consideraron dos casos, en el primero no existen sobrecargas por edificación, en el segundo se agrega una sobrecarga de 2.5 toneladas por metro cuadrado para simular la carga que se impondría sobre el talud si se llevara a cabo la propuesta de urbanización del predio.

3.7.1. Análisis de estabilidad para condición seca

En la tabla 4 se muestran los resultados de los dos escenarios que se analizaron para la condición seca. La estabilidad de las laderas y taludes se expresa por medio del FS, tal como se explicó en el capítulo 2. De acuerdo con la ecuación 18 cuando equivale a 1, las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizadoras se encuentran en equilibrio límite. Por esta razón en la práctica se considera que un talud es estable cuando FS presenta valores mayores o iguales a 1.5.

Tabla 4. Valores del FS obtenidos en los dos casos analizados para la condición seca

Perfil Analizado	FS sin sobrecarga	FS con sobrecarga
Perfil 1	1.146	1.113
Perfil 2	1.195	1.160
Perfil 3	1.315	1.249
Perfil 4	1.325	1.263
Perfil 5	2.166	2.090
Perfil 6	1.478	1.434
Perfil 7	1.596	1.574

Con los valores de FS obtenidos para los perfiles 1 a 4, se construyeron 2 mapas de contornos que se presentan en la figuras 44 y 45. El primero (Figura 44) corresponde al análisis de estabilidad donde no se consideran sobrecargas adicionales, mientras que el segundo (Figura 45) atañe al caso donde se agregaron sobrecargas por edificación.

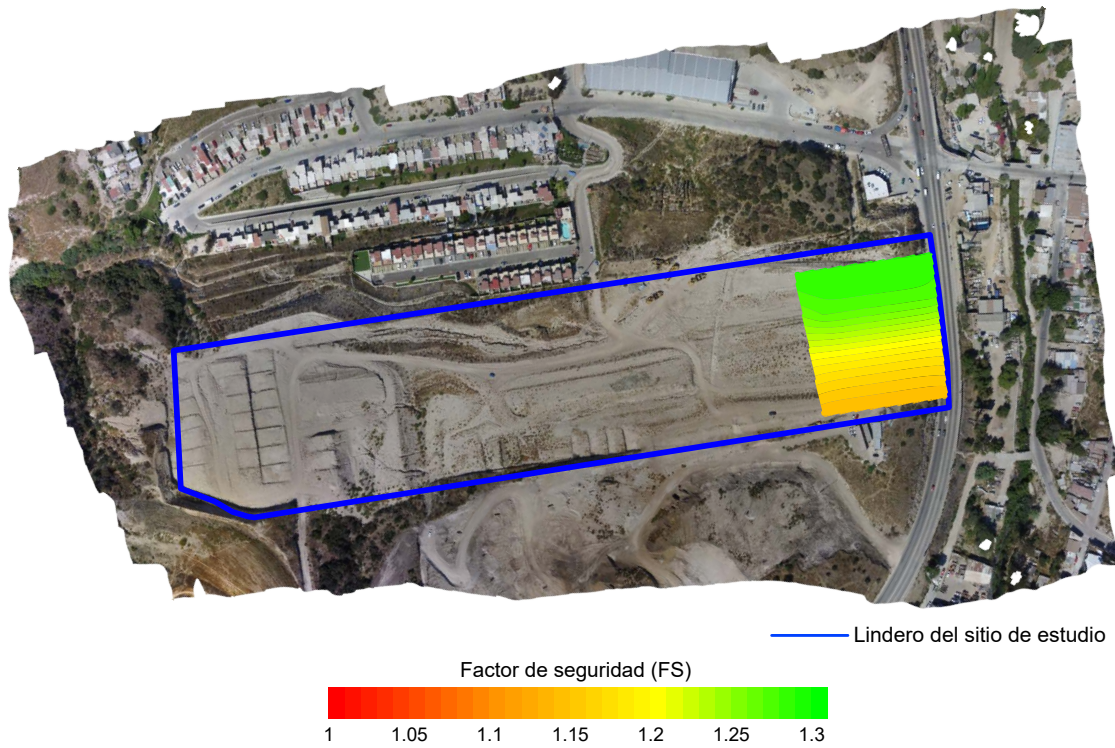


Figura 44. Mapa de contornos generados a partir del valor de FS en los análisis de los perfiles 1 a 4, en condición seca y sin sobrecargas adicionales

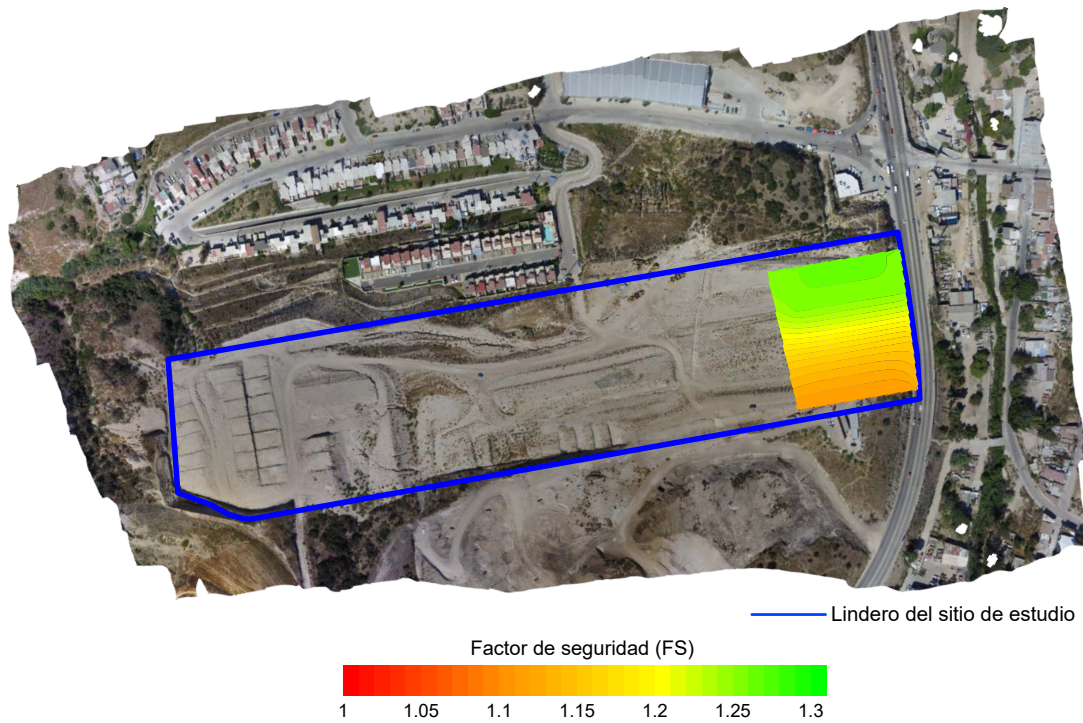


Figura 45. Mapa de contornos generados a partir del valor de FS en los análisis de los perfiles 1 a 4, en condición seca considerando sobrecargas por edificación.

Tanto en la tabla 4 como en las figuras 44 y 45 se puede apreciar que la imposición de cargas no produjo cambios significativos en el valor del FS. En la sección 4.2 se discutirá con detalle la combinación de parámetros que influye en el incremento o disminución del FS.

3.7.2. Análisis de estabilidad para condición húmeda

Para este análisis se consideraron los resultados obtenidos para el escenario donde el contenido de humedad del suelo es mayor y por consecuencia hay una disminución de la resistencia al corte. Cuando aumenta el contenido de humedad, la cohesión y el ángulo de fricción interna disminuyen. En esta sección también se hizo el análisis de estabilidad para laderas y taludes sin edificación y con edificación. Los resultados para ambos casos se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Valores del FS obtenidos en los dos casos analizados para la condición húmeda

Perfil Analizado	FS sin sobrecarga	FS con sobrecarga
Perfil 1	1.030	1.002
Perfil 2	1.058	1.036
Perfil 3	1.203	1.144
Perfil 4	1.213	1.152
Perfil 5	2.155	1.960
Perfil 6	1.296	1.248
Perfil 7	1.396	1.376

El caso donde se consideran sobrecargas adicionales y reducción de los parámetros de resistencia al corte es el más desfavorable, los valores de FS obtenidos para estas condiciones se presentan en la tercer columna de la tabla 5. Los mapas de contornos contruidos a partir de los FS de seguridad calculados para los dos casos analizados bajo condición húmeda se presentan en las figuras 46 y 47.

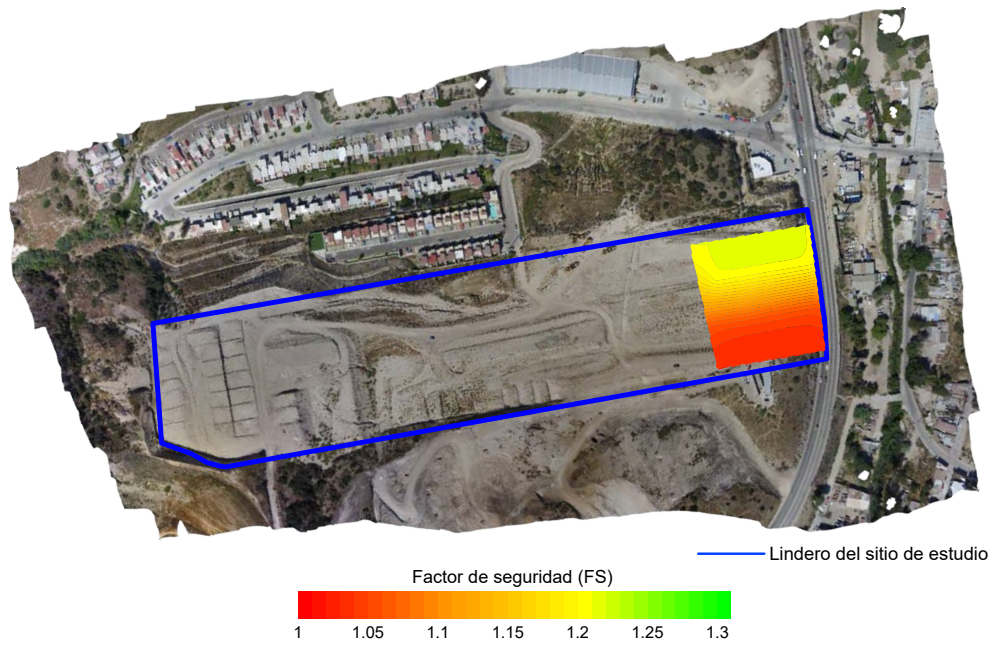


Figura 46. Mapa de contornos generados a partir del valor de FS en los análisis de los perfiles 1 a 4, para la condición húmeda sin imposición de sobrecargas.

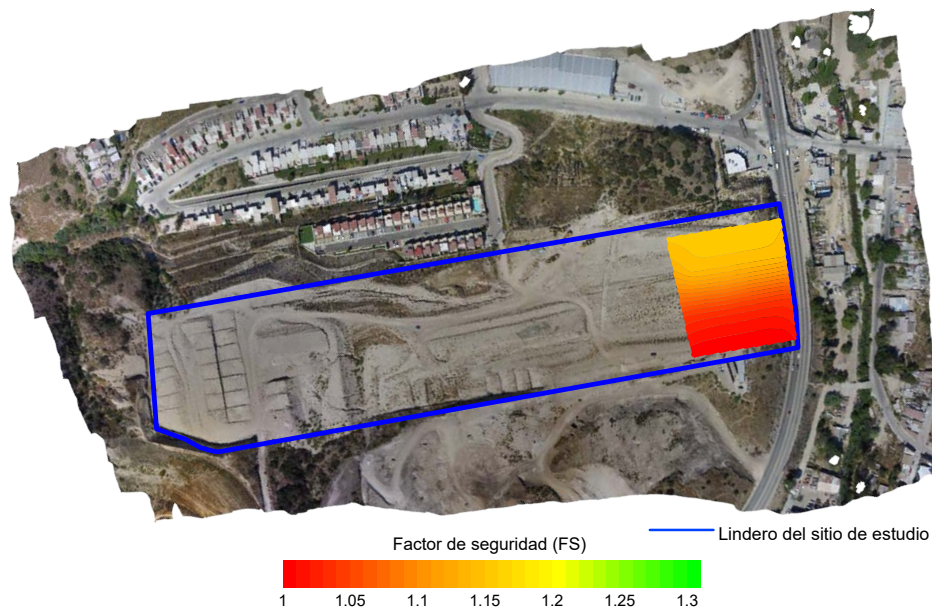


Figura 47. Mapa de contornos generados a partir del valor de FS en los análisis de los perfiles 1 a 4, en condición húmeda considerando sobrecargas adicionales

Con base en los resultados presentados en la tabla 5 así como en las figuras 46 y 47, se observa que el contenido de mayor humedad en el subsuelo modifica significativamente los valores del FS, esto se debe principalmente a la reducción de la resistencia al corte en la masa de suelo, en la sección 4.2 se discute a detalle la combinación de parámetros que produjo la disminución del FS.

3.8. Correlación entre resistividad y propiedades mecánicas del suelo

Las correlaciones entre resistividad estimada por la inversión (ρ) y algunos parámetros geotécnicos obtenidos en laboratorio presentadas en esta sección se realizaron a partir de los modelos 2D para detalle o poca penetración y las muestras que se recuperaron en puntos de interés observados en estos modelos. Además de observar la influencia que tienen las propiedades mecánicas del suelo, se obtuvieron relaciones empíricas que permiten inferir las propiedades geotécnicas de las unidades litológicas del sitio a partir de los valores de ρ .

Primeramente se correlacionó ρ con los resultados de las granulometrías. En la figura 48 se presenta la relación entre el contenido de arena y los valores de resistividad. Se puede observar que en las unidades litológicas del sitio de estudio la resistividad aumenta de forma exponencial conforme la matriz de suelo se torna más arenosa. Se intentó regresión lineal con polinomios, pero la exponencial es simple y ajusta bien.

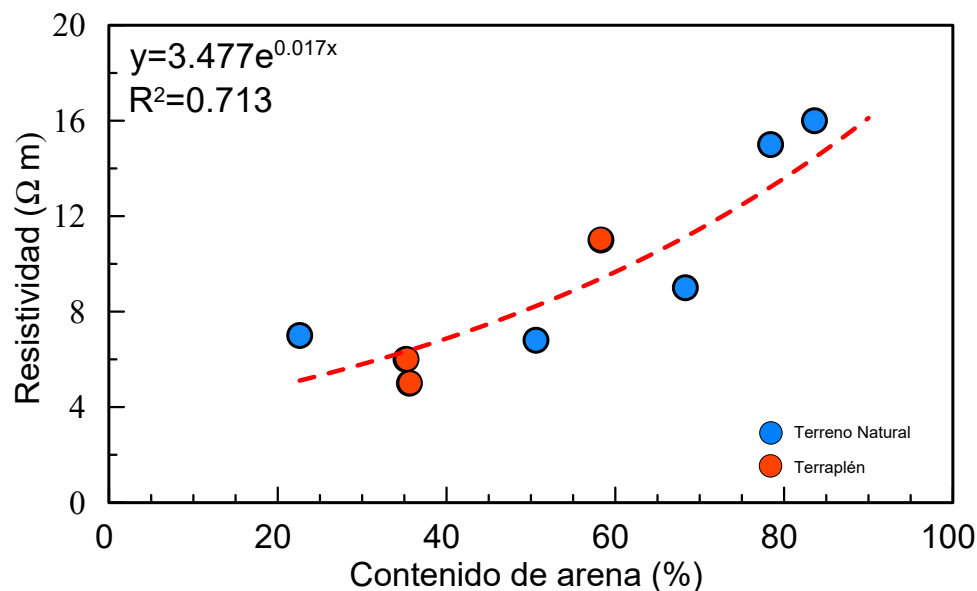


Figura 48. Correlación entre resistividad y el contenido de arena.

La correlación entre el contenido de finos, se presenta en la figura 49, aquí el comportamiento es contrario al de la correlación anterior. Conforme la matriz de suelo se torna mayormente de grano fino, la resistividad disminuye. El porcentaje de finos considerado en esta correlación incluye limos y arcillas.

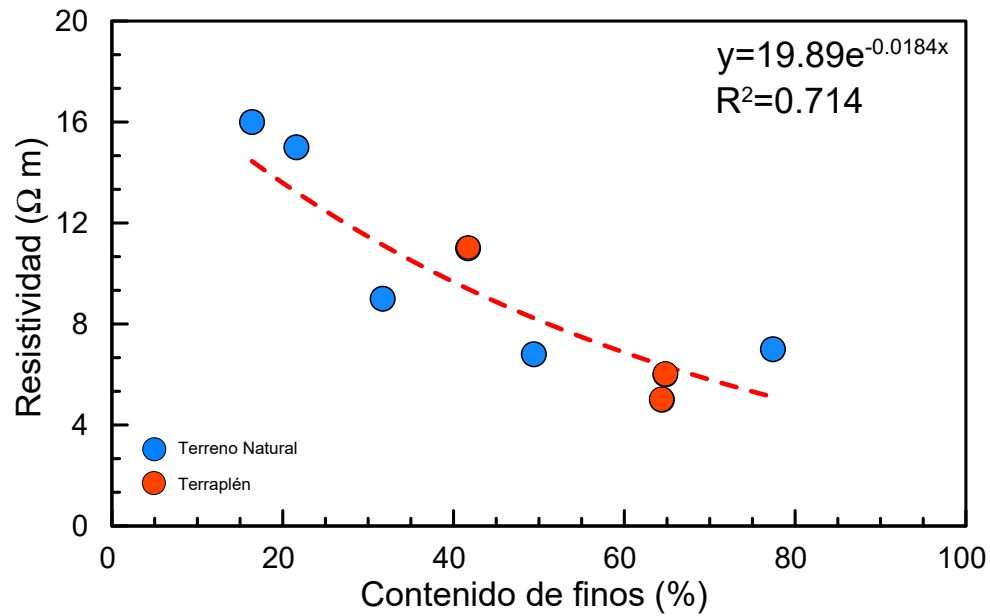


Figura 49. Correlación entre resistividad y el contenido de finos (limos y arcillas).

El coeficiente de determinación (R^2) permite cuantificar la confiabilidad en la ecuación que se ajusta a un conjunto de datos (Zhang, 2017). R^2 puede tomar valores entre 0 y 1, cuanto su valor está más cercano a 1, mejor será el ajuste de la ecuación. Las limitaciones de las ecuaciones empíricas obtenidas para determinar los porcentajes de arena y finos a partir de los valores de ρ_{se} se discuten en la sección 4.3.

Capítulo 4. Discusión

4.1. Relación entre modelos geofísicos y litología

En los modelos de resistividad eléctrica en 2D y 3D se observa poca variación en los valores de resistividad, pues estos oscilan entre 2 a 30 Ωm . La resistividad de una roca o un suelo depende de muchos factores como: el contenido de humedad, la porosidad, la granulometría, etc. Teniendo esto en cuenta se utilizaron los parámetros obtenidos en laboratorio de suelos y las columnas estratigráficas de los pozos para calibrar los modelos geofísicos y poder proponer los modelos estratigráficos.

Los pozos que se perforaron en el sitio de estudio reportan tres unidades litológicas: arenas tobaceas, toba arenosa y toba arcillosa. De acuerdo a las columnas estratigráficas de los pozos, la unidad que predomina en el sitio de estudio es la de arenas tobaceas del miembro inferior de la Fm. San Diego. Las granulometrías realizadas en muestras de esta unidad revelan que se compone por arenas de grano fino. El contenido de arena de esta unidad en porcentaje, es de 50 a 70 % . Las otras dos unidades se encuentran intercaladas entre las arenas tobaceas. El espesor de estas intercalaciones es variable, va desde 10 cm hasta 4.00m. En ambas unidades predomina material de grano fino (limos y arcillas). Una forma de identificar si predomina el material limoso o arcilloso en estas formaciones es la revisión de sus propiedades índice (LL y LP). En la figura 50 se presenta una gráfica conocida como carta de plasticidad, la cual permite identificar que muestras corresponden a arcillas y cuales corresponden a limos.

De la figura 50 podemos notar que la mayoría de los suelos de grano fino corresponden a limos. Solamente una de las muestras analizadas corresponde a material arcilloso. De acuerdo a las granulometrías realizadas, la unidad de tobas arenosas presenta una granulometría donde el 50 a 70 % del material es de grano fino (limos). La unidad de tobas arcillosas presenta un contenido de finos mayor al 80 %, además en este tipo de suelo las propiedades índice aumentan considerablemente. La variación en los contenidos de material arenoso entre las unidades de arena tobacea y toba arenosa es solamente un 20%. Esto se refleja en la poca variación en los valores de resistividad asociados con ambas unidades, de 9 a 14 Ωm para las tobas arenosas y de 15 a 20 Ωm para las arenas tobaceas.

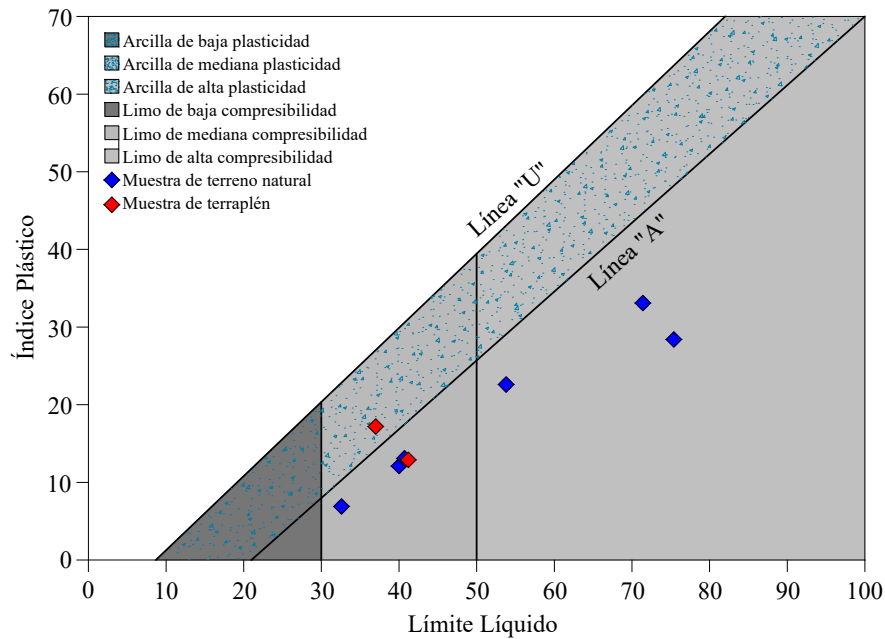


Figura 50. Carta de plasticidad de Casagrande para las muestras recolectadas en el sitio de estudio que presentan mayormente material de grano fino (limos y arcillas).

Las 3 unidades litológicas reportadas en los pozos que se perforaron en 2017, encajan con las descripciones realizadas por Artim y Pinckney (1973) y Minch *et al.* (1984) para el miembro inferior de la Fm. San Diego.



Figura 51. Contacto entre los miembros inferior y superior de la Fm. San Diego. El miembro inferior se conforma por arenas finas, mientras que el superior se caracteriza por areniscas y conglomerados.

Minch *et al.* (1984) mencionan que el miembro inferior de la Fm. San Diego está conformado por horizontes masivos de arenas finas. La presencia de intercalaciones limosas y arcillosas entre las arenas finas fue reportada por Artim y Pinckney (1973).

En un corte expuesto cerca de la esquina noroeste del predio, se puede apreciar el contacto entre los miembros superior e inferior de la Fm. San Diego, ver 51.

Identificar los espesores de material colocado como terraplén utilizando solamente los modelos de resistividad hubiera sido muy complicado, puesto que el material con el que se conformaron, fue producto de corte de las 3 unidades litológicas del sitio. Por esto último la resistividad entre el material terraplenado y el terreno natural no varió mucho, de tal forma que fue necesario hacer la comparación entre superficies topográficas de diferentes años, para determinar los espesores de terraplén e identificar que zonas de los perfiles corresponden a material relleno y cuales a terreno natural.

4.1.1. Limitaciones de los modelos estratigráficos

Para realizar los análisis de estabilidad de taludes es necesario contar con un modelo estratigráfico. Para este trabajo los modelos estratigráficos se propusieron a partir de los modelos de resistividad en 3D y 2D, calibrando los valores de resistividad obtenidos con la estratigrafía observada en los pozos de exploración y con las pruebas de laboratorio. Para obtener un modelo estratigráfico a detalle, es necesario contar con información de un pozo, puesto que los cuerpos observados en los modelos geofísicos carecen de la resolución para ubicar con exactitud interestratificaciones delgadas, tal es el caso de los estratos de material limoso y arcilloso, que se presentan en el miembro inferior de la Fm. San Diego. Además, como estas interestratificaciones pueden ser de poco espesor, la resolución de los modelos geofísicos podría no ser suficiente para trazarlas con exactitud en un modelo estratigráfico.

La ubicación de los estratos limosos y arcillosos que se proponen en los modelos estratigráficos presentados en la sección 3.5, se sustenta en la presencia de cuerpos conductores, cuyos valores de resistividad van de 2 a 13 Ωm . Al comparar la presencia de estos cuerpos con las columnas estratigráficas de los pozos se notó que en la mayoría de los casos si coinciden con los estratos de tobas arenosas y arcillosas. Para ubicar con precisión estas intercalaciones de material limoso y arcilloso se necesitan modelos geofísicos de alta resolución y la columna estratigráfica de un pozo para calibrar los modelos. Si no se contara con información que permita calibrar el modelo de resistividad, el modelo estratigráfico propuesto sería burdo. Si se calculara la estabi-

lidad del talud o ladera con estas limitantes, habría incertidumbre en los valores del FS.

Los modelos de resistividad 2D de los tendidos 5 al 7 (figuras 32 a 36) tienen longitudes de 90 (tendidos 5 y 6) y 54 m (tendido 7). Mientras que sus respectivos modelos estratigráficos tienen 150 m de longitud. La estratigrafía propuesta en los rangos de longitud que no están cubiertos por los tendidos de resistividad se extrapoló de los estratos reportados por pozos cercanos, de observaciones hechas en cortes expuestos y de los cuerpos observados en los modelos de resistividad. En el tendido 5 no hay un pozo cercano, por lo que solamente se utilizaron los modelos de resistividad para inferir la estratigrafía. Para la corona del talud se utilizó el modelo 2D y para el pie del talud se empleó el modelo 3D. En el caso de los tendidos 6 y 7, se extrapoló la estratigrafía a partir de la columna reportada por los pozos LB5 y LB4 (ver figura 21), respectivamente. Cabe mencionar que las unidades litológicas cuya estratigrafía deber ser inferida son las de terreno natural. La geometría del relleno se obtuvo a partir de la comparación de la superficie topográfica que ha tenido el sitio de estudio en diferentes años.

4.1.2. Cambios entre temporadas seca y de lluvias

A partir de los modelos 3D de resistividad obtenidos para las temporadas seca y de lluvias, se hizo una comparación para identificar las zonas donde hubo cambios en la resistividad. La comparación se hizo a través de una relación:

$$\Delta\rho = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (29)$$

donde

$\Delta\rho$: cambio en resistividad

ρ_1 : resistividad antes de lluvia

ρ_2 : resistividad después de lluvia

En la relación 29, si nos da un resultado cercano a uno indica que no hubo cambio

en la resistividad, resultados menores son indicativos de una disminución de la resistividad después de la lluvia, por el contrario un resultado mayor a uno indica aumento en la resistividad después de la lluvia.

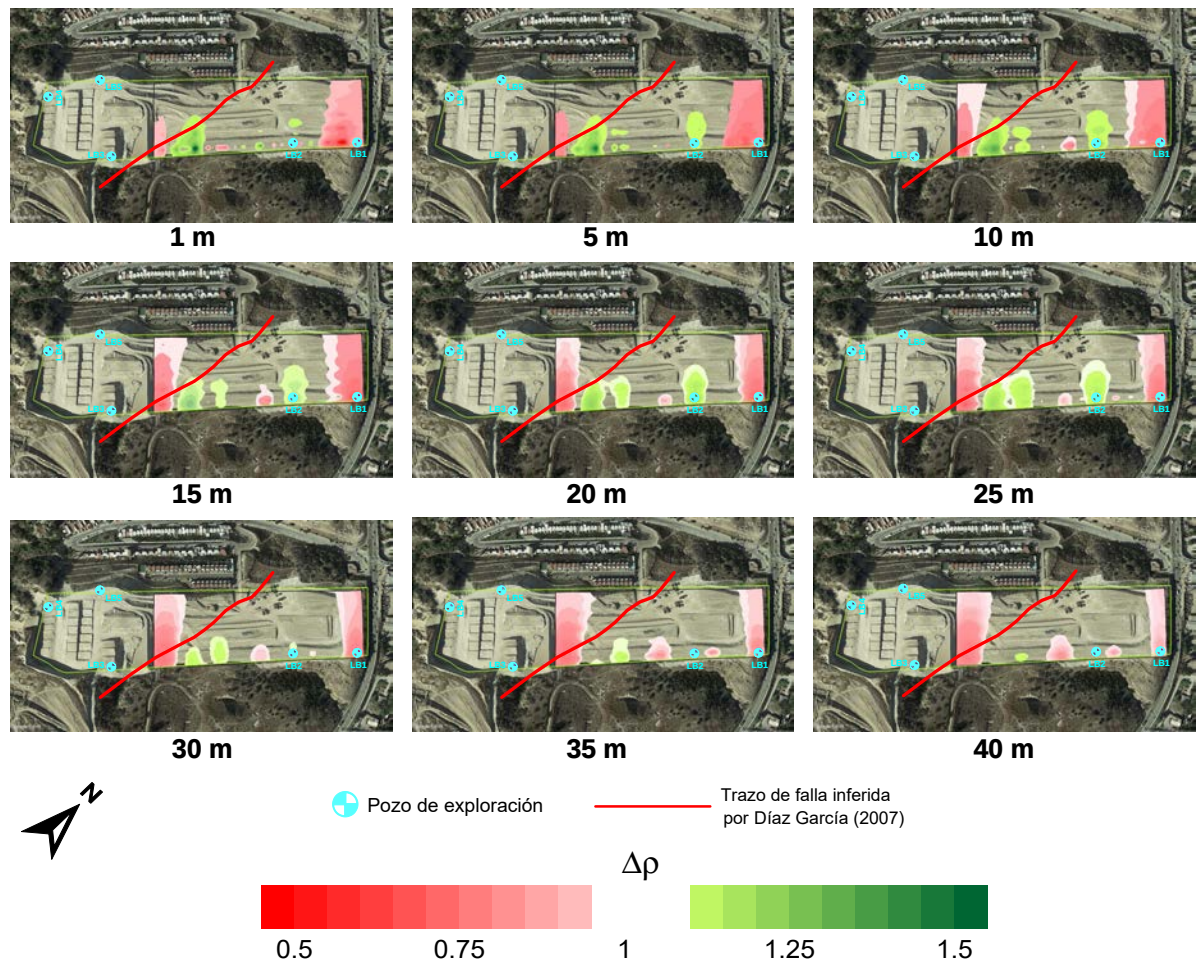


Figura 52. Resultado de la comparación entre los modelos 3D antes y después de lluvias.

El resultado de la comparación entre los modelos 3D se presenta en la figura 52. Entre las temporadas seca y de lluvias con la excepción de la superficie, el contenido de humedad en el suelo no pudo haber disminuido. Considerando esto, las zonas de color rojo que se observan en la figura 52 indican que el suelo era mas resistivo durante la temporada seca, lo cual indica que antes de las lluvias tenía menor contenido de humedad. Durante la temporada de lluvia, se incrementó el contenido de humedad del suelo y por esto, se volvió mas conductor. Las zonas que aparecen de color verde corresponden a suelos que durante la temporada seca eran conductores y al incrementar su humedad durante la temporada de lluvia se tornaron resistivos. Se necesitan pruebas de laboratorio adicionales para determinar porque esta interacción entre material

conductor y agua de lluvia hace que incremente la resistividad del subsuelo. Estas zonas donde se observaron cambios en el contenido de humedad deben ser monitoreadas, pues el incremento de la humedad conlleva la modificación de la resistencia al corte de los suelos. Por esta razón se hizo un análisis de estabilidad considerando la reducción en la resistencia al corte de las unidades litológicas del sitio de estudio. Es interesante ver que estos cambios en la resistividad de una temporada a otra delinea el escurrimiento superficial y movimiento de agua subterránea preferencial en la zona.

Es notorio que en el lindero que colinda con la carretera libre Tijuana - Ensenada se presenta una disminución en la resistividad, en las secciones correspondientes al rango de 1 a 5m de profundidad, es donde se observa mayor disminución, lo que además coincide con el espesor de material terraplenado colocado sobre esta área. La otra zona donde es muy notorio la disminución de resistividad, es el lindero opuesto a la carretera, el cual colinda con el pie de un talud construido con terraplén. Para esta zona, la disminución en la resistividad se atribuye a que durante la temporada de lluvia, parte del escurrimiento desciende por la cara del talud, llega al pie del mismo y se comienza a infiltrar en el subsuelo.

En la figura 52 en cada una de las secciones se dibujó el trazo de la supuesta falla o lineamiento reportado por Díaz García (2007). Cabe señalar que el reporte de Díaz García (2007) no especifica si el rasgo inferido es una falla o un lineamiento. Con excepción de la zona cercana al talud construido con terraplén, no se observan cambios de resistividad considerables sobre el trazo de la supuesta falla. A partir de la comparación entre las superficies topográficas presentadas en la sección 3.1, se puede comentar que, sobre el trazo de la supuesta falla, que además coincide con un cañón, se colocaron los mayores espesores de terraplén. De la comparación entre los modelos 3D de resistividad y las correlaciones entre los valores de resistividad y la granulometría obtenida en laboratorio, se puede inferir que el terraplén fue construido mayormente con material arenoso, el cual al tener mayor porosidad que los materiales de grano fino, no permitiría la acumulación de grandes cantidades de humedad, esto último es el comportamiento deseable al realizar terraplenes sobre cauces antiguos. Este comportamiento del terraplén colocado en el cauce de la cañada, puede ser un indicador de que durante su conformación hubo supervisión. Pues a diferencia del terraplén colocado en otras áreas del predio, en este pareciera que se seleccionaron

los materiales con mayor contenido de arena para realizar el relleno.

4.2. Variación del factor de seguridad

El parámetro principal que controla los valores obtenidos al calcular el FS es la resistencia al corte; también influyen la geometría del talud y el método de análisis que se haya empleado para calcular la estabilidad. Para los análisis de estabilidad realizados en este trabajo, se empleó el método de Spencer porque satisface todas las condiciones de equilibrio. Considerar la aportación de todas las fuerzas involucradas en mantener el equilibrio estático de la masa de suelo, brinda mayor certeza en el cálculo del FS.

Los valores más críticos para el FS se obtuvieron en la ladera que colinda con el trazo de la carretera libre Tijuana-Ensenada. La falla de esta ladera bloquearía una de las principales vialidades de la ciudad, pues comunica a Tijuana con el municipio de Playas de Rosarito y por ende a los desarrollos habitacionales y comerciales intermedios. La estabilidad de esta ladera aumenta en sentido Oeste, ver figuras 44 a 47. En este caso tanto su geometría como las propiedades del suelo influyen en el incremento de la estabilidad. Conforme se avanza hacia el Oeste la altura y la pendiente de esta ladera disminuyen, además en los modelos de resistividad 2D y las ortoimágenes de los modelos 3D para los tendidos 3 y 4, se observa una notable disminución en el tamaño de los cuerpos conductores, que se asocian a las unidades litológicas de grano fino, que son las que menor resistencia al corte tienen.

El FS obtenido para el perfil 5 en todos los escenarios y condiciones analizadas es superior a 1.5. Este análisis corresponde a un talud construido con terraplén, cuya pendiente de diseño es de 1:1.5 (horizontal:vertical), esto sumado a una altura de apenas 14 metros aporta las circunstancias propicias para que se conserve la estabilidad del talud aún en las condiciones menos favorables.

Los análisis realizados en los perfiles 6 y 7, corresponden a un talud estabilizado por bermas, en este caso el espesor de relleno es mínimo. Este talud presenta alturas entre 36.7 y 44.7 metros medidos desde su pie, su pendiente es muy cercana a los 45 grados. Sus características geométricas junto con las bermas, hace que inclusive

en el escenario más crítico el FS de seguridad no disminuya tan drásticamente, en el escenario favorable el FS es muy cercano a 1.5.

No hay mucha diferencia entre los valores de FS calculados cuando se consideran sobrecargas adicionales, esto se debe a que las cargas que se agregaron para simular edificaciones, no se colocan sobre toda la corona del talud, se consideró una convención general, que consiste en emplear una distancia de retiro de 3 m respecto a la corona del talud para desplantar edificaciones.

En los análisis realizados para la condición húmeda, se consideró que todos los estratos presentan una disminución de su ángulo de fricción interna y cohesión. En realidad algunos estratos son más permeables que otros, por lo que la reducción de sus parámetros mecánicos podría ser diferente a lo considerado en este trabajo. Sin embargo con la información obtenida en laboratorio podemos estimar que los estratos arcillosos se verán más afectados ante la infiltración de humedad.

4.3. Correlaciones con los valores de resistividad

Los resultados del análisis de correlación presentado en la sección 3.8 revelan que la granulometría de las muestras de suelo influye en los valores de resistividad obtenidos para el sitio de estudio. En las figuras 48 y 49, es muy claro que la presencia de limos y arcillas contribuye a la disminución en la resistividad de las unidades litológicas del sitio.

En las gráficas presentadas en las figuras 48 y 49, se emplearon marcadores diferentes para las muestras de terreno natural y las de material terraplenado. Se esperaba que las muestras de material utilizado para conformar rellenos no ajustaran en las funciones utilizadas para la correlación de parámetros. Sin embargo, se observó buena correlación en estas muestras. Esto confirma que el terraplén se conformó con material producto de corte de las unidades litológicas del sitio.

Las muestras de suelo fueron tomadas con un muestreador tipo Shelby. El cual consiste en un tubería de acero (hueca) que al hincarse en el subsuelo permite recuperar una muestra relativamente inalterada (ASTM D1587, 2012). Este tipo de muestreador

es muy útil cuando se requiere recuperar muestras de suelos limosos y arcillosos. En la figura 53 se presenta un dibujo esquemático de este tipo de muestreador.

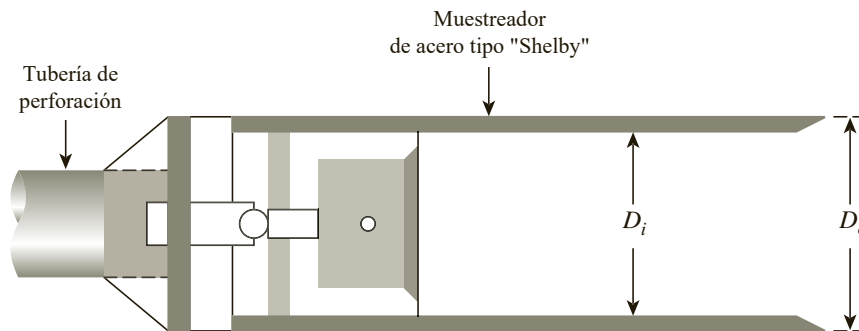


Figura 53. Esquema de un muestreador tipo Shelby, las medidas estandarizadas de los diámetros interior (D_i) y exterior (D_o) de la tubería se encuentran en la norma (ASTM D1587, 2012).

Aún cuando se obtuvieron buenas correlaciones entre el contenido de arena y de finos, las ecuaciones empíricas presentadas en este trabajo solamente son válidas para el sitio de estudio y no se pueden extrapolar a otros sitios. Sin embargo, el procedimiento empleado para obtener las correlaciones se puede aplicar para cualquier sitio. Zhang *et al.* (2018) reportan dos motivos por los que existen limitaciones al obtener este tipo de correlaciones, el primero es la falta de muestras analizadas en laboratorio, el segundo es que exista poca variación en los valores de resistividad del sitio de estudio. Ambas limitaciones se presentan para el sitio estudiado por este trabajo.

Capítulo 5. Conclusiones

- El análisis de estabilidad de laderas y taludes realizado, indica que la zona donde se requiere mayor atención para la propuesta de obras de contención y/o rectificación geométrica, corresponde a la ladera colindante con la carretera Tijuana-Ensenada, pues aún en las condiciones de análisis más favorables su FS está por debajo del valor requerido por normativa que es de 1.5.
- El uso conjunto de modelos geofísicos, perforación de pozos y pruebas de laboratorio de suelos es una combinación ideal para caracterizar el subsuelo. El acoplamiento de estas metodologías permite tener acceso a un mayor volumen de información, lo que brinda mayor confiabilidad en las recomendaciones que se hacen como parte de un estudio de mecánica de suelos o de ingeniería geotécnica. En la práctica es común que estas recomendaciones se hagan solo con información puntual obtenida en pozos.
- Para proyectos que se desarrollen en zonas susceptibles a presentar deslizamientos de laderas, es deseable contar con la mayor cantidad de información posible para caracterizar al subsuelo. Obtener tal grado de información solamente con perforación de pozos, implica un alto costo. El uso de métodos geofísicos permite reducir el costo de un estudio, pues a partir de los modelos se pueden identificar zonas de interés para perforar pozos. De este modo se podría disminuir el número y/o la profundidad de las perforaciones, lo que se reflejaría en un menor costo.
- El sitio de estudio se ubica sobre el miembro inferior de la Fm. San Diego, conformada mayormente por arenas de grano fino, con interestratificaciones de limos y arcillas. Los valores de resistividad obtenidos en los modelos geofísicos presentan poca variación. Sin embargo, gracias a las pruebas de laboratorio y las columnas estratigráficas de los pozos se pudieron calibrar los modelos de resistividad. Se asoció la presencia de cuerpos conductores a estratos donde predomina material limoso y arcilloso, mientras que los cuerpos con mayor resistividad se asociaron a la presencia de suelos arenosos.
- Para tener mayor certeza en el cálculo del FS, se requiere proponer un buen modelo estratigráfico. Mientras mas detallado sea, la incertidumbre en el cálculo de FS es menor. En este trabajo el uso de modelos de resistividad ayudó a proponer

modelos estratigráficos detallados porque los modelos de resistividad fueron calibrados con información de pozos cercanos. En el miembro inferior de la Fm. San Diego hay interestratificaciones de material arcilloso y limoso, las cuales pueden ser muy delgadas. Un modelo geofísico por si solo podría carecer de la resolución necesaria para identificar estratos de poco espesor, de ahí la importancia de combinar ambas metodologías.

- En el sitio de estudio se realizaron trabajos de movimiento de tierras. En las zonas donde se conformaron terraplenes, se colocó material producto de corte del miembro inferior de la Fm. San Diego. Delimitar estas zonas en base a la resistividad eléctrica es complicado, puesto que no se presenta mucha variación entre el terreno natural y el relleno. Por esta razón se comparó la superficie topográfica del sitio para diferentes años. Esto permitió identificar las zonas donde se removió o colocó material.
- La obtención de modelos geofísicos para las temporadas seca y de lluvias fue importante para identificar zonas donde hay cambios en el contenido de humedad. Algunas áreas donde se colocó terraplén se tornaron más conductoras después de lluvia, esto indica que en esas zonas el relleno se conformó con material limoso y arcilloso producto de corte del miembro inferior de la Fm. San Diego. El mismo comportamiento se observa en los estratos de tobas arenosas y arcillosas reportadas por los pozos LB1 y LB2. Las zonas donde se observa este comportamiento deben ser monitoreadas, pues el incremento en el contenido de humedad conlleva una disminución de la resistencia al corte en la masa de suelo.
- El estudio geológico realizado en 2007 reporta el trazo de una falla o lineamiento (no especifica que rasgo es), que a su vez coincide con un cañón que posteriormente se rellenó. Al comparar los modelos geofísicos no se observa algún contraste en la resistividad que confirme la presencia de este rasgo. Inclusive entre las temporadas seca y de lluvias sobre el trazo del rasgo geológico supuesto no se ven cambios significativos en la resistividad. Por lo que se infiere que en esta zona se colocó el producto de corte de la unidad litológica con mayor contenido de arena.
- Las correlaciones entre resistividad y la granulometría de las unidades litológicas del sitio de estudio muestran que el contenido de material de grano fino contribu-

ye bastante en la reducción de la resistividad. Para refinar y en su caso comprobar las relaciones presentadas en este trabajo se necesitan más pruebas de laboratorio y mediciones de resistividad de sitios donde existan las mismas unidades litológicas.

- Dada su sensibilidad a la presencia de material limoso y arcilloso, los métodos eléctricos son una herramienta útil para la caracterización del subsuelo. Sin embargo, se deben tener en cuenta las limitaciones del método, especialmente la relación que hay entre la resolución de los modelos y la profundidad de exploración.
- Como trabajo a futuro se propone la creación de un catálogo de resistividades para las diferentes formaciones geológicas que afloran en la ciudad de Tijuana. Correlacionando esta base de datos con los registros de deslizamientos de ladera ocurridos en Tijuana, se podría identificar que valores de resistividad se asocian con formaciones geológicas susceptibles a presentar un deslizamiento de ladera.

Literatura citada

- Abidin, M., Saad, R., Ahmad, F., Wijeyesekera, D., y Baharuddin, M. (2014). Correlation analysis between field electrical resistivity value (erv) and basic geotechnical properties (bpg). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **51**(3): 117–125.
- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., y Boyce, G. M. (2001). *Slope stability and stabilization methods*. John Wiley & Sons.
- Antonio-Carpio, R. (2003). *Inversión de datos de electromagnéticos y de resistividad en 3D*. Tesis de maestría, Master's thesis (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).
- Artim, E. R. y Pinckney, C. J. (1973). La nacion fault system, san diego, california. *Geological Society of America Bulletin*, **84**(3): 1075–1080.
- ASTM D1587 (2012). Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Soils for Geotechnical Purposes. Standard, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, USA.
- ASTM D2487 (2008). Clasification of Soils for Engineering Puposos (Unified Soil Classification System). Standard, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, USA.
- ASTM D3080 (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Standard, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, USA.
- ASTM D422-63e2 (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. Standard, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, USA.
- ASTM D4318 (2005). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. Standard, American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, USA.
- Bellanova, J., Calamita, G., Giocoli, A., Luongo, R., Macchiato, M., Perrone, A., Uhlemann, S., y Piscitelli, S. (2018). Electrical resistivity imaging for the characterization of the Montaguto landslide (southern Italy). *Engineering Geology*, **243**: 272–281.
- Berumen Rodríguez, M. (2017). Reporte complementario de mecánica de suelos. Reporte técnico, Geoservicios: Geofísica y Geotecnia, Tijuana, Baja California.
- Braga, A. C., Malagutti, W., Dourado, J., y Chang, H. (1999). Correlation of electrical resistivity and induced polarization data with geotechnical survey standard penetration test measurements. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **4**(2): 123–130.
- CENAPRED (2015). Mapa Nacional de Susceptibilidad por Inestabilidad de Laderas. Mapa, Secretaría de Gobernación, Ciudad de México, México.
- Crawford, M. M. y Bryson, L. S. (2018). Assessment of active landslides using field electrical measurements. *Engineering Geology*, **233**: 146–159.
- Cruden, D. M. y Varnes, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. chapter 3-landslide types and processes. *Transportation research board special report*, (247).

- Das, B. M. (2002). *Soil mechanics laboratory manual*. Oxford university press New York, USA.
- Das, B. M. (2019). *Advanced soil mechanics*. Crc Press.
- Das, B. M. y Sivakugan, N. (2019). *Principles of Foundation Engineering*. Cencage Learning.
- Díaz García, J. (2007). Reporte de prospección geológica limitada. Reporte técnico, Grupo 3GEO, Tijuana, Baja California.
- Delgado-Argote, L. A., Brito, J. C. H., Serrano, P. A., y Castillo, G. G. (2012a). Factores geológicos y antrópicos de riesgo en tijuana, baja california. *GEOS*, **32**(2).
- Delgado-Argote, L. A., Castillo, G. G., Alonso, T. A. P., Carrillo, X. G. T., y Serrano, P. A. (2012b). Rasgos geológicos y morfológicos asociados con peligros naturales en los fraccionamientos el valle y hacienda acueducto, tijuana, baja california.
- Dirección de Protección Civil de Tijuana (2016). Capas de google earth.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., y Brandon, T. L. (2014). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.
- Gance, J., Malet, J.-P., Supper, R., Sailhac, P., Ottowitz, D., y Jochum, B. (2016). Permanent electrical resistivity measurements for monitoring water circulation in clayey landslides. *Journal of Applied Geophysics*, **126**: 98–115.
- Gastil, R. G., Phillips, R. P., y Allison, E. C. (1975). *Reconnaissance geology of the state of Baja California*, Vol. 140. Geological Society of America.
- Gómez-Treviño, E. (1987). Nonlinear integral equations for electromagnetic inverse problems. *Geophysics*, **52**(9): 1297–1302.
- González, A. O. O., Jiménez, D. M., Garcia, I. N. A., Nicieza, C. G., y Vigil, A. E. Á. (2014). Hillside instability in the tijuana metropolitan area. analysis of landslide-provoked building collapse. *Engineering Failure Analysis*, **46**: 166–178.
- Gratchev, I., Jeng, D.-S., y Oh, E. (2018). *Soil Mechanics Through Project-Based Learning*. CRC Press.
- Highland, L., Bobrowsky, P. T., et al. (2008). *The landslide handbook: a guide to understanding landslides*. US Geological Survey Reston.
- Huang, Y. H. (2014). Slope stability analysis by the limit equilibrium method: Fundamentals and methods. American Society of Civil Engineers.
- Kaliakin, V. (2017). *Soil mechanics: calculations, principles, and methods*. Butterworth-Heinemann.
- Kalinski, M. E. et al. (2011). *Soil mechanics: lab manual*. John Wiley & Sons.
- Khan, M. S., Hossain, S., Ahmed, A., y Faysal, M. (2017). Investigation of a shallow slope failure on expansive clay in texas. *Engineering Geology*, **219**: 118–129.
- Menke, W. (2018). *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*. Academic press.

- Minch, J. A. (1967). Stratigraphy and structure of the tijuana-rosarito beach area, north-western baja california, mexico. *Geological Society of America Bulletin*, **78**(9): 1155–1178.
- Minch, J. A., Ashby, J. R., Demere, T. A., y Kuper, H. T. (1984). Correlation and depositional environments of the middle miocene rosarito beach formation of northwestern baja california, mexico. *Miocene and Cretaceous Depositional Environments, Northwestern Baja California, Mexico*, **54**: 33–46.
- Pérez-Flores, M., Méndez-Delgado, S., y Gómez-Treviño, E. (2001). Imaging low-frequency and dc electromagnetic fields using a simple linear approximation. *Geophysics*, **66**(4): 1067–1081.
- Pérez-Flores, M. A., Antonio-Carpio, R. G., Gómez-Treviño, E., Ferguson, I., y Méndez-Delgado, S. (2012). Imaging of 3d electromagnetic data at low-induction numbers. *Geophysics*, **77**(4): WB47–WB57.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, **17**(1): 11–26.
- Suárez Díaz, J. (2009). *Deslizamientos, Análisis Geotécnico*. Editorial Universidad Industrial de Santander.
- Sudha, K., Israil, M., Mittal, S., y Rai, J. (2009). Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics*, **67**(1): 74–79.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., y Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, **176**: 11–33.
- Vauhkonen, M., Tarvainen, T., y Lähivaara, T. (2016). *Inverse Problems*, pp. 207–227. Springer International Publishing, Cham.
- Zhang, D. (2017). A coefficient of determination for generalized linear models. *The American Statistician*, **71**(4): 310–316.
- Zhang, T., Liu, S., y Cai, G. (2018). Correlations between electrical resistivity and basic engineering property parameters for marine clays in jiangsu, china. *Journal of Applied Geophysics*, **159**: 640–648.

Pseudosecciones de resistividad aparente

Anexo 1

En este anexo se presentan las pseudosecciones de resistividad aparente para cada uno de los arreglos tetraelectródicos medidos en campo. También se presentan los modelos inversos individuales para cada arreglo.

Pseudosecciones y modelos de resistividad en 2D para el tendido 2

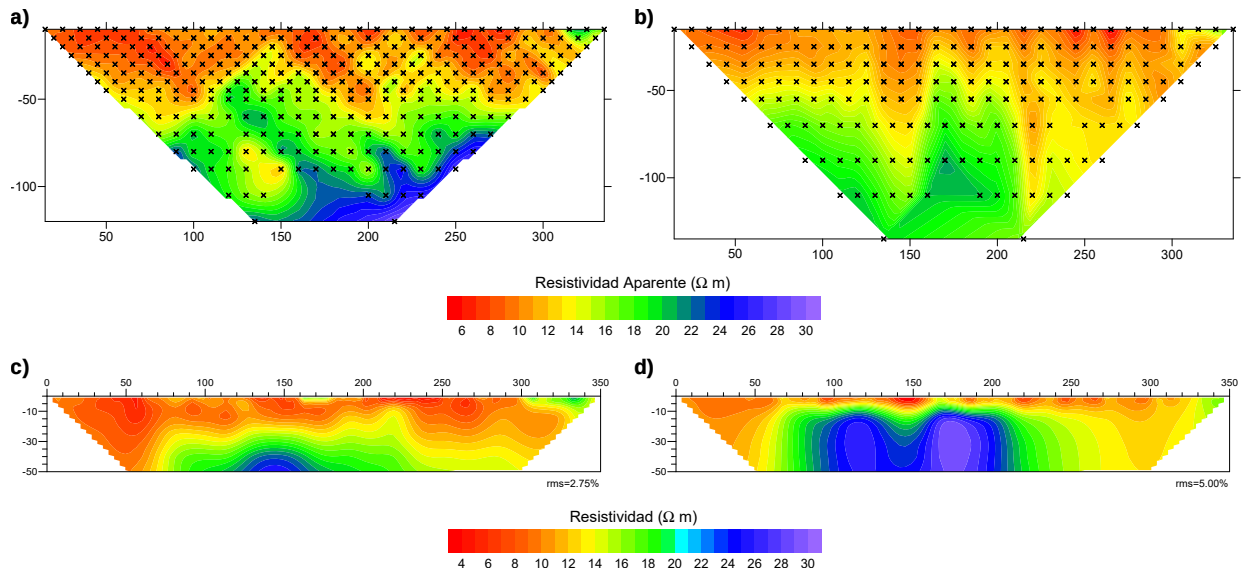


Figura 54. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 2: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger. Modelos inversos individuales en 2D: c) Dipolo-dipolo d) Schlumberger.

Pseudosecciones y modelos de resistividad en 2D para el tendido 3

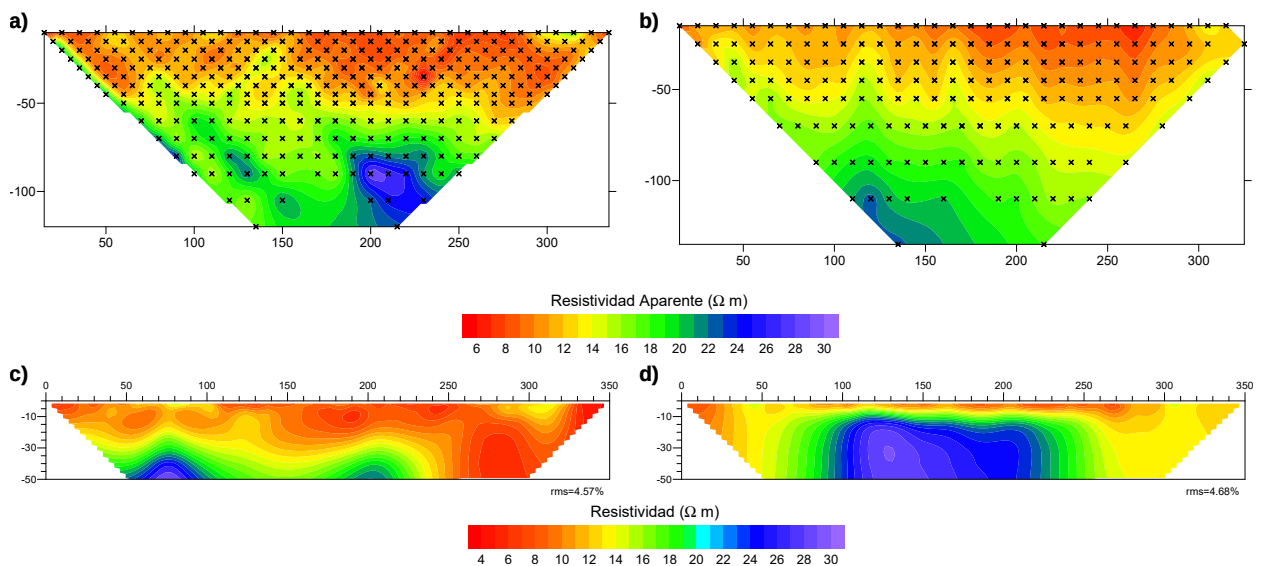


Figura 55. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 3: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger. Modelos inversos individuales en 2D: c) Dipolo-dipolo d) Schlumberger.

Pseudosecciones y modelos de resistividad en 2D para el tendido 4

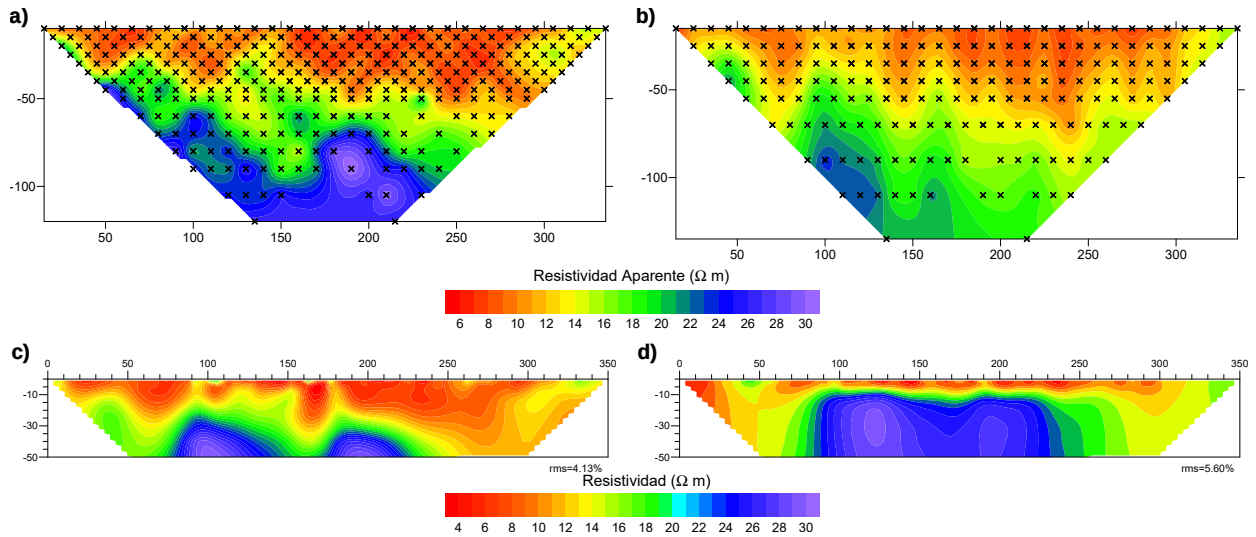


Figura 56. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 4: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger. Modelos inversos individuales en 2D: c) Dipolo-dipolo d) Schlumberger.

Pseudosecciones y modelos de resistividad en 2D para el tendido 1a

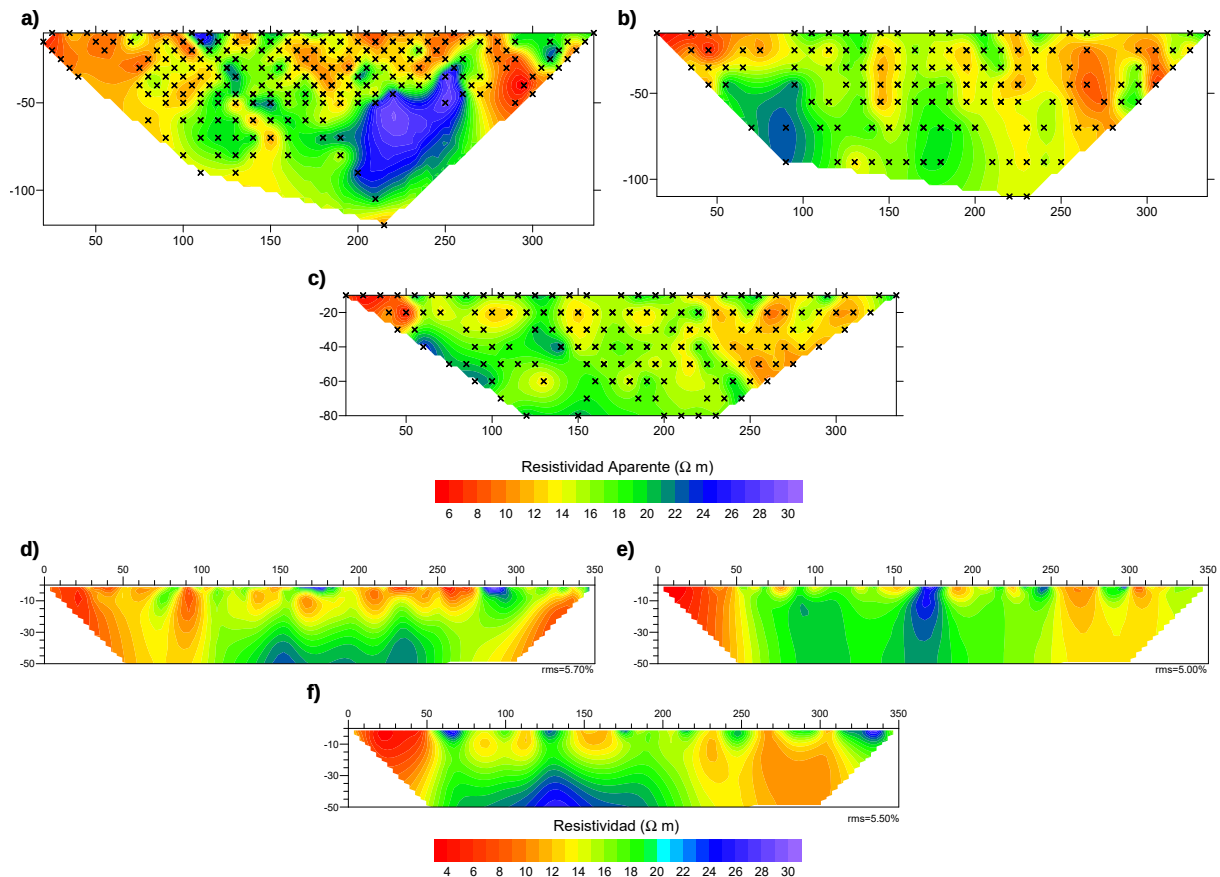


Figura 57. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 1a: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner

Pseudosecciones y modelos de resistividad en 2D para el tendido 2a

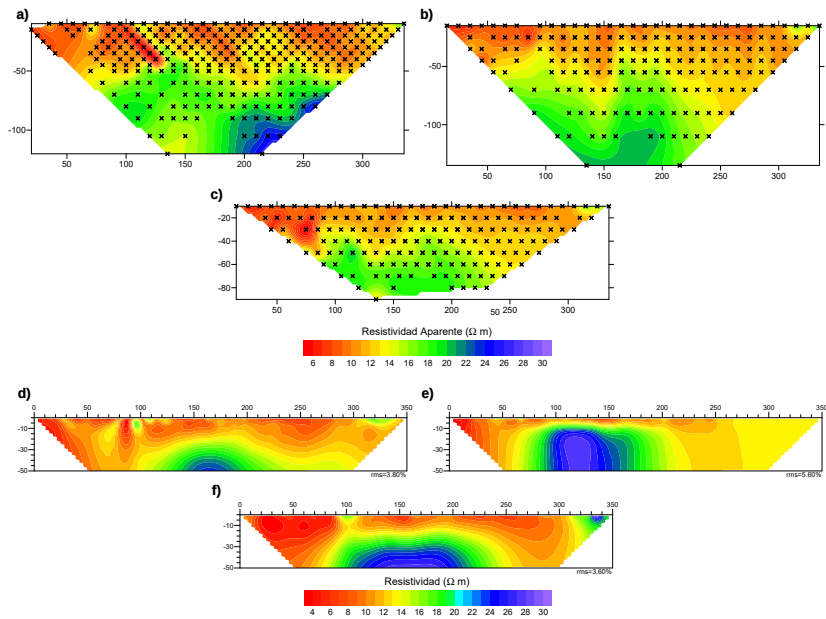


Figura 58. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 2a: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner

Pseudosecciones y modelos de resistividad en 2D para el tendido 3a

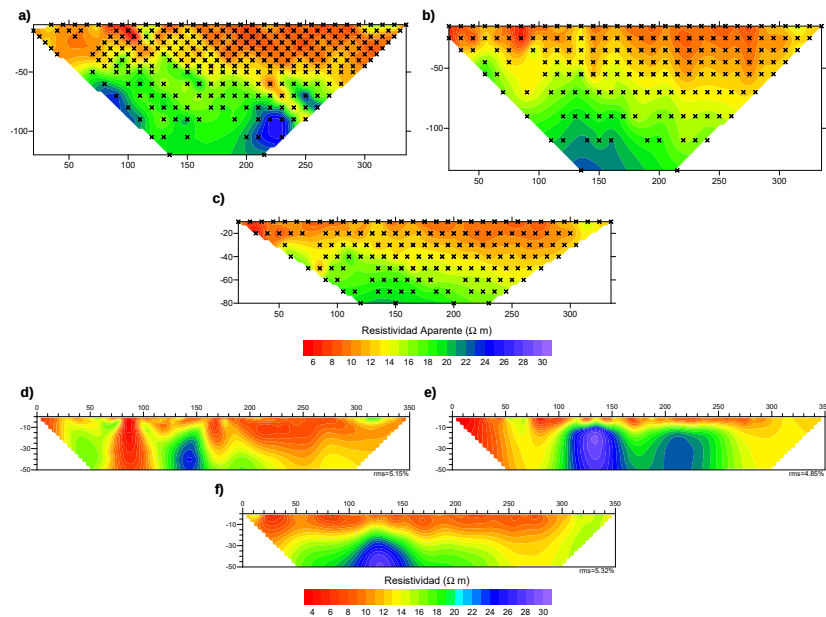


Figura 59. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 3a: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner

Pseudosecciones y modelos de resistividad en 2D para el tendido 4a

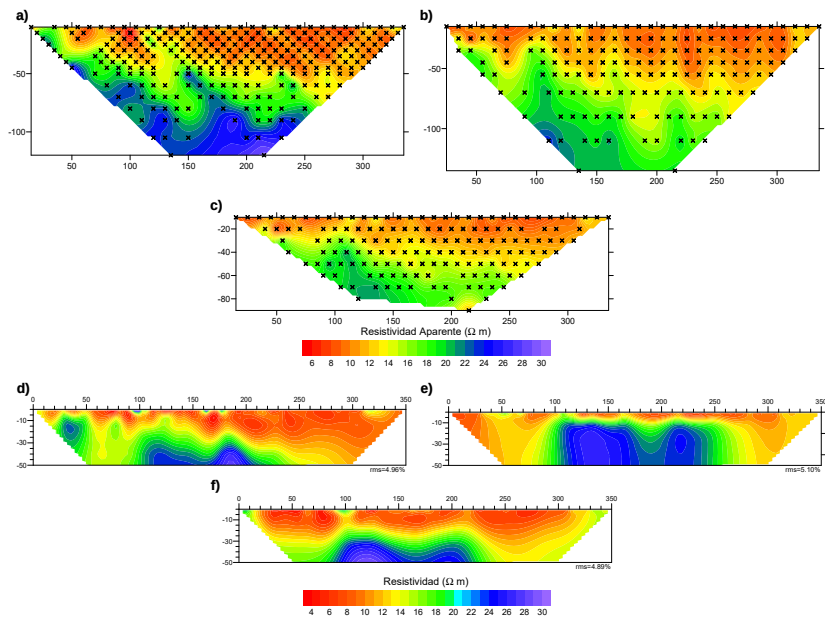


Figura 60. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 4a: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner

Pseudosecciones y modelos de resistividad en 2D para el tendido 5

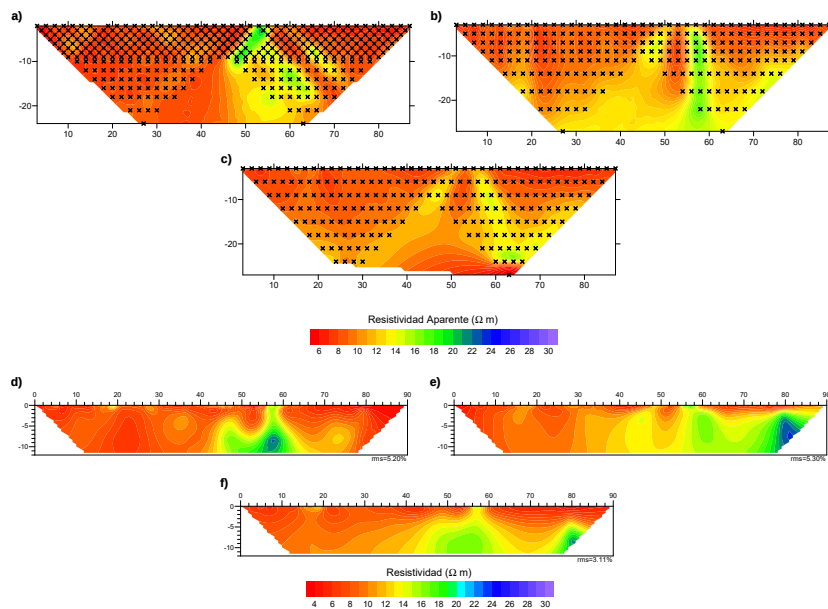


Figura 61. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 5: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner

Pseudosecciones y modelos de resistividad en 2D para el tendido 6

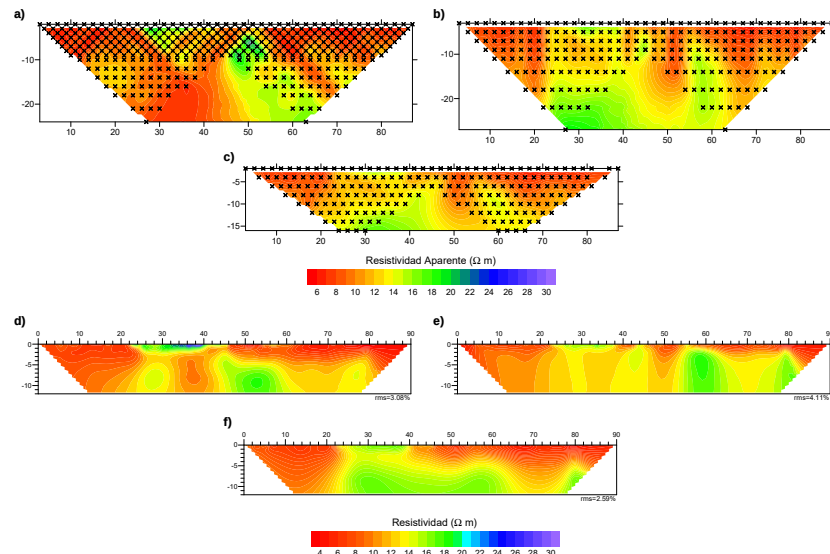


Figura 62. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido6: a) Dipolo-dipolo b)Schlumberger c)Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d)Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner

Pseudosecciones y modelos de resistividad en 2D para el tendido 7

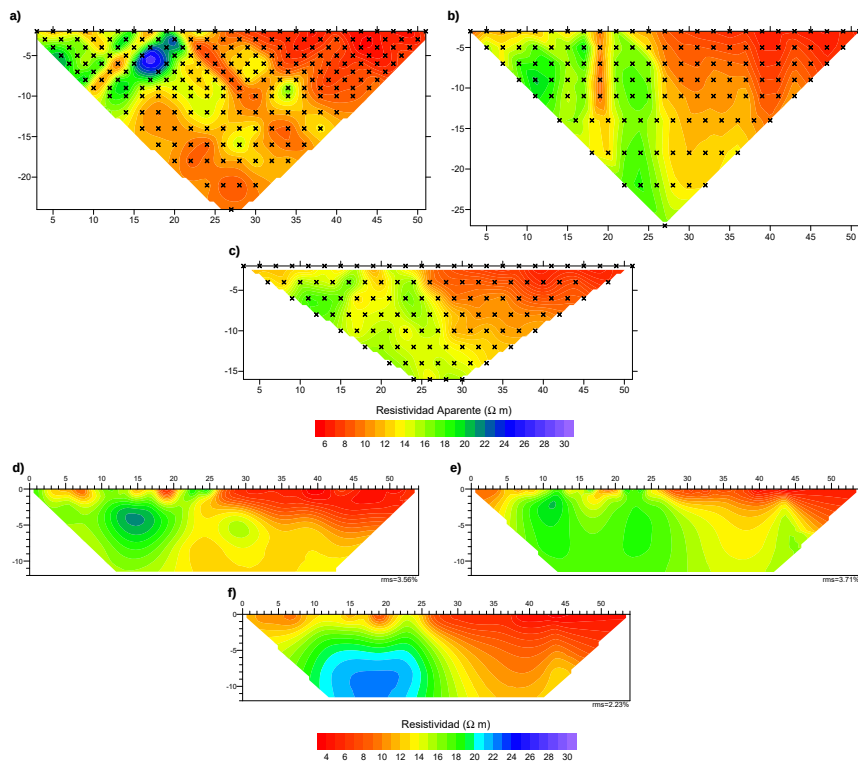


Figura 63. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 7: a) Dipolo-dipolo b)Schlumberger c)Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d)Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner

Pseudosecciones y modelos de resistividad en 2D para el tendido 8

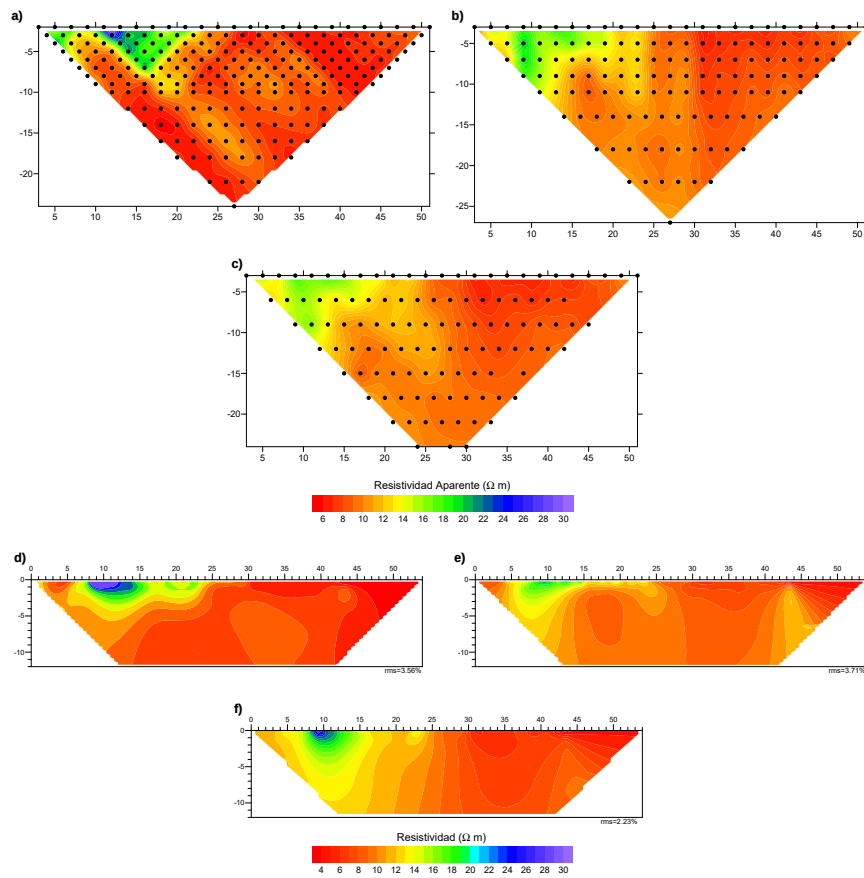


Figura 64. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 8: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner

Pseudosecciones y modelos de resistividad en 2D para el tendido 9

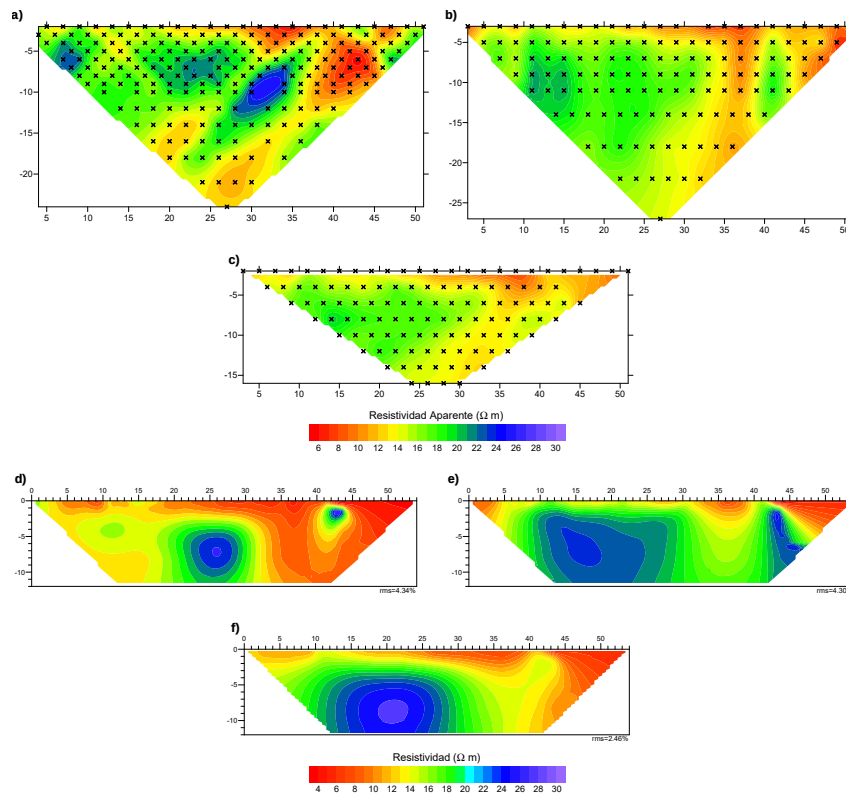


Figura 65. Pseudosecciones de resistividad aparente depuradas para el tendido 9: a) Dipolo-dipolo b) Schlumberger c) Wenner. Modelos inversos individuales en 2D: d) Dipolo-dipolo e) Schlumberger f) Wenner