

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**RESISTIVIDAD Y POLARIZACIÓN INDUCIDA APLICADO AL
ESTUDIO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**CASO: POZO PERFORADO DE TIERRA LINDA, FRAY
QUEBRACHO Y CUENCA PEDAGÓGICA DE YESERA, TARIJA**

Por

BASPINEIRO BELTRAN OMAR

Tesis de grado presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de licenciatura en Ingeniería Civil

Gestión - 2025

TARIJA - BOLIVIA

DEDICATORIA

***Señor, tú nos has sido refugio De
generación en generación. Antes
que naciesen los montes Y
formases la tierra y el mundo,
Desde el siglo y hasta el siglo, tú
eres Dios.***

Santa Biblia / Salmos 90:1,2

INDICE

CAPÍTULO I

1.1	INTRODUCCIÓN	1
1.2	EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.2.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2.3	SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3	OBJETIVOS DEL PROYECTO	3
1.3.1	OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	4
1.4.1	JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	4
1.4.2	JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	4
1.4.3	JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	4
1.5	HIPÓTESIS	4
1.6	ALCANCE DEL ESTUDIO.....	4

CAPÍTULO II

2.1	MARCO TEÓRICO.....	5
2.1.1	PRINCIPIOS TEÓRICOS BÁSICOS	5
2.1.2	ESQUEMA BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DEL MÉTODO	7
2.1.3	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	11
2.1.4	FACTOR GEOMÉTRICO K.....	13
2.1.5	RESISTIVIDAD DE LAS AGUAS NATURALES.....	15
2.1.6	RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS	16
2.1.7	FACTORES QUE AFECTAN A LA RESISTIVIDAD	18
2.1.8	RESISTIVIDAD APARENTE	19

2.1.9	TIPOS DE ARREGLOS	21
2.1.9.1	ARREGLO WENNER	21
2.1.9.2	ARREGLO SCHLUMBERGER	23
2.1.9.3	ARREGLO DIPOLO – DIPOLO	24
2.1.9.4	ARREGLO POLO – DIPOLO.....	25
2.1.9.5	ARREGLO POLO – POLO.....	27
2.1.9.6	ARREGLO GRADIENTE.....	27
2.1.10	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA ARREGLO	30
2.1.11	DIRECCIÓN DE FLUJO	31
2.1.12	PROFUNDIDAD DEL ESTUDIO	33
2.1.13	LEY DE ARCHIE	33
2.1.14	POLARIZACIÓN INDUCIDA PI.....	34
2.1.15	TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LA POLARIZACIÓN INDUCIDA.....	36
2.1.16	TIPOS DE POLARIZACIÓN.....	36
2.1.16.1	POLARIZACIÓN DE ELECTRODO (PE).....	37
2.1.16.2	POLARIZACIÓN DE MEMBRANA (PM).....	38
2.1.17	POLARIZACIÓN INDUCIDA NEGATIVA.....	41
2.1.18	CARGABILIDAD	42
2.1.19	CARGABILIDAD NORMALIZADA.....	45
2.1.20	CURVA DE DECAIMIENTO.....	45
2.1.21	ANÁLISIS DE LA CURVA DE DECAIMIENTO.....	46
2.1.22	IONIZACIÓN DE LOS MINERALES DE LA ARCILLA.....	46
2.1.23	CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS SEDIMENTOS.....	47
2.1.23.1	DEPÓSITOS COLUVIALES	47
2.1.23.2	DEPÓSITOS ALUVIALES.....	48
2.1.23.3	DEPÓSITOS LACUSTRES	49
2.1.24	PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS ROCAS	50
2.1.24.1	POROSIDAD.....	50

2.1.24.2	PERMEABILIDAD	52
2.1.25	CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS	54
2.1.25.1	TAMAÑO.....	55
2.1.25.2	GRAVA (GRANO GRUESO)	55
2.1.25.3	ARENA (GRANO MEDIO).....	56
2.1.25.4	LIMO (GRANO FINO)	56
2.1.25.5	ARCILLA (GRANO FINO)	56
2.1.26	ACUÍFEROS DE ARENA Y GRAVA	56
2.1.27	INTERPRETACIÓN CUALITATIVA Y CUANTITATIVA.....	57
2.1.27.1	INTERPRETACIÓN CUALITATIVA	57
2.1.27.2	INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA.....	58
2.1.28	REGULACIÓN INTERNACIONAL Y NACIONAL DE TRABAJOS GEOFÍSICOS – MÉTODO ELÉCTRICO ERT	59
2.1.28.1	NORMA ASTM D6431-18.....	59
2.1.28.2	GUÍA IEEE STD 81 2012.....	59
2.1.28.3	NORMA BOLIVIANA NB 173001	60
2.1.29	OTRAS APLICACIONES DE RESISTIVIDAD Y POLARIZACIÓN INDUCIDA EN PROYECTOS DE INGENIERÍA	61
2.1.29.1	MINERÍA	61
2.1.29.2	MEDIO AMBIENTE.....	62
2.2	MARCO CONCEPTUAL.....	63
2.3	MARCO ESPACIAL.....	63
2.4	MARCO TEMPORAL.....	64

CAPÍTULO III

	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	65
3.1	UBICACIÓN GENERAL.....	65
3.2	TIERRA LINDA.....	65

3.2.1	ANTECEDENTES	66
3.2.2	UBICACIÓN	66
3.2.3	GEOLOGÍA.....	67
3.3	FRAY QUEBRACHO	74
3.3.1	ANTECEDENTES	74
3.3.2	UBICACIÓN	75
3.3.3	GEOLOGÍA.....	77
3.4	YESERA.....	82
3.4.1	ANTECEDENTES	82
3.4.2	UBICACIÓN	82
3.4.3	GEOLOGÍA.....	84

CAPÍTULO IV

	MATERIALES, EQUIPOS Y HERRAMIENTAS	90
4.1	PLANIFICACIÓN	90
4.2	EQUIPO GEOFÍSICO	90
4.3	PRUEBAS PRELIMINARES.....	90
4.3.1	PRUEBAS DE ISOLACIÓN Y CONTINUIDAD	90
4.4	TRABAJO DE CAMPO	91
4.5	EQUIPO EMPLEADO	93
4.6	SOFTWARE EMPLEADO	94
4.7	CONFIGURACION DE EQUIPO	94
4.8	PROCESO DE INVERSIÓN DE DATOS	95
4.8.1	ANÁLISIS DE DATOS.....	95
4.8.2	PARÁMETROS DE INVERSIÓN.....	102
4.8.3	ELEMENTOS FINITOS	103
4.8.4	DIFERENCIAS FINITAS	104
4.8.5	MODELACIÓN TOPOGRÁFICA.....	105

4.9	HISTOGRAMA DE ERROR MEDIO CUADRÁTICO RMS.....	107
4.10	FLUJO DEL PROCESO DE INVERSION.....	109

CAPÍTULO V

5.1	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	111
5.2	TIERRA LINDA.....	112
5.3	FRAY QUEBRACHO	122
5.4	YESERA.....	132
5.5	ANÁLISIS DE LOS DATOS DEL POZO PERFORADO TIERRA LINDA	138
5.6	ANÁLISIS DEL POZO PERFORADO FRAY QUEBRACHO	145

CAPÍTULO VI

6.1	CONCLUSIONES - TIERRA LINDA.....	153
6.2	RECOMENDACIONES – TIERRA LINDA.....	155
6.3	CONCLUSIONES - FRAY QUEBRACHO.....	156
6.4	RECOMENDACIONES – FRAY QUEBRACHO.....	158
6.5	CONCLUSIONES – YESERA.....	158
6.6	RECOMENDACIONES – YESERA	159
6.7	CONCLUSIÓN GENERAL	159
6.8	RECOMENDACIÓN GENERAL.....	160

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación según la imagen google maps, donde se observa el área de interés tierra linda, la ubicación de la línea de tomografía electro resistiva	66
Mapa 2. Mapa geológico Tierra Linda, imagen base topografía mundial software Arcgis Pro.	73
Mapa 3. Ubicación según la imagen google maps, donde se observa el área de interés Fray Quebracho, la ubicación de la línea de Tomografía Eléctro Resistiva	76
Mapa 4. Mapa geológico Fray Quebracho, imagen base topografía mundial software Arcgis Pro.....	81
Mapa 5. Ubicación según la imagen google maps, donde se observa el área de interés de Yesera, la ubicación de la línea de Tomografía Eléctro Resistiva	83
Mapa 6. Mapa geológico Yesera, imagen base topografía mundial software Arcgis Pro.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujo de corriente A través de un conductor homogéneo con resistividad ρ , longitud L y un área de sección transversal A.....	6
Figura 2. Esquema de la disposición de una medición general de cuatro electrodos con electrodos de potencial p1 y p2 y electrodos de corriente C1 y C2. las distancias entre electrodos son empleadas para calcular el factor geométrico K.....	7
Figura 3. Esquema de la disposición de un sistema de medición de resistividad superficial con cuatro electrodos (Robinson y Coruh, 1998).....	8
Figura 4. Esquema básico de los métodos de resistividad (Fuente. Norma ASTM D6431-18).	9
Figura 5. Secuencia de medidas con dispositivo Wenner (Fuente. Manual RES2DINV)	11
Figura 6. Valores de K (Factor Geométrico) para los principales arreglos.....	14
Figura 7a. Rangos típicos de resistividades para rocas y suelos (Orellana, 1972).....	16

Figura 7b. Rangos de resistividad y conductividad para diferentes materiales geológicos. varios materiales diferentes pueden mostrar resistividades superpuestas. Palačky (1987) y norma ASTM D6431-18.....	17
Figura 8. Medio heterogéneo en el subsuelo.....	21
Figura 9. Disposición de electrodos para el arreglo Wenner (J. Milsom, 2003).....	22
Figura 10. Disposición de electrodos para el arreglo Schlumberger (J. Milsom, 2003).....	24
Figura 11. Disposición de electrodos para el arreglo Dipolo – Dipolo (J. Milsom, 2003)	25
Figura 12. Disposición de electrodos para el arreglo Polo – Dipolo (J. Milsom, 2003).....	26
Figura 13. Disposición de electrodos para el arreglo Polo – Polo (J. Milsom, 2003).....	27
Figura 14. Matriz de gradiente para el cálculo de la seudo sección (Dahlin, 2006)	28
Figura 15. Disposición de electrodos para el arreglo gradiente (J. Milsom, 2003)	29
Figura 16. Patrones de flujo de corriente para (a) semiespacio uniforme; (b) terreno de dos capas con menor resistividad en la capa superior y (c) terrenos de dos capas con mayor resistividad en la capa superior	32
Figura 17. Esquema físico y químico representativo de un medio geológico.....	36
Figura 18. Polarización de electrodo (PE)	37
Figura 19. Polarización de membrana	38
Figura 20. Desarrollo de polarización de membrana asociada con (a) una constricción dentro de un canal entre granos minerales, y (b) partículas de arcilla cargadas negativamente (Fraser et al., 1964) y elementos fibrosos a lo largo de los lados de un canal	39
Figura 21. Difusión de iones producidos por el voltaje PI.....	41
Figura 22. Origen del PI negativo (Parasnis, 1997)	42
Figura 23. Potencial teórico de forma de onda completa para mediciones DCIP con indicación de parámetros importantes para la evaluación de datos	43
Figura 24. Una respuesta pi normalizada generada a partir de la medición modelada	43

Figura 25. Gráfico de resistividad de diferentes materiales vs. Cargabilidad	44
Figura 26. Diferentes gráficos de la curva de decaimiento en función del tiempo (Dahlin, 2003)	46
Figura 27. Perfil de tipo de depósitos coluviales (Gonzales de Vallejo, 2002)	48
Figura 28. Depósitos aluviales (Gonzales de Vallejo, 2002)	49
Figura 29. Depósitos lacustres (Gonzales de Vallejo, 2002)	50
Figura 30. Porosidad y permeabilidad (cartilla técnica, SENAMHI, Lima – Perú)	54
Figura 31. Imagen de resistividad, cargabilidad e interpretación geológica (fuente www.everestgeophysics.com)	61
Figura 32. Imagen de resistividad, cargabilidad en interior mina Oruro – Bolivia (fuente propia)	62
Figura 33. Equipo Terrameter LS 2 sobre relleno sanitario de Mallasa (Fuente propia)	62
Figura 34. Imagen de resistividad de relleno sanitario de Mallasa – La Paz (Fuente propia) ..	63
Figura 35. Ubicación del área de estudio (Fuente: sihita.org y propia)	65
Figura 36. Ubicación de las fotografías con la línea ERT Tierra Linda	69
Figura 37. Perfil litológico 6(s) del documento proyecto BOL.78/006 de Naciones Unidas, 1980	74
Figura 38. Sobreposición de línea ERT Fray Quebracho sobre perfil litológico parcial no. 6 (s) sólo tramos T19-T4	75
Figura 39. Ubicación de las fotografías para la línea ERT Fray Quebracho	78
Figura 40. Ubicación de las fotografías para la línea ERT – Yesera	85
Figura 41. Configuración 4x21 (4 cables de 21 estacas cada uno)	92
Figura 42. Equipo Terrameter LS 2 en el centro Prog. 400 de la línea de Tierra Linda	92
Figura 43. Levantamiento en modo RTK de todas las estacas o electrodos clavados en tierra	93

Figura 44. Gráfico de estacas instalados en campo Resistencia vs. Progresiva en metros	96
Figura 45. Tabla .txt de datos de topografía (ejemplo Tierra Linda).....	96
Figura 46. Cuadro de importación de topografía.....	97
Figura 47. Datos de campo de Tierra Linda sin ningún filtro.....	98
Figura 48. Ejemplo de Tierra Linda arreglo Schlumberger de PI de 0.5 seg.....	99
Figura 49. Cuadro de datos crudos en función de la resistividad de Tierra Linda – Schlumberger de PI de 0.5 seg. que muestra la calidad de los datos de resistividad	100
Figura 50. Software X2IPI.....	101
Figura 51. Cuadro para añadir topografía a los datos de campo.....	101
Figura 52. Cuadro de lectura de los parámetros de inversión	102
Figura 53. Resumen de los parámetros de inversión.....	103
Figura 54. Ejemplo de división de grilla usando elementos finitos (Coggon, 1971).....	104
Figura 55. Ejemplo de división de grilla usando el método de diferencias finitas (Mufti, 1978)	105
Figura 56. Topografía cargada al software tomando en cuenta la opción S-C	105
Figura 57. Diferentes opciones para incorporar la topografía al modelo matemático obtenido	106
Figura 58. Histograma ejemplo de Yesera.....	108
Figura 59. Flujo del proceso de inversión.....	109
Figura 60. Informe técnico con sugerencia de filtros pozo en base a los resultados del REV (informe técnico empresa geo geología y geotécnia Tarija)	140
Figura 61. Diseño y construcción de pozo tierra linda (Informe Técnico UERH – COFADENA)	143
Figura 62. Registro eléctrico vertical REV Tierra Linda, con interpretación y sugerencia post construcción de pozo.....	144

Figura 63. Informe técnico de sugerencia de instalación de filtros en base a los resultados de REV por parte de empresa Geo Tarija	147
Figura 64. Diseño y construcción de pozo de agua subterránea pozo fray quebracho.....	150
Figura 65. Registro eléctrico vertical REV Fray Quebracho, con interpretación y sugerencia post construcción de pozo.....	151

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores típicos de resistividad eléctrica para algunos materiales	17
Tabla 2. Valores representativos de resistividad para suelo, agua y roca según norma ASTM – D6431-18	18
Tabla 3. Valores típicos de resistividad eléctrica para diferentes tipos de suelo y roca.....	18
Tabla 4. Cuadro comparativo de ventajas y desventajas de los diferentes arreglos.....	30
Tabla 5. Profundidad de penetración de diferentes arreglos.....	33
Tabla 6. Cargabilidad de varios materiales (Murali y Patangay. 2006).....	44
Tabla 7. Tabla de porosidad de algunas rocas (Gonzales de Vallejo, 2004)	52
Tabla 8. Tabla de permeabilidad de algunas rocas (Gonzales de Vallejo, 2004)	53
Tabla 9. Escala de tamaño de grano de udden-wentworth (modificado de Adams et al,1984).	55
Tabla 10. Coordenadas de tomografía tierra linda.....	67
Tabla 11. Cuadro de fotos con descripción de los materiales – Tierra Linda.....	70
Tabla 12. Coordenadas de tomografía Fray Quebracho (Fuente. Elaboración propia)	76
Tabla 13. Cuadro de fotos con descripción de los materiales – Fray Quebracho	79
Tabla 14. Coordenadas de tomografía Yesera	83
Tabla 15. Cuadro de fotos con descripción de los materiales – Yesera.....	86
Tabla 16. Configuración de tiempos de polarización inducida PI en dominio de tiempo en seg	95

Tabla 17. Informe técnico de Tierra Linda de UERH – COSSALT 2021.....	138
Tabla 18. Sugerencia de ubicación de filtros en función del resultado de REV por parte de la empresa contratada.....	139
Tabla 19. Informe de perforación UERH – COSSALT, 2021.....	141
Tabla 20. Cuadro resumen de la litología, REV y pozo construido	141
Tabla 21. Interpretación del registro REV en función de la tomografía de tierra linda.....	145
Tabla 22. Informe técnico Fray Quebracho de UERH – COSSALT 2021	146
Tabla 23. Sugerencia de ubicación de filtros en función del resultado de REV	146
Tabla 24. Informe técnico fray quebracho de perforación UERH – COSSALT, 2021.....	148
Tabla 25. Cuadro resumen de la litología, REV y pozo construido	149
Tabla 26. Interpretación del registro REV en función de la tomografía de Fray Quebracho...152	

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	MÉTODO WENNER
Anexo 2a	NORMA ASTM D6431-18
Anexo 2b	NORMA IEEE-81 RESUMEN
Anexo 2c	IBMETRO 173001 RESUMEN
Anexo 3	MONOGRAFÍA GEO09
Anexo 4a	TOPOGRAFÍA TIERRA LINDA
Anexo 4b	TOPOGRAFÍA FRAY QUEBRACHO
Anexo 4c	TOPOGRAFÍA YESERA
Anexo 5a	TOMOGRAFÍAS TIERRA LINDA
Anexo 5b	TOMOGRAFÍAS FRAY QUEBRACHO
Anexo 5c	TOMOGRAFÍAS YESERA
Anexo 6a	REGISTRO ELÉCTRICO VERTICAL POZO TIERRA LINDA

Anexo 6b	REV FRAY QUEBRACHO
Anexo 7a	PERFIL LITOLÓGICO Y UBICACIÓN DE FILTROS POZO OSCAR ZAMORA
Anexo 7b	PERFIL LITOLÓGICO Y UBICACIÓN DE FILTROS POZO AVIT A
Anexo 8	HOJA GEOLÓGICA