

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS



**“ELABORACIÓN DE MAPAS PIEZOMÉTRICOS Y CÁLCULO DE
PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS DE LOS POZOS SUBTERRÁNEOS
QUE ESTÁN EN EL ÁREA DE CONCESIÓN DE COSAALT R.L.”**

Por:

GUILDER GUILLERMO NINAJA CRUZ

SEMESTRE – II – 2022

TARIJA-BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS

**“ELABORACIÓN DE MAPAS PIEZOMÉTRICOS Y CÁLCULO DE
PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS DE LOS POZOS SUBTERRÁNEOS
QUE ESTÁN EN EL ÁREA DE CONCESIÓN DE COSAALT R.L.”**

Por:

GUILDER GUILLERMO NINAJA CRUZ

Proyecto de investigación presentado a consideración de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” como requisito para optar el grado académico de licenciatura de Ingeniería Civil.

SEMESTRE – II – 2022

TARIJA-BOLIVIA

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado a mis padres Jose y Guillerma por darme la fortaleza para seguir adelante, y ayudarme en mi formación, brindándome su apoyo en los momentos buenos y malos de mi vida.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3.1. Antecedentes del problema.....	3
1.3.2. Planteamiento del problema	4
1.3.3. Pregunta de investigación.....	4
1.4. OBJETIVOS	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. HIPÓTESIS	5
1.6. LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	5
1.7. ALCANCE DEL TRABAJO.....	8
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. DEFINICIONES BÁSICAS.....	9
2.1.1. Aguas subterráneas	9
2.1.2. Pozos subterráneos	9
2.1.3. Acuífero.....	11
2.1.4. Tipos de Acuíferos.....	12
2.1.5. Nivel Freático	14
2.1.6. Nivel Dinámico	14
2.1.7. Nivel Estático	15
2.1.8. Abatimiento	15

2.1.9. Nivel Piezométrico	15
2.2. MAPA PIEZOMÉTRICO O SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA.....	17
2.2.1. Trazado e interpretación de superficies piezométricas	17
2.3. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS DE UN ACUÍFERO	26
2.3.1. Permeabilidad o Conductividad hidráulica (k)	26
2.3.2. Transmisividad (T).....	28
2.3.3. Coeficiente de almacenamiento (S)	29
2.4. ENSAYOS DE BOMBEO	31
2.4.1. Realización de los ensayos de bombeo	31
2.4.2. Duración de la prueba	32
2.4.3. Tipos de ensayos de bombeo	33
2.5. ENSAYOS DE RECUPERACIÓN.....	34
2.5.1. Métodos de interpretación (régimen variable)	35
2.6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	41
CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	43
3.2. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	43
3.3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	45
3.3.1 Características climatológicas.....	45
3.3.2. Hidrología.....	46
3.3.3. Geología	46
3.3.4. Hidrogeología.....	49
3.4. MATERIALES	50
3.5. METODOLOGÍA	51

3.5.1. Tipo de investigación.....	51
3.5.2. Diseño de la investigación	51
3.5.3. Nivel de la investigación.....	52
3.5.4. Población y muestra.....	52
3.5.5. Técnicas e instrumentos	52
3.5.6. Metodología seguida.....	53
CAPÍTULO 4 ELABORACIÓN DE MAPAS PIEZOMÉTRICOS.....	55
4.1. CRITERIOS GENERALES	55
4.2. INVENTARIO DE POZOS.....	55
4.3. OBTENCIÓN DE LOS MAPAS PIEZOMÉTRICOS	57
4.3.1. Transformación del nivel estático a cota piezométricas	57
4.3.2. Información hidrogeológica complementaria.....	60
4.4. HIDROGRAMAS.....	63
CAPÍTULO 5 PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS.....	68
5.1. LOCALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO REALIZADAS	68
5.2. MÉTODO UTILIZADO PARA LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE BOMBEO.....	69
5.3. PRUEBAS DE BOMBEO REALIZADAS.....	69
5.3.1. Prueba de bombeo: Pozo 27 de mayo.....	69
5.3.2. Prueba de bombeo: Pozo Valle Hermoso	76
5.3.3. Prueba de bombeo: Pozo San Jorge II	83
5.3.4. Prueba de bombeo: pozo Simón Bolívar (PN)	89
5.3.5. Prueba de bombeo: Pozo Vela (Torrecillas)	96
5.3.6. Prueba de bombeo: Pozo San Salvador	103

5.3.7. Prueba de bombeo: Pozo San Jorge I (PN)	110
5.3.8. Prueba de bombeo: Pozo Simón Bolívar (Antiguo)	116
5.3.9. Prueba de bombeo: Pozo ANASPUGIO B	123
5.3.10. Prueba de bombeo: Pozo San Gerónimo (PN)	130
5.3.11. Prueba de bombeo: Pozo Luis Espinal B	136
5.3.12. Prueba de bombeo: Pozo AVIT A	142
5.3.13. Prueba de bombeo: Pozo AVIT B	149
5.3.14. Prueba de bombeo: Pozo ALBAT	156
5.4. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S)	162
CAPÍTULO 6 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	165
6.1. MAPAS PIEZOMÉTRICOS	165
6.1.1. Dirección de flujo en la zona de estudio	165
6.1.2. Gradiente Hidráulico del agua subterránea	166
6.1.3. áreas de recarga y descarga	167
6.1.4. Análisis de variación de nivel piezométrico en el tiempo.	168
6.2. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS	172
6.2.1. Transmisividad	172
6.2.2. Conductividad Hidráulica o permeabilidad	175
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	179
7.1. CONCLUSIONES	179
7.2. RECOMENDACIONES	180
BIBLIOGRAFÍA	182
ANEXOS	184

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 El agua subterránea en condiciones naturales	9
Figura 2 Extracción de agua subterránea mediante sistema de bombeo	10
Figura 3 Tipos de pozos subterráneos para la extracción de agua	11
Figura 4 Representación esquemática de un acuífero	11
Figura 5 Tipos de acuíferos.....	13
Figura 6 Comportamiento de los distintos tipos de pozos según su potencial hidráulico	14
Figura 7 Esquema representativo del Nivel Estático, Nivel Dinámico y Abatimiento.....	15
Figura 8 Esquemmatización del concepto de nivel piezométrico	16
Figura 9 Trazado de isopiezas mediante interpolación a partir de cinco valores de nivel	18
Figura 10 Áreas de recarga y descarga en un mapa de isopiezas	19
Figura 11 Relación Acuífero-Río en un mapa de isopiezas (Río perdedor conectado hidráulicamente al acuífero)	21
Figura 12 Relación Acuífero-Río en un mapa de isopiezas (Río ganador conectado hidráulicamente al acuífero)	21
Figura 13 Relación Acuífero-Río en un mapa de isopiezas (Río colgado)...	22
Figura 14 Trazado de isopiezas con respecto a la topografía	23
Figura 15 Trazado de isopiezas con respecto a limites impermeables y cuerpos superficiales de agua	24
Figura 16 Relación entre las líneas de drenaje del acuífero y las isopiezas	24
Figura 17 La separación espacial entre isopiezas con respecto al gradiente hidráulico	25
Figura 18 Clasificación de materiales sedimentarios según su permeabilidad (según Custodio y Llamas, 1983)	28

Figura 19 Grafica de recuperación.....	35
Figura 20 Análisis del descenso residual (<i>dr</i>).....	36
Figura 21 Esquema para la deducción del valor del descenso residual (<i>dr</i>) en el análisis de la recuperación de niveles posterior a la parada.....	37
Figura 22 Recta de recuperación.....	39
Figura 23 Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado.....	41
Figura 24 Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero semiconfinado.....	42
Figura 25 Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero libre.....	42
Figura 26 Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero libre con rendimiento retardado y acuífero semi-libre.....	42
Figura 27 Ubicación del área de estudio.....	43
Figura 28 Delimitación del área de estudio.....	44
Figura 29 Mapa geológico del área de estudio.....	48
Figura 30 Pozos de agua subterránea bajo la concesión de COSAALT R.L.	56
Figura 31 Lectura del nivel estático tomada en campo.....	57
Figura 32 Esquema para la transformación del N.E. a Nivel piezométrico ..	58
Figura 33 Curvas de isopiezas y dirección de flujo Agosto 2021, (SURFER 14).....	62
Figura 34 Mapa piezométrico Agosto-2021.....	63
Figura 35 Hidrograma de variación de nivel, pozo de observación Daniel Campos.....	64
Figura 36 Variación del nivel estático con respecto a la precipitación.....	65
Figura 37 Hidrograma de variación de nivel, Pozo Circunvalación B.....	65
Figura 38 Pozos de observación con el mismo comportamiento.....	66
Figura 39 Pozos de observación con el mismo comportamiento (variaciones bruscas).....	67

Figura 40	Pruebas de bombeo realizadas	68
Figura 41	Pozo 27 de mayo	70
Figura 42	Medición del nivel dinámico, Pozo 27 de mayo	71
Figura 43	Curva abatimiento vs tiempo, pozo 27 de mayo	71
Figura 44	Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado	72
Figura 45	Recta de recuperación, pozo 27 de mayo.....	74
Figura 46	Pozo Valle Hermoso.....	76
Figura 47	Medición del nivel dinámico, pozo Valle Hermoso	77
Figura 48	Curva abatimiento vs tiempo, pozo Valle Hermoso.....	78
Figura 49	Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado	78
Figura 50	Recta de recuperación, pozo Valle Hermoso	81
Figura 51	Pozo de agua San Jorge II.....	83
Figura 52	Medición del nivel estático, pozo San Jorge II	84
Figura 53	Aforo del caudal, pozo San Jorge II	84
Figura 54	Curva abatimiento vs tiempo, pozo San Jorge II.....	85
Figura 55	Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado	85
Figura 56	Recta de recuperación, pozo San Jorge II	87
Figura 57	Pozo Simón Bolívar (PN)	90
Figura 58	Medición de los descensos, pozo Simón Bolívar (PN).....	90
Figura 59	Aforo del caudal, Pozo Simón Bolívar (PN).....	91
Figura 60	Curva abatimiento vs tiempo, pozo Simón Bolívar (PN)	92
Figura 61	Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero semiconfinado	92
Figura 62	Recta de recuperación, pozo Simón Bolívar (PN).....	94
Figura 63	Pozo Vela (Torrecillas)	97
Figura 64	Medición del nivel estático, pozo Vela (Torrecillas)	97
Figura 65	Medidor de caudal dañado.....	98

Figura 66 Curva abatimiento vs tiempo, pozo Vela. (Torrecillas).....	98
Figura 67 Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado	99
Figura 68 Recta de recuperación, Pozo Vela	101
Figura 69 Pozo San Salvador	103
Figura 70 Medición del nivel dinámico durante el bombeo, pozo San Salvador	104
Figura 71 Aforo del caudal de bombeo	105
Figura 72 Curva abatimiento vs tiempo, pozo San Salvador	105
Figura 73 Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado	106
Figura 74 Recta de recuperación, pozo San Salvador	108
Figura 75 Pozo San Jorge I (PN)	110
Figura 76 Medición de la recuperación, pozo San Jorge I (PN).....	111
Figura 77 Aforo del caudal de bombeo	112
Figura 78 Curva abatimiento vs tiempo, pozo San Jorge I (PN)	112
Figura 79 Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero semiconfinado	113
Figura 80 Recta de recuperación, pozo San Jorge I	115
Figura 81 Pozo Simón Bolívar (Antiguo)	117
Figura 82 Medición de la recuperación, pozo Simón Bolívar (Antiguo).....	117
Figura 83 Curva abatimiento vs tiempo, Simón Bolívar (Antiguo).....	118
Figura 84 Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero semiconfinado	119
Figura 85 Recta de recuperación, pozo Simón Bolívar (Antiguo).....	121
Figura 86 Pozo ANASPUGIO B	123
Figura 87 Medición de la recuperación, pozo ANASPUGIO B	124
Figura 88 Tubería de desagüe clausurado.....	125
Figura 89 Curva abatimiento vs tiempo, pozo ANASPUGIO B	125

Figura 90	Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado	126
Figura 91	Recta de recuperación, pozo ANASPUGIO B	128
Figura 92	Pozo San Jerónimo (PN)	130
Figura 93	Medición de la recuperación, pozo San Jerónimo (PN)	131
Figura 94	Curva abatimiento vs tiempo, pozo San Jerónimo (PN).....	131
Figura 95	Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado	132
Figura 96	Recta de recuperación, pozo San Jerónimo (PN).....	134
Figura 97	Pozo Luis Espinal B	136
Figura 98	Medición de la recuperación, pozo Luis Espinal B	137
Figura 99	Curva abatimiento vs tiempo, pozo Luis Espinal B	138
Figura 100	Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado. ...	138
Figura 101	Recta de recuperación, pozo Luis Espinal B.....	140
Figura 102	Pozo AVIT A	143
Figura 103	Medición de la recuperación, pozo AVIT A	143
Figura 104	Medidor de caudal, pozo AVIT A	144
Figura 105	Curva abatimiento vs tiempo, pozo AVIT A	144
Figura 106	Curva Típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado ..	145
Figura 107	Recta de recuperación, pozo AVIT A.....	147
Figura 108	Pozo AVIT B	149
Figura 109	Medición de la recuperación, pozo AVIT B.....	150
Figura 110	Medidor de caudal, pozo AVIT B	151
Figura 111	Curva abatimiento vs tiempo, pozo AVIT B.....	151
Figura 112	Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado ...	152
Figura 113	Recta de recuperación, pozo AVIT B.....	154
Figura 114	Pozo ALBAT	156
Figura 115	Medición de la recuperación, pozo ALBAT	157

Figura 116 Medidor de caudal, pozo ALBAT	157
Figura 117 Curva abatimiento vs tiempo, pozo ALBAT	158
Figura 118 Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado ...	158
Figura 119 Recta de Recuperación, pozo ALBAT	161
Figura 120 Mapa piezométrico Agosto-2021.....	166
Figura 121 Diferencia o variación de nivel piezométrico entre Agosto 2021 - 2020.....	169
Figura 122 Variación de Niveles Piezométricos, pozos de observación COSAALT R.L.....	170
Figura 123 Variación de Niveles piezométricos descenso y recuperación .	171
Figura 124 Clasificación de los pozos, según el tipo de acuífero.....	172
Figura 125 Clasificación de los pozos según su transmisividad (según Villanueva & Iglesias, 1984).....	173
Figura 126 Mapa de Transmisividad del área en estudio.....	174
Figura 127 Mapa de transmisividad reclasificado, según Villanueva & Iglesias, 1984.....	175
Figura 128 Clasificación de los pozos según su permeabilidad y comportamiento hidráulico, Según Villanueva & Iglesias, 1984.....	176
Figura 129 Mapa de permeabilidad o conductividad hidráulica del área de estudio	177
Figura 130 Mapa de Conductividad Hidráulica, reclasificado según Villanueva & Iglesias, 1984	178

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de las capas que definen el tipo de acuífero	12
Tabla 2 Valores de la permeabilidad	27
Tabla 3 Valores de la transmisividad	29
Tabla 4 Valores del coeficiente de almacenamiento	30
Tabla 5 Secuencia de intervalos de tiempo para la medición de niveles de agua durante la realización de una prueba de bombeo	32
Tabla 6 Tipos de ensayos de bombeo	33
Tabla 7 Coordenadas área de concesión de COSAALT R.L.	44
Tabla 8 Características de los pozos seleccionados para la elaboración del mapa piezométrico.....	59
Tabla 9 Datos de niveles estáticos complementarios	61
Tabla 10 Horarios de funcionamiento, pozo 27 de mayo.....	70
Tabla 11 Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo 27 de mayo	72
Tabla 12 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación	73
Tabla 13 Valores de la transmisividad	75
Tabla 14 Valores de la permeabilidad.....	76
Tabla 15 Horarios de funcionamiento pozo Valle Hermoso	77
Tabla 16 Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo Valle Hermoso	79
Tabla 17 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación.....	79
Tabla 18 Valores de la transmisividad	82
Tabla 19 Valores de la permeabilidad.....	82
Tabla 20 Características técnicas en la prueba de bombeo, pozo San Jorge II	86
Tabla 21 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación	86

Tabla 22 Valores de la transmisividad	88
Tabla 23 Valores de la permeabilidad.....	89
Tabla 24 Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo Simón Bolívar (PN)	93
Tabla 25 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación	93
Tabla 26 Valores de la Transmisividad	95
Tabla 27 Valores de la permeabilidad.....	96
Tabla 28 Características técnicas en la prueba de bombeo, pozo Vela (Torrecillas)	99
Tabla 29 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación	100
Tabla 30 Valores de la transmisividad	102
Tabla 31 Valores de la permeabilidad.....	103
Tabla 32 Horarios de funcionamiento pozo San Salvador	104
Tabla 33 Características técnicas prueba de bombeo, pozo San Salvador	106
Tabla 34 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación	107
Tabla 35 Valores de la transmisividad	109
Tabla 36 Valores de la permeabilidad.....	110
Tabla 37 Horarios de funcionamiento pozo San Jorge I	111
Tabla 38 Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo San Jorge I (PN)	113
Tabla 39 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación	114
Tabla 40 Valores de la transmisividad	116
Tabla 41 Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo Simón Bolívar (Antiguo)	119
Tabla 42 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación	120
Tabla 43 Valores de la transmisividad	122
Tabla 44 Valores de la permeabilidad.....	123

Tabla 45 Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo ANASPUGIO B	126
Tabla 46 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación	127
Tabla 47 Valores de la transmisividad	129
Tabla 48 Valores de la permeabilidad.....	130
Tabla 49 Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo San Jerónimo (PN)	132
Tabla 50 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación	133
Tabla 51 Valores de la transmisividad	135
Tabla 52 Valores de la permeabilidad.....	136
Tabla 53 Horario de funcionamiento pozo Luis Espinal B	137
Tabla 54 Características técnicas prueba de bombeo, pozo Luis Espinal B	139
Tabla 55 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación	139
Tabla 56 Valores de la transmisividad	141
Tabla 57 Valores de la permeabilidad.....	142
Tabla 58 Horario de funcionamiento pozo AVIT A.....	143
Tabla 59 Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo AVIT A..	145
Tabla 60 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación	146
Tabla 61 Valores de la transmisividad	148
Tabla 62 Valores de la permeabilidad.....	149
Tabla 63 Horario de funcionamiento pozo AVIT B	150
Tabla 64 Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo AVIT B..	152
Tabla 65 Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación	153
Tabla 66 Valores de la transmisividad	155
Tabla 67 Valores de la permeabilidad.....	156
Tabla 68 Horario de funcionamiento pozo ALBAT	157

Tabla 69	Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo ALBAT..	159
Tabla 70	Cálculos de la prueba de bombeo y la recuperación	159
Tabla 71	Valores de la transmisividad	162
Tabla 72	Valores del coeficiente de almacenamiento	163
Tabla 73	Valores de S adoptados, según su litología y grado de confinamiento	163
Tabla 74	Resultados de las pruebas de Bombeo	164
Tabla 75	Valores de la transmisividad	173
Tabla 76	Valores de la permeabilidad.....	176