

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO POR COLAPSO DE POZO PROFUNDO PARA EL
ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DEL ANEXO DE
AZAPAMPA, DISTRITO DE CHILCA-HUANCAYO**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORAS:

Zulema Aída Cajahuanca Córdor

Katia Maricruz Rojas Huamán

ASESOR:

Julio Benjamín Rodríguez Uceda

Lima, Setiembre, 2022

Resumen

El uso del agua subterránea para el abastecimiento de agua potable es cada vez más frecuente en el mundo y en nuestro país. Este recurso representa una alternativa al agua superficial que, en muchos casos, escasea, está contaminada o se encuentra alejada de la población. Existen muchas formas de captar el agua subterránea, entre ellas, la más utilizada es la que se realiza mediante los pozos tubulares. Sin embargo, el diseño de este tipo de obras de captación, no necesariamente garantiza un tiempo de vida útil adecuado. Éste es el caso del pozo ubicado en Azapampa.

Azapampa es un anexo ubicado en la provincia de Huancayo, región de Junín. Este anexo cuenta con un pozo de agua subterránea. Sin embargo, se encuentra inoperativo ya que en setiembre del 2017 presentó una falla por colapso. Desde entonces se viene generando desabastecimiento parcial del agua potable y costos adicionales en la población del anexo. Ante el comportamiento defectuoso del pozo surge la necesidad de diseñar uno nuevo que garantice un tiempo de vida útil de al menos 40 años, evitando el colapso.

Por ello, el presente proyecto tiene como finalidad el diseño de un pozo profundo para el abastecimiento de agua potable de Azapampa, con la consideración de los esfuerzos por colapso. Para lograrlo, se determinó (i) la ubicación favorable del pozo, (ii) el caudal de diseño, (iii) las dimensiones del pozo y (iv) el material de sus componentes.

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que un buen diseño de tubería y filtro garantizan un buen comportamiento para su tiempo de vida útil. Además, todo diseño de pozo profundo para abastecimiento de agua debe contemplar un análisis de esfuerzo por colapso al igual que el análisis hidráulico. Finalmente, el diseño propuesto contempla con las consideraciones establecidas por la Norma Peruana Técnica 360.100.2017.

Dedicatoria

Dedicamos esta tesis a Dios por la sabiduría y fortaleza brindada para desarrollar y continuar a pesar de las adversidades. A nuestro asesor y amigo, Julio Rodríguez, por el gran apoyo, paciencia y los conocimientos brindados. Esta tesis es esfuerzo de los tres.

Las tesistas

A mis padres Hayda y Elmer quienes han sido mi apoyo incondicional y motivación durante todo este tiempo. A mis tías Sarita y Esther, porque a la distancia siempre estuvieron apoyándome y apoyando a mis padres. A Katia por ser la compañera ideal para compartir la autoría de este documento. A todos los familiares y amigos que me motivaron para escribir y concluir esta tesis.

Zulema Cajahuanca

A mis abuelitos, Restituta y Carlos, Francisco y Rosa, porque desde el cielo siempre me guían y protegen. A mis amados padres, Zenobia y Félix, por todo el apoyo incondicional y esfuerzo que hicieron durante mis estudios. A mis queridos hermanos, gracias por confiar y permitirme cumplir un gran sueño. A mis sobrinos Franco, Mateo, André y Catalina, por ser luz y alegría en mi vida. A Zulema, por aceptar y confiar en realizar juntas esta tesis, un honor compartir conocimientos desde el Colegio Mayor.

Katia Rojas

Tabla de Contenidos

Capítulo 1: Aspectos generales.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación.....	1
1.3. Hipótesis.....	1
1.4. Objetivos.....	2
1.4.1. Objetivo general.....	2
1.4.2. Objetivos específicos.....	2
1.5. Alcances.....	2
Capítulo 2: Estado del arte y marco teórico.....	3
2.1. Estado del arte.....	3
2.2. Marco teórico.....	7
2.2.1. El flujo de agua subterránea.....	7
2.2.2. Nivel estático y dinámico total.....	9
2.2.3. Exploración de agua subterránea.....	10
2.2.4. Hidráulica de pozos.....	15
2.2.4.1. <i>Flujo estable</i>	15
2.2.4.2. <i>Flujo transitorio</i>	17
2.2.5. Diseño de pozos.....	20
2.2.5.1. <i>Ubicación del pozo</i>	20
2.2.5.2. <i>Componentes del pozo</i>	20
2.2.5.3. <i>Criterios para la selección el tipo de diseño del pozo</i>	23
2.2.5.4. <i>Diseño de la tubería ciega</i>	24
2.2.5.5. <i>Diseño de filtro</i>	33
2.2.5.6. <i>Diseño de envoltura de grava</i>	42
2.2.5.7. <i>Diseño de sello anular</i>	48
2.2.5.8. <i>Verticalidad y alineamiento del pozo</i>	48
2.2.5.9. <i>Evaluación del pozo y del acuífero con pruebas de bombeo</i>	49
2.2.5.10. <i>Calidad de agua y contaminación</i>	55
2.2.5.11. <i>Corrosión e incrustación</i>	55
Capítulo 3: Estudio de caso.....	57
3.1. Características locales.....	57
3.1.1. Ubicación geográfica.....	57
3.1.2. Clima.....	57
3.1.3. Topografía.....	57

3.1.4. Población.....	58
3.1.5. Recursos hídricos.....	58
3.2. Características geológicas.....	59
3.2.1 Depósitos cuaternarios.....	59
3.2.2 Grupo pucará (tsji - p).....	60
3.2.3 Rocas intrusivas y subvolcánicas (pe - ri,da).....	60
3.2.4 Grupo mitu (pet - m).....	60
3.2.5 Grupo cabanillas (d - c).....	60
3.2.6 Complejo del marañón (np - cm - fil, esq).....	60
3.3. Prospección geofísica.....	60
3.4. Inventario de fuentes de agua subterránea.....	62
3.5. Hidráulica subterránea.....	62
3.5.1. Características hidrogeológicas.....	62
3.5.2. El acuífero.....	63
3.5.3. La napa freática.....	63
3.5.4. Hidrodinámica subterránea.....	64
3.6. Hidrogeoquímica.....	65
3.6.1. Variación en el tiempo de los parámetros físicos químicos del agua.....	65
3.6.2. Caracterización de calidad de agua.....	66
3.6.2.1. <i>Diagramas de stiff</i>	66
3.6.2.2. <i>Diagrama de piper</i>	68
3.7. Potabilidad del agua local.....	69
Capítulo 4: Metodología.....	71
4.1. Ubicación de pozo.....	71
4.1.1. Curvas de iso-resistencia.....	71
4.1.2. Curvas de basamento rocoso.....	72
4.1.3. Curvas de isoprofundidades del nivel freático.....	72
4.1.4. Zona favorable de perforación.....	73
4.2. Caudal de diseño.....	74
4.2.1. Caudal de demanda.....	74
4.2.2. Curva de abatimiento.....	75
4.2.3. Determinación de conductividad hidráulica.....	75
4.2.4. Ecuación de equilibrio de la hidráulica de pozos.....	78
4.3. Diseño del pozo.....	78
4.3.1. Diseño de tubería.....	78

4.3.1.1. Selección de bomba.	78
4.3.1.2. Diámetro nominal de tubería definitiva.	80
4.3.1.3. Espesor de tubería.	80
4.3.1.4. Diámetro de perforación.	80
4.3.1.5. Ajuste de dimensiones.	80
4.3.2. Diseño de paquete de filtro.	81
4.3.3. Diseño de filtro.	83
4.4. Selección del material.	84
4.4.1. Resistencia de la tubería.	84
4.4.1.1. Peso de la tubería.	84
4.4.1.2. Resistencia a la tensión.	85
4.4.1.3. Resistencia de colapso.	85
4.4.2. Resistencia del filtro.	86
4.4.2.1. Resistencia a la tensión.	86
4.4.2.2. Resistencia de colapso.	88
4.4.3. Evaluación de la calidad del agua local.	90
Capítulo 5: Discusión de resultados.	92
5.1. Comparación de resultados obtenidos con pozo existente.	92
5.1.1. Ubicación favorable de pozo.	92
5.1.2. Caudal de diseño.	93
5.1.3. Dimensionamiento de pozo.	95
5.1.3.1. Dimensionamiento de tubería.	95
5.1.3.2. Dimensionamiento de filtros.	95
5.1.3.3. Paquete de grava.	96
5.1.4. Selección de material de tubería y filtro.	97
5.1.4.1. Material de tubería.	97
5.1.4.2. Material de filtro.	98
5.2. Variación de las dimensiones y su influencia.	100
5.2.1. Variación de radio de tubería (r).	101
5.2.2. Variación de la profundidad de pozo.	101
5.2.3. Variación de radio de influencia (r).	102
5.3. Verticalidad y alineamiento y su influencia en los esfuerzos.	103
5.4. Influencia de las cargas sísmicas en los esfuerzos.	104
5.5. Influencia de la variación del nivel estático.	105
5.6. Estimación cualitativa de recarga de acuífero-APLIS.	107

Capítulo 6: Conclusiones.....	109
Bibliografía.....	112

Índice de Tablas

Tabla 1. Mínimo diámetro de la tubería versus diámetro nominal del agujero.	25
Tabla 2. Mínimo espesor para tubería de acero	28
Tabla 3. Propiedades de Materiales de Pozo	31
Tabla 4. Factor de material	32
Tabla 5. Área abierta de filtros	38
Tabla 6. Grava A.....	45
Tabla 7. Grava B.....	45
Tabla 8. Características del material de la envoltura de grava.	47
Tabla 9. Intervalos de tiempo para la medición de bombeo en pozos.	50
Tabla 10. Frecuencia de medición de los niveles de agua.	51
Tabla 11. Coordenadas de los Sondajes eléctricos realizados en el anexo de Azapampa.....	61
Tabla 12. Valores de los Sondajes eléctricos realizados en el anexo de Azapampa.	61
Tabla 13. Radio absoluto de influencia.....	64
Tabla 14. Concentraciones en meq/l de cationes y aniones para las muestras	67
Tabla 15. Porcentaje de cationes y aniones para las muestras.....	67
Tabla 16. <i>Resultados fisicoquímicos en el pozo de Azapampa del año 2016</i>	69
Tabla 17. <i>Parámetros inorgánicos en el pozo de Azapampa del año 2016</i>	70
Tabla 18. <i>Resultados Fisicoquímicos en el pozo de Chilca del año 2017</i>	70
Tabla 19. <i>Parámetros inorgánicos en el pozo de Chilca del año 2017</i>	70
Tabla 20. <i>Rangos usuales de resistividad de tipo de roca y agua.</i>	71
Tabla 21. <i>Caudal obtenido de la ecuación de Thiem</i>	78
Tabla 22. Propiedades mecánicas del agua a presión atmosférica.....	79
Tabla 23. Valores de rugosidad absoluta K	79
Tabla 24. Granulometría de la perforación de pozo.	81
Tabla 25. Granulometría ajustada según anidación.....	82
Tabla 26. Peso de tubería para distintos materiales	84
Tabla 27. Resistencia a la tensión de tubería	85
Tabla 28. Presiones de colapso en la tubería	86
Tabla 29. Resistencia a la tensión en grilla de ranura continua para diámetro 0.38cm.	87
Tabla 30. Resistencia a la tensión en grilla tipo Louver para espesor de 0.64cm	87
Tabla 31. Resistencia a la tensión en grilla tipo Louver para espesor de 0.89cm	88
Tabla 32. Presiones de colapso en grilla de espesor 0.64cm	89
Tabla 33. Presiones de colapso en grilla de espesor 1.27cm	89
Tabla 34. Resistencia a colapso en filtro de ranura tipo continua para espesor de 0.64cm... 90	
Tabla 35. Resistencia a colapso en filtro de ranura tipo continua para espesor de 0.89in.... 90	
Tabla 36. Resistencia a colapso en filtro de ranura tipo continua para espesor de 1.27cm... 90	
Tabla 37. Parámetros para cálculo de LSI	90
Tabla 38. Guía para seleccionar el material del filtro de pozo según el RSI.....	92
Tabla 39. Cuadro comparativo de pozos respecto de su ubicación.	93
Tabla 40. <i>Cuadro comparativo de pozos respecto del caudal</i>	94
Tabla 41. <i>Cuadro comparativo de pozos respecto de los parámetros hidráulicos.</i>	95
Tabla 42. Cuadro comparativo de pozos respecto del dimensionamiento.....	97
Tabla 43. Cuadro comparativo de pozos respecto del material	98
Tabla 44. <i>Cuadro comparativo de pozos respecto del material</i>	100

Tabla 45. Radios de influencia en función del tiempo	102
Tabla 46. Datos utilizados para el cálculo	103
Tabla 47. Datos utilizados para el cálculo	104
Tabla 48. Resultados de esfuerzos principales	105
Tabla 49. Profundidades de nivel de agua de Pozos Aza, Villalva y Chilca	106
Tabla 50. Calculo para obtención de recarga por método APLIS – Parte 1	108
Tabla 51. Calculo para obtención de recarga por método APLIS – Parte 2	108
Tabla 52. Categoría de tasa de recarga según método APLIS.....	108

Índice de Figuras

Figura 1. Abatimiento de un acuífero no confinado.....	10
Figura 2. Componentes de un pozo profundo típico.	21
Figura 3. Valores comunes de colapso de tubos de acero versus relaciones D/t.	29
Figura 4. Falla por colapso de la carcasa.	30
Figura 5. Esfuerzos ejercidos en el filtro.....	34
Figura 6. Abertura Vertical Mecanizada	35
Figura 7. Abertura puente trapezoidal.....	36
Figura 8. Filtro Louver.....	36
Figura 9. Formación estabilizadora, paquete de grava y granulometría de formación.	46
Figura 10. Cono de depresión en acuífero no confinado.....	50
Figura 11. Dispositivos de medición de descarga.	51
Figura 12. Prueba de medición de agua a través de cinta de acero.	52
Figura 13. Prueba de medición de agua a través de cable eléctrico.....	53
Figura 14. Topografía de los alrededores de la ciudad de Huancayo.	58
Figura 15. Variación del pH entre el 2013 y 2017.....	65
Figura 16. Variación de la Dureza total entre el 2013 y 2017.	66
Figura 17. Variación del Cloruro entre el 2013 y 2017.	66
Figura 18. Diagrama de Stiff de la muestra AZA-16.....	67
Figura 19. Diagrama de Stiff de la muestra CHI-17.	68
Figura 20. Diagrama de Piper de las muestras analizadas.	68
Figura 21. Clasificación química del agua de acuerdo al Piper.	69
Figura 22. Curva de abatimiento.....	75
Figura 23. Valores de Conductividad Hidráulica de Suelos	77
Figura 24. Curva de capacidad de acuífero.	77
Figura 25. Granulometría de paquete de filtro y porcentaje retenido.	82
Figura 26. Diferencia de ubicación de los pozos de estudio	93
Figura 27. Relación entre la variación de radio y el caudal	101
Figura 28. Relación entre la variación de radio y el caudal	102
Figura 29. Relación entre el radio de influencia y el caudal.....	103
Figura 30. Relación entre el esfuerzo y la desviación.....	104
Figura 31. Variación del nivel freático.....	106
Figura 32. SIG de las variables APLIS	107

Capítulo 1: Aspectos Generales

1.1. Introducción

En el presente trabajo se realizará el diseño y el análisis estructural de la falla por colapso del pozo profundo ubicado en el anexo de Azapampa, distrito de Chilca. Esto para brindar una propuesta de reemplazo al pozo existente que falló por colapso en junio del 2017 y garantizar la fuente de abastecimiento de agua en la zona por un adecuado tiempo de vida útil. Se describirán e interpretarán las características geológicas e hidráulicas subterráneas de la zona y, a partir de ello, se obtendrán los parámetros de diseño. Asimismo, se realizaron variaciones en las dimensiones y consideraciones especiales para ver su influencia en el diseño final. Finalmente, se comparará el diseño realizado con el que actualmente existe en Azapampa para establecer las conclusiones y recomendaciones.

1.2. Justificación

El anexo de Azapampa, distrito de Chilca, cuenta con pocas fuentes de agua superficial de la cual abastecerse. Además, las pocas fuentes existentes se encuentran alejadas de la zona lo que genera inviabilidad del aprovechamiento hídrico superficial. Una alternativa viable para su abastecimiento es la explotación de agua subterránea mediante pozos profundos. El anexo cuenta con un pozo que los abastecía desde hace 9 años, el mismo que estructuralmente falló. Este problema viene generando cortes de suministro temporal y perjuicio económico en la población.

1.3. Hipótesis

El diseño por colapso de una obra de captación de agua subterránea garantizará la fuente de abastecimiento de agua en el anexo por un tiempo de vida útil mínimo de 40 años. El mal comportamiento del pozo existente en el anexo de Azapampa se pudo haber

generado debido: (a) al mal diseño de sus elementos o (b) a la insuficiencia de especificaciones técnicas a seguir durante el proceso constructivo del pozo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general.

Diseñar por colapso un pozo profundo de agua subterránea para contar con la fuente de abastecimiento de agua potable en el anexo de Azapampa, distrito de Chilca en Huancayo, garantizando un tiempo de vida útil mínimo de 40 años.

1.4.2. Objetivos específicos.

- (a) Evaluar las condiciones hidrogeológicas más favorables para ubicar el pozo.
- (b) Determinar el caudal de diseño apropiado a la demanda.
- (c) Dimensionar los componentes del pozo de acuerdo a las condiciones locales.
- (d) Seleccionar el material adecuado para resistir los esfuerzos de colapso y de acuerdo a la calidad de agua existente.
- (e) Comparar el diseño del pozo colapsado con el diseño de la obra de captación de agua subterránea propuesta.

1.5. Alcances

Las fuentes de los datos para el diseño por colapso del pozo serán los siguientes: (a) el inventario de los pozos existentes de la Autoridad Administrativa del Agua (AAA) Mantaro en el área de estudio (4.1 km²), (b) los estudios realizados por encargo de Sedam Huancayo en la zona para la elaboración del diseño del pozo existente, (c) la carta geológica de Huancayo y (d) el levantamiento técnico de la falla por colapso realizado por ACISA. Se realizarán los cálculos y verificaciones para determinar la geometría de los elementos componentes del pozo. Se elaborará un expediente de diseño de acuerdo con la información, memoria de cálculo y planos que correspondan. Finalmente, se realizará un comparativo del diseño propuesto con el diseño original.

Capítulo 2: Estado del Arte y Marco Teórico

2.1. Estado del Arte

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Por sus siglas en inglés, FAO), “En la actualidad, las aguas subterráneas abastecen de agua potable por lo menos al 50% de la población mundial y representan el 43% de toda el agua utilizada para el riego” (Winpenny et al., 2010). A nivel mundial, 2.500 millones de personas dependen exclusivamente de los recursos de aguas subterráneas para satisfacer sus necesidades básicas diarias de agua (UNESCO, 2012). Además, se estima que el 20% de los acuíferos mundiales están siendo sobreexplotados (Gleeson et al., 2012), lo que va a tener graves consecuencias, como el hundimiento del suelo y la intrusión de agua salada (Galloway et al., 2000). En América, la explotación de agua subterránea varía entre los países. Así, países como Canadá, Estados Unidos y México tienen como fuente de abastecimiento principal al agua subterránea por la poca cantidad de agua superficial existente a comparación de los países como: Brasil, Colombia y Perú. A continuación, se realizará una revisión general del diseño y construcción de pozos de agua subterráneas en países de Norteamérica y Latinoamérica.

De acuerdo a la Environment Canada (2013), Canadá utiliza las aguas subterráneas como fuente de agua potable para el 30% de su población (cerca de 10 millones de canadienses). Sin embargo, hace unos años se ha detectado la sobreexplotación de grandes reservas de agua subterránea, como el que se encuentra por debajo de los estados de La Pradera Occidental (Jiménez y Galizia, 2012). En muchas provincias como: Prince Edward Island y New Brunswick, los pozos suministran agua potable más confiable y económica que el que se obtiene de los ríos, lagos y arroyos cercanos (Environment Canada, 2013). De acuerdo con Buchanan et al. (2013), los cambios de temperatura drásticos que vive el país obligan a diseñar los pozos de manera que cuenten con reservorios de agua en épocas de

demanda pico. Asimismo, Canadá regula la perforación de los pozos mediante el Canada Water Act. Esto le permite a cada provincia, como Alberta, establecer los requerimientos mínimos para la ubicación, la construcción y los materiales utilizados en el diseño de los pozos (Buchanan et al., 2013).

En Estados Unidos, más del 20% del total de agua extraída proviene del subsuelo (Barber, 2014). Según Maupin et al. (2014), existen estados como: Hawaii, Florida, Idaho, Mississippi, Nebraska y Iowa que dependen del agua subterránea para abastecer el 75% o más de su suministro público. De acuerdo a Williams (1985), entre los criterios de diseño de los pozos, se da importancia a la eficiencia del mismo para disminuir los costos de operación a largo plazo. Aunque esto implica una inversión inicial mayor por parte del propietario, los bajos costos en mantenimiento resultan ser energéticamente convenientes (Williams, 1985). En este país, los requerimientos mínimos recomendados para el diseño de los pozos los establece la American Water Works Association (AWWA) Standard for Water Wells.

Edward E. Johnson es uno de los pioneros en el diseño de rejillas o cribas para pozos en Estados Unidos. Johnson es fundador de la empresa Johnson Screen y, en 1923, patentó la primera rejilla de ranura continua, envuelta en alambre en forma de “V” (Sterrett, 2007). Esta empresa ha publicado materiales educativos como: “The Drillers Journal”, el libro: “Ground Water, Its development, use and conservation” y, posteriormente, el libro “Groundwater and wells” (Primera edición: 1966). En cuanto a la perforación de pozos, Roscoe Moss y la empresa S.A. Clampett & Co. son consideradas desde 1906 las pioneras en Estados Unidos (Roscoe Moss, 1990). Una década después (1924) la empresa cambió de nombre a: The Roscoe Moss Company. Esta empresa desarrolló tecnologías y conocimiento de los pozos de agua subterránea y producto de ello publicó libros como: “Handbook of groundwater development” (Roscoe Moss, 1990). Las publicaciones de ambas empresas norteamericanas forman parte de los referentes en los papers de diseño actuales.

Por otro lado, Jiménez y Galizia (2012) afirman que en México cerca del 70% de las ciudades son suministradas por agua extraída del subsuelo. Muchos acuíferos en este país son sobreexplotados, siendo 40 millones de habitantes los que dependen de éstos (Jiménez y Galizia, 2012). Asimismo, el 71% de los títulos de aprovechamiento del agua en el país corresponden a pozos de agua subterránea (Cubas et al., 2017), que pone en manifiesto la importancia de este tipo de obras en el país. Por otro lado, la Ley de Aguas Nacionales (2016) es la normativa que brinda las disposiciones para regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas superficiales y las de subsuelo. Del mismo modo, contempla su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad (Ley de Aguas Nacionales, 2016). Sin embargo, según Cubas et al. (2017), cerca del 93% de los pozos con título de aprovechamiento no son verificados y no existen datos de los caudales reales extraídos en los pozos. También se percibe que el monitoreo de los pozos existentes no es diligente y no se hace un seguimiento exhaustivo de los cambios de uso o desuso del pozo (Cubas et al., 2017).

En Sudamérica, Brasil es uno de los países con mayor cantidad de agua dulce del planeta, cuenta con aprox. el 12% del total (Jiménez y Galizia, 2012). La distribución de aguas subterráneas en el país es variable, existen regiones con abundante disponibilidad hídrica como el acuífero guaraní en el sur de Brasil y regiones con baja disponibilidad como aquellas de rocas cristalinas en las regiones semiáridas. La riqueza de Brasil en agua subterránea se debe a los acuíferos sedimentarios, los cuales ocupan el 48% del área total del Brasil (Jiménez y Galizia, 2012). La importancia económica de este recurso, de acuerdo a Jiménez y Galizia (2012), se demuestra con el número de pozos nuevos construidos para la explotación de aguas subterráneas, alrededor de 10,500 pozos al año. Sin embargo, de acuerdo con Bocanegra et al. (2015), el aumento demográfico somete a los acuíferos a grandes explotaciones de agua para satisfacer la demanda. Junto a esto, se suman problemas

como la falta de control de vertidos de aguas residuales que generan contaminación en el acuífero (Bocanegra et al., 2015). El órgano que legisla sobre las aguas subterráneas en este país es el Estado Brasileño (Cordeiro de Souza, 2015).

El 74.5% del territorio colombiano está cubierto por provincias con alto potencial hidrogeológico (Rodríguez et al., 2010). El uso mayoritario del agua subterránea lo realiza el sector agrícola con un 75%, seguido por los sectores: doméstico con un 9% e industrial con un 7% (Rodríguez et al., 2010). Además, se conoce que la captación de éste agua se realiza mediante pozos, con profundidades que varían entre 50 y 300 m (Jiménez y Galizia, 2012). Sin embargo, Jiménez y Galizia (2012) aseguran que esta información no es exacta, ya que a la fecha no se contaba con un inventario de los pozos de extracción de agua subterránea. Asimismo, el uso no planificado del agua subterránea ha incrementado en las zonas de expansión urbana, esto debido a la disminución de la calidad del agua superficial (IAEA, 2009). Recientemente, el Ministerio del Ambiente de este país se encuentra implementando un Programa Nacional de Aguas Subterráneas. Este programa tiene por objetivo: evaluar, administrar, manejar y aprovechar sosteniblemente el agua subterránea (IDEAM, 2014).

Finalmente, en el Perú existen 106 cuencas hidrográficas de origen superficial y subterráneo que producen 2.043.548,26 metros cúbicos de agua (SUNASS, 2014). Respecto de los acuíferos se tiene información de cuarenta y seis acuíferos estudiados y monitoreados. Éstos son muy vulnerables a la explotación excesiva y con ello a la disminución de la elevación del nivel freático, sobre todo, cuando la tasa de demanda es mayor a la recarga (Jiménez y Galizia, 2012). Por ello, a pesar que las cifras indican que Perú cuente con abundantes recursos hídricos, éstos se encuentran distribuidos de forma desigual debido a que la zona costera es muy árida. En consecuencia, en estas zonas la mayoría de las aguas utilizadas provienen de pozos y el abatimiento generado en el acuífero muchas veces causa

intrusión marina como en el caso del acuífero costero de la Yarada, en Tacna. (Jiménez y Galizia, 2012).

Actualmente, en el Perú existe un Reglamento de Procedimientos Administrativos pertenecientes a la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Este reglamento tiene la finalidad de otorgar los Derechos de Uso del Agua, la Autorización de la Ejecución de Obras en Fuentes Naturales de Agua, entre otros. Además, Instituto Nacional de Calidad (INACAL) cuenta con un marco normativo para las aguas subterráneas, en particular, para los pozos tubulares. En primer lugar, la norma peruana técnica NTP 360.100 2017 que establece los requisitos que debe tener un proyecto de pozo tubular para captación de agua subterránea (INACAL, 2017). Asimismo, se tiene la norma peruana técnica NTP 360.101 2018 que fija los requisitos para la construcción de pozo tubular para captación de agua subterránea (INACAL, 2018).

2.2. Marco Teórico

2.2.1. El flujo de agua subterránea.

El agua subterránea es un componente del ciclo hidrológico donde hay circulación del agua entre la atmósfera y la superficie terrestre (Roscoe Moss, 1990). La permeabilidad cercana a la superficie y las condiciones de humedad determinarán si el agua que cae sobre la superficie de la tierra se infiltra en el suelo o se descarga como un flujo por tierra hacia arroyos y océanos (ASCE, 2014).

El flujo de agua subterránea se debe a la diferencia de alturas entre dos puntos, el agua se moverá desde el punto con mayor carga hacia el punto con menor carga. El sistema del flujo de agua subterránea dependerá del tipo de acuífero, ya sea confinado o no confinado (Sterrett, 2007). La fuerza del flujo del agua subterránea es el gradiente hidráulico, el cual es la diferencia de altura entre las áreas de recarga y descarga, divididas por la longitud de la ruta de flujo (Misstear et al, 2017).

Darcy representa el flujo de agua subterránea a través de la zona saturada de un acuífero mediante la ecuación 1. El flujo por unidad de área a través de un medio poroso es proporcional a la tasa de pérdida de carga hidráulica. La constante de proporcionalidad entre el flujo y la pérdida de carga hidráulica es la conductividad hidráulica (K) (Roscoe Moss, 1990).

$$Q = -AxKxi \quad (1)$$

Dónde:

Q = Flujo de agua (m³/S)

A = Área transversal del flujo (m²)

K = Conductividad hidráulica (m/s)

I = Gradiente hidráulica en dirección del flujo

Roscoe Moss (1990) refiere que los acuíferos son formaciones o grupo de formaciones geológicas saturadas capaces de almacenar y transferir agua en cantidades utilizables. Asimismo, Sterrett (2007) manifiestan que los intersticios o aberturas de un material geológico actúan como sitios de almacenamiento y forman parte de una red de conducciones y son por estas conducciones que el agua subterránea se mueve bajo la gradiente hidráulica.

Los acuíferos pueden ser clasificados como confinados, no confinados y cristalinos, esto dependiendo de la naturaleza de su superficie superior o límites. Los acuíferos confinados están compuestos por rocas sedimentarias litificadas (pero no metamorfizadas), como areniscas y calizas (Roscoe Moss, 1990). Los acuíferos no confinados están formados por sedimentos relativamente jóvenes establecidos por agua, viento o glaciares (Misstear et al, 2017). Finalmente, los acuíferos semi confinados resultan cuando el confinamiento superior o inferior de la capa es lo suficientemente permeable para permitir el flujo de agua entre ella y acuíferos suprayacentes y subyacentes (Misstear et al, 2017).

Por otro lado, la capacidad de transmisión de agua en todo el espesor del acuífero (Kb) es denominada como “coeficiente de transmisibilidad” (T), el cual es calculado mediante el coeficiente de conductividad (K) y espesor de acuífero (b). La transmisibilidad es la tasa de flujo en galones por minuto a través de la sección vertical de un acuífero de un pie de ancho y extendiendo la altura saturada total bajo un gradiente hidráulico de uno (Sterrett, 2007). Los buenos acuíferos se caracterizan por valores relativamente grandes de almacenamiento, rendimiento y reposición. El reabastecimiento, también conocido como recarga, depende de varios factores, como la precipitación y las características del suelo (Roscoe Moss, 1990).

2.2.2. Nivel estático y dinámico total.

Durante la extracción de agua de un pozo se gasta energía, la cual es comúnmente conocida como pérdida de carga. La suma total de pérdidas de cargas de los componentes es denominada nivel dinámico total. El bombeo desempeña un papel importante en la reducción del nivel de agua ya que crea gradientes hidráulicos necesarios para mover el agua subterránea hacia el pozo. La carga dinámica total impuesta a la unidad de bombeo mediante la unificación de las pérdidas de carga de los componentes individuales está representada por la ecuación 2. La suma de los primeros tres términos en el lado derecho generalmente se denomina pérdida de formación (h_{af} , h_{pe} , h_{gp}), mientras que la suma de los últimos tres términos se llaman pérdidas de pozo (h_{ws} , h_{wb} , h_{wc}) (ASCE, 2014).

$$S_w = h_{af} + h_{pe} + h_{gp} + h_{ws} + h_{wb} + h_{wc} \quad (2)$$

El nivel estático en el pozo de agua (H_s) está representado por el nivel freático cuando no se ve afectado por la pérdida de cargas por bombeo. Cuando la unidad de bombeo está operando, la elevación dinámica total, H_1 , desde la superficie del agua en el bombeo hasta la superficie del suelo sería la suma del nivel estático y la reducción total como se indica en la ecuación 3 (ASCE, 2014).

$$H_1 = H_s + S_w \quad (3)$$

Dónde:

H_1 = Nivel dinámico total desde la superficie del agua en un pozo de bombeo a la superficie del suelo, (m)

H_s = Nivel estático en un pozo que no bombea, (m).

Debido al bombeo y las pérdidas de los componentes individuales se forma el cono de depresión. El cono de depresión que rodea un pozo de bombeo es la superficie libre de drenaje por gravedad en un acuífero no confinado y la superficie de presión en un acuífero confinado o semiconfinado. Este cono, de forma logarítmica, se extiende radialmente hacia afuera desde el pozo, siendo la extensión y forma, una función de los parámetros del acuífero, la velocidad de bombeo y el tiempo. (Roscoe Moss, 1990).

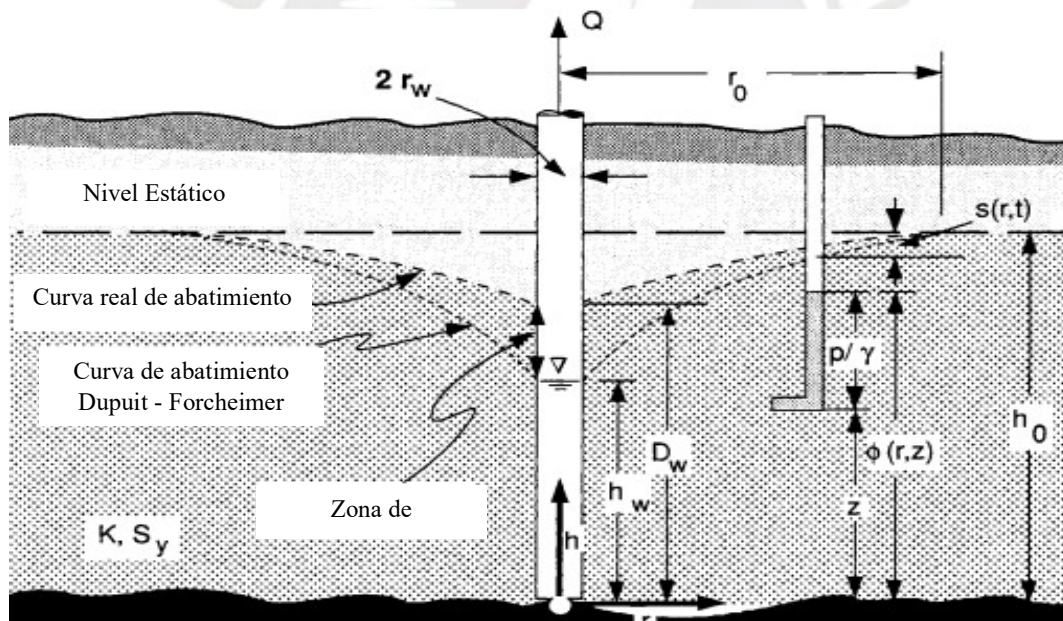


Figura 1. Abatimiento de un acuífero no confinado.
Tomado de Roscoe Moss (1990)

2.2.3. Exploración de agua subterránea.

El objetivo de la investigación no es solo encontrar agua subterránea, sino también, garantizar los requerimientos de cantidad y calidad adecuada (Roscoe Moss, 1990). Todo ello, a un costo razonable y generando el menor impacto a los demás usuarios del agua

subterránea y al acuífero (Misstear et al., 2017). Según recomienda Misstear et al. (2017), un proceso de exploración debería comprender las siguientes tareas: (a) trabajo de gabinete, (b) reconocimiento de campo, (c) elaboración de inventarios, (d) estudios geofísicos, (e) perforación de investigación, (f) evaluación del recurso de agua subterránea y (g) la calidad y el riesgo de contaminación. En general, Roscoe Moss (1990) se refiere a la incorporación de data y al programa de exploración como un proceso continuo que se va retroalimentando.

El trabajo de gabinete comprende la definición del proyecto. Esto implica establecer parámetros como: la cantidad de agua demandada y la calidad de agua requerida (Roscoe Moss, 1990). De acuerdo con Misstear et al. (2017), se debería también definir la cantidad de pozos, la disponibilidad del agua subterránea y la existencia de estudios hidrogeológicos. El primer paso es consultar reportes de profesionales u organizaciones de la zona y, en general, bibliografía que permita obtener datos valiosos. Esta información puede reducir sustancialmente el tiempo de la exploración (Roscoe Moss, 1990). En países como Estados Unidos, por ejemplo, estudios detallados de geología e hidrogeología, se encuentran disponibles a través del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Esto, en algunos casos, incluso elimina la necesidad de realizar un programa de exploración (Misstear et al., 2017).

La visita a campo permite desarrollar un mayor entendimiento de la hidrogeología. Asimismo, de acuerdo con Misstear et al. (2017) estar en la zona posibilita la comunicación con los pobladores en temas como: las fuentes de agua subterránea, el rendimiento de los pozos y la calidad del agua. También, se puede observar las fuentes potenciales de contaminación y la vulnerabilidad del acuífero (Misstear et al., 2017) Durante esta visita, en caso no se haya encontrado en la fase previa, Pulido (1978) recomienda realizar un inventario de fuentes de agua. La cantidad y ubicación de los puntos a inventariar dependerá de la magnitud del proyecto, de manera que no dificulte el trazado de las isopiezas (Pulido, 1978).

Finalmente, durante la visita se deben identificar los sitios potenciales donde se ubicaría el pozo, si bien esto depende de la hidrogeología, también depende de la disponibilidad de terrenos y la aceptación de la comunidad (Misstear et al., 2017).

Luego del reconocimiento de campo, Misstear et al. (2017) sugiere que la información recolectada sea organizada en una base de datos o un Sistema de Información Geográfica (SIG). Asimismo, durante el procesamiento de esta información se elaboran mapas hidrogeológicos (cortes hidrogeológicos) que permitan graficar y entender mejor el funcionamiento del acuífero (Pulido, 1978). Es importante considerar que la localización del pozo a diseñar, no solo está basada en las características hidrogeológicas, sino también en la información de los pozos cercanos. (Roscoe Moss, 1990). Por ello, Pulido (1978) recomienda elaborar los planos de isopiezas (abreviatura de la palabra isopiezometría), que grafican los puntos de igual nivel piezométrico del agua subterránea. Finalmente, se elaboran los planos de isopacas (líneas que unen puntos de igual espesor), graficados en base a estudios geofísicos. La construcción de estos planos permitirá sacar conclusiones importantes de la zona estudiada, sobre todo, para la ubicación del pozo a perforar (Pulido, 1978).

Las pruebas geofísicas miden los parámetros básicos de los suelos desde la superficie o desde el interior de los pozos de exploración (Roscoe Moss, 1990). Tienen la finalidad de reconocer las formaciones geológicas que se encuentran en la profundidad (Sánchez, 2001). Sin embargo, como lo menciona Misstear et al. (2017), los resultados obtenidos pueden generar diversos modelos, de acuerdo a la interpretación del profesional responsable. Es por ello, que el trabajo de campo e interpretación requiere de un alto conocimiento técnico y experiencia del profesional (Roscoe Moss, 1990). Asimismo, el complemento del estudio con los pozos de exploración, disminuyen las ambigüedades que se puedan generar en estas pruebas (Misstear et al., 2017).

Muchas de las técnicas geofísicas utilizadas en la exploración del petróleo fueron adaptadas a la exploración del agua subterránea (Roscoe Moss, 1990). Existen estudios geofísicos pasivos como: estudios de gravedad, estudios magnéticos y estudios de temperatura. También existen estudios geofísicos activos como: estudios sísmicos y técnicas de resistividad (Roscoe Moss, 1990). Según refiere Misstear et al. (2017), diferentes métodos generan diferentes resultados geofísicos de las propiedades de los suelos, por lo que se obtienen mejores resultados al usar más de un método. Las técnicas de resistividad eléctrica y electromagnética son las más comunes y usadas para la exploración de agua subterránea (Misstear et al., 2017).

Entre las técnicas de resistividad eléctrica, están los Sondajes Eléctricos Verticales (SEV), estos son utilizados para explorar agua subterránea por la sencillez y el costo, relativamente bajo, del equipo necesario (Sánchez, 2001). Esta técnica es más adecuada para geologías donde las capas son horizontales y existen variaciones verticales relativamente pequeñas (Misstear et al., 2017), un ejemplo de éstas son los depósitos cuaternarios. Por otro lado, los métodos electromagnéticos son ampliamente utilizados para mapear la geología mediante las variaciones de la conductividad del suelo (McNeill, 1990). A diferencia de los métodos eléctricos, no es necesario hacer un contacto directo con el suelo, lo que las hace menos costosas y más rápidas (Misstear et al., 2017).

Las perforaciones se realizan para complementar la información recolectada y los resultados de los estudios geofísicos (Misstear et al., 2017). Es importante planificar los lugares en los que se realizará la perforación y el número de perforaciones de manera que brinden mayor información al programa de exploración (Misstear et al., 2017). De acuerdo con Roscoe Moss (1990), la consulta a los contratistas locales que se dedican a perforar pozos de agua subterránea es vital, puesto que ellos saben dónde se encuentra el agua, la calidad que tiene y, lo más importante, los problemas que se han encontrado durante su perforación. Por

ejemplo, en zonas donde existen fracturas, es recomendable realizar perforaciones inclinadas que permiten obtener mayor entendimiento de la geología, en comparación de perforaciones verticales (Misstear et al., 2017).

La evaluación del recurso de agua subterránea es importante para verificar que el recurso a largo plazo seguirá siendo sostenible (Misstear et al., 2017). Generalmente se usan las pruebas de bombeo; sin embargo, éstas solo nos brindan información a corto plazo (Misstear et al., 2017). Para evaluar el recurso del agua se deben realizar balances hídricos en la zona que consideren, entre otros aspectos, tanto las épocas de estiaje y las de avenida (Roscoe Moss, 1990). Existen países donde estos cálculos ya se encuentran elaborados y no es necesario realizar una evaluación externa (Misstear et al., 2017). Asimismo, Roscoe Moss (1990) enfatiza que no toda el agua que se obtiene del balance hídrico como disponible, se puede explotar. Generalmente, solo se puede extraer una porción del volumen sin tener efectos indeseables como la subsidencia o los derrumbes en la zona.

Como parte de la exploración se deben realizar estudios de la calidad de agua. Esto para asegurarse de que el agua cumpla con los requerimientos necesarios de acuerdo al uso que se tiene proyectado (Misstear et al., 2017). Aunque esto puede ser corregido mediante obras, como plantas de tratamiento, se debe tener en cuenta que incide directamente en el precio del agua (Pulido, 1978). Por otro lado, estos estudios, también, permiten elegir el material adecuado de los componentes del pozo, para evitar problemas de corrosión durante su operación (Misstear et al., 2017). Al igual que se evalúa la calidad del agua, es necesario identificar las fuentes potenciales de contaminación del agua cercana al pozo propuesto (Misstear et al., 2017). Estas fuentes son muy variadas, pueden provenir del uso inadecuado de fertilizantes, de zonas de deposición de desechos, tanques sépticos, entre otros (Misstear et al., 2017).

Al finalizar el proceso de exploración se debería poder responder como mínimo: ¿De dónde proviene el agua subterránea? ¿A dónde se dirige o dónde desemboca? y ¿Cuál es la naturaleza de la geología que la contiene? (Roscoe Moss, 1990).

2.2.4. Hidráulica de pozos.

El conocimiento de la hidráulica de pozos es esencial para el diseño y construcción, además permite lograr el mejor desempeño del sistema pozo – acuífero (Roscoe Moss, 1990). Las pruebas de acuífero permiten obtener características hidráulicas como el coeficiente de almacenamiento (S), transmisividad (T) y abatimiento (s) (Sterrett, 2007).

El análisis de pruebas de acuífero se da en dos tipos de flujos de agua subterránea: flujo estable y flujo transitorio (Sterrett, 2007). Según Roscoe Moss (1990), el flujo de agua en los pozos considera flujos ideales a través de un medio poroso modificado y las soluciones están basadas en las siguientes asunciones y aproximaciones:

- (a) El acuífero está compuesto por un medio poroso y el flujo de agua subterránea obedece a la Ley de Darcy.
- (b) La velocidad del flujo es proporcional a la tangente de la gradiente hidráulica.
- (c) El acuífero tiene una base horizontal y un espesor uniforme, además es homogéneo e isotrópico.
- (d) La bomba penetra completamente el espesor del acuífero y recibe agua del flujo horizontal.
- (e) El agua es liberada del almacenamiento de forma instantánea en respuesta de la disminución de la carga.
- (f) El pozo es bombeado con una descarga constante.

2.2.4.1. Flujo estable.

Sterrett (2007) refiere que, en un acuífero no confinado, la tasa de descarga por un pozo bombeado en condiciones de flujo estable está dado bajo la ecuación de Thiem (ecuación 4) tomando en cuenta las condiciones de la teoría de Dupuit.

$$Q = \frac{2\pi T(h_2 - h_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2\pi Kb(h_2 - h_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4)$$

Dónde:

Q = Caudal, (m³/s)

T = Transmisividad, (m²/s)

K = Conductividad hidráulica, (m/s)

B = Espesor de acuífero, (m)

r₁, r₂ = Distancia radial de dos pozos de observación del pozo de descarga, (m).

h₁, h₂ = Flujo estable de agua-nivel de elevación en dos pozos de observación (m).

En un acuífero no confinado, Dupuit modifica la ecuación de Thiem bajo consideraciones del flujo de agua y velocidad. Dupuit indica que el flujo de agua es horizontal sin resistencia de flujo vertical, además la velocidad es proporcional a la pendiente de la capa freática (Sterrett, 2007). Por ello, al ser la pendiente de la capa freática muy pequeña, la reducción debido al bombeo es muy pequeña en relación con el grosor del acuífero (Sterrett, 2007). Finalmente, la ecuación de la tasa de descarga en términos de abatimiento para un acuífero no confinado esta da por la ecuación 5.

$$Q = \frac{2\pi T(s'_1 - s'_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (5)$$

Donde:

Q = Caudal, (m³/s)

T = Transmisividad, (m²/s)

r₁, r₂ = Distancia radial de dos pozos de observación del pozo de descarga, (m)

$s'1, s'2 =$ Abatimiento de dos pozos de observación del pozo de descarga, (m)

Donde el abatimiento corregido está dado por la ecuación 6.

$$s' = \frac{s - s^2}{2b} \quad (6)$$

Del mismo modo, la conductividad hidráulica se representa con la siguiente ecuación 7.

$$K = \frac{Q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \quad (7)$$

2.2.4.2. Flujo transitorio.

Roscoe Moss (1990) refiere a dos consideraciones para la determinación de la ecuación de abatimiento en un flujo no permanente en acuíferos no confinados. El abatimiento se verá afectado dependiendo si el bombeo genera (a) o no (b) en el acuífero un rendimiento atrasado.

(a) Sin rendimiento atrasado.

Según Roscoe Moss (1990), en los acuíferos sin rendimientos atrasados, el flujo de agua subterránea alrededor del pozo de bombeo es idéntico al flujo de un acuífero confinado. Por tanto, la ecuación 5 de Thiem-Dupuit pueden ser aplicadas dentro de las limitaciones de los supuestos básicos y luego reemplazar en la ecuación de abatimiento (Roscoe Moss, 1990).

(b) Con rendimiento atrasado.

En un acuífero no confinado, el agua obtenida del bombeo se deriva tanto del drenaje por gravedad como de la compactación del acuífero y expansión del agua (Roscoe Moss, 1990). Sin embargo, el drenaje por gravedad generalmente no ocurre instantáneamente con la disminución de la altura y generalmente los pozos muestran un efecto de rendimiento retrasado (Roscoe Moss, 1990).

Sterrett (2007) señala que la ecuación de Theis permite determinar el abatimiento en un acuífero no confinado con rendimiento atrasado. Para el empleo de la ecuación de Theis se aplican los siguientes supuestos:

- (1) El acuífero está confinado con una extensión de área infinita y sin fugas verticales ni recarga.
- (2) El acuífero es homogéneo e isotrópico con espesor constante.
- (3) Se tiene un flujo laminar y horizontal.
- (4) El abatimiento cambia con el tiempo
- (5) El pozo bombeado tiene un radio muy pequeño, penetra en el acuífero y descarga a una velocidad constante.

La ecuación de abatimiento propuesto por Theis está dada por la ecuación 8.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (8)$$

Dónde:

$$u = r^2 S / 4Tt$$

x=Variable de integración

Q=Caudal (m³/s)

T=Transmisividad (m²/s)

S=Coeficiente de almacenamiento

s: Abatimiento de pozo de observación

r= Distancia radial entre el pozo de observación y el pozo

T=Tiempo

La variable integral de la ecuación 8 es comúnmente conocida como la función de pozo de Theis y es designado por la ecuación 9 como variable W(u) (Roscoe Moss, 1990).

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \dots \quad (9)$$

Finalmente, la ecuación de abatimiento de Theis queda representada por la ecuación 10.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (10)$$

La ecuación de Theis permite calcular el abatimiento para valores conocidos de transmisividad (T) y Coeficiente de almacenamiento (S); sin embargo, para valores no conocidos de estos dos parámetros es considerada como una solución inversa (Roscoe Moss, 1990). Por ello, a través de los datos de abatimiento y caudal obtenidos en la prueba de bombeo, estos se grafican para obtener los valores de T y S (Sterrett, 2007).

En caso de tener tiempos suficientes largos y la distancia al pozo de observación (r) sea lo suficientemente pequeño, Cooper y Jacob notaron que el valor de u es demasiado pequeño, por ello la ecuación de Theis se simplifica a la ecuación 11 (Sterrett, 2007).

$$W(u) \approx -0.5772 - \ln u \quad (11)$$

A través de esta reformulación de la ecuación 9, la ecuación de abatimiento queda dada por la ecuación 12.

$$s = \frac{2.303Q}{4\pi T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (12)$$

Además, como resultado de la gráfica de la prueba de bombeo se puede obtener los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento a través de las siguientes ecuaciones (13) y (14) (Roscoe Moss, 1990).

$$T = \frac{2.303Q}{4\pi \Delta s} \quad (13)$$

Dónde:

T = Transmisividad (m²/s)

Q = Caudal (m³/s)

$$S = \frac{2.25Tt}{r^2} \quad (14)$$

Dónde:

S = Coeficiente de almacenamiento

T = Transmisividad (m²/día)

t = Tiempo desde inicio de bombeo (día)

ro = Línea de extensión interceptada con abatimiento cero (m)

2.2.5. Diseño de pozos.

De acuerdo con Buchanan et al. (2013), un buen diseño de pozo debería asegurar: (a) el suministro de agua confiable y sustentable de acuerdo con las necesidades del usuario y la capacidad del acuífero, (b) la provisión de buena calidad de agua, libre de contaminantes y sedimentos, (c) un largo tiempo de vida esperado para el pozo, (d) los bajos costos de operación y mantenimiento y (e) su facilidad de monitoreo. Según Roscoe Moss (1990), el diseño se debería complementar y terminar cuando se haga la perforación definitiva del pozo. Debido a la dependencia entre el tipo de perforación y el diseño del pozo, es esencial conocer los diversos métodos de perforación existentes, para elegir el diseño adecuado (Roscoe Moss, 1990).

2.2.5.1. Ubicación del pozo.

Luego de la exploración de la zona, se puede determinar la ubicación del pozo. Según plantea Roscoe Moss (1990), la selección se debería realizar en base a los siguientes criterios: (a) evaluación hidrogeológica, (b) calidad de agua, (c) geografía de la zona, (d) dimensiones del área de la zona, (e) acceso a la zona, (f) normativa local, (g) disponibilidad del agua, (h) manejo de excedentes del fluido de perforación, (i) desarrollo y eliminación del agua de prueba, (j) niveles de sonido permitido en el lugar. De acuerdo con Sterrett (2007), la información hidrogeológica es un criterio determinante para obtener un diseño eficiente y de alta capacidad.

2.2.5.2. Componentes del pozo.

Según Rashed y Abduljawad (2013), incorporar los componentes adecuados a un pozo, permitirán proveer agua limpia y segura durante el tiempo de vida esperado. Los componentes de un pozo convencional son: (a) la tubería (well casing), (b) la rejilla (well screen), (c) el paquete de grava (gravel pack), (d) el sello sanitario y la losa sanitaria (sanitary

seal and pump pad), (e) la perforación (bore hole) y (f) la bomba y las tuberías (pump and pipes).

(a) La tubería (casing).

Es instalado durante o después de la perforación del pozo, para soportar las paredes del agujero y prevenir el derrumbe de las mismas (Rashed y Abduljawad, 2013). Usualmente, esta sección aloja la bomba, succiona el agua desde el acuífero y protege el agua de posibles contaminantes adyacentes (Sterrett, 2007). Del mismo modo, sella la interacción del agua bombeada con las aguas subterráneas menos profundas que pueden ser de menor calidad (Misstear et al., 2017).

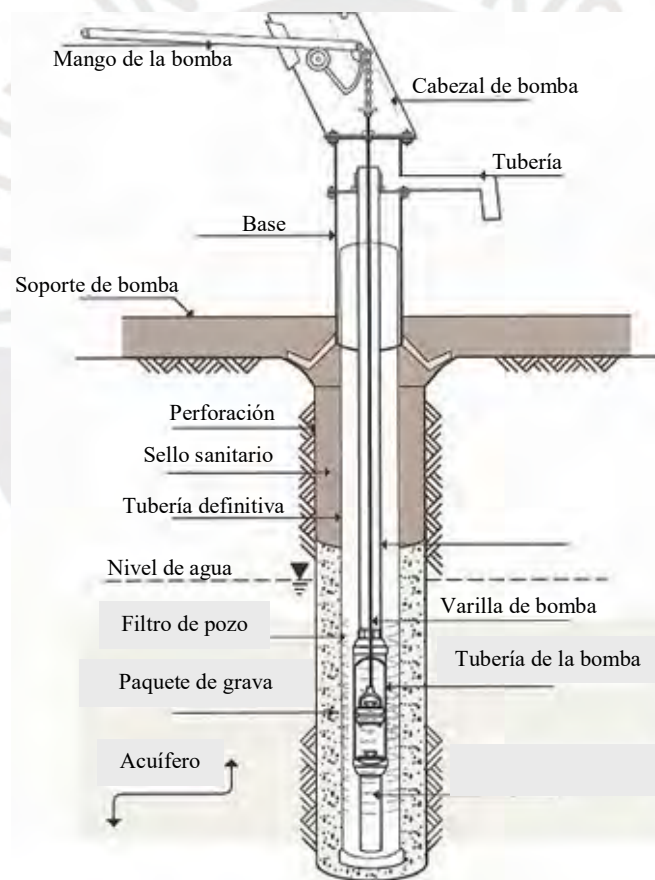


Figura 2. Componentes de un pozo profundo típico.
Tomado de Rashed y Abduljawad (2013)

(b) La criba o filtro (screen).

De acuerdo con el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) (2010), es uno de los componentes más importantes del pozo, ya que su apropiado diseño asegurará un buen desarrollo del pozo y la cantidad óptima de agua subterránea. Para acuíferos con material de roca consolidada, se puede utilizar perforación libre, donde no se requiere una tubería perforada o filtros, para extraer agua (USDA, 2010). En el caso de acuíferos no consolidados, el filtro no solo previene el ingreso excesivo de sedimentos finos, sino también, tiene el propósito de contener la arena y el paquete de grava (prefiltro del pozo), mientras proporciona a la obra de captación, el flujo de agua (Rashed y Abduljawad, 2013). Los tipos más comunes de filtro son: los ranurados, los tipos louver, las pantallas con ranuras de puente y las pantallas continuas de envoltura de alambre (Misstear et al., 2017).

(c) Paquete de prefiltro o paquete de grava (pack gravel).

El paquete de grava generalmente está ubicado en el espacio anular entre la tubería y el agujero de la perforación del pozo (Rashed y Abduljawad, 2013). Este paquete consiste en arena o grava que ha sido diseñada con un tamaño de grano más fino que el tamaño de la ranura del filtro y según la gradación de los materiales del acuífero (USDA, 2010). El paquete de filtro natural previene que arenas y partículas gruesas del acuífero ingresen al pozo. Misstear et al. (2017) recalca que el paquete de grava no excluye partículas finas de limos, ni de arcillas, es por ello que en áreas donde se encuentre este tipo de suelo es mejor utilizar tuberías ciegas.

(d) El sello sanitario y la losa sanitaria (sanitary seal and pump pad).

Es una capa de concreto que sella la superficie para evitar el ingreso de contaminantes en el exterior de la cubierta o en el pozo (Rashed y Abduljawad, 2013). Está diseñado con una pendiente ligera para drenar el agua del pozo. Asimismo, la capa funciona como una plataforma para apoyar cualquier recinto (Misstear et al., 2017).

(e) La perforación (bore hole).

El diámetro de perforación del pozo debería ser mayor al de la tubería de diseño, así como debería estar libre de obstrucciones en toda su profundidad (Rashed y Abduljawad, 2013). La profundidad total del pozo está en función de la producción de agua del pozo y acuífero que será explotado (Misstear et al., 2017).

(f) La bomba y las tuberías (pump and pipes).

La bomba puede ser colocada en la superficie o puede ser sumergible a través de una tubería. El tipo y el tamaño de la bomba del caudal deseado, la ubicación, las condiciones de operación y la altura dinámica total (ADT) (Rashed y Abduljawad, 2013). Luego de determinar las características requeridas por la bomba, ésta será elegida de acuerdo a las recomendaciones de su fabricante.

2.2.5.3. Criterios para la selección el tipo de diseño del pozo.

La elección del tipo de pozo se realiza considerando los siguientes factores: (a) el material del acuífero: Consolidado o no consolidado, (b) el tipo de acuífero: libre o confinado, (c) el caudal demandado, (d) los materiales disponibles de perforación, (e) el equipamiento y (f) el mantenimiento (Misstear et al., 2017). Los diseños típicos y sus variaciones han evolucionado a lo largo de los años. A continuación, se listan dos de los más comunes para formaciones aluviales no consolidadas. Éstos fueron extraídos y resumidos del libro de Roscoe Moss (1990):

(a) Envuelto completamente en grava.

Es el diseño más común de pozo de agua subterránea, se encuentra embebido en grava desde el fondo del pozo hasta la superficie. Las ventajas que tiene este diseño es la simplicidad de su construcción, el mantenimiento y sus bajos costos iniciales. Cuenta con una tubería conductora cementada por el exterior que le permite estabilizar las formaciones

superiores. Asimismo, generalmente, cuenta con una tubería ciega en la parte inferior que funciona como reservorio.

(b) Parcialmente envuelta en grava.

Es una variante del diseño anterior. Se encuentra completamente sellado con un anillo de concreto en la parte superior. Asimismo, cuenta con tuberías aductoras permanentes que conectan el paquete de grava con la superficie. Lo que permite controlar el nivel de grava y alimentarlo durante su vida útil. Es recomendado para sellar formaciones indeseables de la parte superior y proteger la tubería de corrosión externa.

2.2.5.4. Diseño de la tubería ciega.

(a) Selección del material.

De acuerdo con Roscoe Moss (1990) y USDA (2010), la selección del material de la tubería tiene tres principales requerimientos. En primer lugar, debe permitir la instalación y operación de las herramientas de perforación, de desarrollo y de la bomba. En segundo lugar, las propiedades físicas deben ser adecuadas a los esfuerzos de instalación y otros esfuerzos desarrollados durante la operación. Finalmente, debe garantizar el tiempo de vida de diseño del pozo (entre 25 a 50 años), considerando su resistencia a la corrosión.

El acero es el material más utilizado en la construcción de pozos de agua ya que adquiere forma tubular y garantiza una vida útil adecuada en condiciones corrosivas al ser expuesta a la atmósfera, suelo o agua (Roscoe Moss, 1990). Además, el acero posee un alto rendimiento y resistencia a tracciones requeridas para los pozos así también como una adecuada elasticidad y resiliencia (Sterrett, 2007).

Existen otros materiales para la tubería como el concreto, plástico, acero inoxidable y fibra de vidrio (Roscoe Moss, 1990). El concreto por su peso dificulta el proceso de instalación, por otro lado, la tubería de plástico es empleada en su mayoría para pozos domésticos (Sterrett, 2007). Las tuberías de fibra de vidrio son empleadas en zonas donde la

calidad de agua sea altamente corrosiva (Sterrett, 2007). Para los pozos de agua, la tubería de acero inoxidable de grado 304 es la más empleada (Roscoe Moss, 1990).

La mayoría de tuberías para pozos son fabricadas en base a los estándares de la Sociedad Americana para el Muestreo de Materiales (ASTM), Instituto Americano de Petróleo (API) y la Asociación Americana de Trabajo del Agua (AWWA, por sus siglas en inglés) estas tres instituciones designan grados de esfuerzo y calidad (Sterrett, 2007). En el caso de Perú, la normativa indica que la tubería debe cumplir por lo menos con las especificaciones indicadas en la ASTM A53 (INACAL, 2017).

(b) *Diámetro de la tubería.*

(b.1) *Diámetro de tubería ciega y de la bomba:*

Respecto del diámetro, éste depende del diámetro de la bomba. A su vez, este diámetro depende de la producción requerida y el tipo de la bomba (INACAL, 2017). En la tabla 1 se han traducido los datos provistos por Roscoe Moss (1990) donde se muestra el diámetro de la tubería como una función del máximo diámetro de la bomba. Considerar que es posible necesitar mayor despeje para bombas sumergibles.

Tabla 1. *Mínimo diámetro de la tubería versus diámetro nominal del agujero.*

Diámetro nominal del recubrimiento (in)	Velocidad de operación de la bomba (RPM)	Ratio de descarga (gpm)	Diámetro interno mínimo de la tubería (in)
8	3500	200 - 1200	10
	1800	100 - 600	
	1200	160 - 140	
10	1800	200 - 1500	12
	1200	370 - 670	
12	1800	400 - 2300	14
	1200	250 - 1500	
14	1800	1000 - 4500	16
	1200	700 - 3000	
16	1800	2000 - 5200	18
	1200	1300 - 3400	
18	1800	3200 - 4100	20
	1200	2200 - 4000	
	900	2800 - 3000	
20	1200	3100 - 4400	24
	900	2300 - 3600	

22	1200 900	7500 5600	24
----	-------------	--------------	----

Nota. Tomado de Roscoe Moss (1990)

Asimismo, Sterrett (2007) menciona que el diámetro de la tubería debe satisfacer dos consideraciones importantes: (1) No solo debe garantizar la instalación y operación de la bomba, sino también, (2) debe garantizar que no se excedan velocidades de 1.5 m/s. Finalmente, la Norma Técnica Peruana 360.100 añade que el diámetro interno de los tubos debe ser compatible con el diámetro de los filtros, el diámetro de la bomba e implementos de explotación (INACAL, 2017).

(b.2) Diámetro de perforación del pozo

Esta dimensión depende tanto del diámetro de la tubería como del diámetro del filtro (Roscoe Moss, 1990). A continuación, se describen los criterios resumidos del Roscoe Moss (1990).

- (1) El diámetro perforado para pozos con paquetes de grava, es 8 pulgadas a 12 pulgadas más amplios que el diámetro nominal de la tubería de la columna definitiva o del filtro.
- (2) El diámetro perforado para pozos que deberán ser sellados, es aproximadamente de 4 pulgadas a 6 pulgadas más grande que el diámetro nominal de la tubería.
- (3) El diámetro perforado para el pozo con tubería a ser instalada debería tener un mínimo de despeje de 2 a 4 pulgadas más amplio que el diámetro externo de la tubería.

En el caso de Perú, la Norma Peruana 360.100 considera que debe haber un espacio anular de 75 milímetros entre el diámetro de perforación y la columna de producción para garantizar el descenso de tubos y filtros (INACAL, 2017).

(c) Profundidad de la tubería.

En cuanto a la profundidad de la tubería de la columna definitiva, Roscoe Moss (1990) menciona que depende de la ubicación prevista de la bomba, las características del pozo y la descarga que se desea obtener. Asimismo, depende del tipo de acuífero que será explotado Roscoe Moss (1990). Generalmente, un acuífero con material no consolidado puede ser perforado hasta obtener su máximo rendimiento (Misstear et al., 2017). Además, de acuerdo con Misstear et al. (2017), si se asume un acuífero lo suficientemente abundante, la columna de agua que podría ser explotada, para un caudal deseado, puede ser estimado con la siguiente fórmula de equilibrio (ecuación 15).

$$T = Kb = \frac{2Q}{Sw} \quad (15)$$

Donde “T” es la transmisividad del acuífero, “K” es la conductividad hidráulica, “b” es espesor saturado del acuífero, “Q” el caudal deseado y el sw el abatimiento del nivel de agua. El coeficiente considera el abatimiento adicional producto de una penetración parcial y las pérdidas que podrían existir en el pozo (Misstear et al., 2017). Despejando la variable del espesor saturado del acuífero “b” se cuenta con la expresión dada por la ecuación 16.

$$b = \frac{2Q}{SwxK} \quad (16)$$

De la ecuación 16, Misstear et al. (2017) menciona dos consideraciones: (1) Esta expresión puede ser aplicada en acuíferos con materiales relativamente homogéneos. Asimismo, (2) las pérdidas asumidas por el coeficiente 2 no consideran pérdidas ocasionadas por la ineficiencia del bombeo durante grandes descargas.

(d) Espesor de la tubería.

El espesor de la tubería debe ser diseñado para resistir esfuerzos de compresión, tensión y de corte considerando el tiempo de vida útil al que será sometido desde su instalación, generalmente, entre 20 a 40 años. (Michael et al., 2013). Asimismo, Michael et al. (2013) recomiendan utilizar mayor espesor de tubería en ambientes conocidos, previamente, como

altamente corrosivos. En general, el espesor está en función del diámetro y en ocasiones, también, en función de la profundidad. Bajo condiciones normales, es usual utilizar datos de tablas, como las que recomienda AWWA (1997) y que se muestra a continuación:

Tabla 2. *Mínimo espesor para tubería de acero*

Profundidad de tubería ft (m)	Diámetro nominal de tubería – in (mm)										
	8 (203)	10 (254)	12 (305)	14 (356)	16 (406)	18 (457)	20 (508)	22 (559)	24 (610)	30 (762)	
0-100 (0-30)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)
100-200 (30-60)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)
200-300 (60-90)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)
300-400 (90-120)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)
400-600 (120-180)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)	7/16 (11.11)
600-800 (180-240)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)	7/16 (11.11)
800-1000 (240-300)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)	7/16 (11.11)	7/16 (11.11)	½ (12.70)
1000-1500 (300-450)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)	7/16 (11.11)	7/16 (11.11)	*	*
1500-2000 (450-600)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)	7/16 (11.11)	7/16 (11.11)	7/16 (11.11)	*	*

Nota. Tomado de AWWA (1997)

(e) Diseño por esfuerzos.

Roscoe Moss (1990) hace referencia que los esfuerzos en la tubería pueden ser categorizados por la dirección de la fuerza impuesta. En primer lugar, la fuerza axial si es tensión, actúa para separar la tubería y la grilla; pero tiende a aplastarse, si es compresivo (Roscoe Moss, 1990). Además, Sterret (2007) menciona que las fuerzas radiales dirigidas hacia el eje del pozo actúan para colapsar la tubería o grilla, pero crean cargas explosivas si se dirigen hacia afuera.

(e.1) Esfuerzo de colapso en la tubería.

El colapso radial de la tubería se debe a la intervención de las fuerzas dinámicas y fijas. Las fuerzas fijas son la columna de agua y el peso de la formación geológica mientras que el sismo y movimiento del paquete de grava son fuerzas dinámicas (Sterrett, 2007). La resistencia de colapso de la tubería está en función de las propiedades físicas del material,

radio, diámetro, espesor de la tubería y la tolerancia en la fabricación de la tubería; por ello, la variación de estos factores afecta directamente la resistencia de colapso de la tubería (Sterrett, 2007).

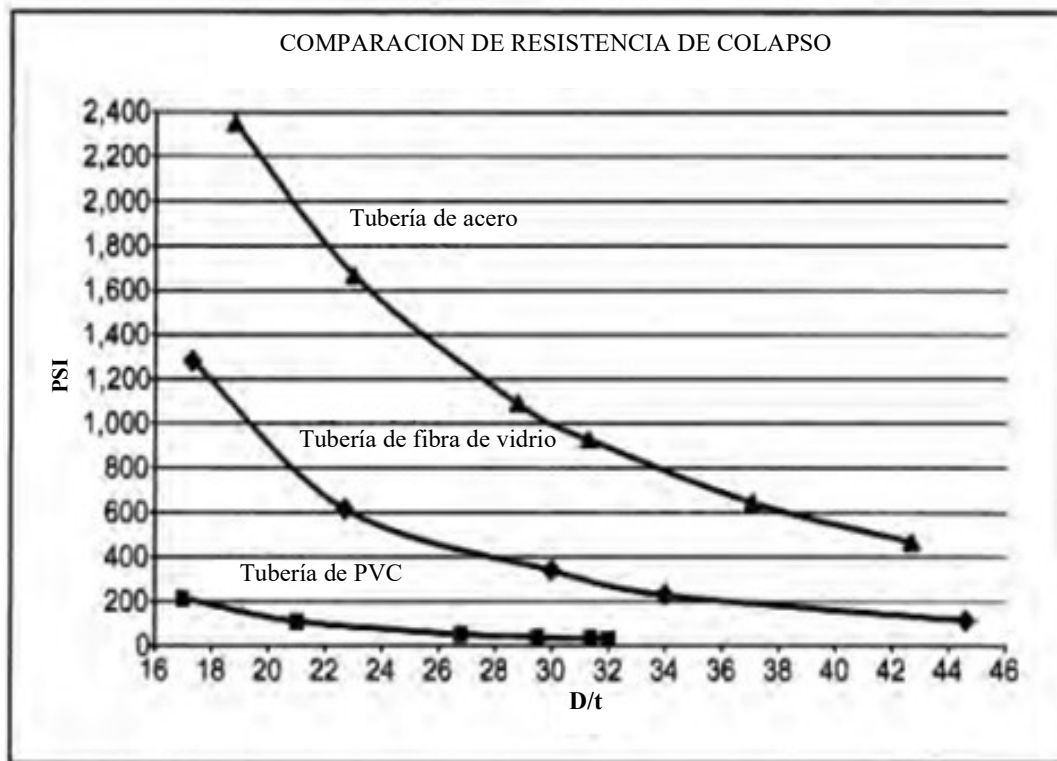


Figura 3. Valores comunes de colapso de tubos de acero versus relaciones D/t.
Tomado de Sterrett (2007)

Sterrett (2007) menciona que cuando la presión externa de la tubería excede la presión interna en una cantidad suficiente, la tubería colapsará. La presión hidráulica desbalanceada es la misma a través de la longitud de la tubería debajo del nivel de bombeo (Sterrett, 2007). Sin embargo, el colapso ocurrirá en o debajo del punto de máxima excentricidad (Roscoe Moss, 1990). Roscoe Moss (1990) indica que la tubería empezará a deformarse, en primer lugar, asumiendo una forma elíptica y luego se dobla sobre sí misma. El comienzo de la deformación arriba y debajo del punto donde comienza el colapso genera que la región colapsada se extienda continuamente (Sterrett, 2007). La falla que se propaga a lo largo de la tubería y puede ir de unas pocas decenas de pies a cien pies o más. Para una tubería de acero

los determinantes para la resistencia al colapso son el diámetro, espesor de pared y excentricidad (Roscoe Moss, 1990).

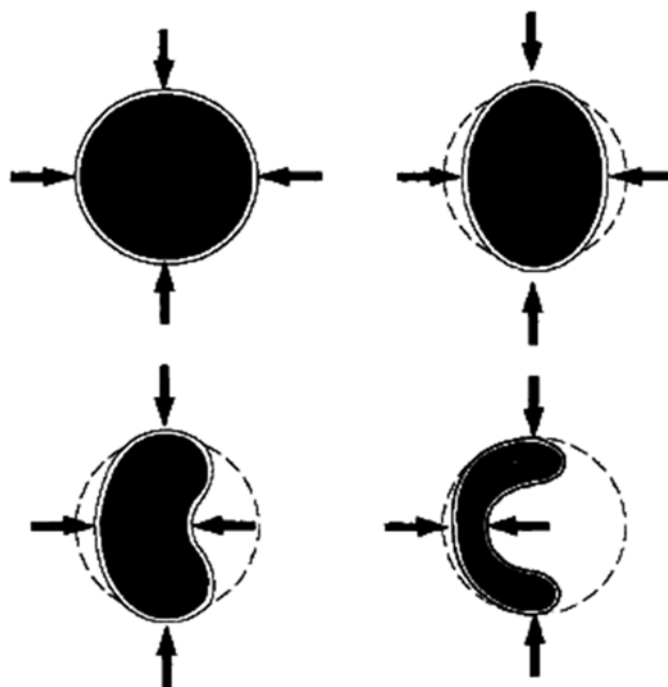


Figura 4. Falla por colapso de la carcasa.
Tomado de Roscoe Moss (1990)

Roscoe Moss (1990) menciona el método de Timoshenko, el cual utiliza la fuerza teórica del colapso elástico con ajuste por la excentricidad de la tubería. El ajuste es necesario porque una pequeña excentricidad puede reducir significativamente la resistencia de colapso de una tubería cilíndrica (Roscoe Moss, 1990). La presión teórica por colapso para un cilindro sin excentricidad y cuya longitud es más de ocho veces el diámetro está dada por la ecuación 17 (Sterrett, 2007).

$$P = \frac{2E}{(1 - \nu^2)\left(\frac{D}{t} - t\right)} \quad (17)$$

Dónde:

P=Presión crítica por colapso para un cilindro perfecto (Psi)

E=Módulo de Young (Psi), ver tabla 3

ν =Ratio de Poisson, ver Tabla 3

D= Diámetro externo de la tubería, (in)

t= Espesor de la tubería, (in)

Tabla 3. *Propiedades de Materiales de Pozo*

Propiedad		Acero Carbon	Acero Inoxidable	PVC	Fibra de vidrio
Gravedad Específica		7.8	8	1.4	1.9
Fluencia de material	Psi	35000	30000	7000	12000
	Mpa	240	210	50	80
Módulo de Young	Psi	30000000	28000000	400000	2000000
	Mpa	206900	193100	2800	13800
Ratio de Poisson		0.28	0.3	0.4	0.6

Nota. Tomado de Sterrett (2007).

Mientras que, para un cilindro con excentricidad, la ecuación de Timoshenko para la presión de colapso está dada por la ecuación cuadrática mostrada en la ecuación 18.

$$Pd^2 - \left\{ \frac{2Yp}{\frac{D}{t} - 1} + \left[1 + 3\left(\frac{D}{t} - 1\right)e \right] Pcr \right\} Pd + \frac{2Yp * Pr}{\frac{D}{t} - 1} = 0 \quad (18)$$

Dónde:

Pd= Presión de colapso de diseño (Psi).

Pcr= Presión crítica de colapso para un cilindro perfecto (Psi)

Yp=Fluencia de material (Psi), Ver tabla 3.

$e = \frac{DM}{Dm}$ = Excentricidad (Se asume 0.01 pero se considera 0.015 para algunos casos estándar).

(e.2) *Esfuerzo de tensión en la tubería.*

Las cargas de tensión impartidas en la tubería durante la instalación están dadas por el peso de la tubería y la grilla suspendida, además de las fuerzas de arrastre adicionales que podrían transferirse al conjunto de la cadena durante el empaquetado de grava (Sterrett, 2007). El peso de la pantalla puede ser calculado por la ecuación 19.

$$Wt = (k \cdot t \cdot (D - t)) \cdot L \quad (19)$$

Dónde:

Wt= Peso total de la pantalla (lb o kg)

t= Espesor de la tubería (in o cm)

D=Diámetro externo de la tubería (in o cm)

L=Longitud total de la tubería (ft o m)

k: Factor de material (Ver tabla 4)

Tabla 4. *Factor de material*

	LCS	SS	PVC	Fibra de Vidrio	Sistema
k	10.68	10.78	2.1	2.7	U.S
	0.229	0.231	0.15	0.62	SI

Nota. Tomado de Sterrett (2007)

Asimismo, la resistencia de tensión de la tubería está dada por la ecuación 20 (AWWA A100-97, 1997).

$$C_{ts} = \frac{\pi \cdot t \cdot St(D_o - t)}{2000} \quad (20)$$

Dónde:

Cts= Resistencia de tensión de la tubería (tons o kg)

Do= Diámetro externo de la tubería (in o mm)

St= Resistencia a la tensión del material (Ver tabla 3)

t=Espesor de la tubería (in o mm)

(e.3) Esfuerzos de compresión de la tubería.

Según Sterrett (2007), los esfuerzos de compresión en la tubería se dan debido a la formación geológica y la mala práctica de construcción. Los esfuerzos de compresión generan el pandeo de la tubería y el factor principal es el descanso de largas longitudes de la grilla en un agujero abierto sin soporte lateral (Sterrett, 2007). Como consecuencia a su área de sección transversal reducida, la pantalla del pozo tiene incluso menos resistencia al pandeo (Roscoe Moss, 1990).

La resistencia a compresión de la tubería es directamente proporcional a los esfuerzos del material usado en la fabricación. La resistencia a la compresión y tensión son suministrados

por el área transversal de la pared (Sterrett, 2007). Si la fuerza de compresión excede el límite elástico del material, la tubería se doblará y con ello presentará la falla por colapso. La resistencia a la compresión axial de la tubería se puede calcular utilizando la ecuación 21 (Sterrett, 2007).

$$C_{as} = \frac{\pi \cdot t \cdot S_{yp}(D_o - t)}{2000} \quad (21)$$

Dónde:

Cas= Resistencia a la compresión axial (ton or kg)

Syp=Esfuerzo de material (MPa)

Do= Diámetro exterior de tubería (mm)

t=Espesor de tubería (mm)

2.2.5.5. Diseño de filtro.

(a) Selección del material de filtro.

El diseño del filtro consta de la selección del material y tipo de filtro a elegirse de acuerdo a las características del acuífero o paquete de grava. El USDA (2010), manifiesta que la selección del material del filtro estará sujeta a la corrosión debido a que esta reduce su efectividad y eventualmente llegar a un punto de falla. Es por ello, que de este punto se base la elección del tipo de material del filtro a través de un análisis químico del agua subterránea (Sterrett, 2007). Según Roscoe Moss (1990), los materiales más utilizados en la elaboración de los filtros al igual que la tubería son acero inoxidable y acero carbono. El acero inoxidable es utilizado en aguas cuyo ph sea entre 5 y 8, mientras que el acero carbono el ph es entre 6 y 8 (Roscoe Moss, 1990).

Asimismo, Sterrett (2007) manifiesta que la selección del material del filtro depende de tres factores: área abierta, geometría de ranura y esfuerzos presentados en la grilla. En el caso de Perú, la norma considera que la selección del filtro debe estar establecido después del

conocimiento de las características litológicas del acuífero (espesor de las capas saturadas, presiones y productividad) (INACAL, 2017).

Finalmente, Roscoe Moss (1990) menciona que otra de las consideraciones para la selección del filtro son los esfuerzos requeridos. Sterrett (2007) precisa que las cargas que son ejercidas en el filtro son las cargas de compresión en la columna, carga de tracción y la presión de colapso (Ver Figura 5). La resistencia del filtro tanto a la compresión como a la tracción es directamente proporcional al límite elástico del material utilizado en la fabricación de la malla, mientras que la resistencia al colapso es proporcional al módulo de elasticidad del material (Sterrett, 2007).

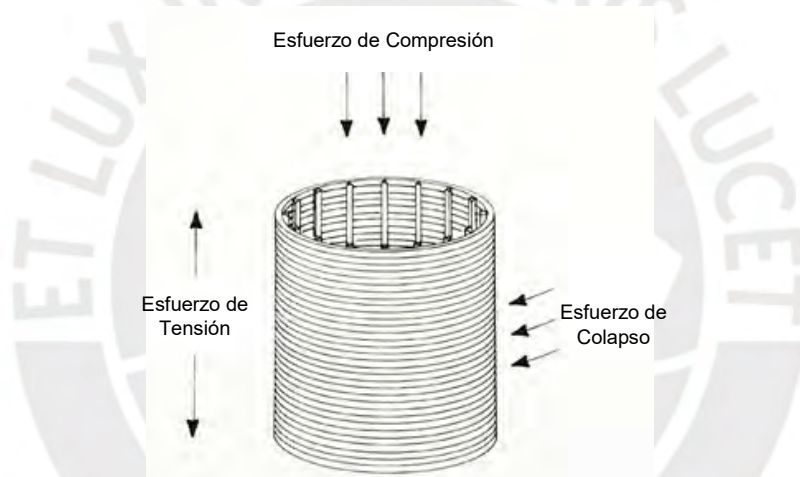


Figura 5. Esfuerzos ejercidos en el filtro.
Tomado de Sterrett (2007)

(b) Selección del tipo de filtro.

La colocación del filtro y selección de tipo de filtro se ven sujetas a los principios hidráulicos y granulometría de la envolvente de grava o acuífero (Roscoe Moss, 1990). Roscoe Moss (1990) manifiesta que para la selección del tipo de filtro se requiere hacer un análisis teórico de la longitud, el diámetro, el área de apertura y la velocidad de entrada.

Roscoe Moss (1990) menciona una variedad de filtros según el desarrollo del pozo. Los tipos de filtro para pozos con envoltura de grava son los siguientes:

- (1) Ranura de corte: Tiene una baja resistencia y su tamaño de abertura es muy pequeña, además por sus bordes irregulares, aberturas irregulares y debilidad tiene tendencia a obstruirse (Roscoe Moss, 1990).
- (2) Abertura Vertical Mecanizada: Utilizada en velocidades de producción bajas, son menos eficientes para estabilizar las partículas de la envoltura de grava; por ello, el tamaño de abertura deberá retener el 90% a 100% del material (Roscoe Moss, 1990).



Figura 6. Abertura Vertical Mecanizada
Tomado de Roscoe Moss (1990)

- (3) Abertura Horizontal Mecanizada: Este tipo de filtro es muy similar a la abertura vertical mecanizada; sin embargo, permite la estabilización de la envoltura de grava de manera más fácil (Roscoe Moss, 1990).
- (4) Abertura Puente: Posee una baja resistencia al colapso por sus ranuras alargadas, es utilizada en pozos con envoltura de grava debido a su gran tamaño de abertura. El tamaño de ranura del filtro deberá ser más pequeña en relación al material del paquete, su porcentaje de área abierta se encuentra en el rango de 5% a 10% (Roscoe Moss, 1990).



Figura 7. Abertura puente trapezoidal
Tomado de Roscoe Moss (1990)

- (5) Louver: Presenta una alta resistencia al colapso, manera segura de desarrollo y construcción. Fabricada para uso de pozos con envoltura de grava, presenta una variedad de patrones con diversos porcentajes de área abierta (Roscoe Moss, 1990).

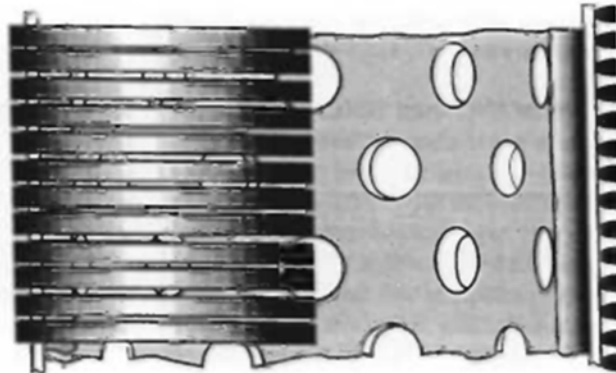


Figura 8. Filtro Louver
Tomado de Roscoe Moss (1990)

(c) Tamaño de abertura.

De acuerdo al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (2010), el indicador para la selección del tamaño de abertura del filtro es el coeficiente de uniformidad (Cu). El coeficiente de uniformidad es el ratio del 60% del material fino entre el 10% del material fino y es determinado por el análisis de tamiz.

El tamaño de la ranura del filtro dependerá de la aplicación ya sea en envoltura de grava o en pozos desarrollados naturalmente. El tamaño de abertura en envoltura de grava se recomienda que sólo el 10% a 20% del material ingrese al pozo (Roscoe Moss, 1990).

Asimismo, AWWA (1997) considera que las aberturas deben ser dimensionadas para retener por lo menos el 85% del material del paquete de grava. Asimismo, el diseño de abertura se complementa con un buen desarrollo del paquete de grava para lograr una producción óptima (USDA, 2010).

Michael et al. (2013) refiere que un sobredimensionamiento de las aberturas genera problemas de arrastre de finos indefinidamente y resulta difícil obtener agua potable. Del mismo modo, si se subdimensiona se obtendrá mayor resistencia al flujo y, por lo tanto, pérdidas de carga y corrosión en la zona (Michael et al., 2013). Generalmente, las aberturas varían entre 0.2 mm y 5 mm y deben ser posteriormente comparadas con la granulometría del acuífero (Michael et al., 2013).

(d) Porcentaje de área abierta.

El flujo del agua y su velocidad de ingreso al filtro dependerá del porcentaje de área abierta. Por ello, Roscoe Moss (1990) indica que el área de abertura debe estar entre el 3% y 5% para así alcanzar el rango de velocidad de 61 a 122 centímetros por segundo (2 a 4 ft/s). La determinación del porcentaje de área abierta dependerá del tipo de filtro, tamaño y ancho de ranura, para pozos desarrollados naturalmente el porcentaje de área se puede determinar mediante la ecuación 22, mientras que para pozos con envoltura de grava se emplea la ecuación 23 (Roscoe Moss, 1990). Sterrett (2007) maneja un cuadro con el porcentaje de área abierta según el diámetro de filtro y tipo de filtro como se indica en la Tabla 5.

$$OA\% = \left(\frac{s}{s + w} \right) \times 100 \quad (22)$$

Dónde:

s = tamaño de ranura (mm)

w = ancho de cara de envoltura de alambre (mm)

$$OA\% = \frac{w \cdot n \cdot sl}{kD} * 100 \quad (23)$$

Dónde:

sl = longitud de ranura (mm)

w = tamaño de ranura (mm)

n = número de ranuras por longitud

D = Diámetro exterior de filtro (mm)

k = constante, (37.7 sistema U.S, 957.5 sistema SI)

Tabla 5. Área abierta de filtros

Diámetro de Filtro		Tamaño de Ranura N°	Tamaño de Ranura mm	Ranura Continua %	Louvered %	Ranura Tipo Puente
in	cm					
4	10.16	20	0.5	25		
		60	1.5	52		12
8	20.3	30	0.75	25		
		60	1.5	41	3	6
		95		51	5	
12	30.48	30	0.75	16		3
		60	1.5	28	4	7
		95	2.75	38	7	
		125	4.25	45	9	14
16	40.64	30	0.75	16		3
		60	1.5	28	4	6
		95	2.75	38	6	
		125	4.25	45	8	13

Nota. Tomado de Sterrett (2007)

Por otro lado, el USDA (2010) y la Asociación Americana de Obras Hidráulicas (AWWA) (1997) coinciden en que el porcentaje de área abierta deberá garantizar que la velocidad no exceda a 3.05 centímetros por segundo (0.1 ft/s). A través de esta velocidad se garantiza un flujo laminar para evitar las pérdidas de fricción al interior del filtro, el cálculo de la velocidad es determinada mediante la ecuación 24 (Sterrett, 2007).

$$V = \frac{Q}{235rbP} \quad (24)$$

Donde:

V= velocidad de entrada de filtro (ft/sec)

Q= Caudal (gpm)

r= radio de filtro (in)

b= longitud de filtro (ft)

P= porcentaje de área abierta de filtro

(e) Ubicación del filtro.

Para acuíferos libres y homogéneos, se puede colocar filtros en la tercera parte inferior del acuífero o de acuerdo con las condiciones locales puede ir hasta la mitad del acuífero para obtener mayor capacidad de producción (Michael et al., 2013). En el caso que el material del acuífero sea heterogéneo, el Army Corps of Engineers (2012) menciona que se coloque el filtro en las zonas más permeables para ello se deberá tener en cuenta la litología del acuífero.

(f) Longitud del filtro.

La condición de longitud mínima requiere considerar el valor de la velocidad de ingreso por las aberturas, menor al permisible (Michael et al., 2013). A veces, cumplir esta condición, reduce la descarga. Asimismo, Army Corps of Engineers (2012) resalta que influye también el espesor del acuífero, sus características y el abatimiento para dimensionar la longitud del filtro. De acuerdo con AWWA (1997), esta longitud, puede ser determinada con la fórmula mencionada en la ecuación 25.

$$L = \frac{Q}{7.48AeVe} \quad (25)$$

Donde:

L= longitud de filtro (in, ft)

Q= caudal (gpm)

Ae= Área abierta efectiva por pie de filtro

Ve= velocidad de entrada (ft/m)

(g) Diseño por esfuerzos.

(g1) Esfuerzo de colapso en el filtro.

Así como la tubería experimenta esfuerzos de colapso, el filtro presenta esfuerzos importantes que están determinados por su diámetro, espesor de pared y tamaño de ranura (Sterrett, 2007).

En el caso de la grilla de envoltura de alambre (Wire Wrap Screen), el cálculo de la resistencia al colapso se puede realizar suponiendo que las varillas longitudinales proporcionan una resistencia al colapso muy pequeña y que toda la carga de colapso es transportada por el alambre enrollado y soldado a las varillas (Roscoe Moss, 1990). La resistencia al colapso para esta grilla es determinada por el módulo de elasticidad del material, momento de inercia de la envoltura, diámetro y tamaño de la ranura (Sterrett, 2007). El momento de inercia está en función de la altura del alambre, ecuación 26 y el esfuerzo al colapso en relación al momento como se indica en la ecuación 27.

$$I = \frac{W \cdot T^3}{12} \quad (26)$$

Dónde:

T= espesor de pared (in o mm)

W= longitud de pared (ft o cm)

$$Clp = \frac{24 \cdot E \cdot I}{(1 - u^2) \cdot (w + s) \cdot D^3} \quad (27)$$

Dónde:

Clp= Resistencia a colapso (Psi o kPa)

E= Módulo de Young (psi)

I= Momento de inercia (in⁴ o mm⁴)

u = Ratio de poisson

w= Ancho de cara de alambre

s= Ancho de ranura (in o mm)

D= Diámetro externo de filtro (in o mm)

Según lo mencionado por Sterrett (2007), la grilla tipo Louvered presenta ranuras en formas de persianas horizontales, las cuales son lo suficientemente densas en la dirección vertical brindando mayor resistencia al colapso. La grilla Louvered es 60% más resistente en configuraciones que brindan una mayor cantidad de apertura por unidad de superficie (Roscoe Moss, 1990). La resistencia a colapso de la grilla tipo Louvered puede calcularse a través de la fórmula de Timoshenko al igual que la tubería (ecuación 17 y 18) (Sterrett, 2007).

Por otro lado, Roscoe Moss (1990) menciona que la grilla de tubería perforada presenta una baja resistencia al colapso debido a sus ranuras verticales, las cuales son relativamente largas. Por ello, las ranuras con orientación horizontal son más resistentes al colapso que las de orientación vertical (Roscoe Moss, 1990).

(g2) Esfuerzo de tensión en el filtro.

Según Sterrett (2007), la resistencia a la tracción mínima del filtro o grilla debe acomodar las cargas de material presentadas durante el desarrollo. Generalmente, la grilla se coloca en la capa permeable del acuífero, por ello en los estratos donde no presentan una alta permeabilidad se coloca tubería ciega (Roscoe Moss, 1990).

En caso de grillas basadas en varillas, la resistencia a la tracción se determina utilizando el área de la sección transversal de las varillas longitudinales como se indica en la ecuación 28, en unidades inglesas (Sterrett, 2007).

$$T_s = (0.7854 \cdot d_r^2) \cdot N_f \cdot Y \cdot E_w \quad (28)$$

Donde:

T_s = Esfuerzo de tensión de filtro (lb o kg)

d_r =: Diámetro de varilla de soporte (in o mm)

N_f = Numero de varilla de soporte

Y = Fuerza de fluencia de material

E_y = Factor de seguridad (85%)

Por otro lado, la resistencia a tracción en la grilla tipo Louver y ranura puente está dada en función de la sección transversal no perforada, como se indica en la ecuación 29 (Sterrett, 2007).

$$T = \left(\frac{\pi \cdot (D - t) - (l \cdot n)}{\pi \cdot (D - t)} \right) \cdot t \cdot Y \cdot \pi(D - t) \quad (29)$$

Dónde:

T= Esfuerzo de tensión (lb o kg)

D=Diametro externo (in o cm)

t= Espesor de pared (in o cm)

l=Longitud de abertura (in o cm)

n=Número de ranuras por hilera

Los fabricantes generalmente usan el término de “peso seguro para colgar” como el peso recomendado para suspender y este valor es determinado por el producto del esfuerzo a tensión por el factor de seguridad (Sterrett, 2007). El factor de seguridad recomendado para el esfuerzo a tracción en la grilla es igual a 2.0 (Roscoe Moss, 1990).

2.2.5.6. Diseño de envoltura de grava.

La envoltura de grava se divide en dos tipos (a) Estabilizador de formación y (b) Paquete de filtro, el empleo de ellas dependerá de la función que vaya a realizar y del material de formación del acuífero (Roscoe Moss, 1990).

- (1) Estabilizador de formación: Su función es rellenar el espacio anular entre la perforación y la tubería en formaciones inestables como prevención a los desprendimientos (Roscoe Moss, 1990).
- (2) Paquete de filtro: Si las características del acuífero indican que se producirán arenas durante el proceso de descarga entonces en ella se buscará seleccionar

la grava de tal forma que contenga permita el mínimo ingreso al pozo (Roscoe Moss, 1990).

(a) Criterios de diseño.

Roscoe Moss (1990) menciona en el capítulo de diseño de envoltura de grava la solución encontrada por Terzhagi (1996) en el problema de las cavidades en presas de tierra creadas por filtración y que lavaban las partículas más finas.

La solución de Terzhagi (1996), como se indica en la ecuación 30, fue colocar en la base de la presa un lecho filtrante granular de tal forma que retenía los finos mientras pasaba la filtración, debido al mismo comportamiento de la grava en los pozos, este criterio es empleado en el diseño de envoltura.

$$\frac{d_{15}(\text{filtro})}{d_{85}(\text{formación})} < 4 < \frac{d_{15}(\text{filtro})}{d_{15}(\text{formación})} \quad (30)$$

Este criterio fue basado en dos principios: (a) la característica del tamaño de la partícula del filtro, el cual debe exceder al tamaño de formación para prever un incremento significativo en la permeabilidad del filtro y (b) la relación entre el tamaño de filtro y el tamaño característico del segmento más fino de la formación, si el tamaño del ratio es muy largo algunas partículas migrarán al paquete (Roscoe Moss, 1990).

Roscoe Moss (1990) también indica que el criterio de tamaño máximo del material propuesto por Terzhagi (1996) ha presentado ciertas modificaciones por algunos investigadores como Halliburton y Sawaro. Los autores mencionados anteriormente han sugerido un criterio estándar del máximo tamaño del material pequeño del filtro $d_{10-15}(\text{filtro})/d_{50}(\text{formación})$, el cual indica que el ratio utilizado es de 4 a 5. Este criterio mantiene la relación del d_{15} que menciona Terzhagi (1996), pero es más rigurosa.

Otra modificación empleada a la solución de Terzhagi (1996) indica la consideración de un rango más amplio del ratio entre 4 a 58 pero la más consistente es de 5 a 6 (Smith,

1954). Si bien existen modificaciones a la solución planteada por Terzhagi (1996) ningún criterio indica una gradación completa del paquete de grava (Roscoe Moss, 1990).

(b) Diseño.

Sterrett (2007) establece pasos para el diseño de la envoltura de grava, los cuales se presentan a continuación:

- "...Escoger las capas a ser filtradas y construir los análisis de tamices para las formaciones.
- Basar la gradación del paquete de filtro en los análisis de la capa compuesta por material fino.
- Multiplica el 70% de tamaño de sedimento retenido por un factor de 3 a 8. Es factor dependerá del tipo de formación.
 - (a) Para arenas no consolidadas usar un factor entre 4 a 6.
 - (b) Si la formación es uniforme y el 40% de tamaño retenido es 0.01 pulgadas usar un factor entre 3 a 6.
 - (c) Si es acuífero es semi consolidado no consolidado con presencia de arcillas y limos, el factor a emplear es de 6 a 8.
 - (d) Si durante el proceso de bombeo se produjeran arenas se deberá considerar un factor de 8 a más.
- Ubicar el valor obtenido en la granulometría, ya que será el primer punto de la granulometría que debe cumplir el paquete de grava.
- A través del punto inicial se procede a dibujar las curvas granulométricas representativas del material con un coeficiente de uniformidad de aproximadamente 2.5 o menos.
- Escoger un paquete de filtro comercial que cumpla con las dimensiones y requerimientos químicos.

- Como último punto, seleccionar el tamaño de ranura que retenga el 90% a más del paquete de grava...”.

Los pasos de diseño propuestos por Sterrett (2007) y mencionados anteriormente, se cumplirán únicamente con la granulometría del material del acuífero, debido a que a través de este se proyectará la gradación que deberá cumplir el paquete de grava. Sin embargo, obtener muestras inalteradas del acuífero durante la perforación de un pozo de observación resulta poco probable. Por ello, Roscoe Moss (1990) propone gradaciones típicas y comerciales de grava, Grava A y Grava B como se observa en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Grava A

Número de tamiz	3	4	8	16	20
Inches		0.187	0.093	0.047	0.0328
Porcentaje que pasa (%)	100	85-95	25-35	5-20	2-10

Nota. Tomado de Roscoe Moss (1990)

Tabla 7. Grava B

Número de tamiz	4	6	8	12	16
Inches	0.187	0.130	0.093	0.0068	0.047
Porcentaje que pasa (%)	100	95-100	70-80	15-25	0-5

Nota. Tomado de Roscoe Moss (1990)

Las gradaciones mencionadas en Roscoe Moss (1990) se obtuvieron de pozos perforados y en funcionamiento, cuya gradación se observa en las curvas 3 y 4 de la imagen 9. La gradación 3 fue filtrada bajo una abertura de 1/16 inches y con capacidad de hasta 126 litros por segundo (Roscoe Moss, 1990). Por otro lado, la gradación 4 es de una formación con menor conductividad hidráulica y con una capacidad de 50 litros por segundo, el paquete de grava utilizado fue el tipo B y filtrada bajo la misma abertura de la gradación 3 (Roscoe Moss, 1990).

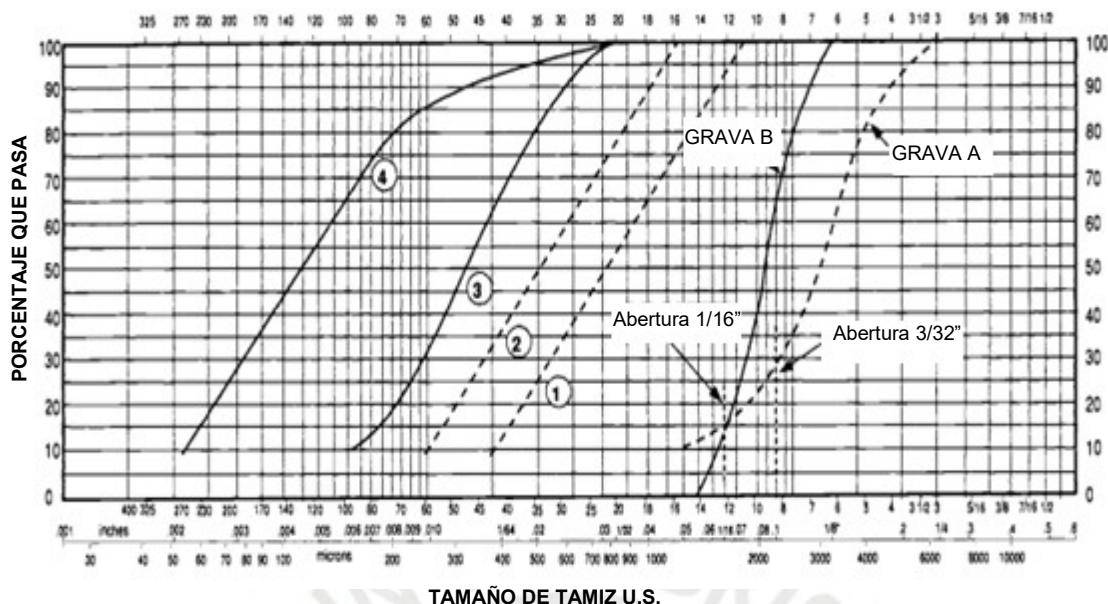


Figura 9. Formación estabilizadora, paquete de grava y granulometría de formación.
Tomado de Roscoe Moss (1990)

(c) Dimensiones.

Un tamaño específico de envoltura de grava es elegido para retener la mayor cantidad de partículas de formación (Sterrett, 2007). Existen infinitos números de posibles gradaciones de acuíferos e infinitos números de gradaciones de envolturas de gravas; sin embargo, el propósito principal de la envoltura es estabilizar la formación sin obstruir (Roscoe Moss, 1990).

Roscoe Moss (1990) manifiesta que la necesidad de la envoltura de grava dependerá de las características de formación del acuífero. Si el 90% del acuífero es más grueso que 0.01 pulgadas y tiene un coeficiente de uniformidad mayor a 2, la envoltura de grava no será necesaria (Sterrett, 2007).

Cuando el acuífero es sostenible para el desarrollo natural, la envoltura de grava es empleada para formar una estabilización (Sterrett, 2007). El material típico utilizado cumple con las características mencionadas en la granulometría de la Grava A, mencionada en la tabla 6 y una abertura de filtro entre 3/32 a 1/18 pulgadas (Roscoe Moss, 1990).

Roscoe Moss (1990) indica que, si el acuífero no cumple con el criterio de desarrollo natural, la selección del paquete de filtro puede ser derivada de las muestras de perforación y en algunos casos de un análisis de producción de arena en los pozos cercanos. Una gradación de envoltura típicamente utilizada en formaciones aluviales y con abertura de filtro de 1/16 pulgadas es la Grava B mencionada en la tabla 7 (Roscoe Moss, 1990).

(d) Materiales.

El material más sostenible es la roca silícea redondeada, limpia y libre de limos, arcillas y material orgánico (Sterrett, 2007). Se prefiere el material liso y bien redondeado en lugar de angulares principalmente porque se cree que es menos probable que produzca desechos finos durante su transporte (Roscoe Moss, 1990). Las características del material de la envoltura de grava brindarán ventajas, como se indican en la tabla 8, pero principalmente esta deberá garantizar una buena porosidad y conductividad hidráulica, generalmente la conductividad hidráulica de la envoltura es mayor a la de la formación porque la distribución es uniforme (Sterrett, 2007).

El AWWA (2006) establece un coeficiente de uniformidad estándar para la envoltura de grava, el cual no debe exceder a 2.5. Por ello, el paquete de grava más comercial tiene un coeficiente de uniformidad igual a 2.5, el coeficiente de uniformidad definida como el 40% del tamaño de sedimento retenido dividido por el 90% del tamaño retenido (Sterrett, 2007). Otras sugerencias indican emplear una grava uniforme, el cual tiene una relación de partículas más grandes a más pequeñas igual a 2 (Roscoe Moss, 1990).

Tabla 8. *Características del material de la envoltura de grava.*

Características	Ventajas
Limpio	Bajas pérdidas de material durante el desarrollo. Menor tiempo de desarrollo.
Granos bien redondeados	Gran conductividad hidráulica y porosidad. Abatimiento reducido. Mayor rendimiento. Desarrollo más efectivo.
90% a 95% granos de cuarzo	Sin pérdida de volumen causado por disolución de

	minerales.
Coefficiente de Uniformidad de 2.5 o menos	Menor separación durante la instalación. Menor pérdida de carga mediante paquete de filtro.

Nota. Tomado de (Sterrett, 2007)

2.2.5.7. Diseño de sello anular.

Tiene la finalidad de proteger el acuífero y prevenir la contaminación del pozo (NGWA, 1998). Según menciona NGWA (1998), existen diversos métodos de colocación de sellos con ventajas y desventajas según condiciones locales. Generalmente la conforman dos capas bajo la superficie y una losa de concreto sobre el terreno natural.

- Sello de bentonita: Se debe ubicar en el espacio anular sobre la empaquetadura de grava. Como mínimo espesor se puede considerar 3 metros. (Army Corpsof Engineers, 2012).
- Grout: Se coloca sobre el sello bentonítico y debe tener por lo menos 2 metros de espesor. El grout es una mezcla de agua, cemento y bentonita con la siguiente dosificación: 6,6:1:0,4 (Army Corpsof Engineers, 2012).
- Losa de concreto: Los alrededores del pozo deben ser cubiertos en por lo menos 60 cm a cada lado, debe tener una caída que permita la evacuación de agua en sentido contrario al pozo. (Michael et al., 2013).

2.2.5.8. Verticalidad y alineamiento del pozo.

Los pozos deberían ser verticales y alineados en toda su longitud; aunque ningún pozo lo es completamente (Sterrett, 2007). Es por ello, que se establecen límites permisibles para ambos parámetros. AWWA (2006) establece que para la verticalidad se debe considerar $\frac{2}{3}$ del diámetro interno más pequeño por cada 30,5m (100 ft). Considerar de acuerdo con Sterrett (2007) este límite para tuberías con diámetros mayores de 12" (30,5cm), puesto que, para tuberías de menor diámetro, resultaría muy riguroso.

En cuanto al alineamiento, AWWA (2006) establece tres criterios: (a) 40ft (12m) de tubería no será mayor a 0.5" (12 mm) más pequeño que el diámetro interno de la tubería, (b)

40ft (12m) dummy assembly (3 rings); each end and middle, 12" wide), (c) Diferencia entre la línea central (surveyed) y la línea central de la bomba que será propuesta no mayor que 1/2 diferencia entre diámetro interno del pozo y máximo del diámetro externo de la bomba que será propuesta.

2.2.5.9. Evaluación del pozo y del acuífero con pruebas de bombeo.

Las pruebas de bombeo permiten obtener información de las propiedades del acuífero como la transmisividad y coeficiente de almacenamiento (Roscoe Moss, 1990). Además, permite conocer el impacto de las capas del acuífero en la producción del pozo. Los resultados de las pruebas del acuífero logran obtener información que serán utilizadas para los cálculos del abatimiento del área de trabajo (Sterrett, 2007).

La variación del nivel estático del agua se conoce como “abatimiento”, la mayor reducción se produce en el pozo de bombeo y se disipa a medida que se aumenta la distancia del pozo (Roscoe Moss, 1990). En condiciones ideales, la distribución de la extracción alrededor del pozo de bombeo asume una forma cónica, la cual es denominada “cono de depresión”, como se puede apreciar en la figura 10 (Sterrett, 2007).

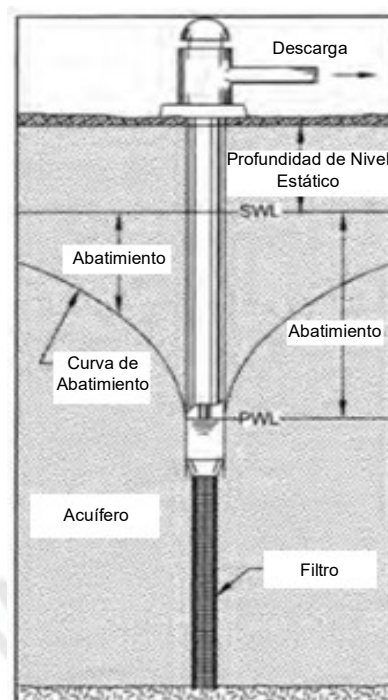


Figura 10. Cono de depresión en acuífero no confinado.
Tomado por Sterrett (2007)

Existen diversas pruebas de bombeo que pueden ser empleadas en la determinación de las propiedades de los acuíferos como: la duración de la prueba e intervalo de tiempo, la tasa de descarga de la bomba y la medición del nivel de agua (Roscoe Moss, 1990).

Roscoe Moss (1990) menciona que la prueba de duración e intervalo de tiempo mide el abatimiento por intervalos de tiempo, ya que a medida que el bombeo continúa, el acuífero agota su capacidad de almacenamiento. Para esta prueba se cuenta con un rango de intervalos de tiempo para la medición de pozos bombeados o pozos cercanos de observación (ver tabla 9) (Roscoe Moss, 1990).

Tabla 9. Intervalos de tiempo para la medición de bombeo en pozos.

Tiempo desde el Inicio de Bombeo hasta su término	Intervalo de Tiempo (min)
0-5 min	1
5-60	5
60-120	15
120-6hr	60
6hr-fin de prueba	120

Nota. Tomado de Roscoe Moss (1990).

En Perú, la Norma de Construcción de Pozo Tubular para captación de agua subterránea NTP 360.101 indica que todo pozo tubular debe proceder con el ensayo de caudal

variable para la determinación del rendimiento del pozo y la relación entre caudal, nivel dinámico, acarreo de finos y algunos parámetros físico-químicos. Además, la norma establece la frecuencia de mediciones de los niveles de agua durante la prueba de bombeo, ver tabla 10.

Tabla 10. Frecuencia de medición de los niveles de agua.

Periodo (min)	Intervalo de lectura (min)
0-10	1
10-20	2
20-60	5
60-120	10

Nota. Tomado de Roscoe Moss (1990).

La prueba de tasa de descarga regula la velocidad de descarga para garantizar la consistencia del bombeo, cuando el ajuste es necesario se realiza con mayor precisión a través de una válvula de compuerta en la tubería de descarga en lugar de cambiar la velocidad (Roscoe Moss, 1990). Existen diferentes dispositivos de medición para esta prueba, pero los más comunes son el medidor de hélice y el vertedero de orificio circular (Ver figura 11).

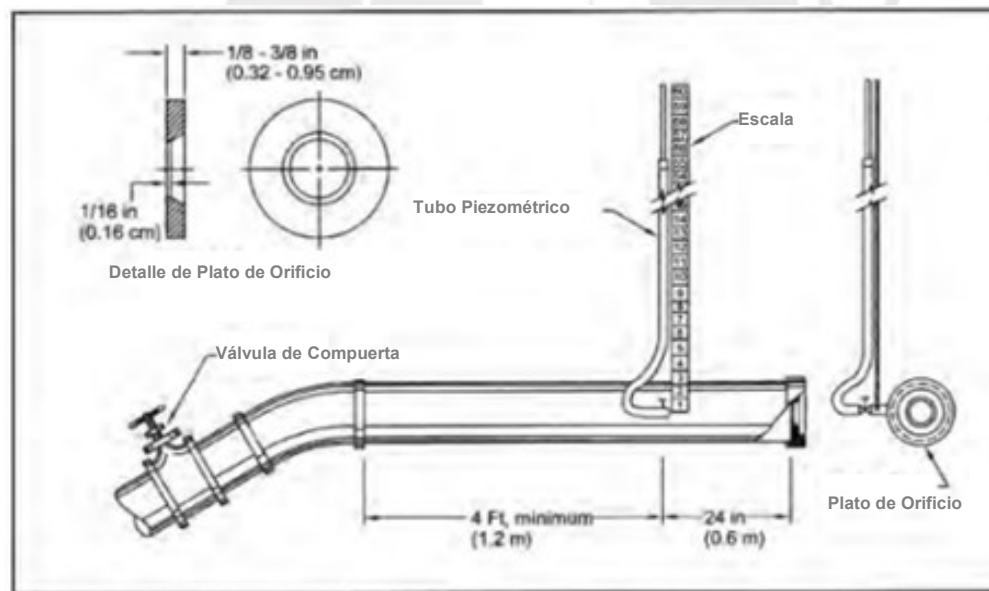


Figura 11. Dispositivos de medición de descarga.
Tomado de Roscoe Moss, 1990

Según Sterret (2007), el vertedero de orificio circular es un dispositivo comúnmente utilizado para medir la velocidad de descarga de una bomba de alta capacidad. Por otro lado, el medidor de hélice se coloca en una sección recta de la tubería de descarga y tiene diales

para la lectura directa de la descarga y la cantidad acumulada bombeada (Roscoe Moss, 1990).

Sterret (2007) menciona que en las pruebas de medición de nivel de agua, la precisión depende principalmente del dispositivo de medición, pero a veces la técnica y las condiciones de prueba son factores de control, particularmente en los pozos de bombeo. La precisión de las mediciones de profundidad al nivel de agua durante una prueba de bombeo debe estar dentro de 0.05 pies en pozos de observación y 0.1 pies en el pozo de bombeo (Roscoe Moss, 1990).

Roscoe Moss (1990) manifiesta que un método simple y confiable para medir la profundidad del agua en los pozos de observación es mediante el uso de una cinta de acero común con marcas en décimas y centésimas de pie (Ver figura 12). Esta prueba mide la profundidad del agua bajando la cinta a un nivel predeterminado y manteniendo una marca de pie uniforme en el punto de referencia de la superficie. Sin embargo, este método es poco usado debido a los niveles fluctuantes del agua (Roscoe Moss, 1990).

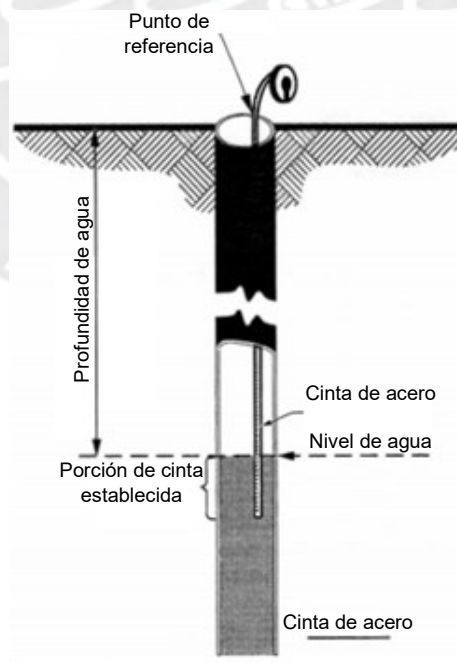


Figura 12. Prueba de medición de agua a través de cinta de acero.
Tomado de Roscoe Moss (1990)

Un refinamiento del método de medición de acero es el uso de cable eléctrico de dos conductores (ver figura 13), con un cable de soporte interno para evitar el estiramiento.

Cuando se contacta, el agua en el pozo completa un circuito eléctrico, incorporando una campana, una luz o un medidor en serie con una batería. El cable generalmente se calibra a intervalos regulares (generalmente cada 5 pies) para que se encuentre la profundidad real al agua midiendo y agregando la longitud desde el punto de referencia de la superficie hasta el marcador de calibración más alto en el pozo (Roscoe Moss, 1990).

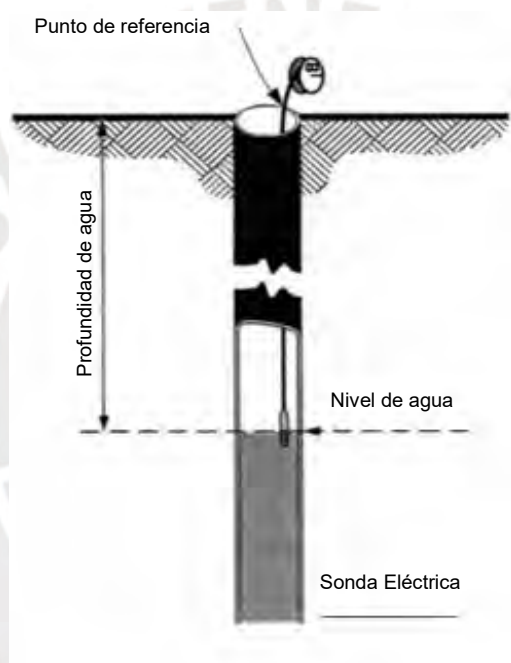


Figura 13. Prueba de medición de agua a través de cable eléctrico.
Tomado de Roscoe Moss (1990)

(a) *Método de tipo de curva Theis.*

Sterrett (2007) precisa que uno de los métodos usados para el cálculo de los parámetros del acuífero es Theis, el cual permite calcular la transmisividad y coeficiente de almacenamiento a través de procedimientos gráficos. El método considera supuestos básicos, además que el acuífero sea confinado y el flujo no estable.

“...Los supuestos básicos son:

- (1) El material del acuífero consiste en un medio poroso de flujo laminar obedeciendo a la Ley de Darcy.
- (2) El acuífero es considerado homogéneo, isotrópico, de área infinita y de espesor constante sobre el área influenciada por la prueba de bombeo.
- (3) A menos que se tenga en cuenta lo contrario, el agua se libera (o se agrega) al almacenamiento interno del acuífero instantáneamente al cambia el nivel agua.
- (4) El almacenamiento del pozo se asume insignificante.
- (5) El pozo de bombeo penetra todo el acuífero y recibe agua del espesor mediante un flujo horizontal.
- (6) La capa freática se asume plana durante el test, además no se consideran recargas que afecten la prueba.
- (7) La tasa de bombeo se considera constante durante toda la prueba de bombeo en todo tipo de prueba.
- (8) Las mediciones de tiempo se refieren al inicio del bombeo para las pruebas de reducción y al final del bombeo para las pruebas de recuperación.
- (9) Los niveles de agua medidos en los pozos de observación reflejan las mismas condiciones hidráulicas encontradas en el pozo de bombeo.
- (10) Las fluctuaciones del nivel del agua causadas por la interferencia de los pozos cercanos u otras causas se consideran insignificantes durante la duración de la prueba...”.

El método implica hacer coincidir los datos de campo con una curva de tipo calculada a partir de la ecuación de Theis según las ecuaciones 12 y 13 mencionadas anteriormente (Sterret, 2007). El abatimiento se encuentra establecido en relación al caudal y la función de pozo de Theis (Roscoe Moss, 1990).

2.2.5.10. Calidad de agua y contaminación.

Los parámetros de calidad del agua en los pozos permiten diagnosticar el daño físico, químico y los procesos microbiológicos que afectan el desempeño del sistema de los pozos (Misstear et al., 2017). Para el estudio de calidad de agua se requiere que la muestra sea in situ, es decir que el agua corresponda al acuífero y no de un pozo almacenado, por ello para poder diferenciarlos se mide la temperatura del agua (Martínez et al, 2005). Los parámetros químicos clave a monitorear incluyen pH, CE, Eh, hierro (Fe^{2+}) y los gases de dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno y oxígeno disuelto (Misstear et al., 2017). Las variables máster como el pH permite medir la acidez de la solución mientras que el pE permite medir la oxidación de la solución.

Las principales características físico-química que se determinan en el análisis de calidad son la conductividad eléctrica, alcalinidad, alcalinidad TAC, alcalinidad TA, total de sustancias disueltas (TSD), temperatura, ph y dureza (Martínez et al, 2005).

Por otro lado, tanto el agua superficial, como el agua subterránea están sujetas a contaminación, pero hay una importante distinción entre ambas. La contaminación de la superficie puede ser transitoria por días o semanas; mientras que la contaminación del agua subterránea puede persistir por décadas o centenarios (Roscoe Moss, 1990). Los focos de contaminación son los lugares en donde el producto contaminante se vierte en los acuíferos, la caracterización de los focos exige conocer su situación geográfica, delimitación de espacio, tipo y características de contaminante (Martínez et al, 2005).

2.2.5.11. Corrosión e incrustación.

(a) Corrosión.

Es el deterioro de las estructuras metálicas en contacto con el agua, usualmente, con pérdida de metal en solución (AWWA Manuals, 2003). De acuerdo con Roscoe Moss (1990)

la corrosión ocurre en cuatro diferentes zonas: (a) parte externa de la tubería y la pantalla, la que se encuentra en contacto con los estratos y el paquete de grava, (b) la superficie interna sobre el nivel estático, (c) la superficie interior entre el nivel estático y el nivel de bombeo (splash zone) y (d) la superficie interior debajo del nivel de bombeo. Según menciona Roscoe Moss (1990), la zona conocida como splash zone es la que se encuentra más propensa a ser corroída, seguida de la zona que se encuentra debajo del nivel de bombeo.

La corrosión puede limitar severamente el tiempo de vida útil del pozo. A continuación, se resumen tres de los aspectos que describe Michael et al. (2013):

- (1) Las aberturas de los filtros aumentarán su tamaño, lo que resulta en la pérdida de metal y el bombeo de arenas. Esto conduce al ingreso de arenas y gravas que podrían bloquear el pozo.
- (2) La resistencia del filtro y la tubería se reducirán, lo que podría resultar en su colapso.
- (3) Los componentes de la bomba serán corroídos, resultando en el daño del filtro.

(b) Incrustación.

Este fenómeno es uno de los problemas más comunes en los pozos relacionado directamente con la mala calidad del agua, más que con el material de la tubería. (Michael et al., 2013). El bloqueo producto de la incrustación genera que se reduzca la producción del pozo que se diseña (Roscoe Moss, 1990). A continuación, se citarán los principales procesos y agentes que causan la incrustación de acuerdo con Michael et al. (2013):

- (1) Precipitación del material contenido en el agua subterránea y transportado dentro del filtro en solución. La precipitación de sales también puede resultar del descenso de la presión en las proximidades del pozo y exposición del filtro al aire.
- (2) Deposición de material suspendido como limos y arcillas en el filtro.

- (3) Presencia de la bacteria del hierro en el agua subterránea. Las ranuras de los filtros y los espacios en la formación se sellan con una sustancia coloidal que se vuelve dura en exposición al aire.
- (4) Presencia de limos formando organismos distintos a los de la bacteria del hierro. Estos organismos se alimentan de amoníaco y materia orgánica muerta o en descomposición.

Capítulo 3: Estudio de Caso

3.1. Características Locales

3.1.1. Ubicación geográfica.

El anexo de Azapampa pertenece al distrito de Chilca, provincia de Huancayo, Región de Junín. Se encuentra a ocho horas de viaje desde Lima, 310 km, aproximadamente, mediante la carretera central. Este anexo está ubicado al sur de la ciudad de Huancayo a 3260 msnm. El pozo que será objeto de estudio está ubicado a una altitud promedio de 3266 metros sobre el nivel del mar, cuyas coordenadas UTM son: 478560.00mE, 8663740.00mS tal como se muestra en el Anexo A (Sedam, 2006). Asimismo, dentro de las 14 unidades hidrográficas del AAA Mantaro, se encuentra ubicado en la Unidad Alto Medio Mantaro (ANA, 2016).

3.1.2. Clima.

El clima es de tipo semiseco, templado y húmedo durante todo el año (Senamhi, 2022). En los meses de mayo a octubre ocurren fuertes heladas y en los meses de noviembre a abril, hay un régimen constante de lluvias (Senamhi, 2017). Se caracteriza por sus precipitaciones anuales promedio de 700 mm y sus temperaturas medias de 12°C (Senamhi, 2017).

3.1.3. Topografía.

La provincia de Huancayo se encuentra ubicada en el valle del río Mantaro. Se encuentra rodeada de valles y montañas de hasta 4400 msnm (INGEMMET, 2019). En la figura 14 se puede observar a la ciudad achurada de color rojo oscuro.

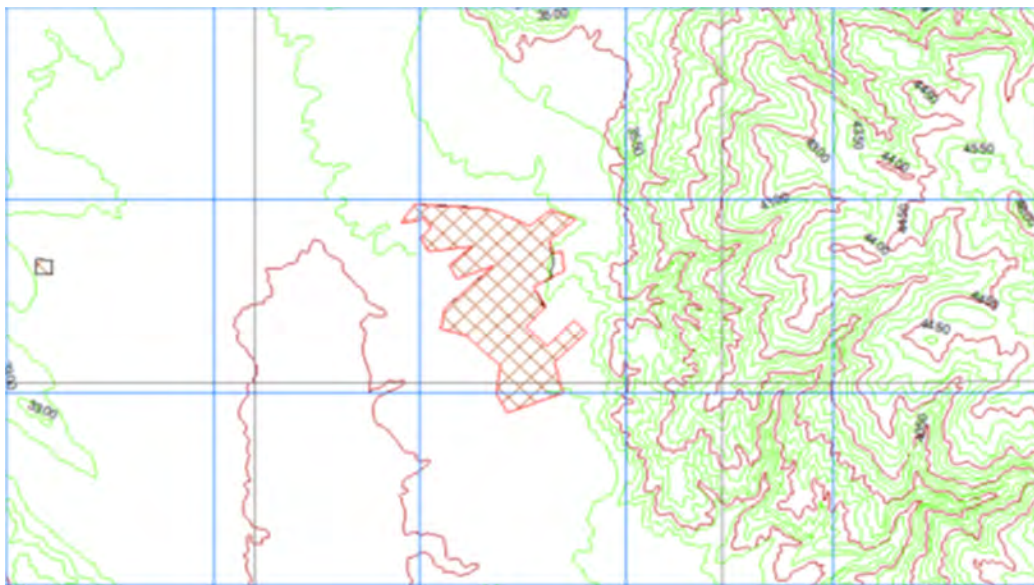


Figura 14. Topografía de los alrededores de la ciudad de Huancayo.
Tomado de INGEMMET (2019).

3.1.4. Población.

Dentro de las catorce unidades hidrográficas, la unidad Medio Alto Mantaro es la segunda unidad con mayor cantidad de población. De acuerdo con ANA (2016) esta unidad cuenta con 407 719 habitantes. Asimismo, en cuanto a densidad poblacional es la más densa del AAA Mantaro con 50 hab/km² (ANA, 2016). De acuerdo con el INEI (2017), la provincia de Huancayo ha registrado una tasa de crecimiento anual de 1.6%. Asimismo, el distrito de Chilca cuenta con 91851 habitantes (INEI, 2017).

3.1.5. Recursos hídricos.

La fuente hídrica principal es el río Mantaro (vertiente del Océano Atlántico). Su cuenca comprende un área total de 34 546,51 km² (ANA, 2016). Se han realizado estudios de la oferta y demanda de los recursos hídricos en la zona teniendo como resultado un caudal promedio de 348 m³/s (ANA, 2016), el mismo que puede satisfacer la demanda actual e incluso considerando un crecimiento a futuro. Según estudio del

ANA (2015), el volumen de extracción del acuífero de Huancayo es de 12.8hm³ en diferentes usos y el recurso aprovechable del mismo es de 79hm³/a.

Además, de acuerdo con el inventario del ANA (2016), cuenta con cinco unidades acuíferas en zonas de montaña no explotadas aún. Sin embargo, se evidencia intensa explotación de los acuíferos en la margen derecha del Mantaro (Río Shullcas) y una menor explotación en la margen izquierda (Río Cunas) (ANA, 2016).

3.2. Características Geológicas

Esta información fue tomada de la geología del cuadrángulo de Huancayo 25-m (Mapa y boletín A18) del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) (2017). A continuación, se describirá textualmente las unidades lito estratigráficas que se encuentran en INGGEMMET) aledañas al área de estudio. Asimismo, se anexa el mapa geológico de las zonas aledañas al área de estudio en el Anexo B.

“... 3.2.1 Depósitos cuaternarios.

El valle del Mantaro está compuesto, en su mayoría, por terrazas aluviales (cono de deyección) del Cuaternario, producto del transporte de sedimentos del Río Mantaro desde su nacimiento. También, se distinguen depósitos fluvio-glaciares y depósitos ligados a la primera, segunda y tercera glaciación.

- (a) **Depósitos residuales (Q - re):** Rocas descompuestas por la acción física y química de la roca in situ.
- (b) **Depósitos fluviales (Q - fl):** Fragmentos rocosos heterométricos (arenas, cantos y bolos), transportado por la corriente de los ríos.
- (c) **Depósitos coluviales (Q - cl):** Bloques angulosos heterométricos y de naturaleza litológica homogénea, acumulados al pie de taludes.

(d) *Depósitos aluviales (Q - al)*: Acumulación de fragmentos rocosos heterométricos y heterogéneos (arenas, cantos, bolos, etc) subangulosos a subredondeados.

(e) *Depósitos glaciares (Q - gl)*: Morrenas de fondo laterales y frontales, constituidas por bloques rocosos heterométricos y subredondeados.

3.2.2 Grupo Pucará (TsJi - p).

De acuerdo con Megard et al. (1968) este grupo puede estar compuesto por tres unidades litoestratigráficas: (a) Unidad inferior compuesta por calizas bandeadas y calizas con chert. (b) Unidad media formada por areniscas negras con nódulos discoidales de caliza y (c) Unidad superior compuesta de calizas grises compactas azulinas con nódulos de chert.

3.2.3 Rocas intrusivas y subvolcánicas (PE - ri,da).

Compuesto por riolitas y dacitas que se intercalan como siles y/o coladas en las series del Grupo Mitu.

3.2.4 Grupo Mitu (PET - m).

Cubre más o menos la mitad del área de la Cordillera Oriental compuesto por areniscas rojizas intercaladas con conglomerados. Dichos conglomerados están compuestos de cantos de areniscas y de cuarzo con cemento arenoso morado. Además, presenta lutitas y volcánicos entre rojo ladrillo y violeta.

3.2.5 Grupo Cabanillas (D - c).

Relacionado clásicamente con el grupo Excelsior. Se trata de una serie gruesa compuesta por areniscas cuarzosas y limolitas

3.2.6 Complejo del Marañón (NP - cm - fil, esq).

Compuesto por filitas y esquistos. ...”

3.3. Prospección Geofísica

La geofísica en un método indirecto que sirve para identificar las capas del suelo mediante las propiedades que se identifican en cada estrato (Misstear et al, 2017). Para este estudio, Solano (2016) utilizó la prospección mediante los Sondajes Eléctricos Verticales (SEVs) realizados en la zona en enero del 2016. Específicamente, para Azapampa se realizaron seis sondajes (Anexo C), detallados a continuación:

Tabla 11. *Coordenadas de los Sondajes eléctricos realizados en el anexo de Azapampa*

SONDAJES ELÉCTRICOS	COORDENADAS	
	ESTE	NORTE
SEV - 01	478811	8662762
SEV - 02	478590	8662746
SEV - 03	478657	8662678
SEV - 04	479126	8661545
SEV - 05	479193	8661620
SEV - 06	479183	8661858
SEV - A (Pozo Chilca)	477849	8663776
SEV - B (Pozo Azapampa)	478560	8663740

Nota. Tomado de Solano (2016)

Tabla 12. *Valores de los Sondajes eléctricos realizados en el anexo de Azapampa.*

Nombre	H1	H2	H3	H4	H5	H6
	R1-E1	R2-E2	R3-E3	R4-E4	R5-E5	R6-E6
SEV1	9.5-6	25-7.1	44-15	17-34	14-7.6	30
SEV2	19-3	7.5-3.4	50.5-23	17-34	28-7.5	56
SEV3	22-3	9.3-3.2	17-6.8	43-14	29-29	20
SEV4	44-6.6	39-8.0	31-17	32-39	16-87	24.7
SEV5	201-3	28-3.2	168-8.8	10-14	26-92	0.4
SEV6	106-4.2	175-5.5	24-12	21-29	31-58	20

Nota. Tomado de Solano (2016)

De los valores de los sondajes eléctricos, Solano (2016) ha establecido la presencia de tres horizontes o capas que representan una secuencia litológica diferente y calidad del fluido relacionado a la litología. A continuación, se describirán textualmente los horizontes detallados en el estudio de Solano (2016).

“... **Horizonte 1:** Con valores de resistividad eléctrica mayores a 100 ohmiómetros y espesores entre 5 y 15 metros, cuyos materiales podrían estar constituidos por materiales gruesos y finos compactos como arenas, cantos y arcillas.

Horizonte 2: Con valores de resistividad eléctrica entre 5 y 30 ohmiómetros y espesores entre 5 a 120 metros, cuyo material podría estar constituido por materiales

gruesos y finos como cantos, arenas y arcillas húmedas. Este horizonte al igual que el horizonte 3 se presenta de forma permanente en todos los sondeos. Este horizonte da inicio al acuífero del sector.

Horizonte 3: Con valores de resistividad eléctrica entre 30 y 60 ohmiómetros y espesores entre 10 y 80 metros, cuyos materiales podrían estar constituidos por elementos como arenas, gravas y arcillas húmedas poco compactadas. ...”

3.4. Inventario de Fuentes de Agua Subterránea

Esta información está basada en los datos que la Autoridad Administrativa del Agua Mantaro proporciona a través de su mecanismo de acceso a la información. Asimismo, se complementaron los datos provistos de los estudios realizados para Sedam Huancayo y los que cuenta la empresa ACISA. De acuerdo a ello, se cuenta con 132 pozos inventariados dentro del AAA entre pozos artesanales y tubulares. De los cuales sólo el 21% de pozos extrae caudales de 15 l/s y el 6% tienen una profundidad perforada de 30m. Sin embargo, solo el 8% de los totales son tubulares (ANA, 2017). En base a estos datos se ha realizado el cuadro del anexo D y el mapa de litopermeabilidades (Anexo E).

3.5. Hidráulica Subterránea

3.5.1. Características hidrogeológicas.

Se ha realizado el mapa de lito-permeabilidades de la zona (Anexo E) en base a la geología provista del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). La metodología seguida para su elaboración del cuadro de caracterización fue la siguiente: (a) Se reconocieron las formaciones geológicas dentro del área de estudio, (b) Se identificó la litología y (c) de acuerdo, a las propiedades de permeabilidad de la roca se determinó el tipo. Los resultados del cuadro con la caracterización hidrogeológica se muestran en el anexo E. En la zona se identificó un acuífero poroso no consolidado, acuitardo y acuitardo intrusivo.

Asimismo, este mapa (Anexo E) fue comparado con el mapa hidrogeológico del INGEMMET siendo ambos bastantes similares.

3.5.2. El acuífero.

Luego de realizar el análisis de la geología, así como los análisis de las muestras de suelo perforado de pozos aledaños, se puede determinar que el reservorio del acuífero está constituido por sedimentos fluvio aluviales no consolidados de la edad cuaternaria (Solano, 2016).

Respecto de su geometría, los límites de este acuífero están representados por formaciones rocosas que afloran flanqueando la depresión, como se puede ver en el corte geológico realizado en la zona por INGEMMET (2017). Estas rocas constituyen un substrato impermeable sobre el cual descansan los depósitos cuaternarios. (Solano, 2016).

Así mismo, Solano (2016) indica que en cuanto a su litología, el análisis de las muestras de suelo muestra que los depósitos están constituidos por cantos rodados, gravas, arenas gruesas y finas. Además, se encuentran limos y arcillas, que se encuentran en diferentes proporciones (Solano, 2016).

3.5.3. La napa freática.

El análisis de las características nos indica que el acuífero es libre. Esta es alimentada por las infiltraciones de los ríos Shullcas y otros afluentes.

En base a las mediciones de los niveles estáticos de los pozos aledaños se graficaron las curvas que establecen una morfología del techo de la napa. Aquí se nota que la recarga se produce por las infiltraciones de las precipitaciones y por las infiltraciones del río Shullcas, Chica y quebradas. El sentido del flujo subterráneo es de NE a SW, con un gradiente hidráulico promedio de 0.07%

En base a la profundidad de las aguas subterráneas se ha elaborado el mapa de isoprofundidad de la napa (Anexo L).

3.5.4. Hidrodinámica subterránea.

Los resultados de los parámetros hidráulicos fueron obtenidos de la reinterpretación de los resultados de ensayos de bombeo a caudal constante realizado por la empresa Amsa Consultores, en el pozo Yanama. Este pozo cuenta con 90 metros de profundidad. La reinterpretación se realizó por el método Theis Jacob, con lo que se obtuvieron los siguientes parámetros:

$$\text{Transmisividad (T)} = 3 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

$$\text{Permeabilidad (K)} = 5.35 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$\text{Coeficiente de almacenamiento (S)} = 5\%$$

En cuanto al radio de influencia se ha basado en la identificación de la ecuación general de Theis- Jacob para el régimen transitorio.

$$R = 1.5 \sqrt{\frac{Tt}{S}} \quad (31)$$

Dónde:

R (m) = Radio absoluto de influencia

T (m²/s) = Transmisividad

t (s) = Tiempo de bombeo

S (%) = Coeficiente de almacenamiento

Con los datos extraídos se calculó y obtuvo lo siguiente:

Tabla 13. *Radio absoluto de influencia*

Tiempo (h)	Radio absoluto de Influencia (m)	Tiempo (h)	Radio absoluto de Influencia (m)
6	171	16	280
8	198	18	297
10	221	20	313
12	242	22	328
14	262	24	343

Nota. Tomado de Solano (2016)

De esto se concluye que la separación mínima entre dos pozos operando en la zona simultáneamente en un lapso de tiempo de 18 horas de manera continua es igual a 297 más 297, es decir casi 600 metros.

3.6. Hidrogeoquímica

Los datos obtenidos de las características físicas, químicas y bacteriológicas fueron recibidos por el laboratorio de control de calidad de Sedam Huancayo S.A. Se utilizarán dos pozos que se encuentra dentro del área de estudio: (1) Pozo Azapampa y (2) Pozo Chilca.

3.6.1. Variación en el tiempo de los parámetros físicos químicos del agua.

Se ha graficado la variación de tres parámetros de los resultados físico químicos: (1) el potencial de hidrógeno (pH), (2) la dureza total y (3) el contenido de cloruros. En la figura 15 se puede ver que los valores de pH están mejorando en los últimos años, respecto de anteriores donde alcanzaron valores por debajo de 7 en el caso del pozo de Chilca.

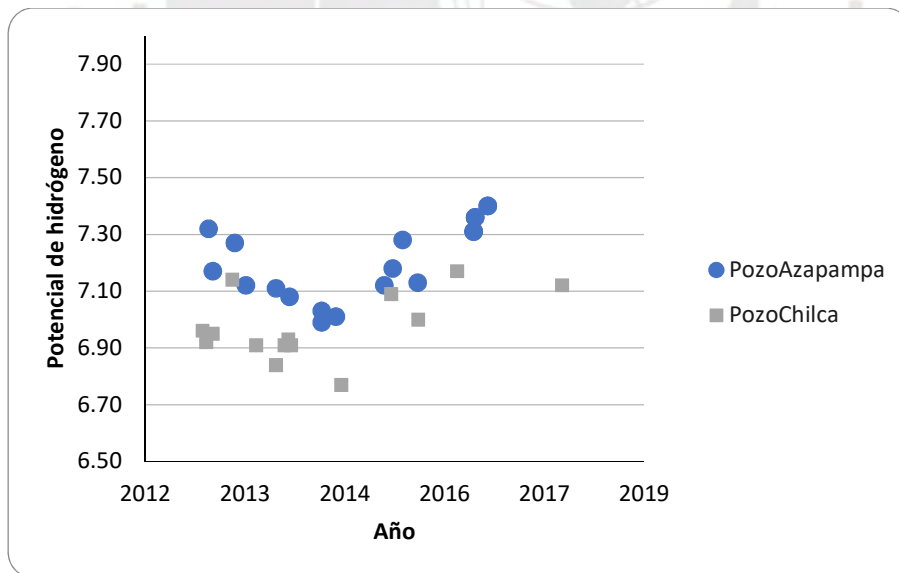


Figura 15. Variación del pH entre el 2013 y 2017.

Elaboración propia

Mientras que en la figura 16 se ve una tendencia de incremento de la dureza en el pozo de Azapampa, a diferencia de Chilca que tiene una tendencia al decrecimiento en el mismo tiempo.

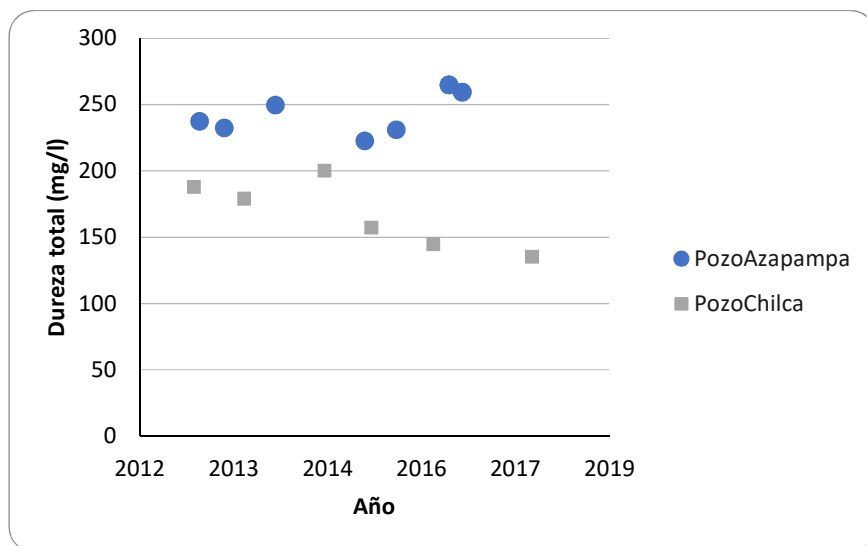


Figura 16. Variación de la Dureza total entre el 2013 y 2017.

Elaboración propia

Finalmente, en la figura 17, se ve la tendencia de crecimiento exponencial del contenido de cloruros en los últimos años para el pozo de Azapampa.

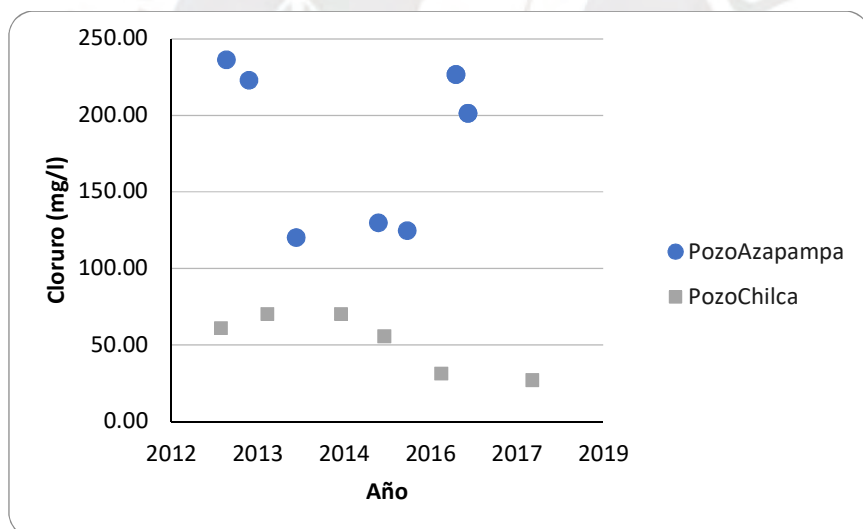


Figura 17. Variación del Cloruro entre el 2013 y 2017.

Elaboración propia

3.6.2. Caracterización de calidad de agua.

3.6.2.1. Diagramas de Stiff.

Para la interpretación de los resultados físicos - químicos se ha utilizado el diagrama de Stiff. Para ello, se han convertido los componentes principales del agua de miligramos por litro a miliequivalentes por litro. De ello, se obtiene los

componentes en porcentajes para hacer los diagramas con la finalidad de clasificar el agua.

a) *Muestra de Pozo Azapampa (Aza-16)*

El análisis de la muestra fue realizado el 14 de diciembre del 2016 por la empresa Sedam. Esta fue la última muestra registrada, antes de que el pozo quede inoperativo. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 14 y 15. Del mismo modo se muestran el diagrama obtenido en la figura 18.

b) *Muestra de Pozo Chilca (Chi-17)*

El análisis de la muestra fue realizado el 21 de diciembre del 2017 realizado por la empresa Sedam. Esta fue la última muestra registrada de acuerdo a los datos entregados por la empresa. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 14 y tabla 15, así como el diagrama obtenido en la figura 19.

Tabla 14. *Concentraciones en meq/l de cationes y aniones para las muestras*

Muestra	CATIONES (meq/l)				ANIONES (meq/l)			Suma de cationes (meq/l)	Suma de aniones (meq/l)
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻		
Aza-16	2,93	2,22	2,97	0,00	0,00	-5,67	-0,56	8,13	-6,23
Chi-17	1,65	1,04	0,68	0,00	0,00	-0,76	-0,25	3,37	-1,01

Nota. Elaboración propia

Tabla 15. *Porcentaje de cationes y aniones para las muestras*

Muestra	% CATIONES				% ANIONES			TOTAL % CATIONES	TOTAL % ANIONES
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻		
Aza-16	36,0	27,4	36,6	0,0	0,0	91,0	9,0	100,0	100,00
Chi-17	49,1	30,8	20,1	0,0	0,0	75,3	24,7	100,0	100,00

Nota. Elaboración propia

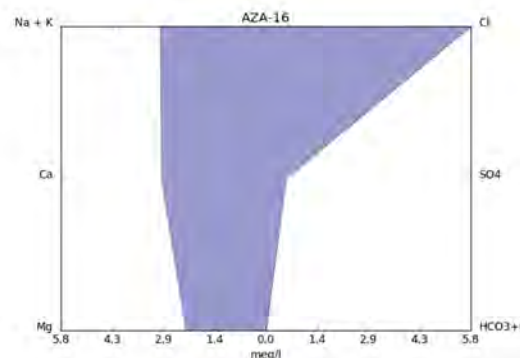


Figura 18. Diagrama de Stiff de la muestra AZA-16.

Elaboración propia.

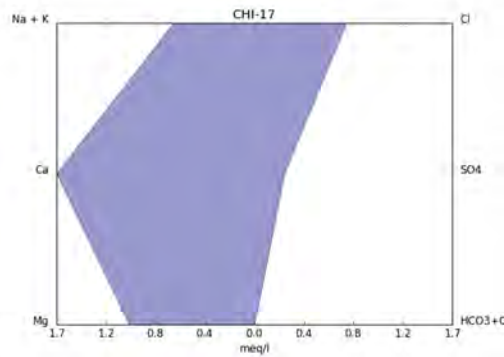


Figura 19. Diagrama de Stiff de la muestra CHI-17.
Elaboración propia.

3.6.2.2. Diagrama de Piper.

Este diagrama permite conocer la calidad del agua que se está analizando. Ambas muestras (Aza-16 y Chi-17) son cloruradas cálcicas, de acuerdo a la figura 20 y 21.

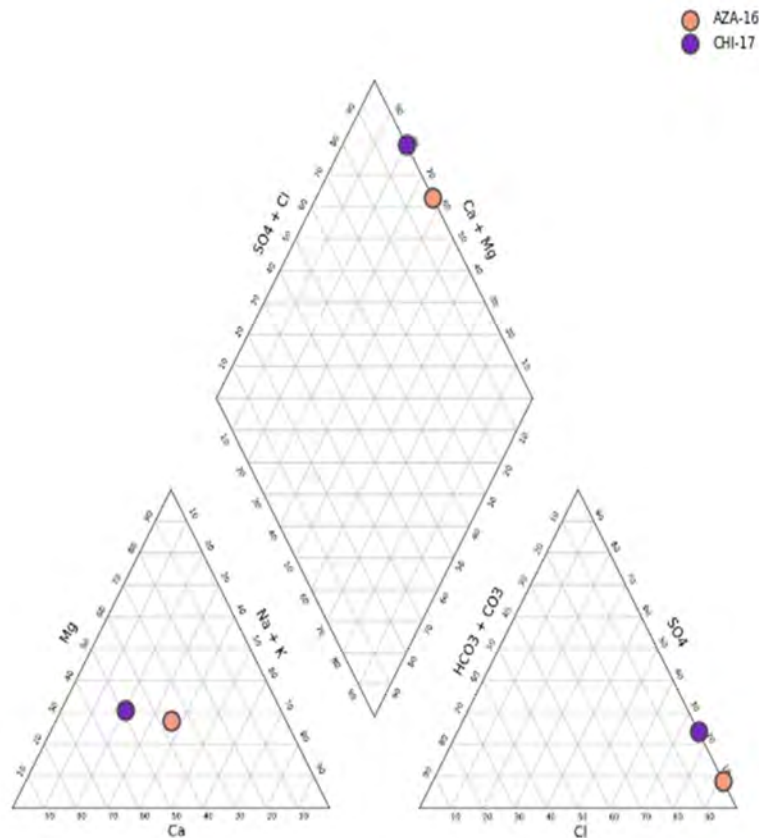


Figura 20. Diagrama de Piper de las muestras analizadas.
Elaboración propia.

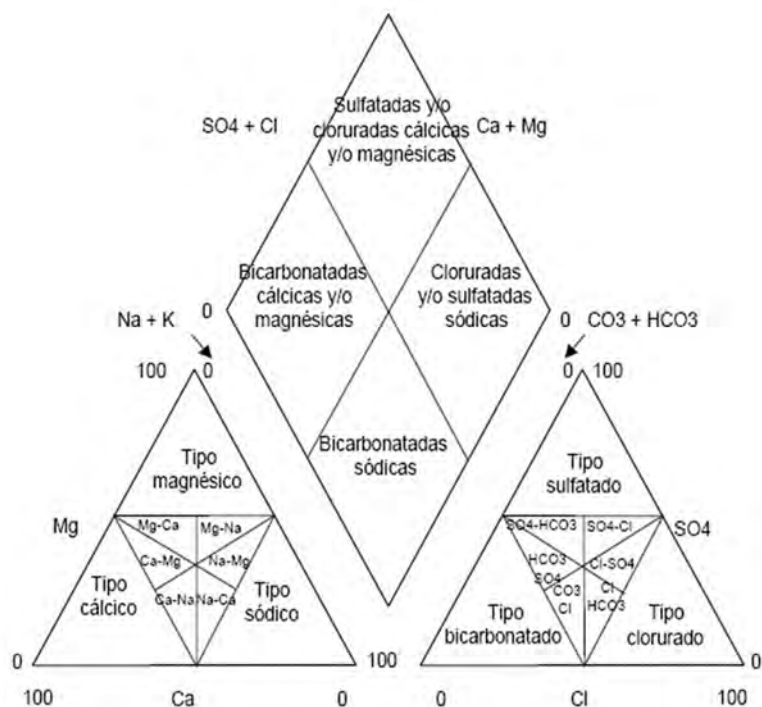


Figura 21. Clasificación química del agua de acuerdo al Piper.
Tomado de Martínez et al. (2005).

3.7. Potabilidad del Agua Local

Las muestras obtenidas de los pozos de Azapampa y Chilca serán comparadas con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) (2017) para Agua. Se elaboraron las siguientes tablas (16 - 19) como resumen de los resultados de las pruebas fisicoquímicas realizadas por Sedam Huancayo.

Tabla 16. Resultados fisicoquímicos en el pozo de Azapampa del año 2016

Fisicoquímicos	Unidad	M Aza-16	A1
Color	UC Pt-Co	0	15
S.T.D.	mg/L	472.94	1000
Dureza Total	mg/l	259.42	500
Cloruro	mg/l	201.36	250
Sulfato	mg/l	27	250
Nitrato	mg/l	11	50
Conductividad	μS/cm	944	1500
pH		7.4	6.5 - 8,5
Turbidez	NTU	0.12	5

Nota. Elaboración propia

Tabla 17. Parámetros inorgánicos en el pozo de Azapampa del año 2016

Inorgánicos	Unidad	M Aza-16	A1
Aluminio	mg/l	0.006	0.9
Cobre	mg/l	0.01	2
Hierro	mg/l	0.08	0.3
Manganeso	mg/l	0.229	0.4
Zinc	mg/l	0.02	3

Nota. Elaboración propia

Tabla 18. Resultados Fisicoquímicos en el pozo de Chilca del año 2017

Fisicoquímicos	Unidad	M Chi-17	A1
Color	UC Pt-Co	0	15
S.T.D.	mg/L	163.6	1000
Dureza Total	mg/l	135.35	500
Cloruro	mg/l	26.99	250
Sulfato	mg/l	12	250
Nitrato	mg/l	21.6	50
Conductividad	μS/cm	337	1500
pH		7.12	6.5 - 8,5
Turbidez	NTU	0.23	5

Nota. Elaboración propia

Tabla 19. Parámetros inorgánicos en el pozo de Chilca del año 2017

Inorgánicos	Unidad	M Chi-17	A1
Aluminio	mg/l	0.006	0.9
Cobre	mg/l	0.01	2
Hierro	mg/l	0.08	0.3
Manganeso	mg/l	0.229	0.4
Zinc	mg/l	0.02	3

Nota. Elaboración propia

Los ECA para agua están en conformidad con la Ley General del Ambiente y el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM aprobado en junio del 2017. Esto permite conocer el tipo de tratamiento que necesitará el agua para estar apta para el consumo humano. Cabe

recalcar que los estándares existentes fueron elaborados para cada tipo de uso: consumo humano, industrial, agrícola, etc.

De acuerdo a las categorías de los ECAS el uso destinado al consumo humano poblacional (agua potable) pertenece a la subcategoría A y la Categoría 1 corresponde a aguas que requieren tratamiento mínimo (potabilización sólo desinfección). Con los resultados obtenidos, se observa que los parámetros son menores a los máximos permitidos del agua de calidad A1, aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección. Esto sucede con ambos pozos analizados y tanto para los parámetros físicos químicos como para los inorgánicos. Esto se muestra en el cuadro del Anexo F

Del mismo modo se han graficado los parámetros en el diagrama de Schoeller y diagrama de potabilidad mostrados en los Anexos G y H.

Capítulo 4: Metodología

4.1. Ubicación de Pozo

4.1.1. Curvas de iso-resistencia.

Los perfiles de iso resistencia se elaboraron a través de los resultados obtenidos del estudio de Sondajes Eléctricos Verticales (SEV). Según Manilla (2003), la relación de la resistividad y el tipo de formación geológica incluyendo el agua puede variar desde unos cuantos ohms-metro dependiendo de la alteración, fracturamiento, grado de saturación, iones en solución, temperatura, porosidad y compacidad. La tabla 20 muestra los márgenes usuales de resistividad para tipos de agua y roca.

Tabla 20. Rangos usuales de resistividad de tipo de roca y agua.

Tipo de Material	Resistividad, Ohm-m
Agua de origen meteórico	30-1000
Agua superficial en distritos de rocas ígneas	30-500
Agua superficial en distritos de roca sedimentarias	10-100
Agua subterránea en distritos de rocas ígneas	30-150

Agua subterránea en distritos de rocas sedimentarias	>1
Agua de mar	=0.2
Agua potable, 0.25% máximo de sólidos totales disueltos	>1.8
Irrigación y almacenaje, 0.7% máximos de sólidos totales disueltos	>0.7

Nota. Tomado de Manilla (2003)

Una vez establecidos los horizontes y los materiales que posiblemente la componen, se identificaron los estratos con presencia de agua subterránea, las cuales conforman propiamente el acuífero. Las curvas de resistencia se construyeron con los valores en Ohmios (Ω); por ello, los valores de resistividad de los SEV en Ohmios por metro se multiplicaron por el espesor del estrato. Cabe recalcar, que se determinó la resistencia solo de los estratos que conforman el acuífero en los puntos de estudio. En seguida, se elaboró un mapa de calor para ubicar la zona más óptima, la interpolación de la resistencia se hizo a cada unidad por ohmio. Como resultado del mapa de calor (Anexo I) y los cortes (Anexo J), las zonas de mayor resistencia del área estudiada se encuentran cerca de la ubicación de los SEV 4 y SEV 6 y alrededor del SEV 2, las cuales alcanzan hasta 3831 ohmios.

4.1.2. Curvas de basamento rocoso.

Se realizaron con la finalidad de estimar la profundidad del basamento rocoso respecto del suelo dentro del área de estudio y así determinar la zona más favorable de ubicación del pozo. Bajo lo mencionado en la Tabla 9, el basamento rocoso presenta altos valores de resistividad; por ello, de los Sondajes Eléctricos se utilizaron la profundidad máxima de exploración para la ubicación del basamento. Por ello, los valores de resistencia (Ω) del basamento rocoso se obtuvieron a través de la suma de las resistencias de los estratos hasta este. El mapa de calor mostrado en el Anexo K, se realizó a través de una interpolación cada 50 unidades.

4.1.3. Curvas de isopropundidades del nivel freático.

Las curvas fueron elaboradas a partir del inventario de pozos de la zona, proporcionado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Sin embargo, no se utilizaron los datos de todos los pozos del inventario porque muchos de ellos no tenían las coordenadas, el dato de nivel estático o estaban fuera del área de estudio. Para ello se han considerado pozos tubulares y pozos artesanales de la zona. Se ha graficado la diferencia del nivel topográfico con el nivel estático de cada pozo. Luego se hizo la triangulación de la zona y mediante interpolación se han obtenido las curvas. Para mostrar la variación de la profundidad del nivel estático, se han pintado las zonas de acuerdo a la profundidad, el mapa de calor con las curvas de isopropiedades se muestra en el anexo L.

4.1.4. Zona favorable de perforación.

Para definir esta zona se utilizó la información obtenida del anexo 9, anexo 11 y anexo 12. En las curvas de resistencias se muestra que las zonas menos resistivas se encuentran alrededor del SEV 3 y SEV 4, con valores desde 1446 ohmios. Mientras que las zonas más resistivas del área estudiada se encuentran cerca de la ubicación de los SEV 4 y SEV 6 y alrededor del SEV 2. Estas zonas llegan hasta 3831 ohmios. Estas últimas zonas son las más favorables para la perforación dentro del área de estudio.

En las curvas de basamento rocoso se muestra que las zonas de color marrón son las que tienen mayores profundidades, donde la mayor llega hasta los 157,12 metros de profundidad. Mientras que las zonas de color verdoso muestran las menores profundidades del basamento rocoso, se tiene profundidades desde los 56,24 metros de profundidad. Bajo el criterio de profundidades del basamento rocoso, la zona más favorable de perforación se encuentra en la zona sur del área de estudio en donde se encuentra el SEV 4, SEV 5 y SEV 6.

En las curvas de isopropiedad de nivel freático se muestra que la profundidad del nivel estático va disminuyendo según se va acercando al río Mantaro. Se muestran zonas en las que los pozos están más cercanos entre sí y hay una mayor profundidad del nivel. De

acuerdo con este criterio, la zona más favorable de perforación es la que se encuentra más cercana al río, zonas en color celeste con valores de cota desde 3172,15 metros. Las zonas rojas y anaranjadas son las zonas con valores de cota mayores de nivel estático, se tiene cotas de hasta 3272,52 metros.

Considerando los tres criterios se determina que la zona más favorable de perforación es la ubicada alrededor del SEV 4 y SEV 6. Por efectos prácticos, se tomará como coordenadas de perforación las coordenadas del SEV 6: 479183m E, 8661858m N.

4.2. Caudal de Diseño

4.2.1. Caudal de demanda.

El caudal de demanda se determinó mediante la dotación típica establecida en el Reglamento Nacional de Edificaciones OS.100 Consideraciones básicas del diseño de Infraestructura Sanitaria (2006). Esta dotación es de 180 l/hab/día para zonas con clima frígido. Cabe recalcar que de acuerdo con dicha norma esta dotación solo se usa cuando no existe un estudio de consumo y no se justifique su ejecución. Asimismo, se utilizaron los datos estadísticos del Censo de Población y Vivienda 2017, para conocer el porcentaje de viviendas en el distrito de Chilca no abastecidas por la red pública y por otros medios como pozos.

La cantidad obtenida de multiplicar el porcentaje de población no satisfecha con la población total del distrito resulta, aproximadamente, en la población objetiva del estudio. Asimismo, se consideró una tasa de crecimiento anual de 1.58, dato que se puede observar en la tabla de resultados del INEI (Anexo M) para determinar la población que se demandará dentro de 40 años (Año 2061) de vida útil que tendría el pozo. Finalmente, con el producto de la dotación de consumo y la población requerida se obtiene el caudal de demanda igual a 30 l/s. La hoja de cálculo se encuentra en el Anexo M. Asimismo, se estableció el régimen de explotación a 7 días por 12 horas diarias de bombeo.

4.2.2. Curva de abatimiento.

De la prueba de bombeo realizada en el pozo de Azapampa, Sedam (2006) obtuvo los valores de profundidad del nivel estático y dinámico. (Ver figura 22)

Profundidad de nivel Estática: 30.87m

Profundidad del nivel Dinámica: 65.90m

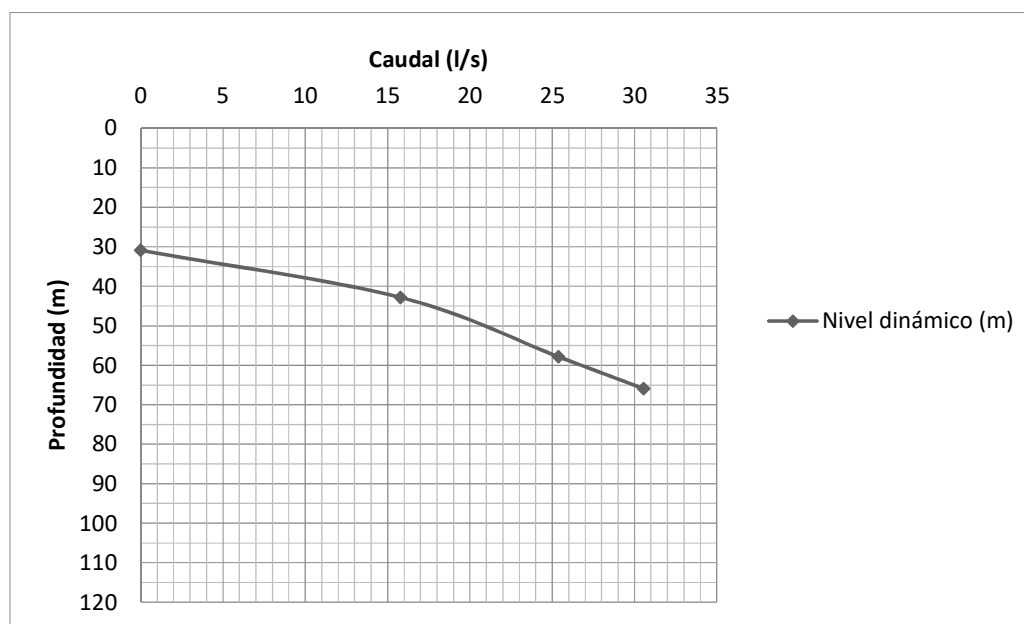


Figura 22. Curva de abatimiento
Elaboración propia

Asimismo, del estudio de Solano (2016), se obtuvieron los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento.

Transmisividad (m²/s): 0.03

Coficiente de almacenamiento: 0.0025

Con los valores obtenidos y a través de la ecuación 31 se obtuvo el valor del radio de influencia igual a 341.53m para 12 horas de bombeo.

4.2.3. Determinación de conductividad hidráulica.

Para obtener la curva de rendimiento se obtendrá primero el parámetro de conductividad hidráulica del acuífero. De acuerdo a los Sondajes Eléctricos Verticales (SEVs) se interpretó que el acuífero se encuentra en los horizontes 2 y 3. Estos horizontes

deberían contener arenas, gravas y arcilla, teniendo una permeabilidad aceptable (Solano, 2016). Del estudio hidrogeológico, la zona favorable de perforación del pozo se encuentra en el SEV6, con las coordenadas 479183E, 8661858N.

De la litología del Pozo de Azapampa perforado, se determinó la composición de los materiales de acuífero a través de una anidación de vacíos, de acuerdo a nuestro asesor de proyecto de tesis, los estratos de los acuíferos no están compuestos únicamente por un solo material sino que dentro de los vacíos de las gravas se encuentran arenas y finos dentro de ellos; por ello, la determinación de la conductividad hidráulica se debe realizar mediante la anidación (J. Rodríguez, comunicación personal, 18 de agosto de 2021).

La anidación de vacíos se determinó a través de la porosidad y el volumen del material, es decir, para saber los porcentajes de cada material debemos conocer el volumen del este y para ello utilizamos la relación volumétrica. De la anidación (Anexo N) se estimó el siguiente porcentaje de distribución de los componentes: (a) arena con 31.47%, (b) grava con 20.85% y (c) arcilla y limos con un 47.68%. Esto permitió obtener una conductividad hidráulica igual a 6.95 m/día, tal como se observa en el anexo Ñ. Para el cálculo de la conductividad hidráulica (K) se utilizó la figura 23 con los valores de conductividad mínima de cada material, ver anexo Ñ. Finalmente, con los valores de conductividad, tirante estático, tirante dinámico, radio de influencia y radio de pozo, se obtuvo la curva de rendimiento del acuífero a través de la ecuación 7, ver figura 24.

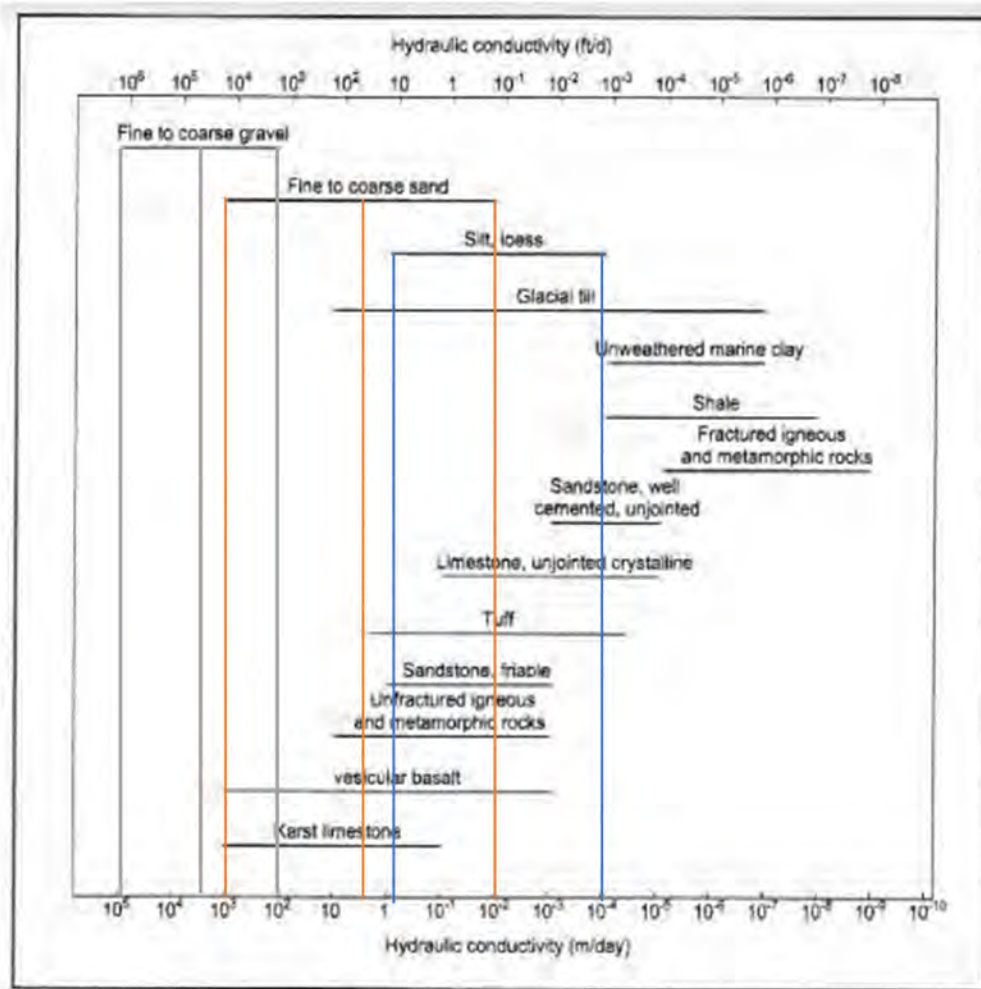


Figura 23. Valores de Conductividad Hidráulica de Suelos Tomado de Sterrett (2007)

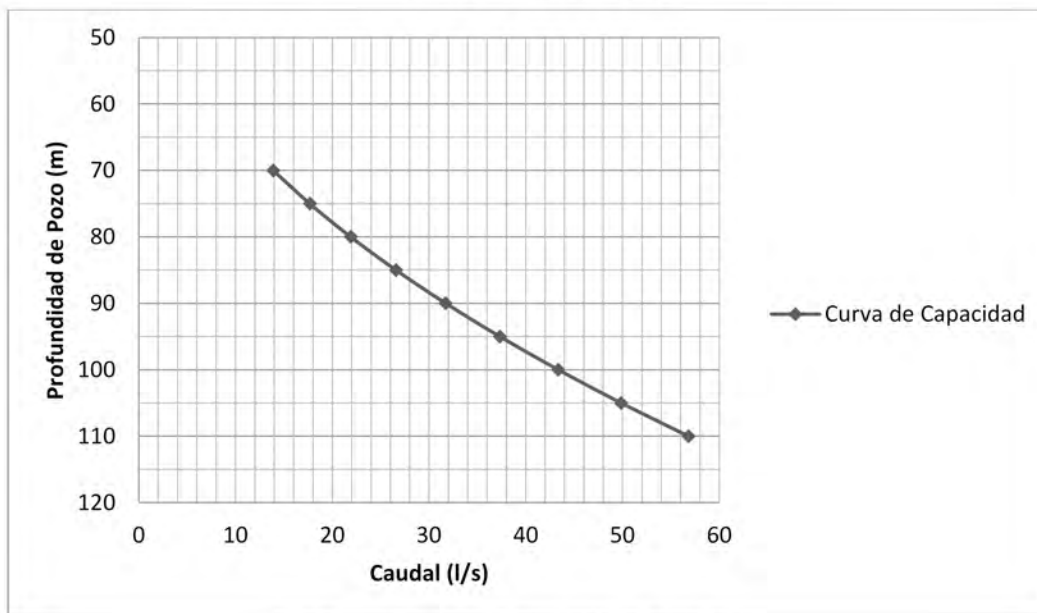


Figura 24. Curva de capacidad de acuífero. Elaboración propia

4.2.4. Ecuación de equilibrio de la hidráulica de pozos.

El caudal se encuentra relacionado con la conductividad hidráulica y las profundidades mediante la ecuación de Thiem o ecuación de equilibrio 7. A través de los valores obtenidos en la curva de abatimiento, anidación de la conductividad hidráulica, diseño de la tubería e hidrogeología para la profundidad del pozo se ingresaron los valores en la ecuación y así obtener la capacidad del acuífero.

Finalmente, la curva obtenida de la tabulación para el dimensionamiento se encuentra en el anexo Ñ. Los resultados finales se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Caudal obtenido de la ecuación de Thiem

Parámetro	Unidad	Valor
Caudal (Q)	(l/s)	30.00
Caudal (Qcal)	(m ³ /día)	2592.00
Conductividad Hidráulica (K)	(m/día)	6.95
Tirante estático (H)	(m)	57.5
Tirante dinámico (h)	(m)	48.9
Radio de influencia (R)	(m)	341.5
Radio de pozo (r)	(m)	0.15

Nota. Elaboración propia

4.3. Diseño del Pozo

4.3.1. Diseño de tubería.

4.3.1.1. Selección de bomba.

Con la ubicación del pozo se tuvo una estimación de la profundidad del basamento rocoso igual a 118,7m, para iniciar el pre dimensionamiento se consideró 110m. El caudal de demanda calculado es de 30 l/s y el nivel estático es considerado el que se midió en el pozo colapsado: 30 metros. Asimismo, se hizo una estimación del nivel dinámico considerando un abatimiento hasta un tercio del tirante estático, siendo 56.7m el nivel estimado. Con este dato se consultó las recomendaciones del proveedor Hidrostral de bombas sumergibles, donde se considera una sumergencia mínima de 3 m de la bomba.

Para la selección de la bomba se calculó la Altura Dinámica Total (ADT) (Ver anexo O y anexo R). Para esto se ubicó el reservorio Azapampa, que almacenará el caudal del pozo. Se empleó la ecuación 31 de Bernoulli, entre los puntos (1) Nivel dinámico del pozo y (2) Cota de nivel de agua dentro del reservorio. Asimismo, las pérdidas por fricción entre ambos puntos fueron calculadas con la ecuación 32, la fórmula de Darcy-Weisbach.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} - h_{p_{1-2}} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (31)$$

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (32)$$

Para ello, se consideró como datos el diámetro de la tubería PVC: 250mm y se asumió la temperatura del agua a 20°C para obtener su viscosidad cinemática en 1,007m²/s según la tabla 22 que se muestra a continuación.

Tabla 22. *Propiedades mecánicas del agua a presión atmosférica*

Temperatura °C	Densidad kg-s ² /m ⁴	Peso específico kg/m ³	Viscosidad dinámica kg-s/m ²	Viscosidad cinemática m ² /s
0	101.96	999.87	18.27x10 ⁻⁵	1.792x10 ⁻⁶
5	101.97	999.99	15.50x10 ⁻⁵	1.520x10 ⁻⁶
10	101.95	999.73	13.34x10 ⁻⁵	1.308x10 ⁻⁶
15	101.88	999.12	11.63x10 ⁻⁵	1.142x10 ⁻⁶
20	101.79	998.23	10.25x10 ⁻⁵	1.007x10 ⁻⁶
25	101.67	997.07	9.12x10 ⁻⁵	0.897x10 ⁻⁶
30	101.53	995.68	8.17x10 ⁻⁵	0.804x10 ⁻⁶

Nota. Tomado de Giles et al. (2014)

La rugosidad absoluta del PVC, también fue dato obtenido de la tabla 23. Con ambos datos se pudo obtener del diagrama de Moody el coeficiente de fricción. Las pérdidas locales fueron consideradas despreciables para este cálculo. (Ver anexo O)

Tabla 23. *Valores de rugosidad absoluta K*

Material	Valores (m)
Tubos muy lisos sin costura (vidrio, cobre, acero nuevo con superficie pintada, plástico, etc)	1.5x10 ⁻⁶
Acero rolado nuevo	5x10 ⁻⁵
Fierro fundido	2.5x10 ⁻⁴
Fierro galvanizado	1.5x10 ⁻⁴

Nota. Tomado de Rocha (2007)

Considerando el caudal demandado y la altura dinámica total se ubica en la ficha técnica del proveedor de la bomba cuya curva cumpla ambos requerimientos. En este caso, se eligió el modelo S07SH-5-50HP. Su ficha técnica y curva se adjunta en Anexo S.

4.3.1.2. Diámetro nominal de tubería definitiva.

De acuerdo con Michael et al. (2013), se calculó el diámetro de la tubería definitiva, que es 2 pulgadas mayor que el diámetro de la bomba: 9.6 pulgadas. Asimismo, de acuerdo a la tabla de Army Corps of Engineers (2012) Se tiene un diámetro mínimo de 9.8 pulgadas y un diámetro óptimo de 11.8 pulgadas. La hoja de cálculo de la primera iteración se muestra en el anexo P. La hoja de cálculo para la segunda, en el anexo T.

4.3.1.3. Espesor de tubería.

Este parámetro es función del diámetro y la profundidad de la tubería. Se utilizó el cuadro de la norma A100-97 (AWWA, 1997). Se obtuvo un espesor mínimo de 0.25 pulgadas. Esto considerando ambos diámetros nominales: mínimos y óptimos. La hoja de cálculo se encuentra en Anexo Q (Primera iteración) y Anexo U (Segunda iteración).

4.3.1.4. Diámetro de perforación.

De acuerdo con Roscoe Moss (1990), este diámetro debe ser 8 pulgadas mayor al diámetro nominal de la tubería definitiva. Considerando este criterio se calculó un diámetro de perforación mínimo de 18 pulgadas y un diámetro de perforación óptimo de 20 pulgadas. Este criterio considera que se instalará un paquete de grava, como es este caso. La hoja de cálculo se encuentra en Anexo Q (Primera iteración) y Anexo U (Segunda iteración).

4.3.1.5. Ajuste de dimensiones.

Luego de realizar el ajuste de las dimensiones de profundidad de pozo y nivel dinámico que se obtuvo en el cálculo hidráulico, se recalculan los demás parámetros con el mismo procedimiento. Obteniéndose los resultados definitivos del Anexo R, Anexo S, Anexo T y Anexo U.

4.3.2. Diseño de paquete de filtro.

De acuerdo a lo mencionado en el Capítulo 2, el diseño del paquete de grava puede realizarse a través de los pasos mencionados por Sterrett (2007) mediante la granulometría del acuífero. Por otro lado, en caso que no se cuente con la granulometría del acuífero, debido a que la gradación no siempre es totalmente inalterada, se puede optar por el criterio mencionado por Roscoe Moss (1990) mediante sus gradaciones típicas y estándares.

De la granulometría obtenida durante la perforación del pozo de Azapampa, podemos observar en la tabla 24 que esta difiere de la anidación realizada a la información de la litología. La anidación indica que se tiene un 52.32% de material granular y 47.68% de material fino. Esto debido a que, durante la perforación del pozo, el material obtenido fue probablemente triturado durante la perforación y se trata de una muestra alterada. Para obtener un buen diseño de paquete de grava es necesario realizar el ajuste a los porcentajes de la granulometría a los tamices N°4 y N°200 para que así permita reflejar los porcentajes de la anidación.

Tabla 24. *Granulometría de la perforación de pozo.*

Tamices	Abertura	% Pasa	%Retenido
ASTM	(mm)	M-7 95m	
3"	75		
2"	50.8	100	0
1 1/2"	38.1	96.35	3.65
1"	25.4	90.15	9.85
3/4"	19.1	82.56	17.44
1/2"	12.7	72.54	27.46
3/8"	9.525	69.34	30.66
N°4	4.76	63.25	36.75
N°10	2	54.96	45.04
N°20	0.84	41.48	58.52
N°40	0.42	32.89	67.11
N°60	0.25	22.15	77.85
N°100	0.15	15.68	84.32
N°200	0.07	10.5	89.5

Nota. Tomado de Sedam (2006)

Finalmente, con la granulometría ajustada, tabla 25, se determinó la abertura del tamiz para el 70% de material retenido a través de la interpolación, el cual es de 1.19mm. En seguida, para la determinación del primer punto de la curva que representa la gradación del paquete de filtro, se procede a multiplicar el tamaño de abertura por el factor según las condiciones del material del acuífero. En este caso, el factor es 5 porque se trata de arenas no consolidadas. Finalmente, se obtuvo un valor de 5.96mm, el cual representa el primer punto de la granulometría del paquete y la curva granulométrica con un coeficiente de uniformidad igual a 2 representada en la figura 25, ver anexo V. Como el criterio indica que el tamaño de abertura del filtro deberá retener el 90% del material del paquete, entonces se necesita un tamaño de 1.19 milímetros.

Tabla 25. *Granulometría ajustada según anidación*

Tamices	Abertura	% Pasa	%Retenido
Nº4	4.76	47.68	52.32
Nº10	2	39.39	60.61
Nº20	0.84	25.91	74.09

Nota. Elaboración propia

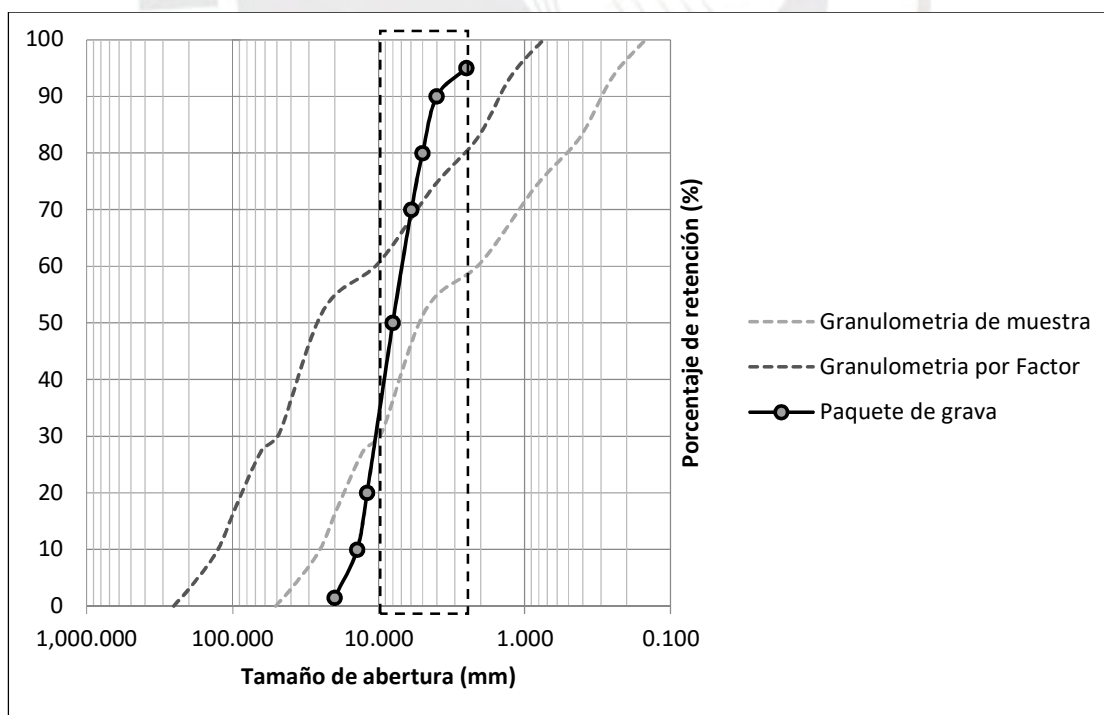


Figura 25. Granulometría de paquete de filtro y porcentaje retenido.
Elaboración propia

Por otro lado, Roscoe Moss (1990) ante las condiciones de no siempre contar con las muestras inalteradas, propone una gradación de grava para acuíferos aluviales con una capacidad de hasta 50 litros por segundo. La grava Tipo B mencionada en la tabla 7 es filtrada con una abertura comercial de 1.58 mm (1/16 in).

Finalmente, el paquete de grava debe tener un tamaño de 3 a 8 mm con una granulometría igual a la señalada en la figura 25 y además cumplir características señaladas en la tabla 8 para así lograr mejor desarrollo, menores pérdidas y mayor conductividad y porosidad.

4.3.3. Diseño de filtro.

El diseño del filtro consta de la determinación del diámetro, longitud del filtro, tipo de filtro y tamaño de ranura de filtro. Al igual que en el diseño de la tubería, el cálculo del diámetro del filtro depende de las solicitudes hidráulicas, para ello a través de la ecuación de equilibrio para acuíferos no confinados se obtuvo un diámetro de 30.5 cm, además según la verificación de la talla del equipo de bombeo, el diámetro de filtro debe ser 30.5 cm. En conclusión, el diámetro del filtro será el mismo que el diámetro de la tubería.

Por otro lado, la longitud del filtro obtenido es de 35 metros, esta longitud se obtuvo a partir del nivel dinámico y estudio geofísico. Los filtros se ubican en las capas de mayor permeabilidad según se indica en el anexo W.

La selección del tipo y material de filtro se encuentran relacionados a las resistencias de tensión y colapso de la grilla. Por ello, de acuerdo a los análisis realizados en el anexo X y anexo Y, se observó que ante las evaluaciones de resistencia para los materiales de acero carbono, acero inoxidable y PVC, el material más resistente es el acero carbono y acero inoxidable. Asimismo, en los cuadros se observó que la grilla tipo Louver y Bridge presenta mayor resistencia al colapso que la grilla de ranura continua. En conclusión, se puede utilizar como material el acero al carbono o el acero inoxidable y el filtro tipo Louver por su mejor

resistencia, además se considerará un espesor de tubería igual a 0.64cm según el análisis realizado.

Finalmente, para la determinación del tamaño de abertura se consideraron las metodologías de diseño del paquete de filtro. Según el por Sterrett (2007), el tamaño de abertura del filtro deberá ser de 1.19mm. Mientras que según lo indicado por Roscoe Moss (1990), el filtro deberá tener un tamaño de filtro comercial de 1.58mm, el cual se usará.

4.4. Selección del Material

4.4.1. Resistencia de la tubería.

Una vez definida las dimensiones del pozo se procede a determinar las resistencias de tensión, colapso y compresión de la tubería para los materiales de acero carbono, acero inoxidable, PVC y fibra de vidrio.

4.4.1.1. Peso de la tubería.

De acuerdo a la ecuación 19 y los parámetros del pozo se proceden a calcular el peso de la tubería. A continuación, se muestra la tabla 26 con los pesos de la tubería calculados para los diferentes tipos de materiales.

$$Wt = (k \cdot t \cdot (D - t)) \cdot L \quad (19)$$

Dónde:

Wt= Peso total de la pantalla (lb o kg)

t= Espesor de la tubería (in o cm)

D=Diámetro externo de la tubería [30.5cm (12 in)]

L=Longitud total de la tubería (ft o m)

k: Factor de material (Ver tabla 4)

Tabla 26. *Peso de tubería para distintos materiales*

Parámetros	Acero Carbono	Acero Inoxidable	PVC	Fibra de vidrio
t (cm)	0.64	0.64	1.74	0.95
Wt (kg/m)	4.34	4.38	2.9	1.63

Nota. Elaboración propia

4.4.1.2. Resistencia a la tensión.

De igual manera se determina la resistencia a la tensión con la ecuación 20, mencionada por Sterrett (2007) para los distintos materiales.

$$Cts = \frac{\pi \cdot t \cdot St(D_o - t)}{2000} \quad (20)$$

Dónde:

D: Diámetro de la tubería [0.305m (12 in)]

t: Espesor de la tubería (m)

S: Resistencia última a la tensión del material (MPa)

Cts: Resistencia a la tensión (kg)

Tabla 27. Resistencia a la tensión de tubería

Parámetros	Acero	Acero Inoxidable	PVC	Fibra de vidrio
S(MPa)	420	485	53.7	78.83
t (cm)	0.64	0.64	1.74	0.95
Cts (kg)	322,987	324,579	95,222	78,747
Cts (Tn)	322.99	324.58	95.22	78.75

Nota. Elaboración propia

4.4.1.3. Resistencia de colapso.

Para la determinación de la resistencia de colapso utilizamos la ecuación de Timoshenko para cilindros sin excentricidad (ecuación 17) y la ecuación 18 para cilindros con excentricidad igual a 1%.

$$P = \frac{2E}{(1 - \nu^2)\left(\frac{D}{t} - t\right)} \quad (17)$$

Dónde:

P=Presión crítica por colapso para un cilindro perfecto (Psi)

E=Módulo de Young (Psi), ver tabla 3

ν =Ratio de Poisson, ver Tabla 3

D= Diámetro externo de la tubería, (in)

t= Espesor de la tubería, (in)

$$Pd^2 - \left\{ \frac{2Yp}{\frac{D}{t} - 1} + \left[1 + 3\left(\frac{D}{t} - 1\right)e \right] Pcr \right\} Pd + \frac{2Yp * Pr}{\frac{D}{t} - 1} = 0 \quad (18)$$

Dónde:

Pd= Presión de colapso de diseño (Psi).

Pcr= Presión crítica de colapso para un cilindro perfecto (Psi)

Yp=Fluencia de material (Psi), Ver tabla 3.

$e = \frac{DM}{Dm}$ Excentricidad (Se asume 0.01 pero se considera 0.015 para algunos casos estándar).

Tabla 28. Presiones de colapso en la tubería

MATERIAL	E (Psi)	u	S (Psi)	Pcr (Psi)	Pcr (kg/cm2)	Pe (Psi)	Pe (kg/cm2)
Acero	3×10^7	0.28	35,000	627	44	353	25
Acero Inoxidable	2.8×10^7	0.3	30,000	593	42	317	22
PVC	4×10^5	0.4	7,000	213	15	207	15
Fibra de Vidrio	2×10^6	0.6	12,000	210	15	159	11

Nota. Elaboración propia

4.4.2. Resistencia del filtro.

De igual manera que la tubería, con los parámetros calculados en el diseño del pozo se procede a calcular las resistencias en el filtro para los materiales de acero carbono, acero inoxidable y PVC.

4.4.2.1. Resistencia a la tensión.

A través de las ecuaciones de resistencia a la tensión para grilla tipo continua (ecuación 28) y la ecuación 29 para grilla tipo Louver se determinaron las resistencias para los materiales de acero carbono, acero inoxidable y PVC.

$$Ts = (0.7854 \cdot dr^2) \cdot Nf \cdot Y \cdot Ew \quad (28)$$

Dónde:

Ts= Resistencia a la tensión de filtro (lb o kg)

dr=: Diámetro de varilla de soporte (in o mm)

Nf= Numero de varilla de soporte

Y= Fuerza de fluencia de material

Ey= Factor de seguridad (85%)

$$T = \left(\frac{\pi \cdot (D - t) - (l \cdot n)}{\pi \cdot (D - t)} \right) \cdot t \cdot Y \cdot \pi(D - t) \quad (29)$$

Dónde:

T= Resistencia a la tensión (lb o kg)

D=Diámetro externo (in o cm)

t= Espesor de pared (in o cm)

l=Longitud de abertura (in o cm)

n=Número de ranuras por hilera

Tabla 29. Resistencia a la tensión en grilla de ranura continua para diámetro de varilla 0.38cm.

MATERIAL	S	Diámetro de varilla	Ts	Ts
	(Psi)	in	lb	kg
Acero Carbono	35,000	0.15	31544	14308
Acero Inoxidable	30,000	0.15	27037	12264
PVC	7000	0.15	6308	2862

Nota. Elaboración propia

Tabla 30. Resistencia a la tensión en grilla de ranura continua para diámetro de varilla 0.55cm.

MATERIAL	S	Diámetro de varilla	Ts	Ts
	(Psi)	in	lb	kg
Acero Carbono	35,000	0.217	66016	29944
Acero Inoxidable	30,000	0.217	56585	25667
PVC	7,000	0.217	13203	5989

Nota. Elaboración propia

Tabla 30. Resistencia a la tensión en grilla tipo Louver para espesor de 0.64cm

MATERIAL	S	t	T	T
	(Psi)	in	lb	kg
Acero Carbono	35,000	0.25	60,475	27,431
Acero Inoxidable	30,000	0.25	51,836	23,512

Nota. Elaboración propia

Tabla 31. Resistencia a la tensión en grilla tipo Louver para espesor de 0.89cm

MATERIAL	S	t	T	T
	(Psi)	in	lb	kg
Acero Carbono	35,000	0.35	80,817	36,658
Acero Inoxidable	30,000	0.35	69,218	31,421

Nota. Elaboración propia

4.4.2.2. Resistencia de colapso.

Se han calculado las resistencias de colapso para los filtros de ranura tipo Louver y Bridge mediante las ecuaciones de Timoshenko, ecuaciones 17 y 18. Se han considerado los materiales de acero carbono y acero inoxidable y espesores de pared de 0.25 y 0.5 in.

$$P = \frac{2E}{(1 - \nu^2)\left(\frac{D}{t} - t\right)} \quad (17)$$

Dónde:

P=Presión crítica por colapso para un cilindro perfecto (Psi)

E=Módulo de Young (Psi), ver tabla 3

ν =Ratio de Poisson, ver Tabla 3

D= Diámetro externo de la tubería, (in)

t= Espesor de la tubería, (in)

$$Pd^2 - \left\{ \frac{2Yp}{\frac{D}{t} - 1} + \left[1 + 3\left(\frac{D}{t} - 1\right)e \right] Pcr \right\} Pd + \frac{2Yp * Pr}{\frac{D}{t} - 1} = 0 \quad (18)$$

Dónde:

Pd= Presión de colapso de diseño (Psi).

Pcr= Presión crítica de colapso para un cilindro perfecto (Psi)

Y_p =Fluencia de material (Psi), Ver tabla 3.

$e = \frac{DM}{Dm}$ Excentricidad (Se asume 0.01 pero se considera 0.015 para algunos casos estándar)

Tabla 32. Presiones de colapso en grilla de espesor 0.64cm

MATERIAL	E (Psi)	u	S (Psi)	t (in)	Pe (Psi)	Pe (kg/cm2)
Acero Carbono	3×10^7	0.28	35,000	0.25	353	25
Acero Inoxidable	2.8×10^7	0.3	30,000	0.25	317	22

Nota. Elaboración propia

Tabla 33. Presiones de colapso en grilla de espesor 1.27cm

MATERIAL	E (Psi)	u	S (Psi)	t (in)	Pe (Psi)	Pe (kg/cm2)
Acero Carbono	3×10^7	0.28	35,000	0.5	1,545	109
Acero Inoxidable	2.8×10^7	0.3	30,000	0.5	1,345	95

Nota. Elaboración propia

Por otro lado, para los filtros con ranura tipo continua se ha calculado a través de la fórmula mencionada por Sterrett (2007) y Roscoe Moss (1990), ecuación 27. En este caso, se ha considerado los materiales de acero carbono, acero inoxidable y PVC. Así, como los espesores de ranura de 0.64, 0.89 y 1.27 cm. Los resultados obtenidos son los mencionados en las tablas 34, 35 y 36.

$$I = \frac{W \cdot T^3}{12} \quad (26)$$

Dónde:

T= espesor de pared (in o mm)

W= longitud de pared (ft o cm)

$$Clp = \frac{24 \cdot E \cdot I}{(1 - u^2) \cdot (w + s) \cdot D^3} \quad (27)$$

Dónde:

Clp= Resistencia a colapso (Psi o kPa)

E= Módulo de Young (psi)

I= Momento de inercia (in⁴ o mm⁴)

u = Ratio de poisson

w= Ancho de cara de alambre

s= Ancho de ranura (in o mm)

D= Diámetro externo de filtro (in o mm)

Tabla 34. Resistencia a colapso en filtro de ranura tipo continua para espesor de ranura de 0.64cm.

MATERIAL	E (Psi)	w in	b in	h in	s (in)	Pcs (Psi)	Pcs (kg/cm2)
Acero Carbono	3x10 ⁷	0.118	0.185	0.03	0.25	39	2.74
Acero Inoxidable	2.8x 10 ⁷	0.118	0.185	0.03	0.25	36	2.56
PVC	4x10 ⁵	0.118	0.185	0.03	0.25	0.52	0.04

Nota. Elaboración propia

Tabla 35. Resistencia a colapso en filtro de ranura tipo continua para espesor de ranura de 0.89in.

MATERIAL	E (Psi)	w in	b in	h in	s (in)	Pcs (Psi)	Pcs (kg/cm2)
Acero Carbono	3x10 ⁷	0.146	0.215	0.04	0.35	58	4.06
Acero Inoxidable	2.8x 10 ⁷	0.146	0.215	0.04	0.35	54	3.79
PVC	4x10 ⁵	0.146	0.215	0.04	0.35	0.75	0.05

Nota. Elaboración propia

Tabla 36. Resistencia a colapso en filtro de ranura tipo continua para espesor de ranura de 1.27cm.

MATERIAL	E (Psi)	w in	b in	h in	s (in)	Pcs (Psi)	Pcs (kg/cm2)
Acero Carbono	3x10 ⁷	0.165	0.25	0.03	0.5	69	4.7
Acero Inoxidable	2.8x 10 ⁷	0.165	0.25	0.03	0.5	62	4.39
PVC	4x10 ⁵	0.165	0.25	0.03	0.5	0.84	0.06

Nota. Elaboración propia

4.4.3. Evaluación de la calidad del agua local.

Para evaluar las propiedades corrosivas del agua, se utilizó el Índice de Saturación de Langelier (LSI, por sus siglas en inglés). Esta metodología se encuentra recomendada en Roscoe Moss (1990) y en ASCE (2014). A continuación, se muestran los parámetros utilizados para el cálculo. Estos parámetros corresponden a los resultados de laboratorio de una muestra de agua sacada en Pozo Azapampa, en junio del 2013.

Tabla 37. Parámetros para cálculo de LSI

PARÁMETROS	VALOR
pH	7.27
Total sólidos disueltos (TSD)	460.5
Dureza cálcica (CaCO ₃)	161.62
Alcalinidad	139.83
Temperatura	10

Nota. Tomado de Sedam Huancayo (2018)

Con estos datos se determinaron los factores de A y B que dependen de la temperatura y el contenido total de sólidos disueltos (TSD).

$$A = 2.0763$$

$$B = 9.93$$

Con estos parámetros determinados, se realiza el cálculo del pH_s, mediante la ecuación 33. ASCE (2014)

$$pH_s = A + B - \log_{10}[Ca^{2+} \text{ as } CaCO_3] - \log_{10}[TALK] \quad (33)$$

Con este resultado, a su vez, se calcula LSI con la ecuación 34, obteniéndose el resultado -0.38.

$$LSI = pH - pH_s \quad (34)$$

Otro factor que se calculó fue el Índice de Estabilidad de Ryznar (RSI, por sus siglas en inglés). El resultado fue 8.03, al aplicar la ecuación 35.

$$RSI = 2(pH_s) - pH \quad (35)$$

Finalmente, con ayuda de la tabla adjunta se determinó que el acero de bajo contenido de carbono y el Hierro Armco podrían ser utilizados, pero con restricciones. Lo ideal sería utilizar el resto de los materiales listados en la tabla.

Tabla 38. Guía para seleccionar el material del filtro de pozo según el RSI

Material de Filtro de pozo	Límites de Índice de Estabilidad de Ryznar
Acero con bajo contenido de carbono	Entre 7.0 y 8.0
Hierro Armco	Entre 6.5 y 8.0
Silicon Red Brass	Entre 6.0 y 8.5
Everdur Bronze	Menos de 9.0
Super Nickel	Menos de 9.0
Acero inoxidable Tipo 304	Menos de 9.5
Acero inoxidable Tipo 304 ELC (Extra Low Carbon)	Menos de 12
Acero inoxidable Tipo 316	Menos de 15
Acero inoxidable Tipo 316 ELC (Extra Low Carbón)	Menos de 18

Nota. Tomado de Mogg (1972)

Capítulo 5: Discusión De Resultados

5.1. Comparación de Resultados Obtenidos con Pozo Existente

Tras el diseño por colapso del pozo profundo para el abastecimiento de agua en el anexo de Azapampa, Distrito Chilca, se pudo determinar las dimensiones de sus elementos como longitud de tubería, diámetro de tubería, longitud de filtros, diámetro de filtro, abertura de filtro, diámetro de paquete de grava y diámetro de perforación. Con los parámetros obtenidos se realizará la comparación con el pozo de Azapampa existente, para ello se analizó el expediente técnico del proyecto “Perforación de pozo tubular de 143m de profundidad en la localidad de Azapampa”.

5.1.1. Ubicación favorable de pozo.

Del diseño realizado se pudo observar que la ubicación del pozo depende de las condiciones propias del acuífero, bajo la interpretación de los sondajes realizados para la ubicación del basamento rocoso y caracterización de los estratos que conforman el acuífero. Además, el reconocimiento del sentido del flujo a través de las curvas de isoprofundidades del nivel freático garantizará la mejor ubicación para el aprovechamiento de agua

subterránea. De la ubicación obtenida en la metodología se puede observar que la ubicación del pozo perforado se encuentra cercana a la zona de los Sondajes 1, Sondaje 2 y Sondaje 3, mientras que la del diseño realizado se encuentra dentro de los Sondajes 4, Sondaje 5 y Sondaje 6. La ubicación del pozo perforado difiere del diseño por casi 2 kilómetros como se puede ver la figura 26.

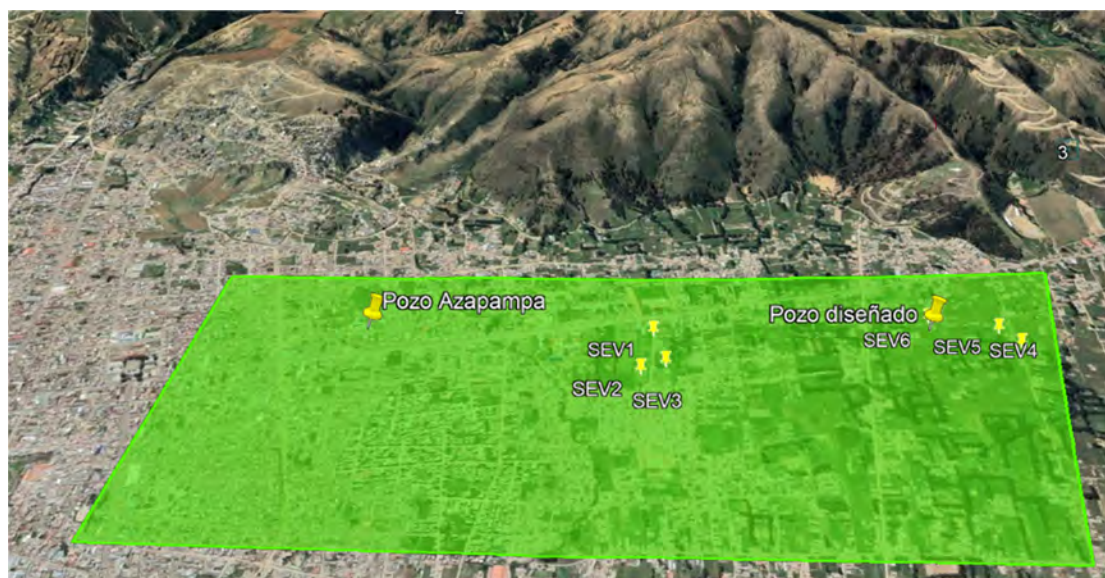


Figura 26. Diferencia de ubicación de los pozos de estudio
Elaboración propia

Tabla 39. Cuadro comparativo de pozos respecto de su ubicación.

	Pozo existente	Pozo propuesto
Coordenadas UTM	478550 E, 8683730 N	479183m E, 8661858m N
Nivel estático (m)	39.5	30.87
Nivel dinámico (m)	60.8	65.90
Caudal de diseño (l/s)	30	30

Nota. Elaboración propia

5.1.2. Caudal de diseño.

Para determinar el caudal de diseño se determinó primero el caudal de demanda. El caudal de demanda se calculó con una dotación 180 litros por habitante al día, en ambos casos. Sin embargo, en la determinación de la cantidad de población objetivo, en el estudio proporcionado, no se menciona la metodología, ni la fuente utilizada para llegar a 4356

personas. Existe una diferencia de 3200 personas aproximadamente que no están abastecidas en lo que muestran los resultados del último censo 2017. Esta diferencia debe responder al alto crecimiento promedio anual que hubo de viviendas abastecidas de agua en los últimos años en el departamento de Junín.

Asimismo, dentro del cálculo del presente estudio se consideró la proyección de la demanda para el tiempo de vida útil del pozo 40 años. Esta proyección no se hizo en el estudio del pozo proyectado. Finalmente, solo considera abastecimiento de agua para consumo poblacional, no considera el uso agrícola, ni recreativo ya que no forma parte de los objetivos del presente estudio. Considerando estos aspectos, el caudal de demanda del pozo existente es de 20 litros/segundos a diferencia de este estudio es 30 litros/segundo. El régimen de explotación es parecido al planteado.

Tabla 40. Cuadro comparativo de pozos respecto del caudal

	Pozo existente	Pozo propuesto
Dotación	18 l/hab/ día	18 l/hab/ día
Población no abastecida	4356	1148
Caudal de demanda	20 l/s	30 l/s
Proyección para tiempo de vida útil	No es considerado	Si es considerado para 40 años
Uso agrícola (Áreas verdes y recreativas)	Si es considerado 10% adicional aproximadamente	No es considerado

Nota. Elaboración propia

Por otro lado, de la evaluación de la capacidad del acuífero se pudo obtener que bajo los parámetros hidráulicos mencionados en la tabla 41 se puede extraer un caudal de 30 litros por segundo para una profundidad de pozo igual a 90 m y un tiempo de extracción igual a 12 horas. Por el contrario, el pre dimensionamiento del pozo perforado, indica que la capacidad del acuífero con un tiempo de extracción igual a 24 horas será de 20 litros por segundo, a pesar de contar con una mejor conductividad hidráulica, como se mencionada en la tabla 41. Por tanto, la curva de abatimiento proyectada en el pozo perforado tendrá un radio de influencia aproximadamente de 483 m mientras que la de nuestro estudio contempla un valor

igual a 341.53m para la misma profundidad del pozo mencionado. Finalmente, podemos concluir que para nuestro diseño la capacidad del acuífero logra satisfacer la demanda obtenida para un tiempo de vida útil de 40 años como se establece en la metodología.

Tabla 41. Cuadro comparativo de pozos respecto de los parámetros hidráulicos.

Parámetro	Pozo existente	Pozo diseñado
Transmisividad (m ² /día)	2592	2592
Coefficiente de almacenamiento (%)	2.5	2.5
Tiempo de extracción (día)	1	0.5
Radio de influencia (m)	483	341.53
Conductividad Hidráulica (m/s)	5.35x10 ⁻⁴	8.04x10 ⁻⁵
Profundidad de pozo (m)	90	90

Nota. Elaboración propia

5.1.3. Dimensionamiento de pozo.

5.1.3.1. Dimensionamiento de tubería.

Respecto del diámetro, se tiene una tubería de 12 pulgadas como parte del diseño, en comparación con el de 15 pulgadas y en profundidad, se tiene 90 metros respecto a 100 metros (Ver anexo Z). Es un pozo más pequeño que rendiría mayor caudal. Esto refleja lo eficiente que puede ser el diseño y el ahorro en términos de dinero que puede significar la construcción de esta obra. Recalcando que es un diseño preliminar y que se complementará con los datos que se obtienen de la perforación.

Respecto del espesor, tenemos el mismo en ambos casos. Geométricamente no hay diferencias, pero al ser de diferentes materiales, la resistencia a los esfuerzos, la calidad del agua, la corrosión e incrustación hacen que varíen el tiempo de vida útil del pozo por este factor.

5.1.3.2. Dimensionamiento de filtros.

A través del diseño del filtro desarrollado en el capítulo 4, logramos obtener la longitud y ubicación del filtro, diámetro de filtro y tamaño de ranura. La ubicación del filtro se ha realizado en las capas de permeabilidad alta, además, se tuvo en cuenta la ubicación del nivel estático y dinámico, pues los filtros irán colocados en los 2/3 inferiores al nivel dinámico para evitar el ingreso de finos y así futuras fallas. Por ello, la longitud del filtro es

de 35 metros como se indica en el anexo Y. En comparación con el predimensionamiento realizado para el pozo existente, nuestra longitud es superior por 5 metros.

Por otro lado, el diámetro del filtro hallado fue de 30.5cm (12") al igual que la tubería a través del empleo de la ecuación de equilibrio o Theim. Cabe recalcar que autores como Sterrett (2007) y Roscoe Moss (1990) coinciden que generalmente el diámetro del filtro es igual al de la tubería y ello fue comprobado con la verificación del diseño hidráulico y verificación de la talla de equipo de bombeo. El diámetro de filtro para el pozo existente es de 38.1 mm (15") y este es igual al diámetro de la tubería, podemos concluir que el diámetro de filtro del pozo existente es mayor al planteado en nuestro diseño.

Finalmente, la abertura del filtro se obtuvo del dimensionamiento del paquete de filtro, el cual contempla la retención del 90% de material a través de una ranura igual a 1.58mm. Del diseño se pudo observar que el valor teórico determinado para la abertura de filtro 1.19mm es cercano a la abertura de ranura comercial. A través de diámetro de filtro, tamaño de ranura y tipo de filtro según la evaluación de selección de material se concluye que el porcentaje de área abierta será de 4%, según la tabla 5, este porcentaje se encuentra dentro del rango sugerido por Roscoe Moss (1990) quien establece que el porcentaje debe ser entre 3% a 5%. Sin embargo, para el diseño del pozo existente el tamaño de ranura es 1mm y con el diámetro igual a 38.1mm (15") se tiene un porcentaje de área abierta igual a 6%. Si bien el porcentaje de área abierta no es un parámetro determinante este influye en el límite de velocidad (3 m/s), el cual tiene efecto en la cantidad de arena es llevado al pozo y tasa de corrosión e incrustación.

5.1.3.3. Paquete de grava.

De acuerdo a lo realizada en la metodología, se pudo observar que el dimensionamiento del paquete de grava se encuentra relacionado a la granulometría de los materiales encontrados en el acuífero. Por ello, es importante contar con la granulometría de

la muestra insitu para así obtener los parámetros correctos en el dimensionamiento del cual también dependerá la abertura del filtro.

Para nuestro diseño se obtuvo un paquete de grava de tamaño de 3 a 8 mm con granulometría señalada en la figura 25, además debe poseer un coeficiente de uniformidad igual a 2 y deberá ser limpia y de granos redondeados, como se indica en la tabla 8. De los resultados hallados, se observó que la metodología de Sterrett (2007) brinda un valor aproximado al tamaño de abertura propuesta por Roscoe Moss (1990) en su granulometría de paquete de grava y abertura de filtro comerciales. Por ello, del diseño del paquete de grava se obtuvo que se empleara una abertura de filtro igual a 1.58mm para garantizar la retención del 90% de material.

Por otro lado, del tamaño de paquete de filtro hallado en comparación con el propuesto en el pozo perforado, se puede observar que el rango de diámetro se encuentra dentro del rango de nuestro diseño. Asimismo, es importante recalcar que el diseño no contempla un paquete de filtro muy fino porque ello afectaría el rendimiento del pozo.

Tabla 42. Cuadro comparativo de pozos respecto del dimensionamiento.

	Pozo existente	Pozo propuesto
Long. de la tubería (m)	142	90
Diámetro exterior de tubería (cm)	38.1	30.5
Espesor de la tubería (cm)	0.64	0.64
Diámetro exterior de filtro (cm)	38.1	30.5
Abertura de filtro (mm)	1.00	1.58
Longitud de filtros (m)	30	35
Diámetro de perforación (cm)	61	51
Diámetro de paquete de filtro (mm)	3 a 6	3 a 8

Nota. Elaboración propia

5.1.4. Selección de material de tubería y filtro

5.1.4.1. Material de tubería.

La selección del material de la tubería se encuentra relacionada a las resistencias de tensión y colapso que el material pueda soportar. Por ello, en el Capítulo 4 se hicieron la evaluación de 4 materiales: acero, acero inoxidable, PVC y fibra de vidrio.

De la evaluación de los cuatro materiales, en la Tabla 25 se pudo observar que los materiales con mayor peso por metro lineal fueron el acero y acero inoxidable a pesar que sus espesores fueron de 0.64cm. Por otro lado, los materiales con menor peso fueron el PVC con un espesor de 1.74cm y la fibra de vidrio con un espesor igual a 0.95cm. Asimismo, de la Tabla 26 se pudo observar que las resistencias de tensión determinadas en acero y acero inoxidable son hasta cuatro veces las de PVC y fibra de vidrio.

Finalmente, en la evaluación de resistencia al colapso, Tabla 27, se observó que las mayores resistencias las obtuvieron el acero y acero inoxidable, mientras que el PVC y fibra de vidrio presentan hasta un 65% de resistencia menor a comparación del acero y acero inoxidable. Además, a través de la ecuación de Timoshenko en el cálculo de resistencia al colapso, se pudo observar que la resistencia presión crítica es mayor a la presión teórica debido a que la presión crítica considera un tubo perfectamente redondo.

Por ello, de la evaluación de resistencias podemos concluir que los materiales que requieren mayores prestaciones al colapso son el acero y acero inoxidable, para este caso optaremos por el acero, el cual es el material comúnmente utilizado en pozos y presenta mejores condiciones corrosivas ante la exposición de suelo y agua. Con la selección del acero como material de tubería se estaría concordando con el material del pozo construido, como se puede ver en la tabla 43.

Tabla 43. Cuadro comparativo de pozos respecto del material

	Pozo existente	Pozo propuesto
Material de la tubería	Acero Inoxidable	Acero Carbono

Nota. Elaboración propia

5.1.4.2. Material de Filtro.

Al igual que la tubería, la selección del material del filtro se encuentra relacionada a las resistencias de tensión y colapso. Para el caso de los filtros, se realizó la evaluación de las resistencias para los filtros de ranura continua en los materiales de acero carbono, acero inoxidable y PVC, además de los filtros tipo puente y Louver, en las cuales se analizaron los materiales de acero y acero inoxidable.

De la evaluación de las resistencias a la tensión en el filtro de ranura continúa se pudo observar en la tabla 28 que para un diámetro de varilla igual a 0.38cm, el material con mayor resistencia fue el acero carbono, seguidamente el acero inoxidable y finalmente el PVC. Además, la resistencia del acero es hasta 5 veces la del PVC. Por otro lado, para un diámetro de varilla de 0.55cm en el filtro de ranura continúa, tabla 29, las resistencias de los materiales son hasta 2 veces la resistencia del filtro de ranura con diámetro de varilla de 0.38cm.

Para el caso de la resistencia a la tensión en los filtros tipo puente y louver, tabla 30, se observó que para un espesor de pared igual a 0.64cm, las resistencias del acero carbono y acero inoxidable son hasta dos veces mayor que las del filtro de ranura continua con diámetro de varilla igual a 0.55cm, obteniendo el acero la mayor resistencia. Asimismo, para un espesor de pared igual a 0.89cm en los filtros tipo puente y louver, tabla 31, la resistencia se incrementa hasta en un 35% que el espesor de pared mencionada anteriormente.

Del análisis de resistencia al colapso, para los filtros tipo Louver y Bridge, la resistencia se determinó mediante la ecuación de Timoshenko al igual que la tubería, de las tablas 32 y 33, se pudo observar que el material con mayor resistencia fue el acero carbono por un porcentaje igual a 11% que el acero inoxidable. Además, con el aumento de espesor de la pared de filtro, la resistencia aumenta significativamente alcanzando valores de hasta 5 veces mayor, en un cambio de espesor de 0.64cm a 1.27cm.

La resistencia al colapso para el filtro de ranura continúa depende del diámetro del filtro, tamaño, forma y tipo de material de alambre, por ello su ecuación involucra el momento de

inercia. La evaluación de la resistencia al colapso para espesores de 0.69, 0.89 y 1.27 cm dieron como resultados en las tablas 34,35 y 36 que, a mayor espesor, la resistencia incrementa hasta en un 60%. Sin embargo, si comparamos las resistencias de colapso producidos del filtro de ranura continua con los filtros tipo Louver o Bridge, podemos observar que, para un mismo espesor, los filtros tipo Louver o Bridge son mucho más resistentes.

En conclusión, de las evaluaciones se pudo observar que los materiales que requieren mayores prestaciones a la tensión y colapso son el acero carbono y acero inoxidable. Además, de los tipos de filtros se vio que los filtro tipo Louver y Bridge son mucho más resistentes al colapso que los de ranura continua. Finalmente, el espesor de pared interviene directamente en la resistencia de tensión y colapso; por tanto, a mayor espesor, mayor será la resistencia, lo contrario sucede con el tamaño de ranura, pues a mayor ranura, menor será la resistencia que brinde. Por ello, para el diseño del proyecto el material a utilizar será el acero carbono y el tipo de filtro tipo Louver, como se indica en la tabla 44 y difiriendo de lo establecido en el pozo construido, pues para el diámetro de 38.1 cm y espesor igual a 0.64cm, la resistencia a colapso es igual a 13.38 kg/cm², mientras que nuestro pozo diseñado presenta una resistencia igual a 24.8 kg/cm². Esto indica una resistencia que duplica a la otra.

Tabla 44. Cuadro comparativo de pozos respecto del material

	Pozo existente	Pozo propuesto
Material de la tubería	Acero inoxidable	Acero Carbono
Tipo de filtro	Puente trapezoidal	Louver
Resistencia al colapso (kg/cm ²)	13.38	24.8

Nota. Elaboración propia

5.2. Variación de las Dimensiones y su Influencia

De acuerdo a lo revisado en la metodología, Capítulo 4, se pudo observar que la ecuación de equilibrio empleada para determinación del caudal de extracción depende del tirante estático (H), tirante dinámico (h), radio de influencia (R), radio de tubería (r) y conductividad

hidráulica (K). Por ello, es importante conocer la influencia directa de la variación de los parámetros como el tirante estático (H), tirante dinámico (h) y radio de tubería (r) con el caudal de extracción. Además, la influencia del tiempo de bombeo con el radio de influencia (R) y ella indirectamente su intervención en el caudal.

5.2.1. Variación de radio de tubería (r).

Se pudo observar que la variación de radio de la tubería (r) en la ecuación de Thiem, ecuación de equilibrio, genera un incremento de caudal; sin embargo, su aporte se encuentra en un 5% a 9%. Para la construcción de la figura 27 se mantuvo todos los factores excepto el radio de tubería y se realizó una variación de 5 centímetros.

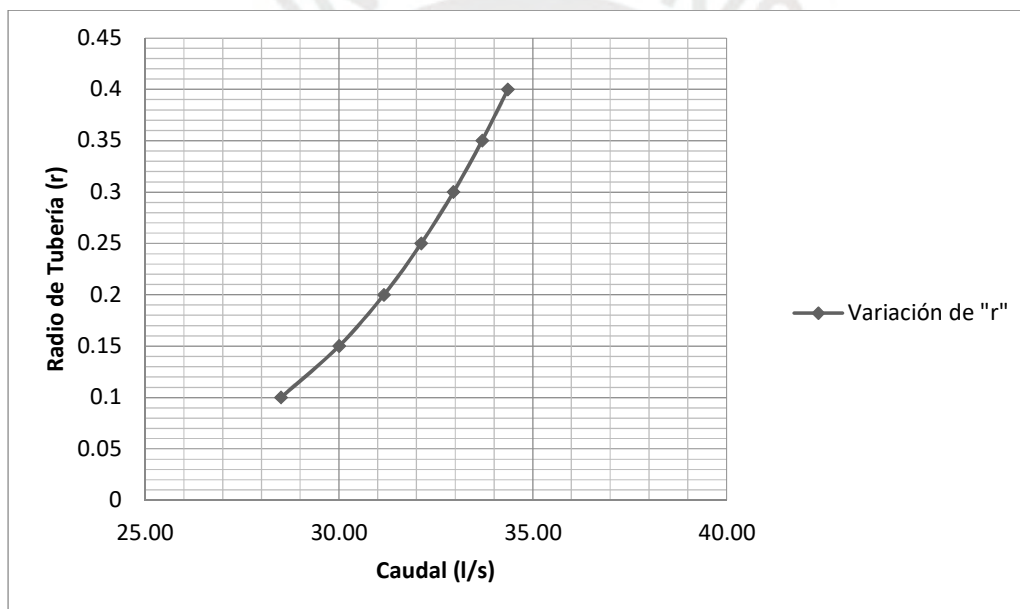


Figura 27. Relación entre la variación de radio y el caudal
Elaboración propia

5.2.2. Variación de la profundidad de pozo.

La sensibilidad del parámetro de profundidad de pozo en la ecuación de equilibrio es significativa, pues su variación de 10 metros genera un incremento de hasta el 45% de caudal. Esto debido a que el tirante estático depende del nivel estático y la profundidad de pozo y a su vez el tirante dinámico depende del tirante estático. Para la construcción de la figura 28 se mantuvo todos los factores excepto el tirante estático y dinámico, pues estas dependen de la

profundidad del pozo, se consideró una variación de 5m de profundidad. Por tanto, a mayor profundidad de pozo, mayor caudal. Por tanto, se puede concluir que este parámetro es muy significativo en el diseño de pozo.

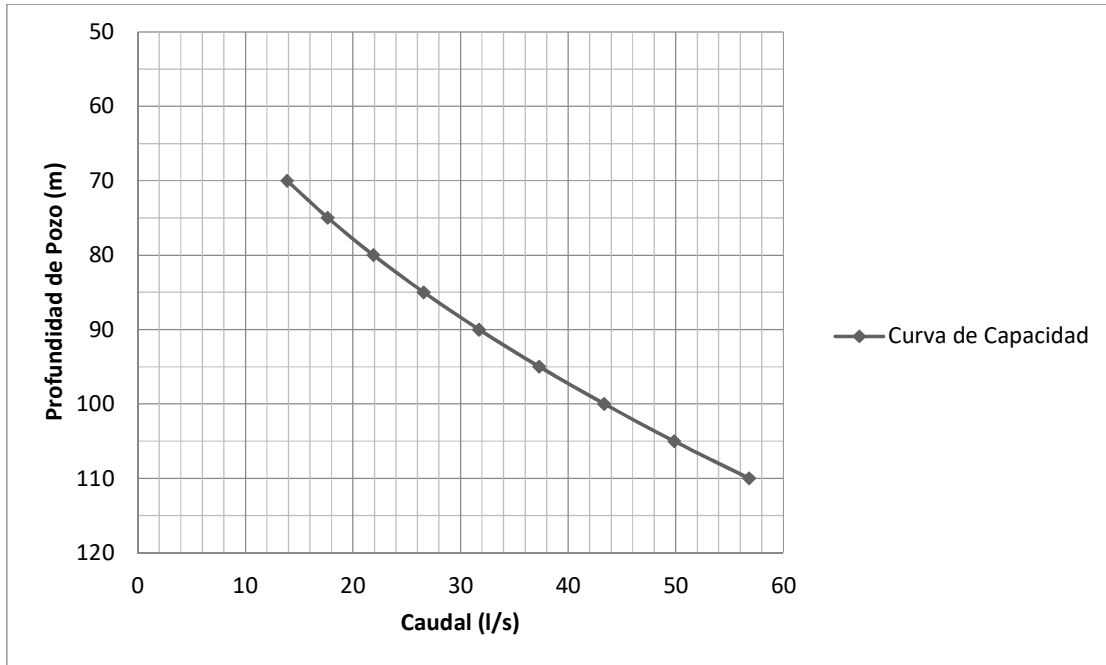


Figura 28. Relación entre la variación de radio y el caudal
Elaboración propia

5.2.3. Variación de radio de influencia (R).

Si bien el radio de influencia no es parámetro independiente porque se encuentra en función de otros parámetros como: la transmisividad, coeficiente de almacenamiento y tiempo de bombeo. Es importante, conocer la sensibilidad de la variación del tiempo de bombeo en el radio de influencia (R) y como termina influyendo en el caudal.

Por ello, se consideró una evaluación de tiempo de bombeo igual a 0.25, 0.5 y 0.75 días, obteniendo valores de radios de influencia mencionados en la tabla 45. Seguidamente, se obtuvieron los caudales para estos radios, logrando observar que, a mayor tiempo de bombeo, menor es el valor del caudal de extracción, como se observa en la figura 29.

Tabla 45. Radios de influencia en función del tiempo

R(m)	Tiempo(día)
241.5	0.25

341.53	0.5
418.28	0.75
482.99	1

Nota. Elaboración propia

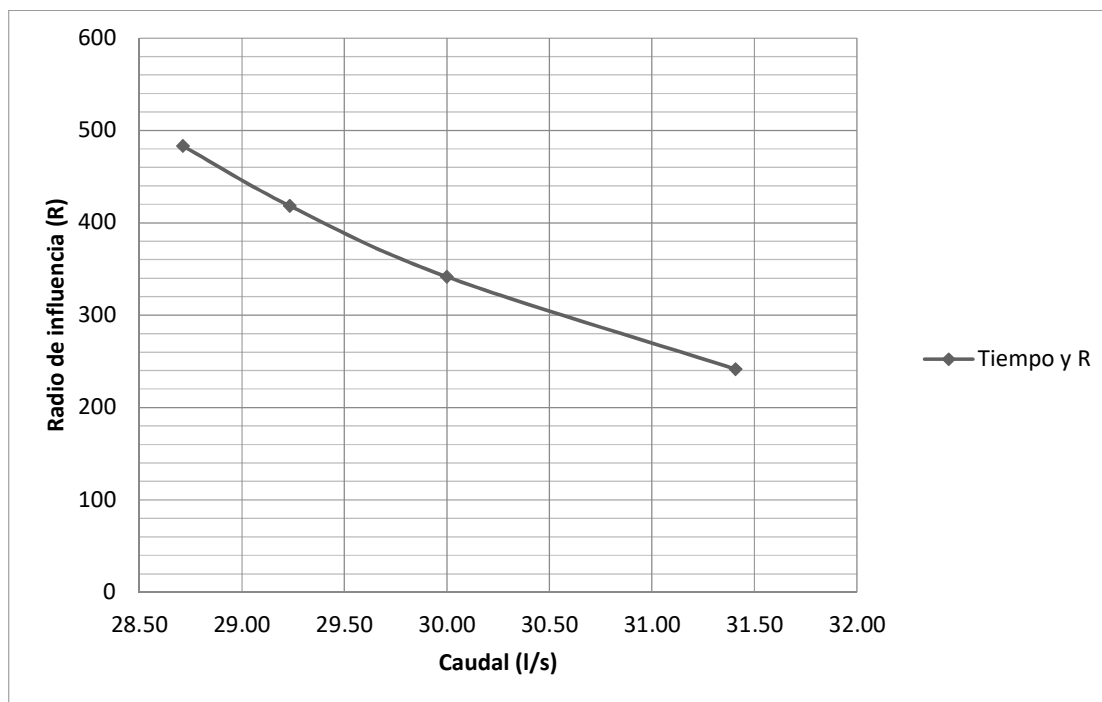


Figura 29. Relación entre el radio de influencia y el caudal
Elaboración propia

5.3. Verticalidad y Alineamiento y su Influencia en los Esfuerzos

El diseño realizado considera que el pozo y su tubería se encontrarán completamente alineados y verticales. Sin embargo, esto no se cumple durante la construcción, ya que durante la perforación se producen desviaciones que generan esfuerzos adicionales. Para el análisis se idealizó la tubería como una barra circular hueca que se encuentra empotrada en el interior y en la parte superior se encuentra libre. Se han considerado como cargas actuantes solo las adicionales que aparecen por causa de la inclinación de la tubería. Se realizó un análisis estático con los datos en la siguiente tabla:

Tabla 46. Datos utilizados para el cálculo

DATOS UTILIZADOS	CANTIDAD	UNIDADES
Densidad del suelo	1.85	t/m ³

Longitud de tubería	100	m
Peso de tubería	4.34	kg/m
Diámetro de tubería	12	in
Espesor de tubería	0.25	in
Esfuerzo de fluencia del acero 304L	170	MPa

Nota. Elaboración propia

Producto de este análisis se obtuvo la siguiente gráfica donde se aprecia el incremento exponencial del esfuerzo según el aumento del desplazamiento. Asimismo, se grafica el punto que establece el desplazamiento máximo permitido por la norma técnica peruana y el esfuerzo de fluencia del acero.

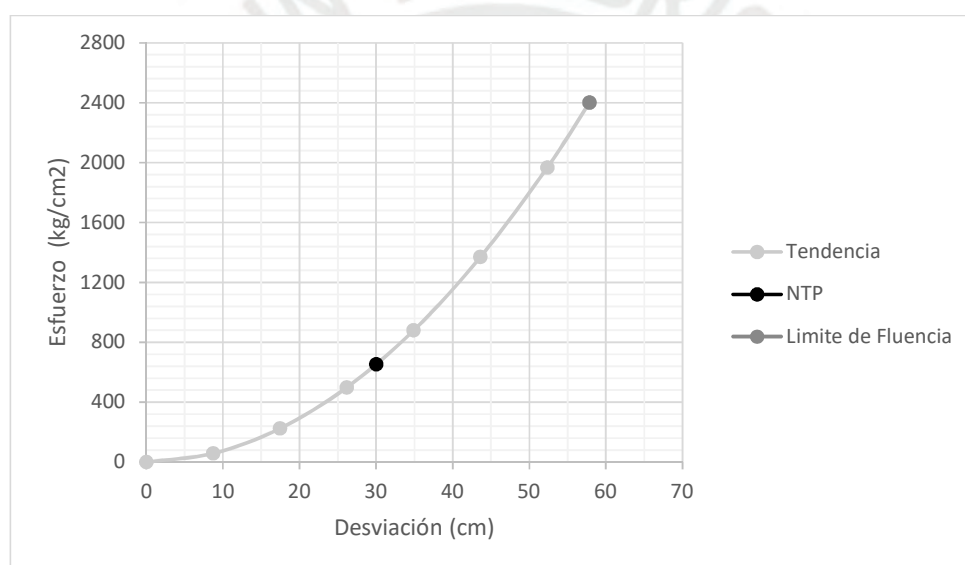


Figura 30. Relación entre el esfuerzo y la desviación
Elaboración propia

5.4. Influencia de las Cargas Sísmicas en los Esfuerzos

Asimismo, se agregó la carga por sismo para evaluar su influencia en los esfuerzos de la tubería del pozo diseñado. Los datos sísmicos fueron seleccionados según lo establece la Norma E0.50, los mismos que se muestran a continuación:

Tabla 47. Datos utilizados para el cálculo

Nombre	Símbolo	Cantidad	Unidad	Comentarios
Espesor tubería	t	0.25	in	
Espesor filtro	ta		in	
Peso específico de suelo	γ_s	104.77	lb/ft ³	

Peso específico de suelo sumergido	γ_b	50.97	lb/ft ³	
Radio de tubería	r	6	in	
Diferencia de la presión hidrostática	hd	117.78	ft	
Altura entre la superficie y el nivel freático	h1	98.42	ft	
Altura máxima debajo de nivel freático	h2	229.66	ft	
Peso específico de agua	γ_w	62.43	lb/ft ³	
Módulo de elasticidad	Es	28000000	psi	
Periodo crítico de movimiento de suelo	T	0.6	s	Norma E.050
Máxima aceleración del suelo inducido	A	11.25	ft/s ²	0.35g (Zona 3)
Coefficiente para arena suelta	C	0.0000001		
Profundidad total de la tubería	H	328	ft	
Coefficiente para arena suelta	n	1.86		
Módulo de corte	G	10500000	psi	
Altura de tubería debajo del basamento rocoso	B	59	ft	
Velocidad de onda de cortante en el suelo	v s	1640.42	ft/s	Norma E.050 (Suelo intermedio)

Nota. Elaboración propia.

Se siguió el procedimiento planteado en por Nazarian (1973) en Water Well Design for Earthquake-Induced Motions. Se evaluaron los esfuerzos principales a los que se encuentra sometidos y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 48. *Resultados de esfuerzos principales*

Esfuerzos	Cantidad	Unidades
σ_p	4980	lb/in ²
σ_1	9368	lb/in ²
σ_2	-593	lb/in ²

Nota. Elaboración propia.

5.5. Influencia de la Variación del Nivel Estático

De acuerdo con los datos obtenidos de Solano (2016) y la base de datos de la empresa ACISA, se tiene como información las profundidades del nivel freático del pozo Aza, Villalva y N°08 de Chilca (Ver tabla 49), todos estos pozos ubicados en la zona de estudio y aledaños al pozo de Azapamapa. Con los valores graficados, en la figura 31 se observa que la variación del nivel en los pozos Aza, Villava y Chilca son similares en el último periodo desde el 2009. Por lo que se determinó la ecuación de la variación de la cota del nivel freático

y con ello, la proyección en 40 años. Esta proyección se puede aplicar para la zona de estudio, por lo que se usará para considerarla en el pozo de Azapampa.

Tabla 49. Profundidades de nivel de agua de Pozos Aza, Villalva y Chilca

Pozo	Año	Profundidad (m)	Cota nivel freático (msnm)
Pozo Aza	2005	89.81	3244
Pozo Villalva	2017	79.40	3242
Pozo 08 Chilca	1992	8.00	3252
Pozo 08 Chilca	2001	12.00	3248
Pozo 08 Chilca	2005	16.00	3244
Pozo 08 Chilca	2009	21.00	3239
Pozo 08 Chilca	2016	23.10	3237

Nota. Elaboración propia

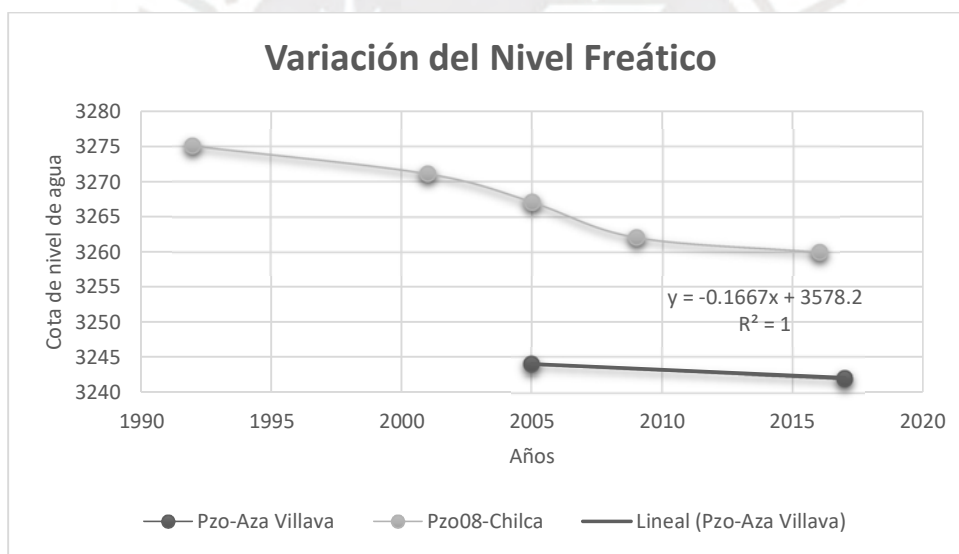


Figura 31. Variación del nivel freático
Elaboración propia

Con la ecuación hallada obtenemos que para el año 2048, se va a tener una cota igual 3236.8 metros y como en la actualidad se tiene una cota de 3241 m, observamos la disminución es de 4.2 metros. Esta variación influencia en el diseño de distribución de filtros y el diseño hidráulico; sin embargo, no han sido considerados para el presente diseño. Este

cálculo solo se realizó para tener en cuenta que este aspecto influye en el tiempo de vida útil de la obra de captación.

5.6. Estimación Cualitativa de Recarga de Acuífero-APLIS

Para poder determinar y conocer la recarga del acuífero en estudio, se empleó el método APLIS, el cual permite determinar la tasa media de recarga anual expresada como porcentaje de la precipitación, a partir de las variables: Altitud (A), Pendiente (P), Litología (L), áreas de absorción-Infiltración preferencial (I) y Suelo (S) (Andreo,B. et al., 2004). Cada variable tiene una categoría establecida y de acuerdo con la data de Sistema de Información Geográfica (SIG) de la cuenca, se asigna una puntuación por categoría, la cual es ingresada en la expresión de recarga, $R = (A + P + 3 \cdot L + 2 \cdot I + S) / 0,9$ (Andreo,B. et al., 2004).

Para el área de estudio, se trabajó el SIG para cada una de las variables como se muestra en la Figura 32.

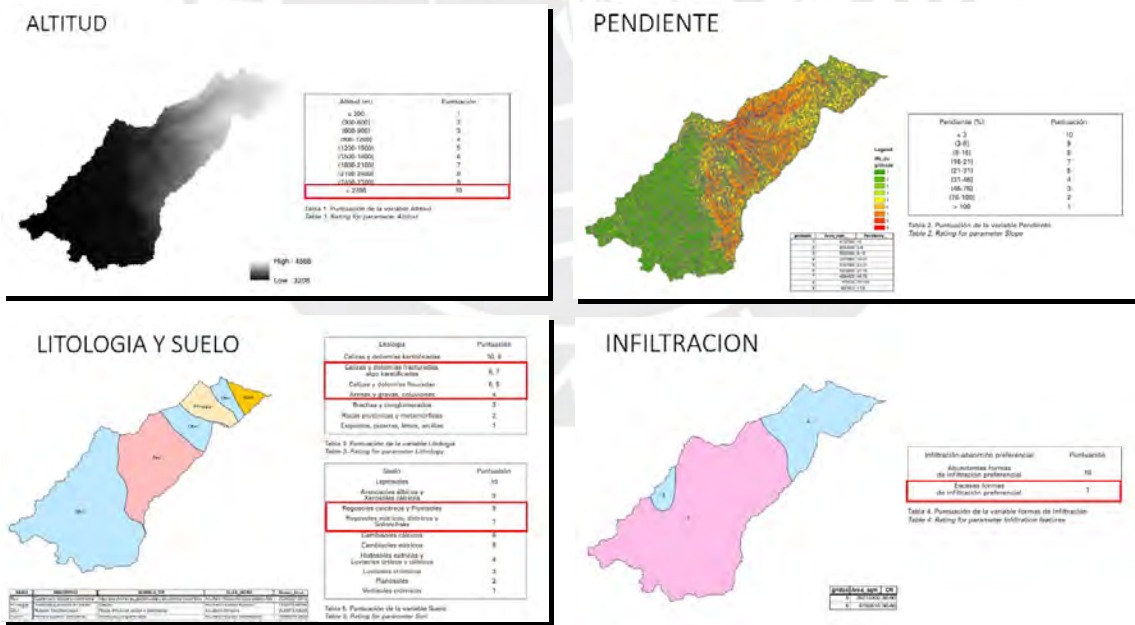


Figura 32. SIG de las variables APLIS
Elaboración propia

Finalmente, se elaboró un cuadro con la puntuación de las categorías según el Sistema de Información Geográfica a partir de las pendientes obtenidas en nuestra área de estudio. Del cálculo realizado se obtuvo que la recarga del acuífero se encuentra en un intervalo de 40% a 60% de la precipitación, la cual categoriza a la recarga como moderada según la metodología APLIS (Ver tabla 52).

Tabla 50. *Calculo para obtención de recarga por método APLIS – Parte 1*

Cod	Área (m2)	Pendiente (%)	índice	Altitud (msnm)	índice	Suelo	índice
1	4157060	<3	10	3208	10	Arenosoles-Fluviosoles	8.5
2	8743450	3-8	9	3208	10	Arenosoles-Fluviosoles	8.5
3	5030390	8-16	8	3208	10	Arenosoles-Fluviosoles	8.5
4	2270560	16-21	7	4566	10	Arenosoles-Fluviosoles	8.5
5	5161880	21-31	5	4566	10	Arenosoles-Fluviosoles	8.5
6	6372680	31-46	4	4566	10	Arenosoles-Fluviosoles	8.5
7	4684500	46-76	3	4566	10	Arenosoles-Fluviosoles	8.5
8	470539	76-100	2	4566	10	Arenosoles-Fluviosoles	8.5
9	89740.6	>100	1	4566	10	Arenosoles-Fluviosoles	8.5

Nota. Elaboración propia

Tabla 51. *Calculo para obtención de recarga por método APLIS – Parte 2*

Cod	Litología	Índice	Infiltración (CN)	Índice	APLIS
1	Arenas	4	86-90	1	47.2
2	Arenas	4	86-90	1	46.1
3	Arenas	4	86-90	1	45
4	Arenas	4	86-90	1	43.9
5	Calizas y dolomias fisuradas algo kársticas	8	90-95	1	55
6	Calizas y dolomias fisuradas algo kársticas	8	90-95	1	53.9
7	Calizas y dolomias fisuradas algo kársticas	8	90-95	1	52.8
8	Calizas y dolomias fisuradas algo kársticas	8	90-95	1	51.7
9	Calizas y dolomias fisuradas algo kársticas	8	90-95	1	50.6

Nota. Elaboración propia

Tabla 52. *Categoría de tasa de recarga según método APLIS*

Intervalos de Recarga (%P) Método APLIS	Clase Recarga
≤20	Muy Baja
20-40	Baja
40-60	Moderada
60-80	Alta
>80	Muy Alta

Nota. Tomado de Andreo, B. et al. (2004)

Capítulo 6: Conclusiones

1. La proyección en planta de la zona más favorable para la ubicación de un pozo se obtiene del estudio hidrogeológico donde, como parte del procedimiento, se intersectan las proyecciones verticales de (a) las regiones o áreas de basamento rocoso más profundo, (b) la zona de mayor resistividad y (c) la zona o región que contiene el nivel freático más alto. Además, se debe garantizar que exista un frente de recarga y una dirección de flujo subterráneo favorable a la misma. Además, se debe seleccionar un área cercana al punto de entrega de agua del pozo proyectado (Reservorio o cisterna de almacenamiento). En conclusión, la ubicación de nuestro pozo se deberá encontrar en las coordenadas UTM: 479183m E, 8661858m N, en el anexo de Azapampa, distrito de Chilca y provincia de Huancayo, para obtener los mejores resultados.
2. El caudal de demanda debe considerar la proyección de crecimiento de la población para los años de tiempo de vida útil en los que se basa el diseño, en este caso 40 años. El suministro considera un abastecimiento para consumo humano y no considera otros usos, por no ser prioritarios. Considerando lo expuesto el caudal de demanda para este trabajo fue de 30 l/s. En cuanto a la capacidad del acuífero para la extracción del agua, el análisis hidráulico indica que este depende de las propiedades del acuífero (Transmisividad, coeficiente de almacenamiento y conductividad hidráulica) y las características del pozo (Profundidad de pozo y radio de tubería). Por ello, bajo el análisis hidráulico el caudal resultante fue también de 30l/s. Concluyendo que se puede extraer el caudal demandado, sin perjudicar el acuífero.
3. El diseño se realizó de manera iterativa. Comenzando con un diseño preliminar que consideró el caudal de demanda y diámetro de equipo de bombeo. Con el predimensionamiento de la tubería y equipo de bombeo, se realizó la evaluación hidráulica mediante la ecuación de equilibrio y luego de varias iteraciones se

establecieron las dimensiones definitivas del pozo como diámetro 12 pulgadas (305 mm) y profundidad 90 metros.

4. La distribución de los filtros se realizó en los estratos más permeables y que se encuentran ubicados debajo del nivel dinámico esperado. La longitud efectiva de los filtros se calculó en 35 metros. Además, se utilizó la ecuación de equilibrio para determinar su diámetro, obteniendo el mismo valor que el diámetro de la tubería. Esto corrobora que el diámetro será constante a lo largo de pozo, siguiendo también la recomendación de la norma peruana y las referencias citadas.
5. El dimensionamiento del paquete de grava se encuentra relacionado a la granulometría del acuífero. Para ello, se consideró el diámetro que controla la retención del 70% del material. Además, se utilizó un coeficiente de 6 para el dimensionamiento del primer punto de la granulometría del paquete de grava que se encuentra relacionado al tipo y características del acuífero (Metodología de Sterrett, 2007). Finalmente, las características de la granulometría del paquete de grava deben cumplir con un coeficiente de uniformidad igual a 2 y características de calidad descritas en el estudio. Además, de este punto se determina el tamaño de abertura del filtro. El dimensionamiento del tamaño de ranura deberá retener el 90% del material del paquete de grava. El tamaño de ranura será, para el proyecto de tesis, de 1.58mm.
6. La selección de materiales para la tubería y filtro depende de dos factores relevantes, resistencia y corrosión. En el diseño se pudo observar que la evaluación de resistencias se realizó para condiciones de tensión y colapso tanto para tubería como filtros. De ambos análisis se observó que los materiales con mayor resistencia a tensión y colapso fueron el acero carbono y acero inoxidable. Además, en el cálculo de determinación de presiones de colapso para el filtro, se elaboró un análisis comparativo de sensibilidad respecto a los parámetros de tamaño de abertura y espesor, del cual se desprende que, a

mayor tamaño de abertura, menor será la resistencia a colapso; a mayor espesor, mayor resistencia a colapso. Si bien, desde el punto de vista de resistencia mecánica los mejores materiales fueron acero carbono y acero inoxidable, desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión, se concluye el uso del acero inoxidable tanto en la tubería como filtros.

7. El pozo colapsado con dimensiones de profundidad igual a 142 metros, pese a que el pre dimensionamiento planteó una profundidad de 110 metros; y diámetro de tubería igual a 15" (381 mm) brinda un caudal de 18 litros por segundo. Sin embargo, se sabe que, a mayor profundidad y mayor diámetro, mayor es el caudal que se obtiene; condición que no cumple el pozo perforado y brinda un indicador de problema. Además, del análisis de presiones de colapso, se puede concluir que para un cambio en las dimensiones del pozo aproximadamente del 50% (pasar de una profundidad de 90 a 142 metros), la solicitud de carga se reduce a casi la mitad (13.38 kg/cm² para pozo de 142m y 24.8 kg/cm²).
8. El cálculo de los esfuerzos con la variación de la verticalidad del pozo de una profundidad de 100 metros, mostró un comportamiento exponencial. Para 30 centímetros de desviación (Longitud máxima recomendada por AWWA), obtenemos un factor de seguridad de 1.93. Por otro lado, se realizó el análisis dinámico del pozo vertical con una aceleración de 0.35g (Mw = 5.5) obteniéndose un factor de seguridad de 4.07 respecto del esfuerzo de fluencia. Los esfuerzos por inclinación (1967 kg/cm²) generan más del triple de solicitud de carga que los esfuerzos por sismo (590kg/cm²). Sin embargo, si ambos esfuerzos (sismo e inclinación) ocurren en simultáneo, como caso crítico, vemos que el acero del pozo sobrepasa el esfuerzo por fluencia, llegando a la falla del pozo.

Bibliografía

- Andreo, B., Vías, J., López-Geta, J.A., Carrasco, F., Durán, J.J. y Jiménez, P. (2004).
Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos.
Boletín Geológico y Minero, 115 (2): 177-186 ISSN: 0366-0176
- Agrícola Comercial e Industrial S.A. (2019). Base de datos históricos de pozos en la provincia de Huancayo.
- Álvarez, A. (2003). Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. *Publicación Técnica Instituto Mexicano Del Transporte*, (229), 83.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2014). *Hydraulics of Wells*. (N. Ahmed, S. Taylor, & Z. Sheng, Eds.), *ASCE Manuals and reports on Engineering Practice N° 127* (Vol. 9). Virginia: Task Committee on Hydraulics of Wells.
<https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9932-0.50010-3>
- American Water Works Association. (1997). AWWA STANDARD FOR WATER WELLS A100-97. *AMERICAN NATIONAL STANDARD*, 97.
- American Water Works Association. (2006). AWWA STANDARD FOR WATER WELLS A100-06. *AMERICAN NATIONAL STANDARD*, 06.
- American Water Works Association. (2003). *Groundwater - Manual of Water Supply Practices, M21* (Third Edit). Denver. Retrieved from <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpGMWSPME7/groundwater-manual-water/groundwater-manual-water>
- Autoridad Nacional del Agua. (2017). AAA Mantaro. *Atlas de Recursos Hídricos Del Perú*, 2.10, 236–259.
- Autoridad Nacional del Agua. (2016). Compendio nacional de estadísticas de recursos hídricos. In *Sistema Nacional de información de recursos hídricos (SNIRH)* (Vol. 53, p. 268).
- Autoridad Nacional del Agua. (2015). Evaluación de recursos hídricos en la cuenca de Mantaro. *Autoridad Nacional Del Agua*, 59. Retrieved from <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/36>
- Barber, N. L. (2014). Summary of Estimated Water Use in the United States. *United States Geological Survey (USGS)*, (November).
- Bocanegra, E., Cardoso, G., Custodio, E., Massone, H., Martínez, D., & Raposo de Almeida, R. (2015). Los Acuíferos Costeros Del Litoral Atlántico Sudamericano: La Explotación En El Estado De Rio De Janeiro (Brasil) Y La Provincia De Buenos Aires (Argentina). Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/D_Martinez3/publication/267253777_LOS_ACUIFEROS_COSTEROS_DEL_LITORAL_ATLANTICO_SUDAMERICANO_LA_EXPL

OTACION_EN_EL_ESTADO_DE_RIO_DE_JANEIRO_BRASIL_Y_LA_PROVINCIA_DE_BUENOS_AIRES_ARGENTINA/links/54faf85d0cf2859b8857827c/L

- Buchanan, B., De La Cruz, N., Macpherson, J., & Williamson, K. (2013). Design and Construction of Water Wells. In *Water wells that last* (Octava Edi, p. 128). Alberta Agriculture and Rural Development. Retrieved from <http://www.agric.gov.ab.ca/>
- Cordeiro de Souza - Fernandes, L. (2015). El acuífero guaraní en Brasil y su protección por medio de la legislación ambiental y urbanística: Un estudio de caso, *VI*, 1–27.
- Cubas, F., Llano, M., & De Rosenzweig, L. (2017). El misterio del agua subterránea en México, 9.
- Estados Unidos Mexicanos. (2016). LEY DE AGUAS NACIONALES. *Diario Oficial de La Federación. TEXTO VIGENTE Última Reforma Publicada DOF 24-03-2016*, 1–91.
- Galloway, D., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (2000). Land subsidence in the United States. *United States Geological Survey (USGS)*, (1182), 1–175. <https://doi.org/10.3133/fs16500>
- Giles, R. V., Evett, J. B., & Liu, C. (2014). *Fluid Mechanics and Hydraulics. Beyond Failure*. <https://doi.org/10.1061/9780784409732.ch08>
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., & Van Beek, L. P. H. (2014). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, *488*(7410), 197–200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>
- Hidrostal. (2018). Manual del usuario, instalación, operación y mantenimiento. *Bombas sumergibles*. [http://www.hidrostal.com.pe/pdf/manuales/L2/MANUAL%20LINEA-2%2016%20BOMBA%20SUMERGIBLE%204,%206,%208%20y%2010%20PULGADA%20\(03-2015\).pdf](http://www.hidrostal.com.pe/pdf/manuales/L2/MANUAL%20LINEA-2%2016%20BOMBA%20SUMERGIBLE%204,%206,%208%20y%2010%20PULGADA%20(03-2015).pdf)
- IDEAM. (2014). Programa Nacional de Aguas Subterráneas.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) (2017). Mapa geológico del cuadrángulo de Huancayo 25m. En *Geocatmin*. <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2017). Censos Nacionales XII de Población y VII de Vivienda, 22 de octubre del 2017, Perú: Resultados Definitivos. Lima, octubre de 2018.
- Instituto Nacional de la Calidad (INACAL). (2017). AGUAS SUBTERRÁNEAS. Pozo tubular. Proyecto de pozo tubular para captación de agua subterránea. *NORMA PERUANA TÉCNICA NTP 360.100*, (Lima 27).
- Instituto Nacional de la Calidad (INACAL). (2018). AGUAS SUBTERRÁNEAS. Pozo tubular. Construcción. *NORMA PERUANA TÉCNICA NTP 360.101*, (Lima 27).

- Jiménez Cisneros, B., & Galizia Tundisi, J. (2012). Los recursos hídricos en Canadá: Un punto de vista estratégico. In *Diagnóstico del agua en las Américas* (pp. 1–448). Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC.
- Martínez, A.P.E., Martínez, S.P., Caste, & Castaño, C.S. (2005). *Fundamentos de hidrogeología*. Mundi-Prensa.
- Maupin, M. A., Kenny, J. F., Hutson, S. S., Lovelace, J. K., Barber, N. L., & Linsey, K. S. (2014). *Estimated Use of Water in the United States in 2010*. *United States Geological Survey (USGS)* (Vol. 1405). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3133/cir1405>
- McNeill, J. D. (1990). *Use of Electromagnetic Methods for Groundwater Studies*, (2).
- Michael, A. M., Khepar, S. D., & Sondhi, S. K. (2013). *Water Wells and Pumps*. *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53).
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017). Estandares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y disposiciones complementarias. *El Peruano*, 6–9. Retrieved from <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Missteart, B., Banks, D., & Clark, L. (2017). *Water Wells and Boreholes*.
- Mogg, J.L. (1972), Practical Corrosion and Incrustation Guide Lines for Water Wells. *Groundwater*, 10: 6-11. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1972.tb02908.x>
- National Ground Water Association (NGWA). (1998). *Manual of Water Well Construction Practices*, 2, 260.
- Nazarian, H. N. (1973). Water Well Design for Earthquake-Induced Motions. *Journal of the Power Division*, 101(July), 111–127.
- Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA). (2009). *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina*.
- Pulido, C. J. L. (1978). *Hidrogeología práctica*. Bilbao: Urmo.
- Rashed, K. A., & Abduljawad, A. M. (2013). A GUIDE TO DESIGNING WATER WELLS, (November), 5–7.
- Rocha Felices, A. (2007). *Hidraulica De Tuberias Y Canales*. *Susferrinmaquinas.Com.Ar*.
- Rodriguez, C. O., Vargas, N. O., Jaramillo, O., Piñeros, A., & Cañas, H. (2010). Oferta Y Uso De Agua Subterránea En Colombia. *Estudio Nacional Del Agua 2010*, 4, 112–168. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP4.pdf>
- Roscoe Moss Company. (1990). *Handbook of Ground Water Development*.

- Sánchez, J. (2001). Prospección geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales. *Departamento de Geología Universidad de Salamanca*, 1–12. Retrieved from <http://web.usal.es/javisan/hidro>
- Sedam Huancayo (2006) Informe Final de Ejecución de Obra “Perforación de Pozo Tubular de 130 m de profundidad – Azapampa”
- Solano, R. A. (2016) Estudio Hidrogeológico de aguas subterráneas para la perforación de un pozo tubular con fines de abastecimiento de agua potable.
- Smith, H. F. (1954). Gravel Packing Water Wells, (44).
- Sterrett, R. J. (2007). *Groundwater and Wells* (3ra ed.). -Johnson Screens.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS). (2018). Proyecto De Estudio Tarifario. *Sunass*, 1–696. Retrieved from https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2020/09/epsgrau_etproy_288_2018.pdf
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. *John Wiley & Sons*.
- United Nations Education, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2012). World’s groundwater resources are suffering from poor governance, experts say. UNESCO. Recuperado de http://www.unesco.org/new/en/media-services/single-view/news/worlds_groundwater_resources_are_suffering_from_poor_gove/
- U. S. Army Corps of Engineers. (2012). AED Design Requirements: Well Pumps y Well Design, (March).
- U. S. Department of Agriculture (USDA). (2010). Well Design and Spring Development. In *National Engineering Handbook* (p. 63). United States.
- Vivienda, M. de. (2006). Norma OS.100: Consideraciones basicas de diseño de Infraestructura Sanitaria. *El Peruano*, 1–5. Retrieved from <http://www3.vivienda.gob.pe/dgprvu/docs/RNE/Título II Habilitaciones Urbanas/26 OS.100 CONSIDERACIONES BASICAS DE DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA>
- Williams, D. (1985). Modern techniques in well design. *Roscoe Moss Company*, 77(9), 68–74. Retrieved from http://www.roscoemoss.com/tech_manuals/mtwd/mtwd.pdf

ANEXO A: AREA DE ESTUDIO

477000

478000

479000

8664000

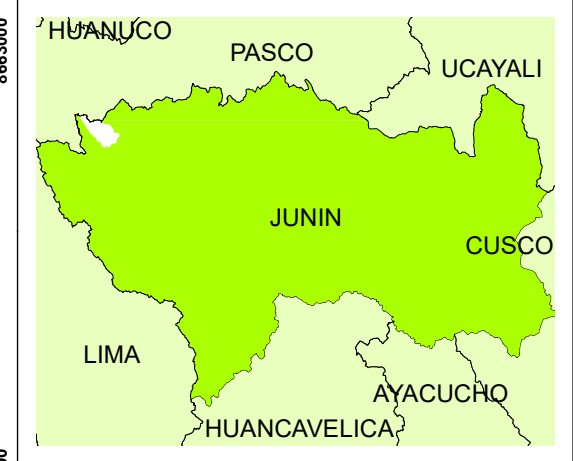
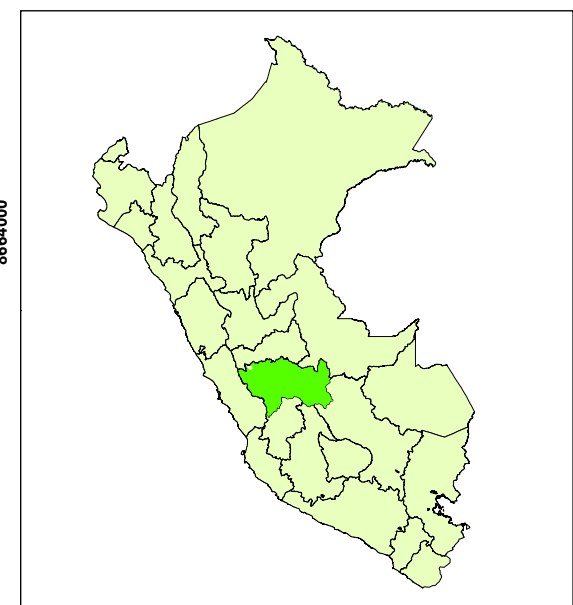
8663000

8662000

477000

478000

479000

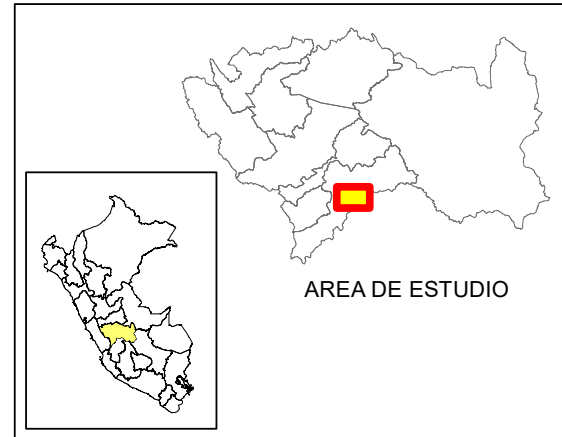
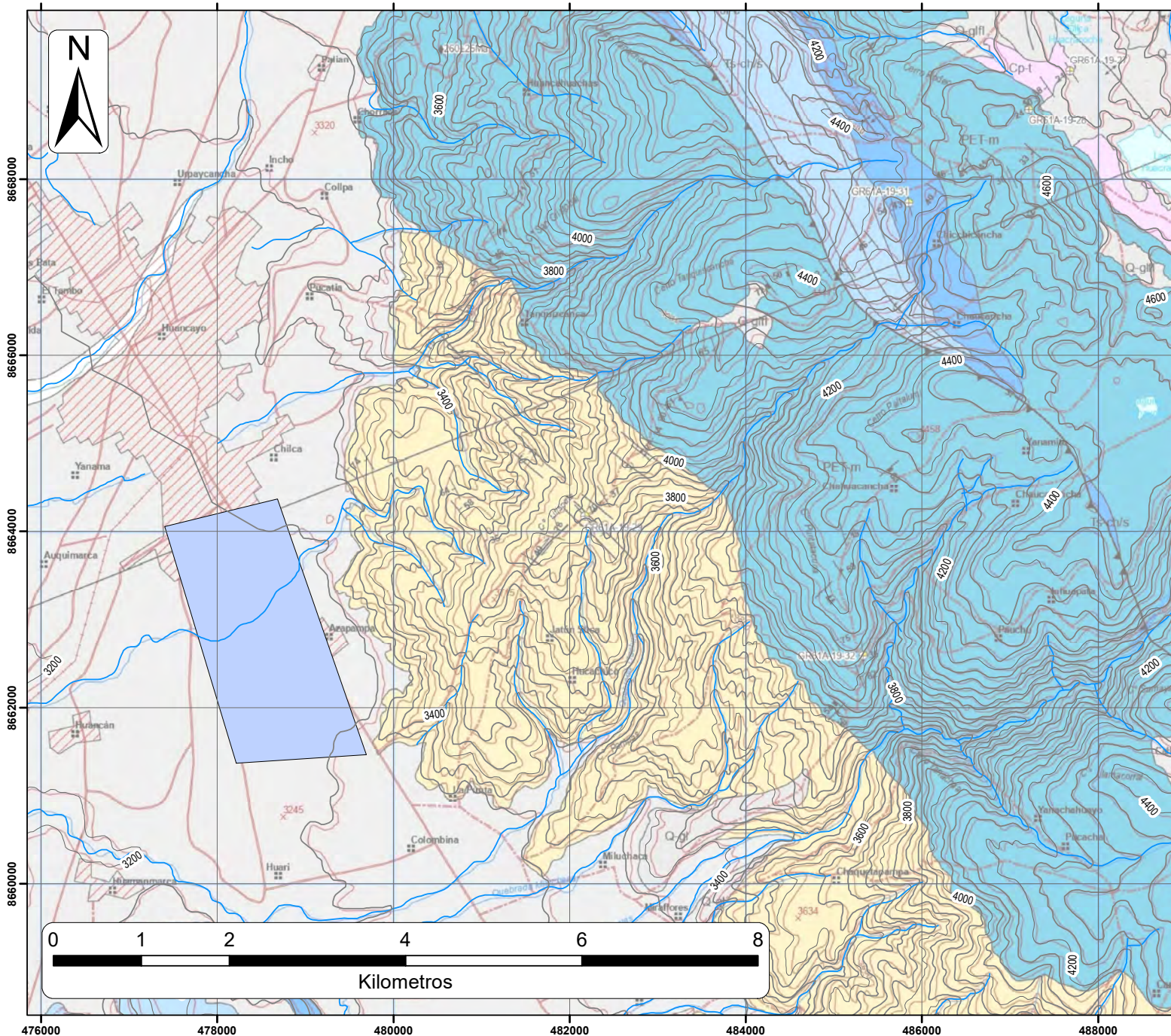


PROYECTO: DISEÑO DE POZO PROFUNDO AZAPAMPA-CHILCA
TITULO: AREA DE ESTUDIO

Elaborado por: K.R.-Z.C.
Revisado por: J.R.
Fecha: 12/21

MAPA N°:
01

Anexo B: Mapa de Geología de la Zona de Estudio



LEYENDA

- Area Estudio

LITOPERMEABILIDADES

- Depósitos cuaternarios
- Grupo Excelsior (SD-e)
- Grupo Mitu (PET-m)
- Formación Condorsinga (Ji - c)

PROYECTO: DISEÑO DE POZO PROFUNDO AZAPAMPA - CHILCA

TÍTULO: MAPA DE GEOLOGÍA

Dibujado por:
K.R.-Z.C.
Basado en:
Torres et al. (2019)
Megard et al. (1998)
Fecha: 12/2021

Mapa N°:
02

Anexo C: Mapa de ubicación de sondajes



LEYENDA

▲ Resistividad

PROYECTO: DISEÑO DE
POZO PROFUNDO
AZAPAMPA - CHILCA

TITULO: MAPA DE
UBICACIÓN
DE SONDAJES

Diseñado por: K.R.-Z.C.
Revisado por: J.R.U.
Fecha: 12/2021

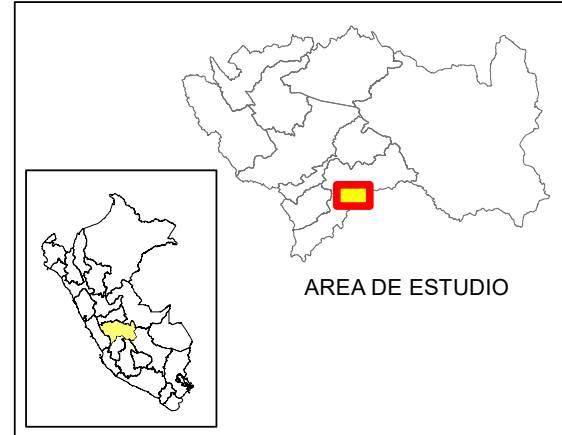
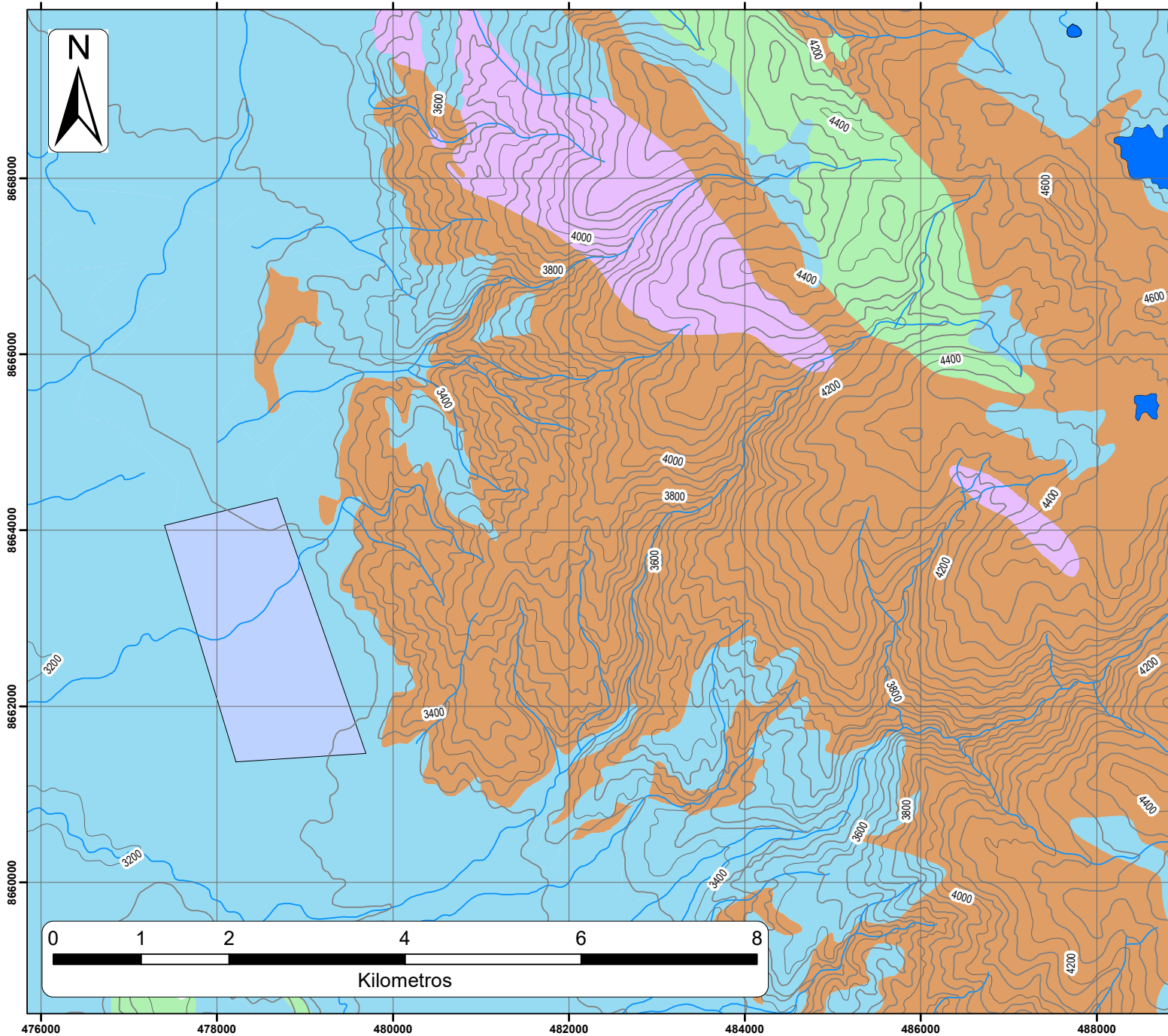
Mapa N°:

03

Anexo D: Inventario de pozos con data completa para Hidroisohipsas

Código	XX	YY	Altitud	Profundidad	NE	Hidroisopieza	Condicion	Fuente
IRHS 12/01/07-01	477515	8664410	3256	16.20	15.90	3240.10	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/07-04	476762	8663262	3238	7.80	7.05	3230.95	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/07-05	476835	8663314	3238	8.15	6.20	3231.80	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/14-06	474961	8668463	3275	68.90	52.00	3223.00	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/14-07	474875	8668349	3271	40.87	38.80	3232.20	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/14-10	476450	8666866	3272	38.00	36.70	3235.30	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/01-04	477746	8666753	3292	50.60	49.40	3242.60	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/01-05	477686	8666212	3273	52.80	49.50	3223.50	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/01-06	477743	8666272	3281	53.80	52.10	3228.90	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/01-07	477999	8665941	3273	51.00	40.15	3232.85	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/01-08	477785	8665827	3273	42.00	41.50	3231.50	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/01-09	476984	8666201	3269	25.00	24.80	3244.20	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/01-10	476828	8665613	3294	20.35	19.00	3275.00	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/01-12	477259	8665535	3273	31.70	28.25	3244.75	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/01-14	476647	8665345	3257	5.55	4.00	3253.00	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/01-18	476132	8665413	3231	30.90	24.45	3206.55	Licenciado	ANA
IRHS 12/01/30-01	469322	8678707	3270	16.35	16.22	3253.78	Licenciado	ANA

Anexo E: Mapa Hidrogeológico



LEYENDA

Area Estudio

LITOPERMEABILIDADES

- Acuíferos fisurados
- Acuitardo
- Volcánicos
- Acuífero poroso no consolidado

PROYECTO: DISEÑO DE POZO PROFUNDO AZAPAMPA - CHILCA

TÍTULO: MAPA DE HIDROGEOLOGÍA

Diseñado por:
K.R.- Z.C.
Revisado por:
J.R.U.
Fecha: 12/2021

Mapa N°:
05

ANEXO F: Evaluación con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECAS)

TABLA 1F: Resultados de análisis de los principales parámetros pozo Chilca

Parámetro	Unidades	Limite de cuantificación	Limite de detección	Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano - Ministerio de Salud ⁽¹⁾			Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aguas Superficiales Destinadas a la Producción de Agua Potable y Riego ⁽²⁾				Resultados de análisis del pozo Chilca
				Anexo I LMP de parámetros microbiológicos y parasitológicos	Anexo II LMP de parámetros de calidad organoléptica	Anexo III LMP de parámetros químicos, inorgánicos y orgánicos	Categoría 1-A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Categoría 1-A2: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Categoría 1-A3: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	Categoría D1: Aguas que pueden ser utilizadas para riego de vegetal	Fecha de muestreo: 21/12/17
Parámetros Generales (Físico-Químicos)											
pH	pH	-	-		6.5-8.5		6.5-8.5	5.5-9.0	5.5-9.0	6.5-8.5	7.12
Conductividad	uS/cm	1.0	1.0		1500		1500	1600	**	2500	337
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	10.0	5.4		1000		1000	1000	1500		163.6
Sólidos Totales Suspendidos	mg/L	3.0	1.3								
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	1.0	0.5		500		500	**	**		135.35
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	1.0	0.8								
Turbidez	NTU	0.1	0.07		5		5	100	**		0.23
Aceites y grasas	mg/L	1.0	0.6				0.5	1.7	1.7	5	
D.B.O.	mg/L	2.0	1.0				3	5	10	15	
Color verdadero	UCV esc. Pt/Co	0.5	0.3		15		15	100	**	100	<0.5
Olor	-	-	-		Aceptable						Aceptable
Sabor	-	-	-		Aceptable						Aceptable
Principales Aniones (Físico-Químicos)											
Cloruros	mg/L	0.1	0.05		250		250	250	250	500	26.99
Fluoruros	mg/L	0.05	0.03				1.5	**	**	1	
Sulfatos	mg/L	0.1	0.05		250		250	500	**	1000	12
Principales Cationes (Físico-Químicos)											
Calcio	mg/L	0.0303	0.0152								33.13
Magnesio	mg/L	0.0356	0.0178								12.6
Potasio	mg/L	0.0237	0.0119								
Sodio	mg/L	0.01	0.005		200						15.6
Constituyentes Miscelaneos											
Nitrito como NO ₂	mg/L NO ₂	0.05	0.03			0.2/3.0(***)	3	3	**		
Nitrato como NO ₃	mg/L NO ₃	0.05	0.03			50	50	50	50		21.6
Fósforo Total	mg/L	0.01	0.007			50	50	50	50		

Excedió los LMP y/o ECA

Notas:

.(1) Valores correspondientes al Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano, según Decreto Supremo N°031-2010-SA/Ministerio de Salud

.(2) Valores correspondientes a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, aprobado con Decreto Supremo N°004-2017-MINAM

(**) El parámetro no aplica para esta categoría

(***) 0.2 para exposición corta y 0.3 para exposición larga

LMP: Limite máximo permisible

TABLA 2F: Resultados del análisis de metales totales pozo Chilca

Parámetro	Unidades	Límite de cuantificación	Límite de detección	Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano - Ministerio de Salud ⁽¹⁾			Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aguas Superficiales Destinadas a la Producción de Agua Potable y Riego ⁽²⁾				Resultados de análisis del pozo Chilca
				Anexo I LMP de parámetros microbiológicos y parasitológicos	Anexo II LMP de parámetros de calidad organoléptica	Anexo III LMP de parámetros químicos, inorgánicos y orgánicos	Categoría 1-A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Categoría 1-A2: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Categoría 1-A3: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	Categoría D1: Aguas que pueden ser utilizadas para riego de vegetales	Fecha de muestreo: 21/12/17
Aluminio (Al)	mg/L	0.0019	0.001		0.2		0.9	5	5		0.013
Antimonio (Sb)	mg/L	0.0002	0.0001			0.02	0.02	0.02	**		
Arsénico (As)	mg/L	0.0004	0.002			0.01	0.01	0.01	0.15	0.1	
Bario (Ba)	mg/L	0.0004	0.002			0.7	0.7	1	**	0.7	
Berilio (Be)	mg/L	0.0006	0.0003				0.012	0.04	0.1	0.1	
Bismuto (Bi)	mg/L	0.0003	0.0001								
Boro (B)	mg/L	0.0012	0.0006			1.5	2.4	2.4	2.4	1	
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0002	0.0001			0.003	0.003	0.005	0.01	0.01	
Cerio (Ce)	mg/L	0.0003	0.0001								
Cobalto (Co)	mg/L	0.0002	0.0001								
Cobre (Cu)	mg/L	0.0001	0.0001	2			2	2	2	0.2	0.01
Cromo (Cr)	mg/L	0.0005	0.002			0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	
Estaño (Sn)	mg/L	0.0004	0.0002								
Estroncio (Sr)	mg/L	0.002	0.001								
Fosforo (P)	mg/L	0.0033	0.0016				0.1	0.15	0.15		
Hierro (Fe)	mg/L	0.0031	0.0015		0.3		0.3	1	5	5	0.01
Litio (Li)	mg/L	0.0012	0.003							2.5	
Manganeso (Mn)	mg/L	0.0003	0.0001		0.4		0.4	0.4	0.5	0.2	0.013
Mercurio (Hg)	mg/L	0.0001	0.0001			0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	
Molibdeno (Mo)	mg/L	0.0002	0.0001			0.07	0.07	**	**		
Niquel (Ni)	mg/L	0.0004	0.0002			0.02	0.07	**	**	0.2	
Plata (Ag)	mg/L	0.0002	0.0001								
Plomo (Pb)	mg/L	0.0002	0.0001			0.01	0.01	0.05	0.05	0.05	
Selenio (Se)	mg/L	0.0002	0.0001			0.01	0.04	0.04	0.05	0.02	
Silicio (Si)	mg/L	0.1	0.05								
Talio (Tl)	mg/L	0.0003	0.0002								
Titanio (Ti)	mg/L	0.0004	0.0002								
Torio (Th)	mg/L	0.001	0.0005								
Uranio (U)	mg/L	0.0003	0.0001			0.015	0.02	0.02	0.02		
Vanadio (V)	mg/L	0.0003	0.0002								
Zinc (Zn)	mg/L	0.0002	0.0001		3		3	5	5	2	0

Excedió los LMP y/o ECA

Notas:

(1) Valores correspondientes al Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano, según Decreto Supremo N°031-2010-SA/Ministerio de Salud

(2) Valores correspondientes a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, aprobado con Decreto Supremo N°004-2017-MINAM

(**) El parámetro no aplica para esta categoría

(***) 0.2 para exposición corta y 0.3 para exposición larga

LMP: Límite máximo permisible

TABLA 3F: Resultados de análisis microbacteriológico pozo Chilca

Parámetro	Unidades	Límite de detección	Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano - Ministerio de Salud ⁽¹⁾			Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aguas Superficiales Destinadas a la Producción de Agua Potable y Riego ⁽²⁾				Resultados de análisis del pozo Chilca
			Anexo I LMP de parámetros microbiológicos y parasitológicos	Anexo II LMP de parámetros de calidad organoléptica	Anexo III LMP de parámetros químicos, inorgánicos y orgánicos	Categoría 1-A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Categoría 1-A2: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Categoría 1-A3: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	Categoría D1: Aguas que pueden ser utilizadas para riego de vegetale	Fecha de muestreo: 21/12/17
Parámetros bacteriológicos y parasitológicos										
Bacterias Coliformes Totales	NMP/100 mL	-	<1.8/100 mL			50	**	**		<1.8
E. Coli	NMP/100 mL	-	<1.8/100 mL			0	**	**	1000	<1.8
Bacterias Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 mL	-	<1.8/100 mL			20	2000	20000	1000	<1.8

Excedió los LMP y/o ECA

Notas:

(1) Valores correspondientes al Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano, según Decreto Supremo N°031-2010-SA/Ministerio de Salud

(2) Valores correspondientes a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, aprobado con Decreto Supremo N°004-2017-MINAM

(**) El parámetro no aplica para esta categoría

(***) 0.2 para exposición corta y 0.3 para exposición larga

LMP: Límite máximo permisible

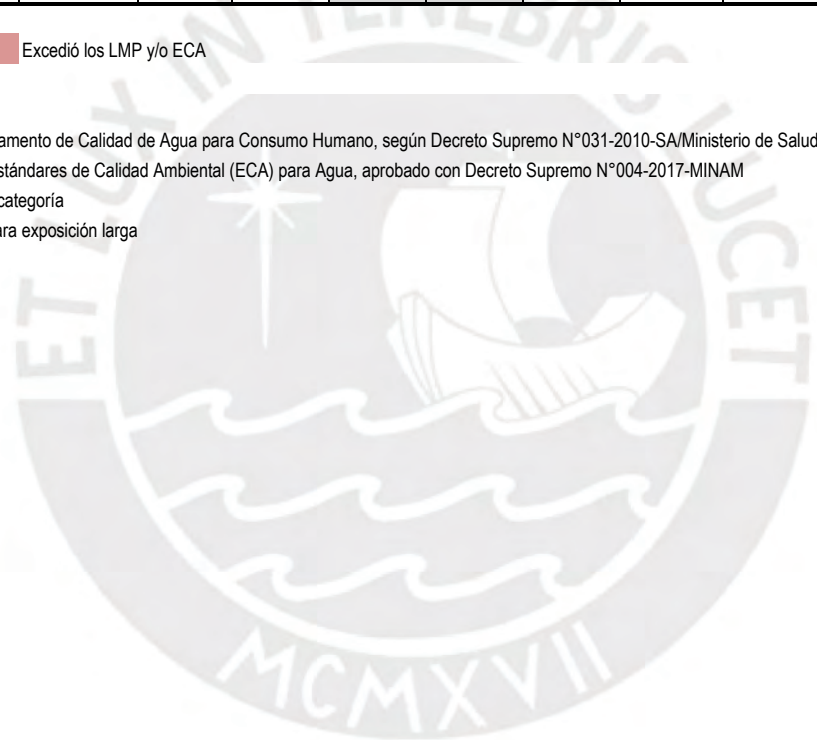


TABLA 4F: Resultados de análisis de los principales parámetros pozo Azapampa

Parámetro	Unidades	Límite de cuantificación	Límite de detección	Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano - Ministerio de Salud ⁽¹⁾			Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aguas Superficiales Destinadas a la Producción de Agua Potable y Riego ⁽²⁾				Resultados de análisis del pozo Azapampa
				Anexo I LMP de parámetros microbiológicos y parasitológicos	Anexo II LMP de parámetros de calidad organoléptica	Anexo III LMP de parámetros químicos, inorgánicos y orgánicos	Categoría 1-A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Categoría 1-A2: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Categoría 1-A3: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	Categoría D1: Aguas que pueden ser utilizadas para riego de vegetal	Fecha de muestreo: 14/12/16
Parámetros Generales (Físico-Químicos)											
pH	pH	-	-		6.5-8.5		6.5-8.5	5.5-9.0	5.5-9.0	6.5-8.5	7.4
Conductividad	uS/cm	1.0	1.0		1500		1500	1600	**	2500	944
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	10.0	5.4		1000		1000	1000	1500		472.94
Sólidos Totales Suspendidos	mg/L	3.0	1.3								
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	1.0	0.5		500		500	**	**		259.42
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	1.0	0.8								
Turbidez	NTU	0.1	0.07		5		5	100	**		0.12
Aceites y grasas	mg/L	1.0	0.6				0.5	1.7	1.7	5	
D.B.O.	mg/L	2.0	1.0				3	5	10	15	
Color verdadero	UCV esc. Pt/Co	0.5	0.3		15		15	100	**	100	<0.5
Olor	-	-	-		Aceptable						Aceptable
Sabor	-	-	-		Aceptable						Aceptable
Principales Aniones (Físico-Químicos)											
Cloruros	mg/L	0.1	0.05		250		250	250	250	500	201.36
Fluoruros	mg/L	0.05	0.03				1.5	**	**	1	
Sulfatos	mg/L	0.1	0.05		250		250	500	**	1000	27
Principales Cationes (Físico-Químicos)											
Calcio	mg/L	0.0303	0.0152								58.72
Magnesio	mg/L	0.0356	0.0178								27.03
Potasio	mg/L	0.0237	0.0119								
Sodio	mg/L	0.01	0.005		200						68.4
Constituyentes Miscelaneos											
Nitrito como NO ₂	mg/L NO ₂	0.05	0.03			0.2/3.0(***)	3	3	**		
Nitrato como NO ₃	mg/L NO ₃	0.05	0.03			50	50	50	50		11
Fósforo Total	mg/L	0.01	0.007			50	50	50	50		

Excedió los LMP y/o ECA

Notas:

(1) Valores correspondientes al Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano, según Decreto Supremo N°031-2010-SA/Ministerio de Salud

(2) Valores correspondientes a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, aprobado con Decreto Supremo N°004-2017-MINAM

(**) El parámetro no aplica para esta categoría

(***) 0.2 para exposición corta y 0.3 para exposición larga

LMP: Límite máximo permisible

TABLA 5F: Resultados del análisis de metales totales pozo Azapampa

Parámetro	Unidades	Límite de cuantificación	Límite de detección	Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano - Ministerio de Salud ⁽¹⁾			Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aguas Superficiales Destinadas a la Producción de Agua Potable y Riego ⁽²⁾				Resultados de análisis del pozo Azapampa
				Anexo I LMP de parámetros microbiológicos y parasitológicos	Anexo II LMP de parámetros de calidad organoléptica	Anexo III LMP de parámetros químicos, inorgánicos y orgánicos	Categoría 1-A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Categoría 1-A2: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Categoría 1-A3: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	Categoría D1: Aguas que pueden ser utilizadas para riego de vegetale	Fecha de muestreo: 14/12/16
Aluminio (Al)	mg/L	0.0019	0.001		0.2		0.9	5	5		0.006
Antimonio (Sb)	mg/L	0.0002	0.0001			0.02	0.02	0.02	**		
Arsénico (As)	mg/L	0.0004	0.002			0.01	0.01	0.01	0.15	0.1	
Bario (Ba)	mg/L	0.0004	0.002			0.7	0.7	1	**	0.7	
Berilio (Be)	mg/L	0.0006	0.0003				0.012	0.04	0.1	0.1	
Bismuto (Bi)	mg/L	0.0003	0.0001								
Boro (B)	mg/L	0.0012	0.0006			1.5	2.4	2.4	2.4	1	
Cadmio (Cd)	mg/L	0.0002	0.0001			0.003	0.003	0.005	0.01	0.01	
Cerio (Ce)	mg/L	0.0003	0.0001								
Cobalto (Co)	mg/L	0.0002	0.0001								
Cobre (Cu)	mg/L	0.0001	0.0001		2		2	2	2	0.2	0.01
Cromo (Cr)	mg/L	0.0005	0.002			0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	
Estaño (Sn)	mg/L	0.0004	0.0002								
Estroncio (Sr)	mg/L	0.002	0.001								
Fosforo (P)	mg/L	0.0033	0.0016				0.1	0.15	0.15		
Hierro (Fe)	mg/L	0.0031	0.0015		0.3		0.3	1	5	5	0.08
Litio (Li)	mg/L	0.0012	0.003							2.5	
Manganeso (Mn)	mg/L	0.0003	0.0001		0.4		0.4	0.4	0.5	0.2	0.229
Mercurio (Hg)	mg/L	0.0001	0.0001			0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	
Molibdeno (Mo)	mg/L	0.0002	0.0001			0.07	0.07	**	**		
Niquel (Ni)	mg/L	0.0004	0.0002			0.02	0.07	**	**	0.2	
Plata (Ag)	mg/L	0.0002	0.0001								
Plomo (Pb)	mg/L	0.0002	0.0001			0.01	0.01	0.05	0.05	0.05	
Selenio (Se)	mg/L	0.0002	0.0001			0.01	0.04	0.04	0.05	0.02	
Silicio (Si)	mg/L	0.1	0.05								
Talio (Tl)	mg/L	0.0003	0.0002								
Titanio (Ti)	mg/L	0.0004	0.0002								
Torio (Th)	mg/L	0.001	0.0005								
Uranio (U)	mg/L	0.0003	0.0001			0.015	0.02	0.02	0.02		
Vanadio (V)	mg/L	0.0003	0.0002								
Zinc (Zn)	mg/L	0.0002	0.0001		3		3	5	5	2	0.02

Excedió los LMP y/o ECA

Notas:

(1) Valores correspondientes al Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano, según Decreto Supremo N°031-2010-SA/Ministerio de Salud

(2) Valores correspondientes a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, aprobado con Decreto Supremo N°004-2017-MINAM

(**) El parámetro no aplica para esta categoría

(***) 0.2 para exposición corta y 0.3 para exposición larga

LMP: Límite máximo permisible

TABLA 6F: Resultados de análisis microbacteriológico pozo Azapampa

Parámetro	Unidades	Límite de detección	Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano - Ministerio de Salud ⁽¹⁾			Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aguas Superficiales Destinadas a la Producción de Agua Potable y Riego ⁽²⁾				Resultados de análisis del pozo Azapampa
			Anexo I LMP de parámetros microbiológicos y parasitológicos	Anexo II LMP de parámetros de calidad organoléptica	Anexo III LMP de parámetros químicos, inorgánicos y orgánicos	Categoría 1-A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Categoría 1-A2: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Categoría 1-A3: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	Categoría D1: Aguas que pueden ser utilizadas para riego de vegetale	Fecha de muestreo: 14/12/16
Parámetros bacteriológicos y parasitológicos										
Bacterias Coliformes Totales	NMP/100 mL	-	<1.8/100 mL			50	**	**		<1.8
E. Coli	NMP/100 mL	-	<1.8/100 mL			0	**	**	1000	<1.8
Bacterias Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 mL	-	<1.8/100 mL			20	2000	20000	1000	<1.8

Excedió los LMP y/o ECA

Notas:

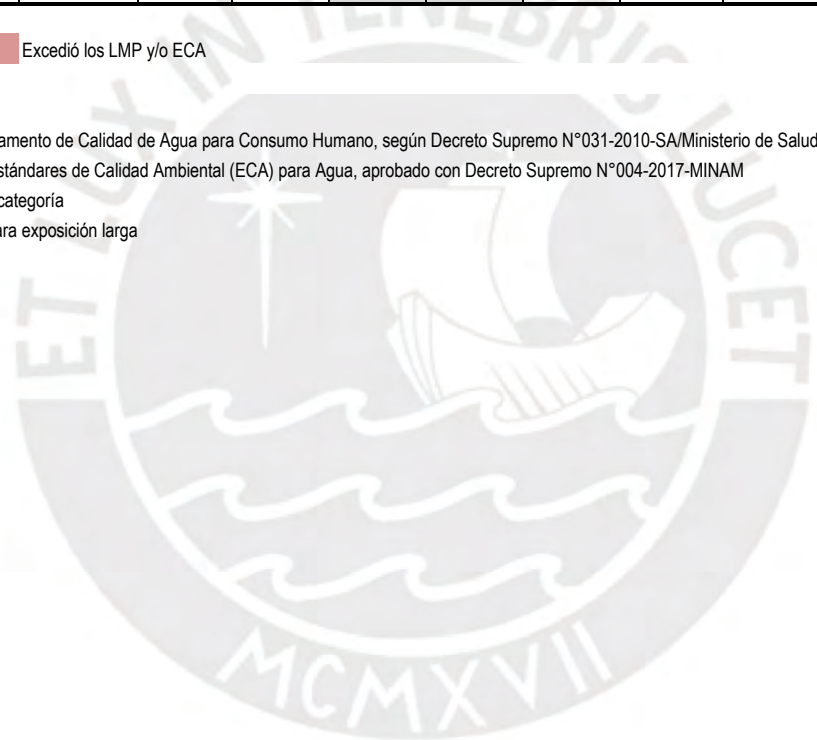
(1) Valores correspondientes al Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano, según Decreto Supremo N°031-2010-SA/Ministerio de Salud

(2) Valores correspondientes a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, aprobado con Decreto Supremo N°004-2017-MINAM

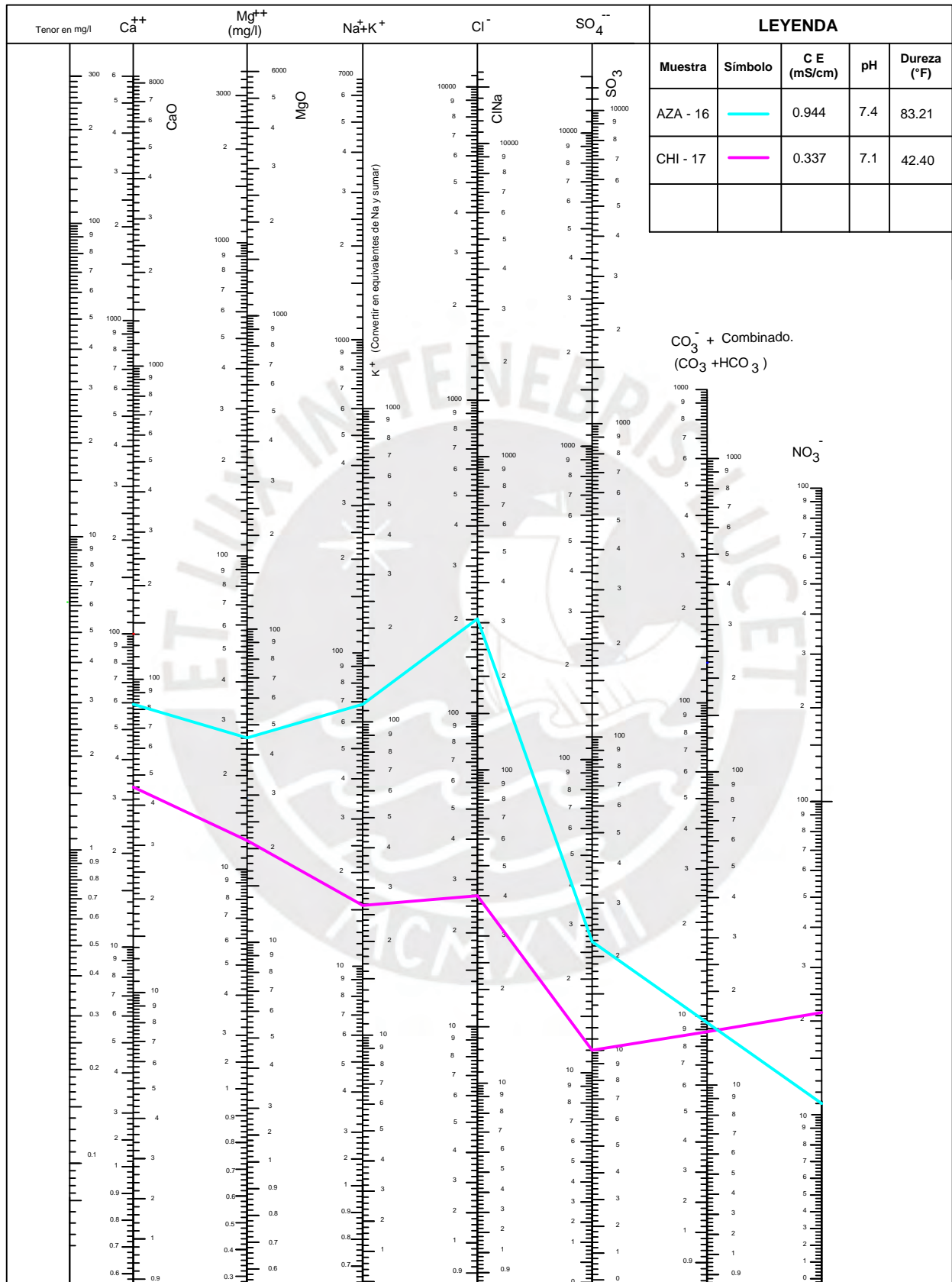
(**) El parámetro no aplica para esta categoría

(***) 0.2 para exposición corta y 0.3 para exposición larga

LMP: Límite máximo permisible



Anexo G: Diagrama Schoeller



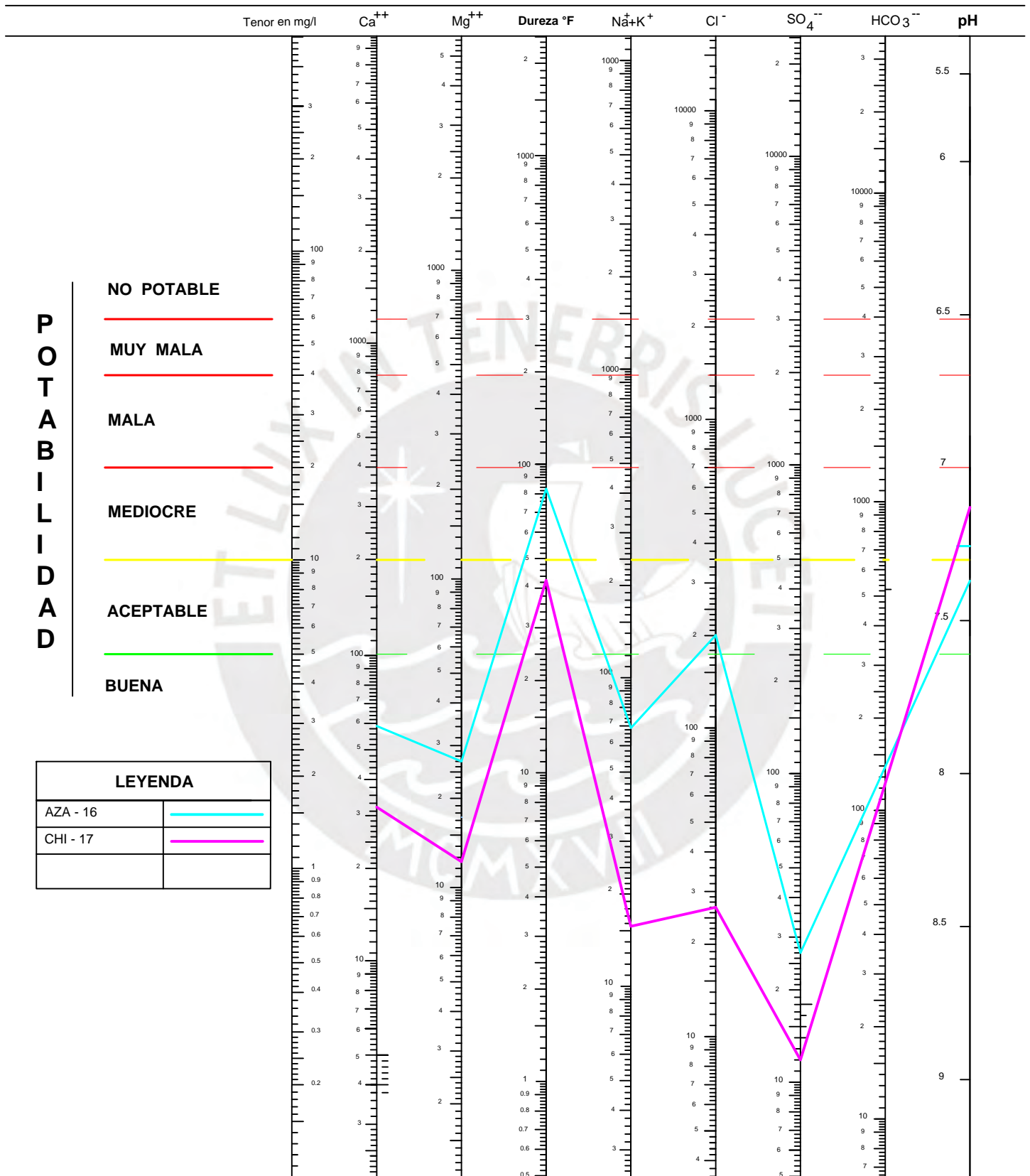
PUCP

DATOS ADICIONALES	FECHA
DIBUJADO POR: K.R.-Z.C.	01.03.21
DISEÑADO POR: K.R.-Z.C.	01.03.21
REVISADO POR: J.R.U.	01.04.21
APROBADO POR: J.R.U.	01.04.21

Proyecto: **DISEÑO DE POZO PROFUNDO AZAPAMPA - CHILCA**
 Titulo: **DIAGRAMA DE SCHOELLER**

ESCALA: **S/E**
 PLANO N°: **07**
 HOJA: **7_28** | REV.: **A**

Anexo H: Diagrama de Potabilidad



PUCP

DATOS ADICIONALES	FECHA
DIBUJADO POR: K.R.-Z.C.	02.03.21
DISEÑADO POR: K.R.-Z.C.	02.03.21
REVISADO POR: J.R.U.	02.04.21
APROBADO POR: J.R.U.	02.04.21

Proyecto: **DISEÑO DE POZO PROFUNDO AZAPAMPA - CHILCA**

Título: **DIAGRAMA DE POTABILIDAD**

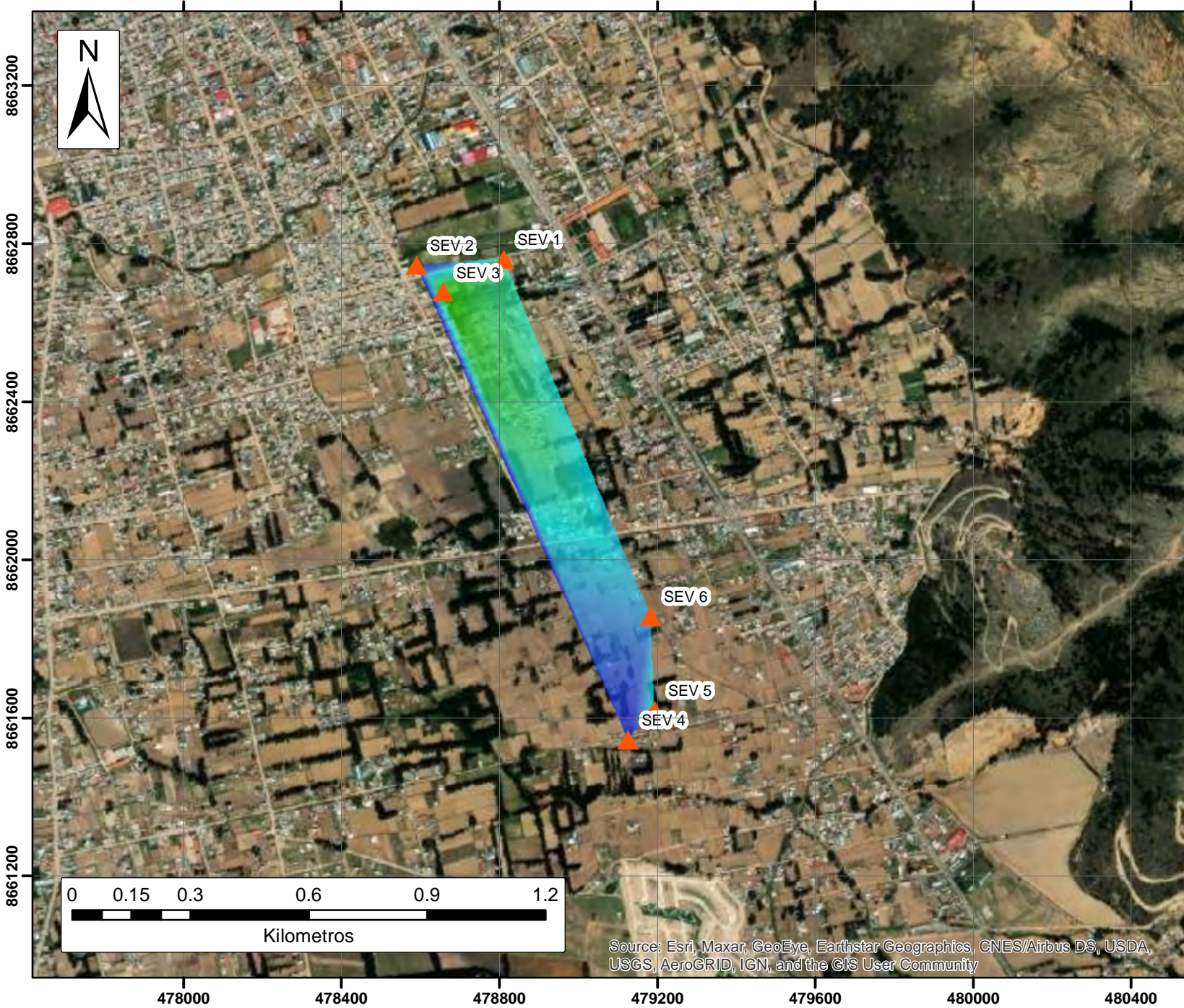
ESCALA: **S/E**

PLANO N°:

08

HOJA: **8_28** REV.: **A**

Anexo I: Mapa de Isoresistencia



LEYENDA

Resistencia
(Ohmios)

High : 3831.57
Low : 1446.18

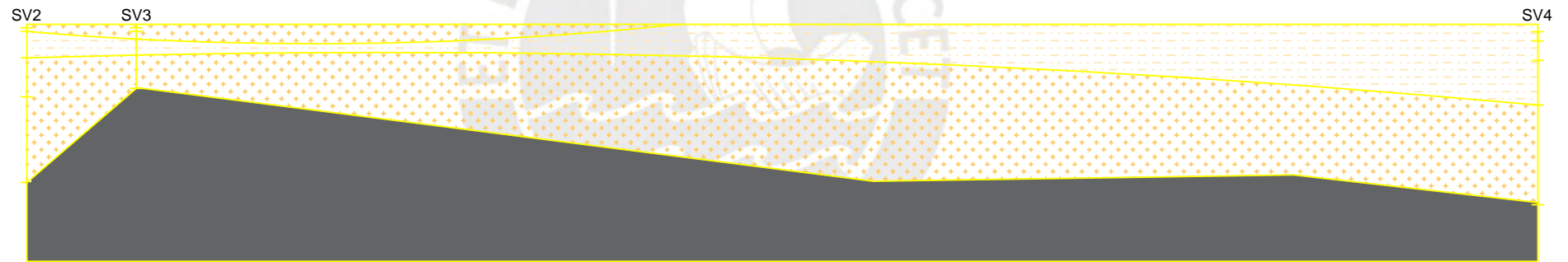
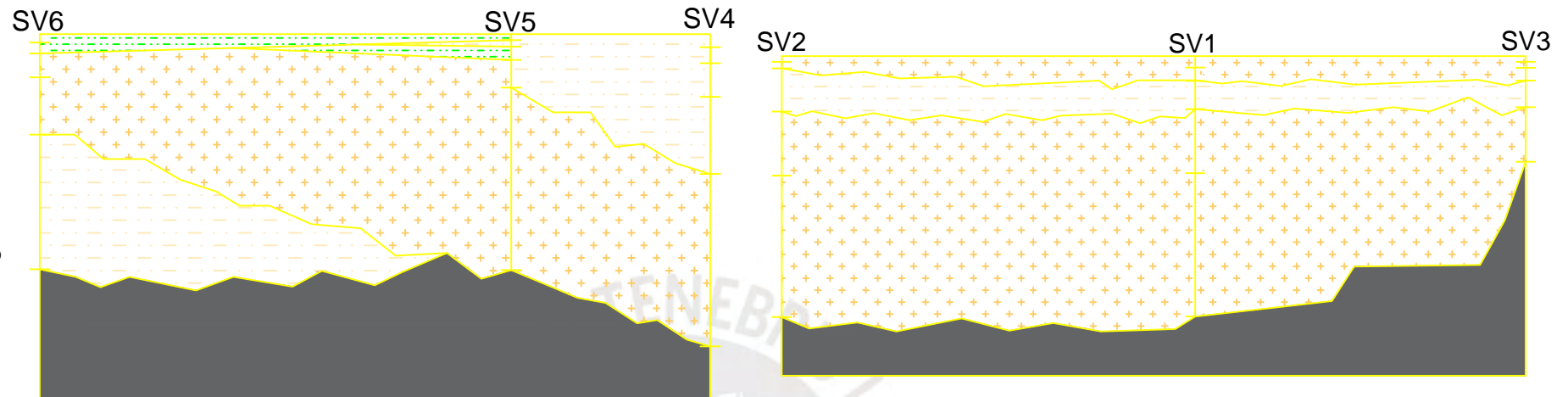
PROYECTO: DISEÑO DE POZO PROFUNDO AZAPAMPA - CHILCA

TITULO: MAPA DE ISORESISTENCIA

Diseñado por: K.R.-Z.C.
Revisado por: J.R.U.
Fecha: 12/2021

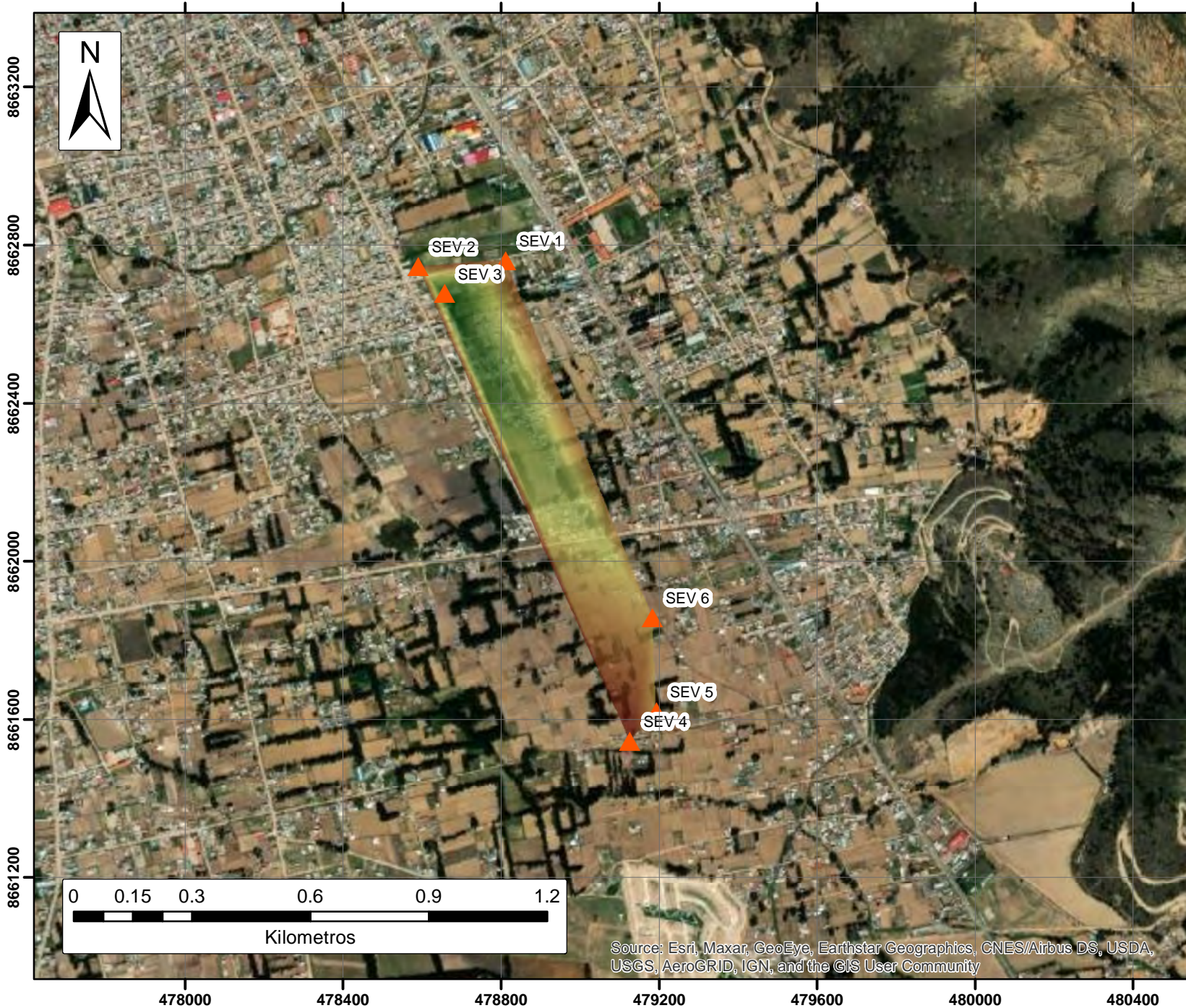
Mapa N°:
05

ANEXO J: CORTES DE RESISTIVIDAD



			Cliente:	Propietario:	DATOS ADICIONALES	FECHA	Proyecto:	ESCALA: S/E	
					DIBUJADO POR: K.R-Z.C	12/09/2021	DISEÑO DE POZO PROFUNDO-AZAPAMPA-CHILCA	PLANO N°:	
					DISEÑADO POR: K.R-Z.C	12/09/2021	Título:	J	
REV. N°	DESCRIPCIÓN	FECHA			REVISADO POR: J.R.U	12/09/2021		CORTES DE RESISTIVIDAD	HOJA: 2_4
					APROBADO POR: J.R.U	12/09/2021			REV.: A

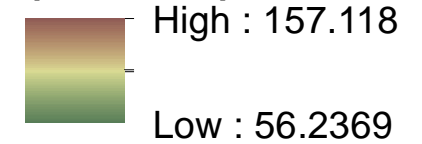
Anexo K: Mapa de Isoprofundidad de Basamento Rocoso



LEYENDA

Nivel de roca

(metros)



PROYECTO: DISEÑO DE
POZO PROFUNDO
AZAPAMPA - CHILCA

TITULO: MAPA DE
ISOPROFUNDIDAD
DE BASAMENTO
ROCOSO

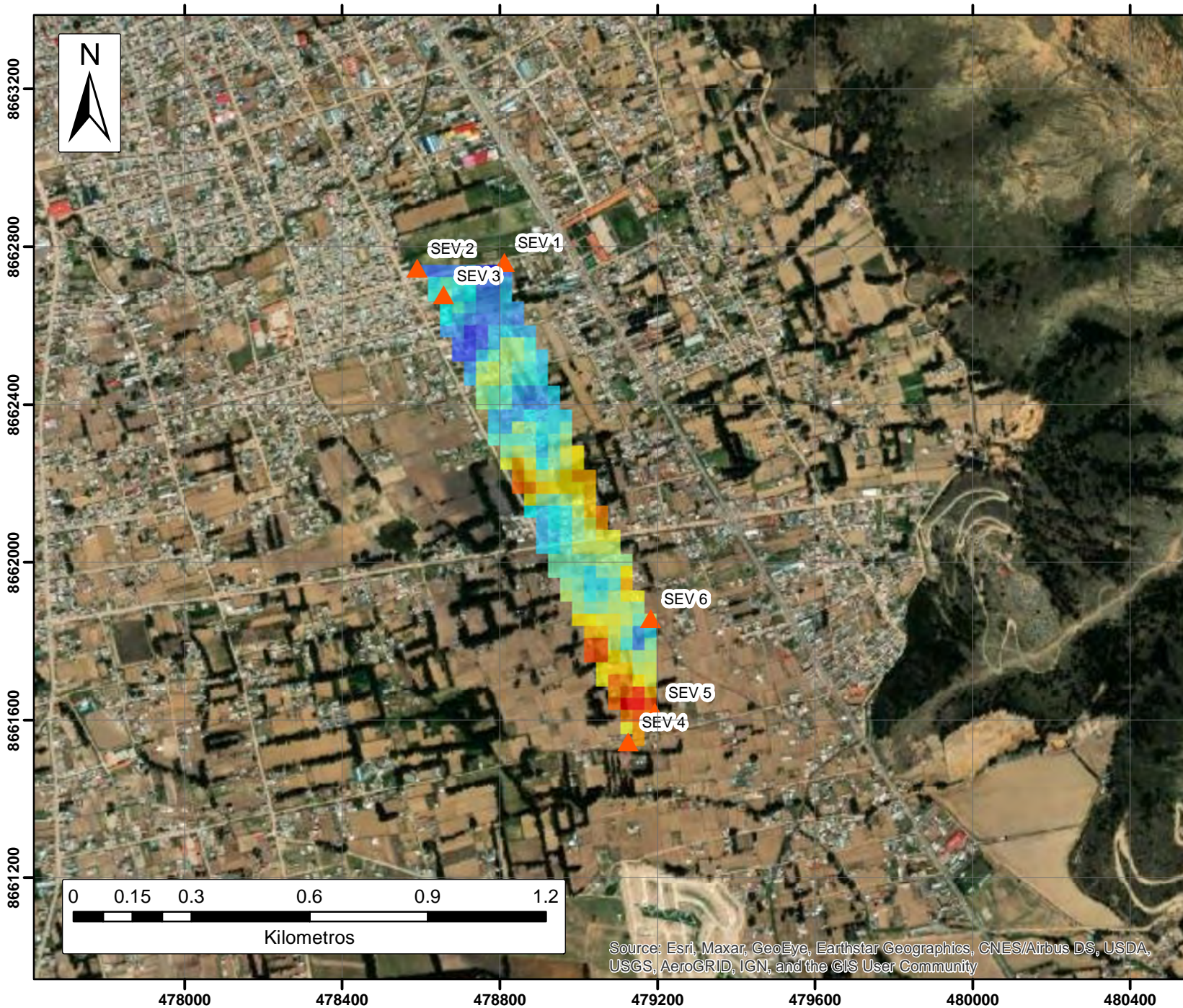
Diseñado por: K.R.-Z.C.
Revisado por: J.R.U.
Fecha: 12/2021

Mapa N°:

07

Source: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

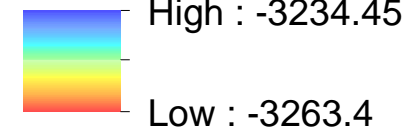
Anexo L: Mapa de Hidroisohipsas



LEYENDA

Niveles de Agua

(metros)



PROYECTO: DISEÑO DE
POZO PROFUNDO
AZAPAMPA - CHILCA

TITULO:
MAPA DE
HIDROISOHIPZAS

Diseñado por: K.R.-Z.C.
Revisado por: J.R.U.
Fecha: 12/2021

Mapa N°:

08

Anexo M: Cálculo del Caudal de Demanda y Regimen de Explotación

CUADRO M1: Población censada en el distrito de Chilca

Provincia, distrito y edades simples	Total	Población		Total	Urbana		Total	Rural	
		Hombres	Mujeres		Hombres	Mujeres		Hombres	Mujeres
DISTRITO CHILCA	91 851	43 611	48 240	91 796	43 584	48 212	55	27	28

CUADRO M2: Viviendas particulares con ocupantes presentes, por tipo de procedencia del agua en el Distrito de Chilca y total de ocupantes presentes

Provincia, distrito, área urbana y rural, tipo de vivienda y total de ocupantes presentes	Total	Tipo de procedencia del agua							
		Red pública dentro de la vivienda	Red pública fuera de la vivienda, pero dentro de la edificación	Pilón o pileta de uso público	Camión-cisterna u otro similar	Pozo	Manantial o puquio	Río, acequia, lago, laguna	Otro 1/
DISTRITO CHILCA									
Ocupantes presentes	89 902	75 488	9 083	1 685	499	2 522	3	70	552
Ocupantes presentes (%)	100.00	83.97	10.10	1.87	0.56	2.81	0.00	0.08	0.61
Ocupantes no abastecidos 2017 (%)	1.25				0.56		0.00	0.08	0.61
Ocupantes no abastecidos 2061 (%)	5.93			1.87	0.56	2.81	0.00	0.08	0.61

Cuadro M3: Cálculo de población no abastecida al 2017

Población total	91851	habitantes
Porcentaje no abastecido	1.25	%
Población total no abastecida	1148	habitantes

Cuadro M5: Cálculo de población no abastecida al 2061

Población total	183082	habitantes
Porcentaje no abastecido	5.93	%
Población total no abastecida	10856	habitantes

Cuadro M6: Cálculo de caudal demandado al 2061

Dotación para clima fríos	180	l/hab/día
Caudal demandado	1196885	l/día

Cuadro M7: Regimen de explotación

Horas bombeo	12	h/día
Caudal bombeo	30	l/s
Caudal obtenido	1242000	l/día
	453330	m3/año

Cuadro M4: Cuadro de Censo con datos de tasa de crecimiento anual

CUADRO N° 2.2
JUNÍN: POBLACIÓN CENSADA Y TASA DE CRECIMIENTO PROMEDIO ANUAL, SEGÚN PROVINCIA,
2007 Y 2017
 (Absoluto y porcentaje)

Provincia	2007		2017		Variación intercensal 2007-2017		Tasa de crecimiento promedio anual
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%	
Total	1 225 474	100,0	1 246 038	100,0	20 564	1,7	0,2
Huancayo	466 346	38,0	545 615	43,6	79 269	17,0	1,6
Concepción	60 121	4,9	55 591	4,5	- 4 530	-7,5	-0,8
Chanchamayo	168 949	13,8	151 489	12,2	- 17 460	-10,3	-1,1
Jauja	92 053	7,5	83 257	6,7	- 8 796	-9,6	-1,0
Junin	30 187	2,5	23 133	1,9	- 7 054	-23,4	-2,6
Salto	193 872	15,8	203 985	16,4	10 113	5,2	0,5
Tarma	112 230	9,2	89 590	7,2	- 22 640	-20,2	-2,2
Yauli	49 838	4,1	40 390	3,2	- 9 448	-19,0	-2,1
Chupaca	51 878	4,2	52 988	4,3	1 110	2,1	0,2

Fuente: INEI - Censos Nacionales de Población y Vivienda 2007 y 2017.

ANEXO N: ANIDACION PARA CALCULO CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (K)

Tabla N1. Rangos de porcentaje de vacíos para materiales

Material	Porcentaje de vacíos (n)		
	nmin(%)	nmax(%)	nprom(%)
Grava	24	40	32
Arena	25	50	37.5
Arcilla	40	70	55
Limo	40	50	45

Datos de pozo	
Diámetro (m)	0.381
Area (m ²)	0.114

Fuente: Terzagui (1948)

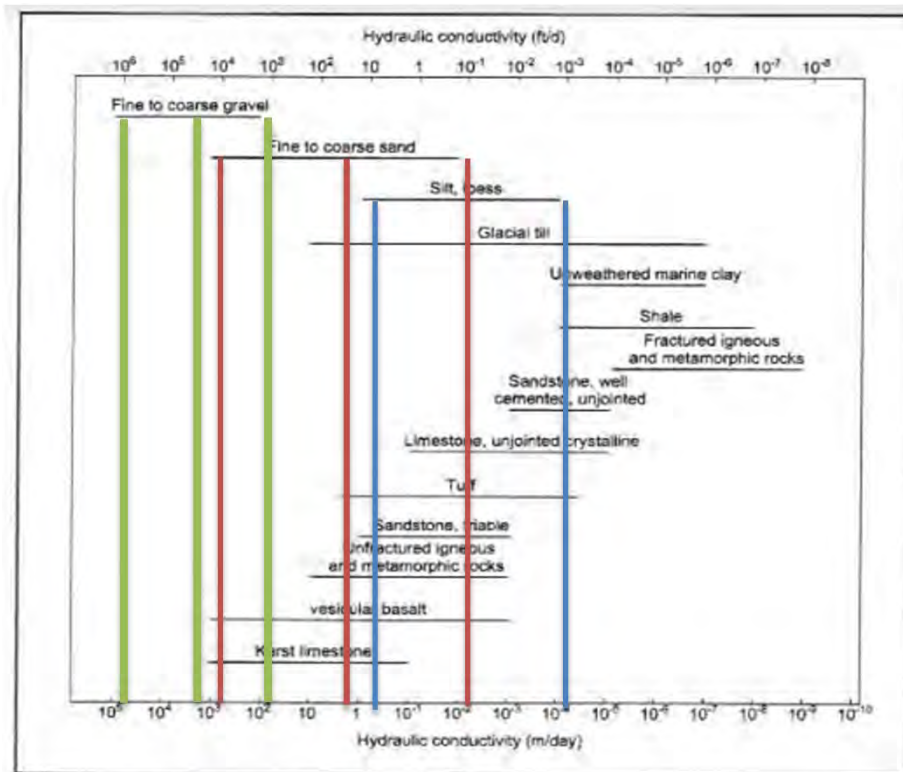
Tabla N2. Volumen de materiales

Tipo de Material	Grava arena gruesa a fina	Limo	Arcilla	Grava, arena en limos	Limos arena fina	Grava arena arcilla
Espesor(m)	15.8	13	17	34.6	16.8	8
AREA(m ²)	0.1140	0.1140	0.1140	0.1140	0.1140	0.1140
Vol(m ³)	0.261	0.215	0.281	0.573	0.278	0.132

Tabla N3. Volumen de vacíos

Material	Volumen de Vacíos (m ³)						Vol Parcial (m ³)	(%)
	Grava arena gruesa a fina	Limo	Arcilla	Grava, arena en limos	Limos arena fina	Grava arena arcilla		
Grava	0.58			1.26		0.29	2.13	20.85
Arena	0.68			1.48	0.72	0.34	3.21	31.47
Arcilla			1.07			0.50	1.57	15.34
Limo		0.67		1.78	0.86		3.30	32.34
						TOTAL	10.22	

Tabla N4. Conductividad Hidráulica



K POR TIPO DE SUELO

ARENA

K max (m/s)	8.00E+02
K min (m/s)	9.00E-03

GRAVA

K max (m/s)	1.00E+05
K min (m/s)	1.00E+02

ARCILLA

K max (m/s)	9.00E-01
K min (m/s)	1.00E-04

Fuente: Sterrett (2017)

Comp de suelo	Porcentaje	K min (m/día)	K (m/día)
Arena	31.47	9.00E-03	2.83E-03
Grava	20.85	1.00E+02	2.09E+01
Arcilla-Limos	47.68	1.00E-04	4.77E-05
	Anidación		6.95E+00

ANEXO Ñ: HIDRAULICA DE POZOS

Tabla Ñ1. Tirante estático

H	Nivel Estático	Tirante Estático
88.37	30.87	57.50

Tabla Ñ2. Tirante dinámico

Tirante Estático (m)	Tirante Dinámico (m)
57.50	48.88

Tabla Ñ3. Radio de Influencia

T (m ² /día)	2592	Fuente: Solano(2016)
S	0.025	Fuente: Solano(2016)
t (day)	0.5	Fuente: SEDAM (2006)
R (m)	341.53	

Tabla Ñ4. Ecuación de equilibrio en Pozos

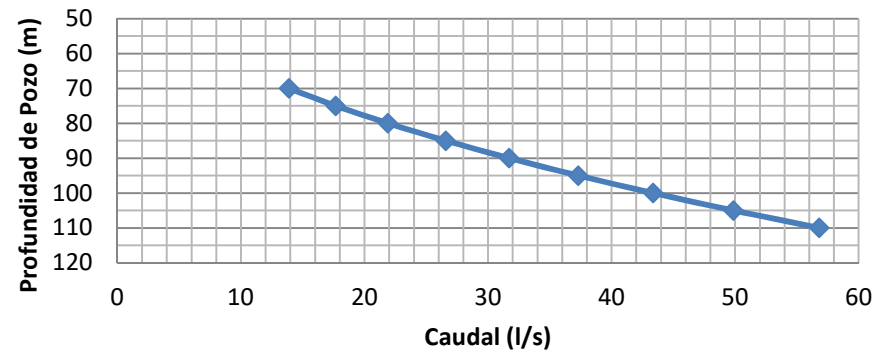
Q calc. (l/s)	30.00		
Q (m ³ /día)	2592.00		
K (m/día)	6.95		
H (m)	57.50		
h (m)	48.88		
R (m)	341.53		
r (m)	0.15	Dato	305mm (12")

Tabla Ñ5. Curva de Capacidad

Q(m ³ /día)	Q calc. (l/s)	Profundidad(m)
1200.37	13.89	70
1526.74	17.67	75
1892.30	21.90	80
2297.06	26.59	85
2741.02	31.72	90
3224.18	37.32	95
3746.53	43.36	100
4308.09	49.86	105
4908.84	56.82	110*

*Máxima Profundidad

Figura Ñ1. Curva de Capacidad



Anexo O: Cálculos para selección del equipo de bombeo

Tabla O1: Datos para el cálculo

Profundidad de pozo	H (m)	110	(Profundidad max. Dato de prof. de basamento rocoso del pozo propuesto: 118.7m)
Caudal demandado	Qd (l/s)	30	
Nivel estático	NE (m)	30	(Dato de la prueba de bombeo)

Tabla O2: Estimación del nivel dinámico

Columna de agua	CA (m)	80	(CA = H - NE)
Nivel dinámico estimado	ND (m)	56.7	(ND = CA * 1/3 + NE)

(Asumido como 1/3 de la columna de agua, debe ser verificado luego con las pruebas de bombeo)

Tabla O3: Cálculo de altura dinámica total

Punto 1 (Pozo propuesto)		
Cota del ND	Z1 (m)	3186
Pérdidas por fricción (hf) Darcy-Weisbach		
Diámetro de tubería	D (m)	0.250
Área transversal de tubería	A (m ²)	0.049
Velocidad en tubería	v (m/s)	0.611
Viscosidad cinemática del agua	ν (m ² /s)	1E-06
Numero de Reynolds	Re	151804
Rugosidad absoluta	K (m)	1.5E-06
Cociente para diagrama Moody	K/D	6E-06
Diagrama Moody	f	0.017
Recorrido de pozo a reservorio	L (m)	3200
Perdidas por fricción	hf (m)	4.1
Punto 2 (Reservorio)		
Cota del Reservorio	Z2 (m)	3271
Altura dinámica total		
HDT = (Z2 - Z1) + hf	HDT (m)	88.8

(Las pérdidas locales son considerados despreciables para los cálculos)

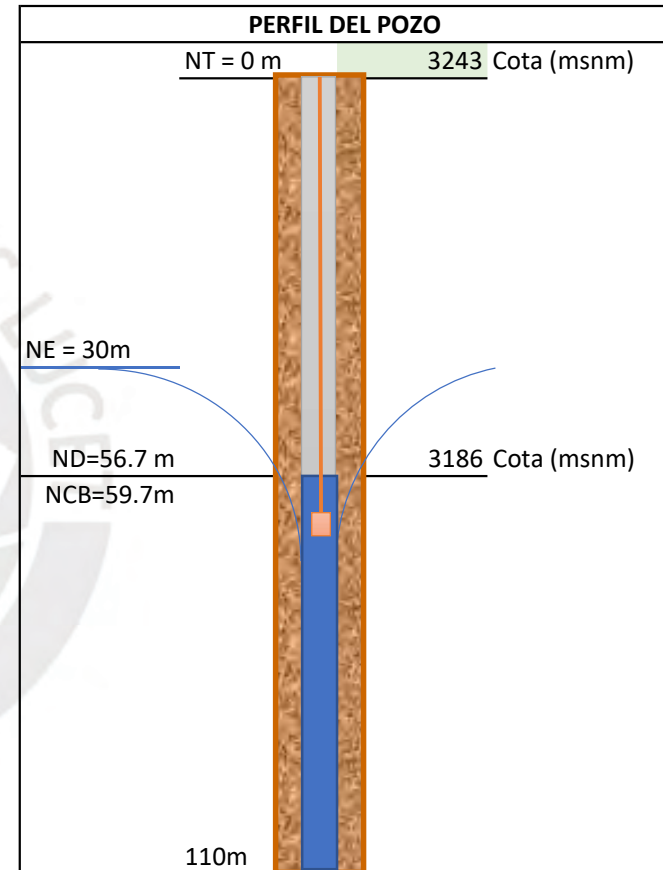


Tabla O4: Dimensiones de Bomba (Ficha técnica de bomba)

Con Qd (l/s) = 30 y con HDT (m)= 89m ->

S07SH-5-50HP

Diámetro sin tubo de enfriamiento	d (mm)	144
Diámetro con tubo de enfriamiento	D (mm)	194
Profundidad de cabeza de bomba	NCB (m)	59.7
Sumergencia mínima de bomba	(m)	3

Tabla O5: Datos referenciales de la tubería de conducción existente

Cuadro N° 6: Líneas de conducción de Agua Tratada

Línea	Diámetro (mm)	Longitud	Antigüedad	Estado	Tipo de Tubería
URPAYCANCHA	350	5,660.00	15.00	Bueno	AC
SAN ANTONIO	350	4,530.00	35.00	Malo	HUME
CERRITO	300	6,900.00	45.00	Regular	AC
CERRITO L PRADO	250	2,070	35	Regular	AC
L PRADO R. AZAPAMPA	250	1,833.00	2.00	Bueno	PVC
DERIVACION URPAYCANCHA RESERVORIO AZA.	250	1,280.00	2.00	Bueno	PVC

Fuente: Gerencia Técnica SEDAM HUANCAYO.

Tabla O6: Distancia y cotas entre pozo y reservorio

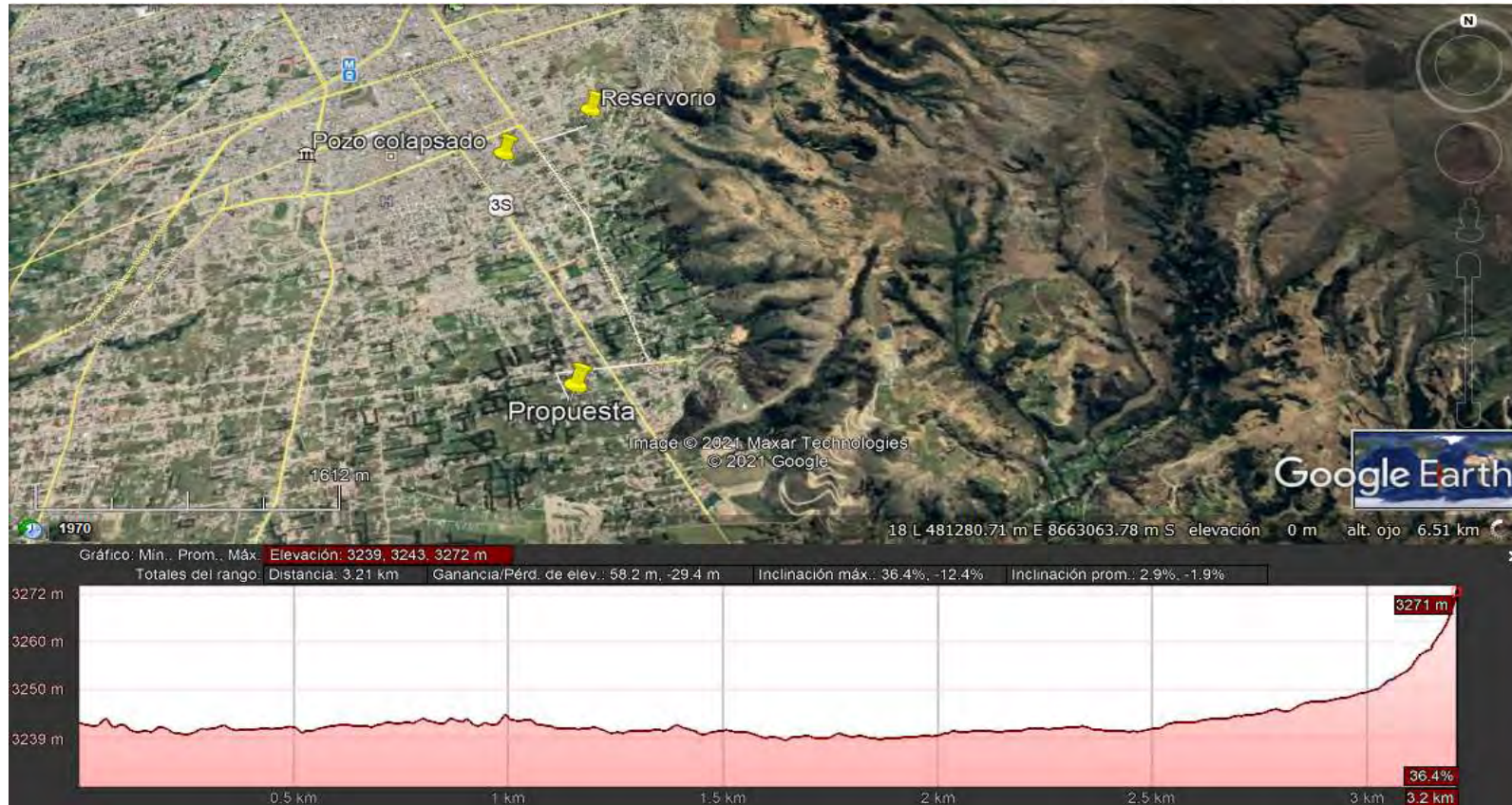
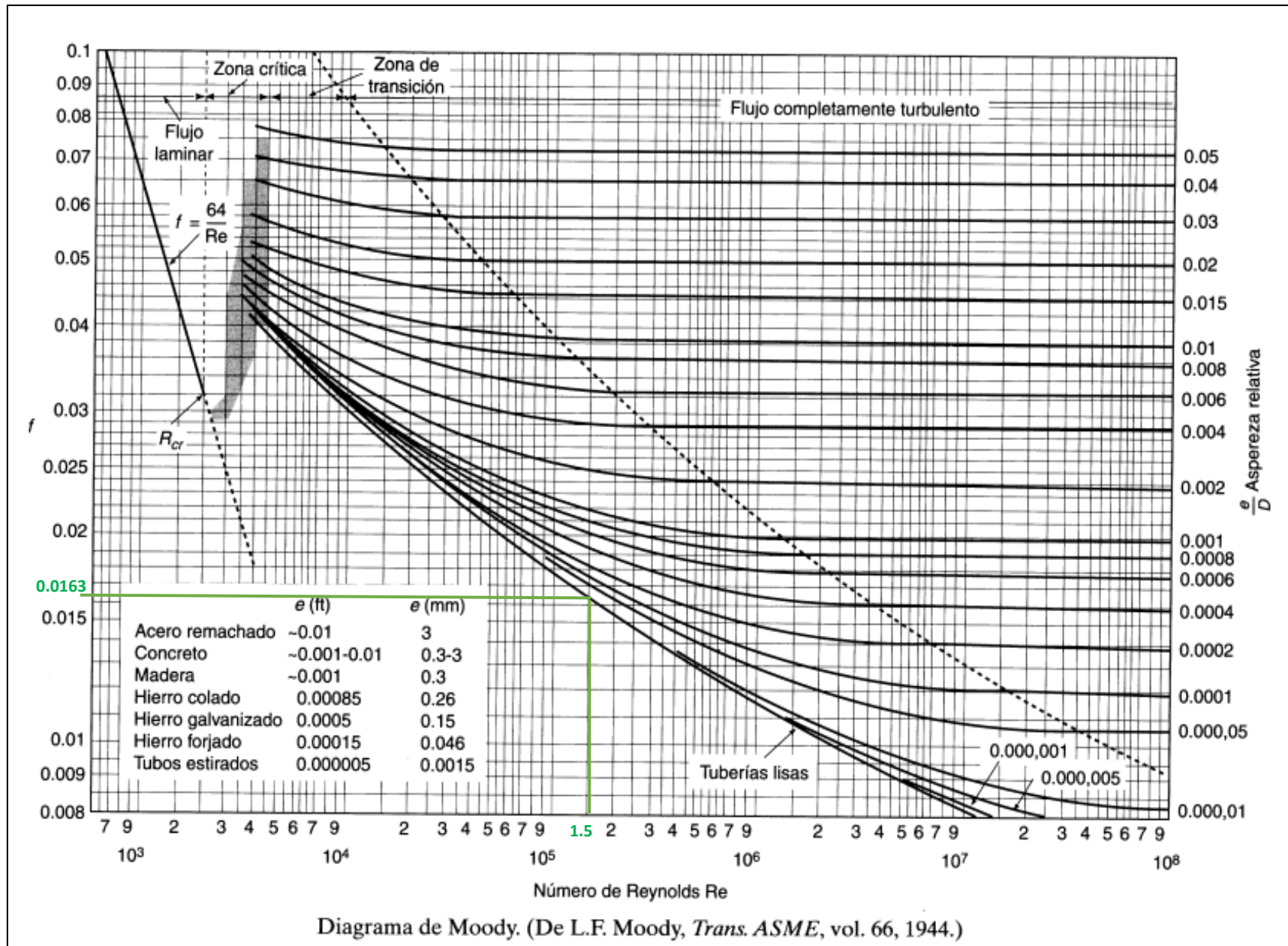


Figura O2: Diagrama Moody



ANEXO P: Dimensionamiento de diámetro de tubería definitiva

Tabla P1: Cálculo según USDA (2010) y Khepar (2003)

Diámetro de bomba + 2" = Diámetro de tubería pozo		
Diámetro mínimo interno de pozo sin tubo de enfriamiento.	Øi (pulg)	7.7
	Øi (cm)	19.5
Diámetro mínimo interno de pozo con tubo de enfriamiento.	Øi (pulg)	9.6
	Øi (cm)	24.5

Tabla P2: Cálculo según (AED DESIGN REQUIREMENTS,2012)

Caudal de demanda	Qd (l/s)	30
	Qd (l/min)	1800
Diámetro mínimo interno de pozo con tubo de enfriamiento.	Øi (pulg)	9.8
	Øi (cm)	25.0
Diámetro óptimo interno de pozo con tubo de enfriamiento.	Øi (pulg)	11.8
	Øi (cm)	30.0

Tabla P3: Diámetro de pozo vs Caudal esperado

**Table 3. Well Diameter vs. Expected Yield
(In SI and U.S. Customary Units)**

Expected Well Yield	Nominal Size of Pump Bowls	Optimum Size of Well Casing	Smallest Size Well Casing
<i>(lpm)</i>	<i>(mm)</i>	<i>(mm)</i>	<i>(mm)</i>
<380	100	150 ID	125 ID
285-660	125	200 ID	150 ID
570-1515	150	250 ID	200 ID
1325-2460	200	300 ID	250 ID
2270-3400	250	350 OD	300 ID
3200-4900	300	400 OD	350 OD
4550-6800	350	500 OD	400 OD
6050-11400	400	600 OD	500 OD
<i>(gpm)</i>	<i>(in)</i>	<i>(in)</i>	<i>(in)</i>
<100	4	6 ID	5 ID
75-175	5	8 ID	6 ID
150-400	6	10 ID	8 ID
350-650	8	12 ID	10 ID
600-900	10	14 OD	12 ID
850-1300	12	16 OD	14 OD
1200-1800	14	20 OD	16 OD
1600-3000	16	24 OD	20 OD
3000-6000	20	30 OD	24 OD

Note: If provided, contract section 01015 technical requirements shall supersede the minimum diameters suggested in this table.

Anexo Q: Dimensionamiento de espesores y diámetro de perforación

Tabla Q1: Espesor de tubería (TABLA 32-3 A100-97 AWWA)

Diámetro nominal mínimo	Øi (pulg)	9.6	Diámetro nominal óptimo	Øo (pulg)	11.8
Profundidad	H (m)	110	Profundidad	H (m)	110
Espesor de tubería definitiva	E (pulg)	0.25	Espesor de tubería definitiva	E (pulg)	0.25
	E (mm)	6.35		E (mm)	6.35

Tabla Q2: Espesor de tubería definitiva (TABLA 4-3 KHEPAR 2003)

Caudal de demanda	Qd (l/s)	30
	Qd (l/min)	1800
Espesor de tubería definitiva	E (mm)	3.5 (Es espesor mínimo)

Tabla Q3: Mínimo Espesor de tubería de acero (AWWA,1997)

Table 4 Minimum thickness for steel well casing—single casing

Depth of Casing ft (m)	Nominal Casing Diameter—in. (mm)									
	8 (203)	10 (254)	12 (305)	14 (356)	16 (406)	18 (457)	20 (508)	22 (559)	24 (610)	30 (762)
0–100 (0–30)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)
100–200 (30–60)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)
200–300 (60–90)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)
300–400 (90–120)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)
400–600 (120–180)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)	7/16 (11.11)
600–800 (180–240)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)	7/16 (11.11)
800–1,000 (240–300)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)	7/16 (11.11)	7/16 (11.11)	1/2 (12.70)
1,000–1,500 (300–450)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)	7/16 (11.11)	*	*
1,500–2,000 (450–600)	¼ (6.35)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	5/16 (7.94)	3/8 (9.52)	3/8 (9.52)	7/16 (11.11)	7/16 (11.11)	*	*

*As specified by the purchaser.

Tabla Q4: Diámetro de tubería según caudal

TABLE 4.3 Diameter and Thickness of Housing Pipes of Tube Wells for Different Sizes of Turbine/Submersible Pumps

Discharge l/min	Nominal diameter of pump, cm	Diameter of housing pipe cm	Thickness of housing pipe mm
475	12.5	15.0–20.0	1.5–3.5
1150	15.0	20.0–25.0	1.5–3.5
2275	20.0	25.0–30.0	2.0–3.5
4550	30.0	35.0	2.0–5.0
7500	35.0	40.0	2.0–6.0
11500	40.0	45.0	2.0–6.0

Source: Ahrens (1970)

Tabla Q5: Dimensionamiento de diámetro de perforación

Diámetro de perforación = 8" + diámetro nominal de tubería : Rocoe Moss (1990)

Diámetro de perforación sin tubo de enfriamiento	Øp (pulg)	16
	Øp (cm)	40
Diámetro de perforación con tubo de enfriamiento	Øp (pulg)	18
	Øp (cm)	45
Diámetro de perforación óptimo	Øp (pulg)	20
	Øp (cm)	50

Nota: Estos diámetro consideran el engravado

Anexo R: Cálculos Definitivos para selección del equipo de bombeo

Tabla R1: Datos para el cálculo

Profundidad de pozo	H (m)	90	(Profundidad max. Dato de prof. de basamento rocoso del pozo propuesto: 118.7m)
Caudal demandado	Qd (l/s)	30	
Nivel estático	NE (m)	30	(Dato de la prueba de bombeo)

Tabla R2: Estimación del nivel dinámico

Columna de agua	CA (m)	60	(CA = H - NE)
Nivel dinámico estimado	ND (m)	65.9	(Dato de la pruebas de bombeo)

Tabla R3: Cálculo de altura dinámica total

Punto 1 (Pozo propuesto)		
Cota del ND	Z1 (m)	3177
Pérdidas por fricción (hf) Darcy-Weisbach		
Diámetro de tubería	D (m)	0.250
Área transversal de tubería	A (m ²)	0.049
Velocidad en tubería	v (m/s)	0.611
Viscosidad cinemática del agua	v (m ² /s)	1E-06
Numero de Reynolds	Re	151804
Rugosidad absoluta	K (m)	2E-06
Cociente para diagrama Moody	K/D	6E-06
Diagrama Moody	f	0.0163
Recorrido de pozo a reservorio	L (m)	3200
Perdidas por fricción	hf (m)	4.0
Punto 2 (Reservorio)		
Cota del Reservorio	Z2 (m)	3271
Altura dinámica total		
HDT = (Z2 - Z1) + hf	HDT (m)	97.9

(Las pérdidas locales son considerados despreciables para los cálculos)

Tabla R4: Predimensionamiento hidráulico

k	0.0000798 m/s
b	21 m
Prof. Pozo	87 m

FIGURA R1: Perfil de pozo

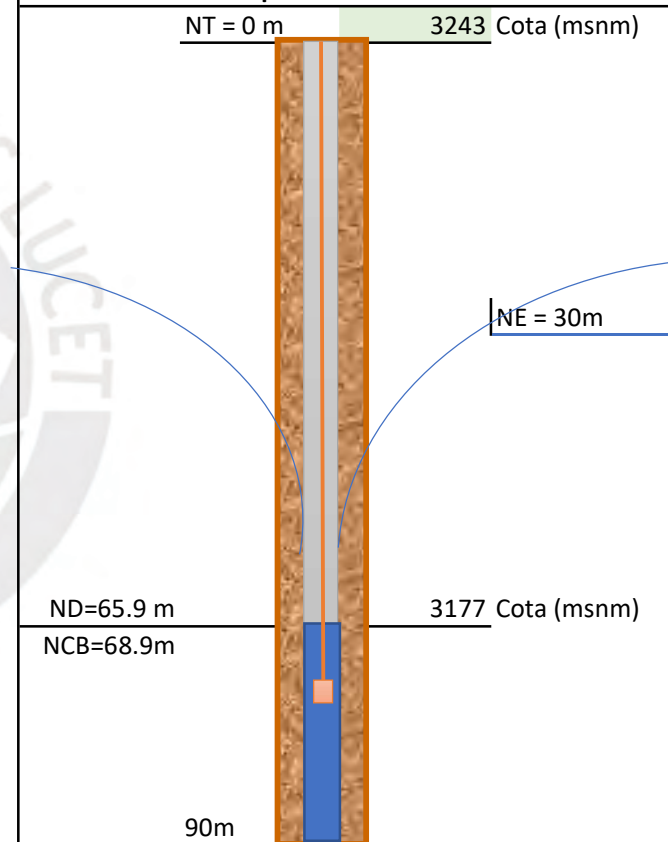


Tabla R5: Dimensiones de Bomba (Ficha técnica de bomba)

Con Qd (l/s) = 30 y con HDT (m)= 98m ->

S07SH-6R1-60HP

Diámetro sin tubo de enfriamiento	d (mm)	193
Diámetro con tubo de enfriamiento	D (mm)	234
Profundidad de cabeza de bomba	NCB (m)	68.9
Sumergencia mínima de bomba	(m)	3

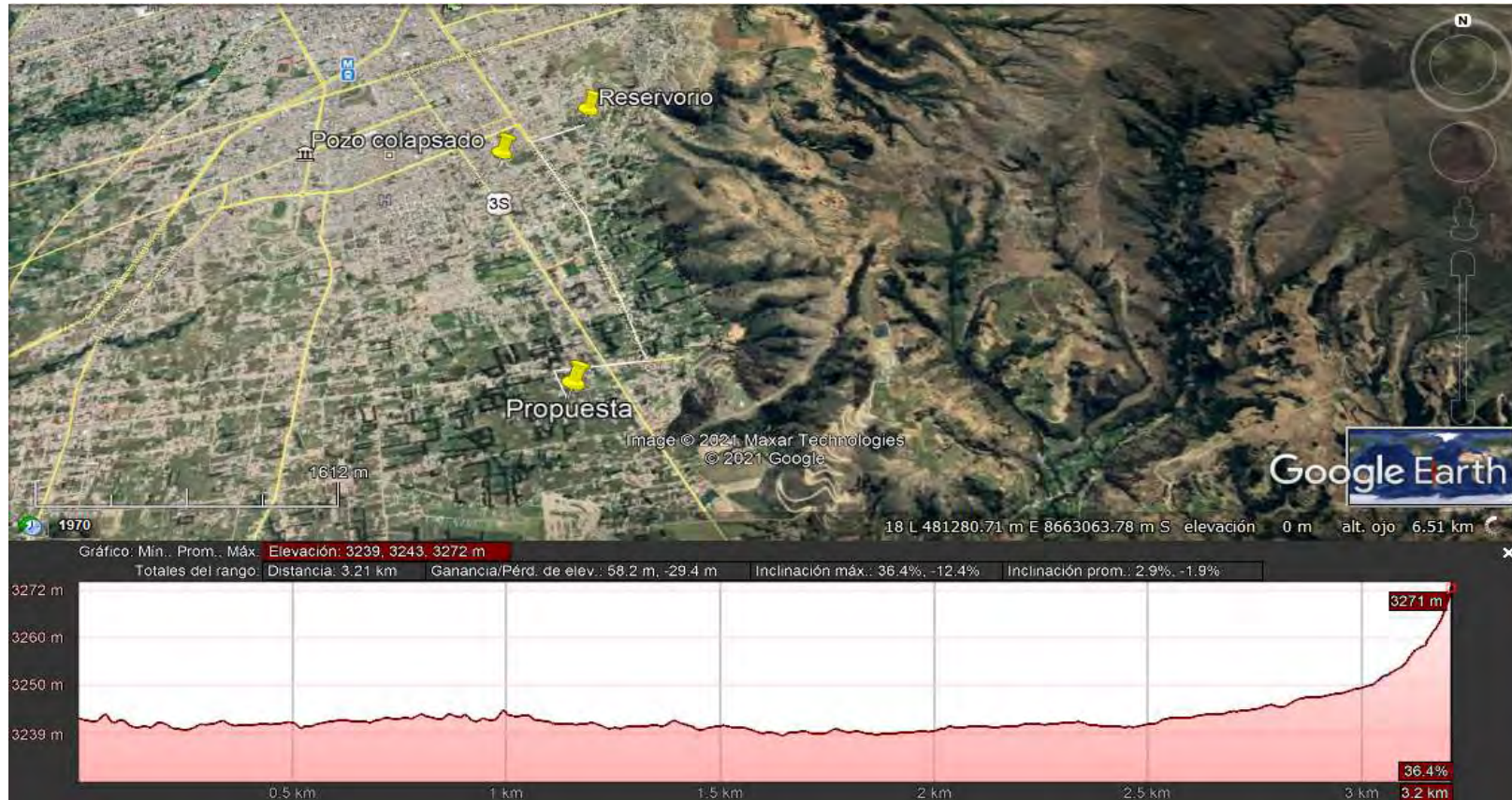
Tabla R6: Datos referenciales de la tubería de conducción existente

Cuadro N° 6: Líneas de conducción de Agua Tratada

Línea	Diámetro (mm)	Longitud	Antigüedad	Estado	Tipo de Tubería
URPAYCANCHA	350	5,660.00	15.00	Bueno	AC
SAN ANTONIO	350	4,530.00	35.00	Malo	HUME
CERRITO	300	6,900.00	45.00	Regular	AC
CERRITO L. PRADO	250	2,070	35	Regular	AC
L. PRADO R. AZAPAMPA	250	1,833.00	2.00	Bueno	PVC
DERIVACION URPAYCANCHA RESERVORIO AZA.	250	1,280.00	2.00	Bueno	PVC

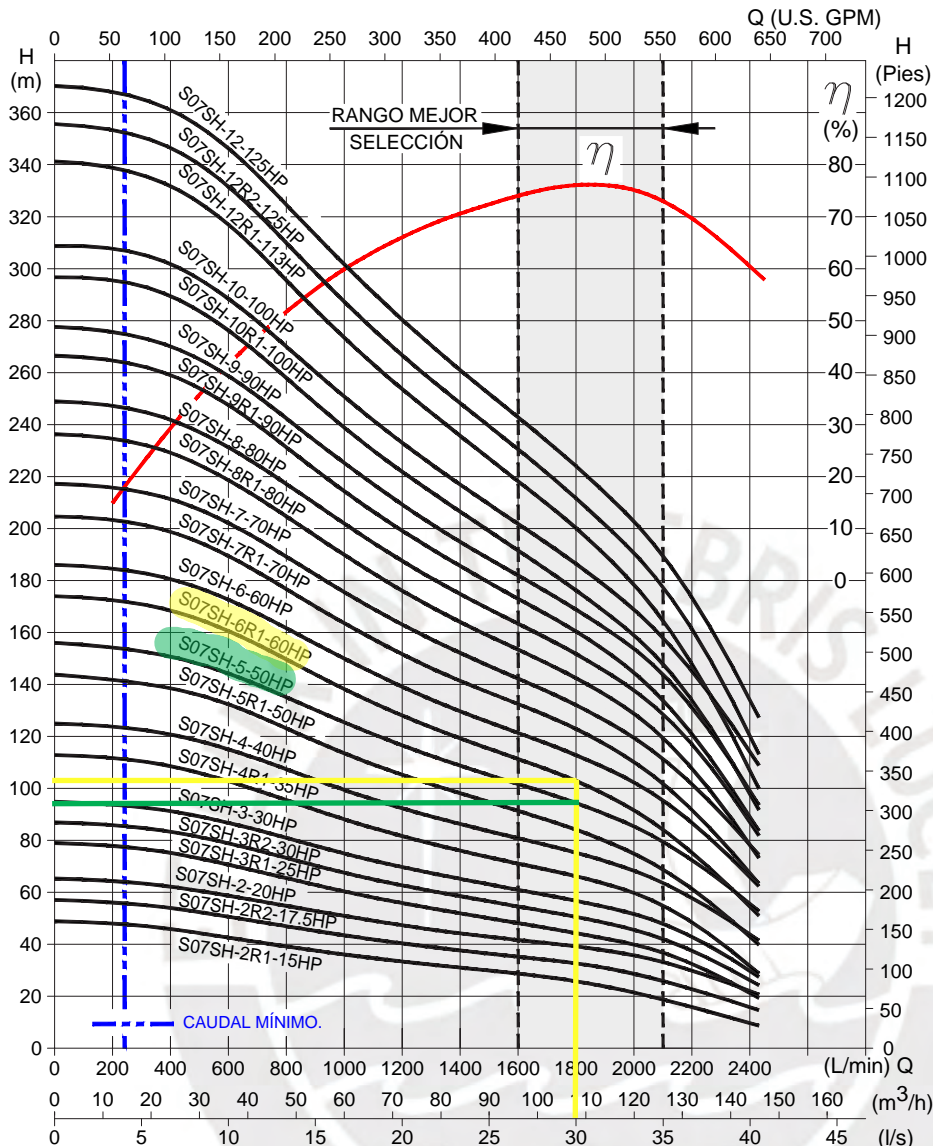
Fuente: Gerencia Técnica SEDAM HUANCAYO.

Figura R2: Distancia y cotas entre pozo y reservorio



BOMBAS SUMERGIBLES PARA POZOS 8"
DE ACERO INOXIDABLE CON MOTOR REBOBINABLE

S07SH 60 Hz 3470-3510 RPM



NOTAS: - CURVA DE OPERACIÓN SEGÚN NORMA ISO 9906 : 2012 GRADO 2B.
- SIN TUBO DE ENFRIAMIENTO: POZO MÁXIMO DE Ø8".
- CON TUBO DE ENFRIAMIENTO: POZO MÍNIMO DE Ø10".

- (*) LONGITUD DEL CABLE PUEDE SER MAYOR, CONSULTAR A HIDROSTAL S.A.
- MOTOR: TRIFÁSICO = T. - FACTOR DE SERVICIO = 1.15
- PROFUNDIDAD MÁXIMA: 200 m. - TEMPERATURA MÁXIMA DE AGUA = 25° C.
- INFORMACIÓN SUJETA A CAMBIOS SIN PREVIO AVISO POR HIDROSTAL S.A.

Etapas	Impulsor	Motor (HP)	Dimensiones (mm)						Peso (kg)	Maximos arranques x hora	Calibre del cable según voltaje y longitud				
			B	E	H	d	Tubo de Enfriamiento				Arranque directo			Arranque E - T	
							D	L			220V	380V	440V	220V	440V
2	R1	15	T	746	685	1431			91	20	80m (*)	135m (*)	160m (*)	65m (*)	120m (*)
2	R2	17.5	T	746	725	1471		812	93		8 AWG	10 AWG	10 AWG	10 AWG	12 AWG
2	MAX.	20	T	746	775	1521			96		6 AWG	10 AWG	10 AWG	10 AWG	
3	R1	25	T	873	875	1748			117	15	4 AWG	8 AWG	8 AWG	8 AWG	10 AWG
3	R2	30	T	873	965	1838	144	194	127		4 AWG	8 AWG	8 AWG	8 AWG	
3	MAX.	30	T	873	965	1838	144	194	127		4 AWG	8 AWG	8 AWG	8 AWG	
4	R1	35	T	1000	1055	2055			143	25	2 AWG	6 AWG	6 AWG	6 AWG	8 AWG
4	MAX.	40	T	1000	1135	2135			149		2 AWG	6 AWG	6 AWG	6 AWG	
5	R1	50	T	1139	925	2064			188		1/0 AWG	4 AWG	4 AWG	4 AWG	
5	MAX.	50	T	1139	925	2064			188	1/0 AWG	4 AWG	4 AWG	4 AWG		
6	R1	60	T	1266	995	2261			206	20	2/0 AWG	2 AWG	2 AWG	2 AWG	6 AWG
6	MAX.	60	T	1266	995	2261			206		2/0 AWG	2 AWG	2 AWG	2 AWG	
7	R1	70	T	1393	1065	2458			225		3/0 AWG	2 AWG	2 AWG	2 AWG	
7	MAX.	70	T	1393	1065	2458			225	3/0 AWG	2 AWG	2 AWG	2 AWG		
8	R1	80	T	1520	1135	2655	193	234	243	20	4/0 AWG	1/0 AWG	1/0 AWG	1/0 AWG	4 AWG
8	MAX.	80	T	1520	1135	2655	193	234	243		4/0 AWG	1/0 AWG	1/0 AWG	1/0 AWG	
9	R1	90	T	1647	1235	2882			267		No Disponible	2/0 AWG	1/0 AWG	2/0 AWG	
9	MAX.	90	T	1647	1235	2882			267	No Disponible	2/0 AWG	1/0 AWG	2/0 AWG	4 AWG	
10	R1	100	T	1774	1335	3109			291	20	3/0 AWG	2/0 AWG	3/0 AWG	2 AWG	
10	MAX.	100	T	1774	1335	3109			291		3/0 AWG	2/0 AWG	3/0 AWG	2 AWG	
12	R1	113	T	2028	1415	3443			315		No Disponible	3/0 AWG	2/0 AWG	3/0 AWG	2 AWG
12	R2	125	T	2028	1495	3523			331	No Disponible	3/0 AWG	2/0 AWG	3/0 AWG	2 AWG	
12	MAX.	125	T	2028	1495	3523			331	No Disponible	3/0 AWG	2/0 AWG	3/0 AWG	2 AWG	

ANEXO T: Dimensionamiento definitivo de diámetro de tubería

Tabla T1: Cálculo según USDA (2010) y Khepar (2003)

Diámetro de bomba + 2" = Diámetro de tubería pozo		
Diámetro mínimo interno de pozo sin tubo de enfriamiento.	Øi (pulg)	9.6
	Øi (cm)	24.4
Diámetro mínimo interno de pozo con tubo de enfriamiento.	Øi (pulg)	11.2
	Øi (cm)	28.5

Tabla T2: Cálculo según (AED DESIGN REQUIREMENTS,2012)

Caudal de demanda	Qd (l/s)	30
	Qd (l/min)	1800
Diámetro mínimo interno de pozo con tubo de enfriamiento.	Øi (pulg)	9.8
	Øi (cm)	25.0
Diámetro óptimo interno de pozo con tubo de enfriamiento.	Øi (pulg)	11.8
	Øi (cm)	30.0

Tabla T3: Diámetro de pozo vs Caudal esperado

**Table 3. Well Diameter vs. Expected Yield
(In SI and U.S. Customary Units)**

Expected Well Yield	Nominal Size of Pump Bowls	Optimum Size of Well Casing	Smallest Size Well Casing
(lpm)	(mm)	(mm)	(mm)
<380	100	150 ID	125 ID
285-660	125	200 ID	150 ID
570-1515	150	250 ID	200 ID
1325-2460	200	300 ID	250 ID
2270-3400	250	350 OD	300 ID
3200-4900	300	400 OD	350 OD
4550-6800	350	500 OD	400 OD
6050-11400	400	600 OD	500 OD
(gpm)	(in)	(in)	(in)
<100	4	6 ID	5 ID
75-175	5	8 ID	6 ID
150-400	6	10 ID	8 ID
350-650	8	12 ID	10 ID
600-900	10	14 OD	12 ID
850-1300	12	16 OD	14 OD
1200-1800	14	20 OD	16 OD
1600-3000	16	24 OD	20 OD
3000-6000	20	30 OD	24 OD

Note: If provided, contract section 01015 technical requirements shall supersede the minimum diameters suggested in this table.

Anexo U: Dimensionamiento definitivo de espesores y diámetro de perforación

Tabla U1: Espesor de tubería (TABLA 32-3 A100-97 AWWA)

Diámetro nominal mínimo	Øi (pulg)	11.2	Diámetro nominal óptimo	Øo (pulg)	11.8
Profundidad	H (m)	90	Profundidad	H (m)	90
Espesor de tubería definitiva	E (pulg)	0.25	Espesor de tubería definitiva	E (pulg)	0.25
	E (mm)	6.35		E (mm)	6.35

Tabla U2: Espesor de tubería definitiva (TABLA 4-3 KHEPAR 2003)

Caudal de demanda	Qd (l/s)	30
	Qd (l/min)	1800
Espesor de tubería definitiva	E (mm)	3.5 (Es espesor mínimo)

Tabla U3: Mínimo Espesor de tubería de acero (AWWA,1997)

Table 4 Minimum thickness for steel well casing—single casing

Depth of Casing ft (m)	Nominal Casing Diameter—in. (mm)									
	8 (203)	10 (254)	12 (305)	14 (356)	16 (406)	18 (457)	20 (508)	22 (559)	24 (610)	30 (762)
0–100 (0–30)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (7.94)
100–200 (30–60)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (7.94)
200–300 (60–90)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (9.52)
300–400 (90–120)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (9.52)	¼ (9.52)
400–600 (120–180)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (9.52)	¼ (9.52)	¼ (11.11)
600–800 (180–240)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (9.52)	¼ (9.52)	¼ (9.52)	¼ (11.11)
800–1,000 (240–300)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (6.35)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (9.52)	¼ (11.11)	¼ (11.11)	¼ (12.70)
1,000–1,500 (300–450)	¼ (6.35)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (9.52)	¼ (9.52)	¼ (9.52)	¼ (11.11)	—	—
1,500–2,000 (450–600)	¼ (6.35)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (7.94)	¼ (9.52)	¼ (9.52)	¼ (11.11)	¼ (11.11)	—	—

*As specified by the purchaser.

Tabla U4: Diámetro de tubería según caudal

TABLE 4.3 Diameter and Thickness of Housing Pipes of Tube Wells for Different Sizes of Turbine/Submersible Pumps

Discharge l/min	Nominal diameter of pump, cm	Diameter of housing pipe cm	Thickness of housing pipe mm
475	12.5	15.0–20.0	1.5–3.5
1150	15.0	20.0–25.0	1.5–3.5
2275	20.0	25.0–30.0	2.0–3.5
4550	30.0	35.0	2.0–5.0
7500	35.0	40.0	2.0–6.0
11500	40.0	45.0	2.0–6.0

Source: Ahrens (1970)

Tabla U5: Dimensionamiento de diámetro de perforación

Diámetro de perforación = 8" + diámetro nominal de tubería : Rocoe Moss (1990)

Diámetro de perforación sin tubo de enfriamiento	Øp (pulg)	16
	Øp (cm)	40
Diámetro de perforación con tubo de enfriamiento	Øp (pulg)	18
	Øp (cm)	45
Diámetro de perforación óptimo	Øp (pulg)	20
	Øp (cm)	50

Nota: Estos diámetro consideran el engravado

ANEXO V: DISEÑO DE PAQUETE DE GRAVA

Tabla V1. Granulometría de la muestra

Tamices	Abertura	% Pasa	%Retenido			
ASTM	(mm)	M-7				
		95m				
3"	75					
2"	50.8	100	0			
1 1/2"	38.1	96.35	3.65			
1"	25.4	90.15	9.85			
3/4"	19.1	82.56	17.44			
1/2"	12.7	72.54	27.46			
3/8"	9.525	69.34	30.66			
N°4	4.76	63.25	36.75	Anidación	52%	
N°10	2	54.96	45.04			
N°20	0.84	41.48	58.52			
N°40	0.42	32.89	67.11	% Pasa	Abertura	Paquete
N°60	0.25	22.15	77.85	70	0.37	2.25
N°100	0.15	15.68	84.32	Coef.	6	
N°200	0.07	10.5	89.5			

Tabla V2. Granulometría ajustada según anidación

Tamices	Abertura	% Pasa	%Retenido			
N°4	4.76	47.68	52.32	% Pasa	Abertura	Paquete
N°10	2	39.39	60.61	70	1.19	5.96
N°20	0.84	25.91	74.09	Coef.	5	

Tabla V3. Granulometría ajustada según anidación

Tamices	Abertura	% Pasa	%Retenido
ASTM	(mm)	M-7	
		95m	
3"	75		
2"	50.8	100	0
1 1/2"	38.1	96.35	3.65
1"	25.4	90.15	9.85
3/4"	19.1	82.56	17.44
1/2"	12.7	72.54	27.46
3/8"	9.525	69.34	30.66
N°4	4.76	47.68	52.32
N°10	2	39.39	60.61
N°20	0.84	25.91	74.09
N°40	0.42	17.32	82.68
N°60	0.25	6.58	93.42
N°100	0.15	0.11	99.89

Figura V1. Curva de Retención- Paquete de Grava

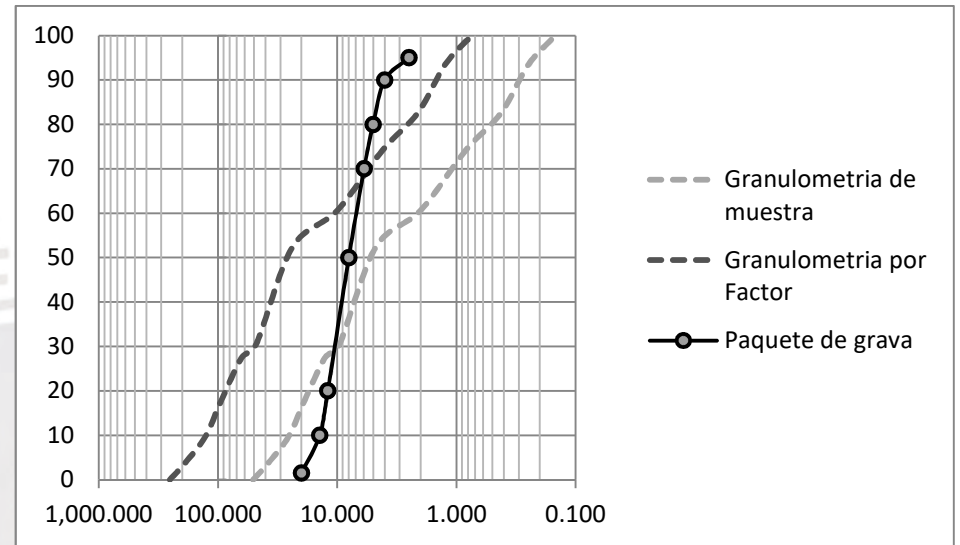


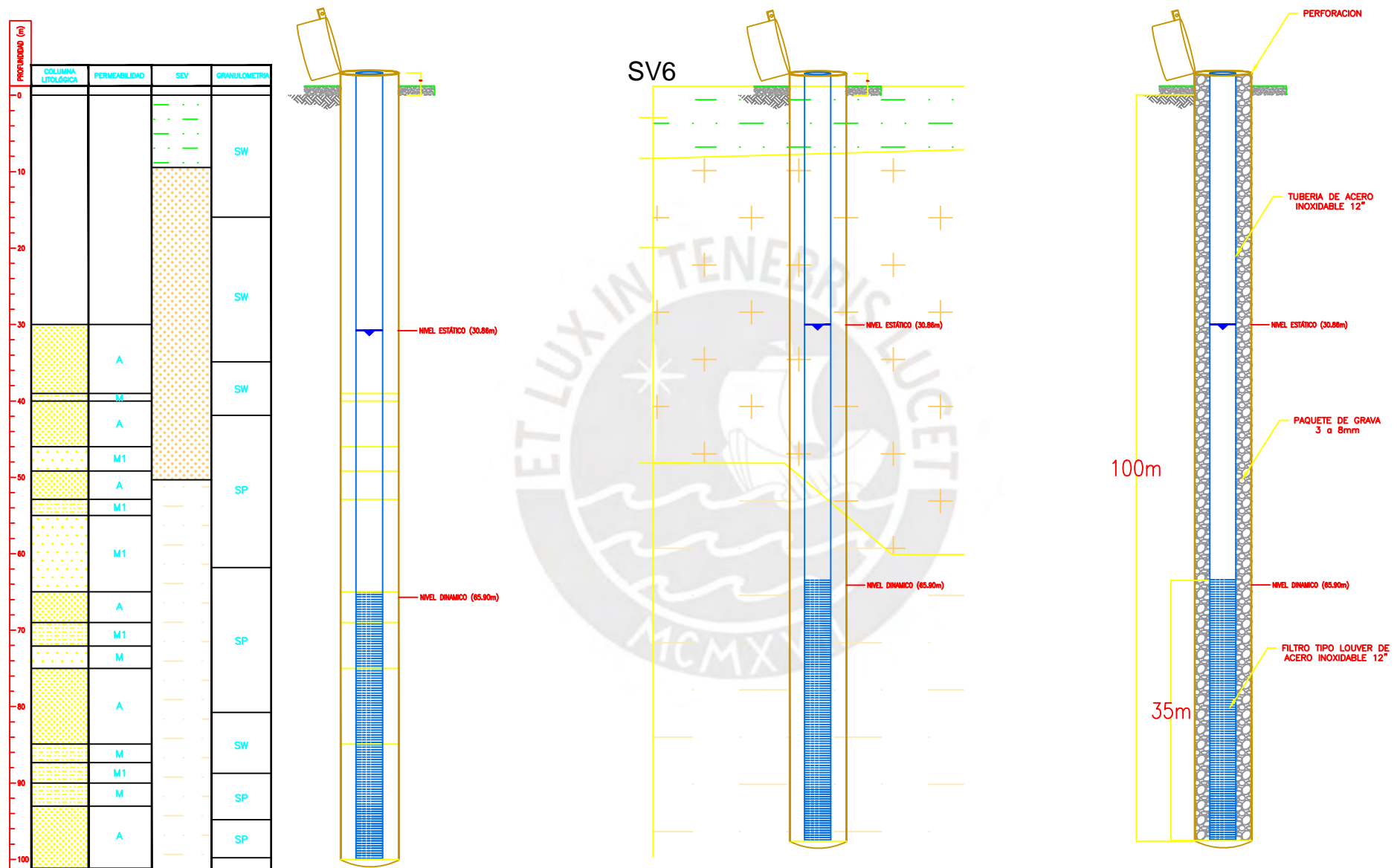
Tabla V4. Características de paquete de grava

Característica	
Tamaño de canto rodado	3-8mm
Forma de Grano	Redondeado
Coefficiente de Uniformidad	2
Calidad	Limpio

Tabla V5. Tamaño de ranura de filtro

Porcentaje de retencion	Abertura
90%	1.58mm

ANEXO W: UBICACION DE FILTRO



REV. N°	DESCRIPCIÓN	FECHA

Cliente: _____

Propietario: _____

DATOS ADICIONALES	FECHA
DIBUJADO POR: K.R.-Z.C.	12/09/2021
DISEÑADO POR: K.R.-Z.C.	12/09/2021
REVISADO POR: J.R.U.	12/09/2021
APROBADO POR: J.R.U.	12/09/2021

Proyecto: **DISEÑO DE POZO PROFUNDO-AZAPAMPA-CHILCA**

Título: **UBICACION DE FILTRO**

ESCALA: S/E

PLANO N°: **W**

HOJA: 4_4 REV.: A

ANEXO X: RESISTENCIAS EN LA TUBERIA

Tabla X1. Peso de Tubería

$$Wt = (k \cdot t \cdot (D - t)) \cdot L$$

k	10.68	
t(Espesor de tubería)	0.25	in
D(Diámetro externo de tubería)	12	in
Wt(Peso de tubería por cada metro de longitud)	31.37	lbs/ft
Wt(Peso de tubería por cada metro de longitud)	4.34	kg/m

Tabla X2. Factor de material

Coef.	LCS	SS	PVC	Fibra de Vidrio	Sistema
k	10.68	10.78	2.1	2.7	U.S
	0.229	0.231	0.15	0.62	SI

Fuente: Sterrett(2007)

Tabla X3. Resistencia a la tensión de Tubería

$$Cts = \frac{\pi \cdot t \cdot St (D_o - t)}{2000}$$

t(Espesor de pared)	0.25	in
St(Resistencia última de tensión del material)	70000	psi
Do(Diámetro externo)	12	in
Cts(Resistencia a la tracción de la tubería)	322.99	tn
Cts(Resistencia a la tracción de la tubería)	322987.11	kg

Tabla X4. Resultados de peso de tubería

Parámetros	Acero	Acero Inoxidable	PVC	Fibra de vidrio
t (cm)	0.64	0.64	1.74	0.95
Wt(kg/m)	4.34	4.38	2.9	1.63
Wt(lb/ft)	31.37	31.67	20.98	11.77

Tabla X5. Resultados de resistencia a la de tubería

Parámetros	Acero	Acero Inoxidable	PVC	Fibra de vidrio
S(MPa)	420	485	53.7	78.83
t (cm)	0.64	0.64	1.74	0.95
Cts (Tn)	322.99	324.58	95.22	78.75

Tabla X6. Presión de colapso sin excentricidad

Material	Acero	
E (Módulo de Young)	30000000	Psi
v (Ratio de Poisson)	0.28	
D (Diámetro externo)	12	in
t (Espesor de pared)	0.25	in
P (Presión de colapso sin excentricidad)	627.07	Psi
P (Presión de colapso sin excentricidad)	44.09	kg/cm2

Tabla 3. Propiedades de Materiales de Pozo

Propiedad	Acero Carbon	Acero Inoxidable	PVC	Fibra de vidrio
Gravedad Especifica	7.8	8	1.4	1.9
Fluencia de material	35000	30000	7000	12000
Módulo de Young	240	210	50	80
Ratio de Poisson	30000000	28000000	400000	2000000
	206900	193100	2800	13800
	0.28	0.3	0.4	0.6

Nota. Tomado de Sterrett (2007).

Ecuación de presión sin excentricidad

$$P = \frac{2E}{(1 - \nu^2) \left(\frac{D}{t} - 1 \right)}$$

Ecuación de presión con excentricidad

$$Pd^2 - \left\{ \frac{2Yp}{D-1} + \left[1 + 3 \left(\frac{D}{t} - 1 \right) e \right] P_{cr} \right\} Pd + \frac{2Yp * Pr}{\frac{D}{t} - 1} = 0$$

Tabla X7. Presión de colapso con excentricidad

Pe(Presión de colapso con excentricidad)	24.80	kg/cm2
Pe(Presión de colapso con excentricidad)	352.71	Psi
Ecuación Timoshenko	9.60E-08	Psi
Yp(Gravedad Específica)	35000	Psi
Do(Diámetro externo)	12	inches
t(Espesor de pared)	0.25	inches
e(Excentricidad)	0.01	
Pcr (Presión colapso sin excentricidad)	627.07	Psi

Tabla X8. Resultados de Presiones de colapso

MATERIAL	E	u	S	Pcr	Pcr	Pe	Pe
	(Psi)		(Psi)	(Psi)	(kg/cm2)	(Psi)	(kg/cm2)
Acero	3.00E+07	0.28	35000	627.07	44.09	352.71	24.8
Acero Inoxidable	2.80E+07	0.3	30000	592.72	41.67	316.83	22.28
PVC	4.00E+05	0.4	7000	150.79	10.61	175.26	12.32
Fibra de Vidrio	2.00E+06	0.6	12000	209.79	14.75	159.26	11.2

ANEXO Y: RESISTENCIAS EN FILTRO

Tabla Y2. Características de alambre

Ancho de alambre	Altura de alambre	Espesor de base menor de alambre
(in)	(in)	(in)
0.058	0.085	0.02
0.09	0.14	0.025
0.118	0.185	0.03
0.146	0.215	0.04
0.165	0.25	0.03
0.183	0.375	0.04
0.215	0.315	0.04

Tabla Y1. Presión de colapso en ranura continua

E(Modulo de Young)	30000000	psi
w(Espesor de alambre)	0.118	in
s(espesor de ranura de filtro)	0.25	in
D(Diámetro de filtro)	12	in
h(Altura de alambre)	0.185	in
b(Espesor de base menor de alambre)	0.03	in
I(Inercia)	0.0000344	in ⁴
Pcs (Presión de colapso)	39.0	psi
Pcs(Presión de colapso)	2.74	kg/cm²

Fuente: Roscoe Moss(1990)

Tabla Y3. Presión de colapso sin excentricidad en filtro Louver/Bridge

Material	Acero	
E (Módulo de Young)	28000000	Psi
v (Ratio de Poisson)	0.3	
D (Diametro externo)	12	in
t (Espesor de pared)	0.5	in
P (Presión de colapso sin excentricidad)	5057.82	Psi
P (Presión de colapso sin excentricidad)	355.60	kg/cm²

Ecuación de presión para ranura continua

$$I = \frac{h^3 (w^2 + 4wb + b^2)}{36 (b + w)} \quad P_{cs} = \frac{24 EI}{(w + s) D^3}$$

Ecuación de presión sin excentricidad

$$P = \frac{2E}{(1 - v^2) \left(\frac{D}{t} - t \right)}$$

Ecuación de presión con excentricidad

$$Pd^2 - \left\{ \frac{2Yp}{\frac{D}{t} - 1} + \left[1 + 3 \left(\frac{D}{t} - 1 \right) e \right] P_{cr} \right\} Pd + \frac{2Yp * Pr}{\frac{D}{t} - 1} = 0$$

Tabla Y4. Presión de colapso sin excentricidad en filtro Louver/Bridge

Pe(Presión de colapso con excentricidad)	94.55	kg/cm²
Pe(Presión de colapso con excentricidad)	1344.76	Psi
Ecuación Timoshenko	1808176.373	Psi
Yp(Fluencia de material)	30000	Psi
Do(Diámetro externo)	12	inches
t(Espeso de pared)	0.5	inches
e(Excentricidad)	0.01	
Pcr(Presión sin excentricidad)	5057.82	Psi

Tabla Y5. Resistencia a la tensión en ranura continua

dr(Diámetro de soporte)	0.15	in
Nf(Número de soportes)	60*	
Y(Esfuerzo específico de material)	35000	psi
Ew(factor de seguridad)	0.85	
Ts(Resistencia a la tensión)	31544	lb
Ts(Resistencia a la tensión)	14308	kg

*Dato obtenido de Roscoe Moss(1990)

Ecuación de resistencia a la tensión: Ranura continua

$$T_s = (0.7854 \cdot dr^2) \cdot N_f \cdot Y \cdot E_w$$

Tabla Y6. Resistencia a la tensión en filtro Louver/Bridge

dr (Diámetro de soporte)	12	in
t (Espesor de pared)	0.35	in
l (Longitud de ranura)*	3	in
n (Número de ranura)	10	
Y(Esfuerzo específico de material)	35000	
Ys(Yield point)	0.180	
T(Resistencia a la tensión)	80817	lb
T(Resistencia a la tensión)	36658	kg

*Dato obtenido de Roscoe Moss(1990)

Ecuación de resistencia a la tensión: Louver/Bridge

$$T = \left(\frac{\pi \cdot (D - t) - (l \cdot n)}{\pi \cdot (D - t)} \right) \cdot t \cdot Y \cdot \pi \cdot (D - t)$$

Diámetro (in)	Longitud de ranura (in)
<8"	2
>10"	3

Fuente: Roscoe Moss(1990)

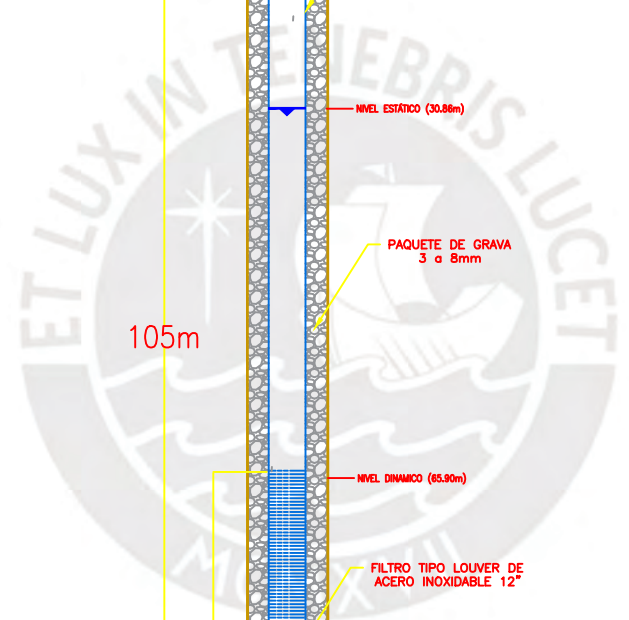
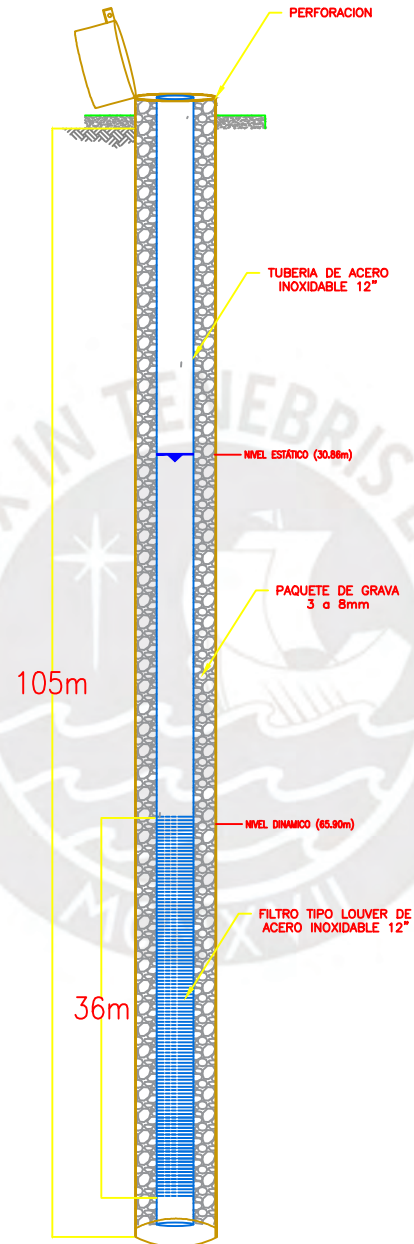
Tabla Y7. Resultados de resistencia a la tensión en ranura continua

MATERIAL	S (Psi)	dr in	T lb	T kg
Acero	35000	0.15	31544	14308
Acero Inoxidable	30000	0.15	27037	12264
PVC	7000	0.15	6308	2861

Tabla Y8. Resultados de resistencia a la tensión en filtro Louver/Bridge

MATERIAL	S (Psi)	t in	T lb	T kg
Acero	35000	0.35	80817	36658
Acero Inoxidable	30000	0.35	69218	31421

ANEXO Z: ESQUEMA DE POZO



			Ciente:	Propietario:	DATOS ADICIONALES	FECHA	Proyecto:	ESCALA: S/E	
					DIBUJADO POR: K.R.-Z.C.	12/09/2021	DISEÑO DE POZO PROFUNDO-AZAPAMPA-CHILCA	PLANO N°:	
					DISEÑADO POR: K.R.-Z.C.	12/09/2021	ESQUEMA DE POZO	Z	
					REVISADO POR: J.R.U.	12/09/2021		HOJA: 4_4	REV.: A
REV. N°	DESCRIPCIÓN	FECHA			APROBADO POR: J.R.U.	12/09/2021			