

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN
DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO
FORTALEZA”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

CÉSAR MANUEL ALVARADO MAYHUA






LIMA – PERÚ

2022

Document Information

Analyzed document	TSP Alvarado César.pdf (D155503465)
Submitted	2023-01-11 17:53:00
Submitted by	Absalón Vásquez
Submitter email	avasquez@lamolina.edu.pe
Similarity	2%
Analysis address	avasquez.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

SA	Ramos_Perez_Frank_Titulo_Profesional_2016.pdf Document Ramos_Perez_Frank_Titulo_Profesional_2016.pdf (D27115885)		2
SA	35072-Diaz Avila, Gil Franklin.pdf Document 35072-Diaz Avila, Gil Franklin.pdf (D107444820)		1
SA	EF_TT2_CHILON_E - GALLARDO-M.docx Document EF_TT2_CHILON_E - GALLARDO-M.docx (D120242384)		1
SA	TESIS_ MICHELLE BONIFAZ.pdf Document TESIS_ MICHELLE BONIFAZ.pdf (D131864373)		3
SA	5457-Rojas Rubio,hugo Amado.pdf Document 5457-Rojas Rubio,hugo Amado.pdf (D110970226)		3
W	URL: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Exercises%3A_General_Chemistry/Exerc... Fetched: 2019-12-01 16:09:12		2
SA	Evaluacion hidrogeologica acuifero aluvial Viru.pdf Document Evaluacion hidrogeologica acuifero aluvial Viru.pdf (D55241405)		11
W	URL: https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultu... Fetched: 2020-07-28 02:41:28		1

Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA "INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA" TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AGRÍCOLA CÉSAR MANUEL ALVARADO MAYHUA LIMA – PERÚ 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN
DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO
FORTALEZA”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. CÉSAR MANUEL ALVARADO MAYHUA

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Mg. Sc. GUILLERMO CLEMENTE AGUILAR GIRALDO
Presidente

Dr. ABSALÓN VÁSQUEZ VILLANUEVA
Asesor

Mg. Sc. ERICK ABAD ROSALES ASTO
Miembro

Ing. ANTONIO CELESTINO ENCISO GUTIÉRREZ
Miembro

LIMA – PERU

2022

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problemática.....	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Acuífero.....	4
2.2. Hidráulica subterránea.....	5
2.2.1. Flujo subterráneo	7
2.2.2. Homogeneidad e isotropía	8
2.2.3. Prueba de bombeo.....	8
2.3. Inventario de fuentes de agua subterránea	9
2.4. Prospección geofísica aplicada a la hidrogeología	10
2.5. Balance hídrico de acuíferos	10
2.5.1. Balance de zona	11
2.5.2. Métodos basados en la zona no-saturada.....	12
2.5.3. Métodos basados en la zona saturada	13
2.6. Modelo conceptual	15
2.7. Modelamiento numérico.....	17
III. DESARROLLO DEL TRABAJO	21
3.1. Materiales, equipos y <i>software</i>	22
3.1.1. Materiales	22
3.1.2. Equipos	22
3.1.3. Programas de cómputo	22
3.2. Ubicación y características de la zona de estudio	23
3.2.1. Ubicación.....	23
3.2.2. Hidrografía de la cuenca.....	23
3.2.3. Demografía del distrito de Paramonga	23
3.2.4. Agricultura.....	24

3.2.5. Vías de comunicación.....	25
3.2.6. Uso del agua	25
3.2.7. Geomorfología.....	25
3.2.8. Geología.....	27
3.3. Métodos.....	29
3.3.1. Inventario de fuentes de agua subterránea.....	29
3.3.2. Prospección geofísica	30
3.3.3. Napa freática.....	33
3.3.4. Prueba de acuífero	35
3.3.5. Geometría y composición del acuífero.....	39
3.3.6. Flujo subterráneo y almacenamiento del acuífero.....	39
3.3.7. Análisis de la calidad del agua.....	40
3.3.8. Recarga del acuífero	43
3.3.9. Descarga del acuífero	45
3.3.10. Balance hídrico subterráneo	46
3.3.11. Elaboración del modelo conceptual.....	46
3.3.12. Elaboración del modelo numérico	47
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1. Inventario de pozos de agua subterránea.....	50
4.1.1. Inventario de pozos de agua subterráneo en el valle Fortaleza	50
4.1.2. Actualización del Inventario de Pozos de Agua Subterránea en la zona de estudio.....	54
4.2. Análisis de prospección geofísica	57
4.2.1. Prospección Geofísica con fines Hidrogeológicos	57
4.3. Napa freática.....	60
4.3.1. Morfología de la napa freática.....	60
4.3.2. Profundidades de la napa freática	61
4.3.3. Variación temporal de la napa freática	62
4.4. Hidráulica subterránea.....	67
4.4.1. Pruebas de bombeo	67
4.4.2. Conductividad Hidráulica (k)	68
4.4.3. Transmisividad (T)	70
4.4.4. Porosidad Efectiva	70
4.5. Geometría y composición del acuífero.....	71

4.5.1. Basamento rocoso y napa freática	71
4.5.2. Espesor del acuífero.....	72
4.5.3. Condiciones de límites laterales	72
4.5.4. Composición litológica.....	73
4.6. Flujo subterráneo y almacenamiento del acuífero.....	73
4.6.1. Origen y caudal de Flujo subterráneo	73
4.6.2. Almacenamiento del reservorio acuífero.....	74
4.7. Hidrogeoquímica	74
4.7.1. Características Físicas.....	75
4.7.2. Características Químicas	75
4.8. Recarga del acuífero	77
4.9. Descarga del acuífero	79
4.10. Balance hídrico.....	80
4.11. Modelamiento conceptual	81
4.12. Modelamiento numérico.....	83
4.12.1. Dominio del modelo	83
4.12.2. Discretización del sistema	84
4.12.3. Definición de condiciones iniciales	86
4.12.4. Definición de condiciones de frontera.....	86
4.12.5. Definición de pozos de observación	88
4.12.6. Calibración.....	89
4.12.7. Simulación y balance de masas del acuífero	91
4.13. Análisis de reserva acuífero	93
4.13.1. Reserva Racionalmente Explotable	93
4.13.2. Reserva Potencialmente Explotable	93
4.14. Caudal óptimo de explotación.....	94
V. CONCLUSIONES.....	96
VI. RECOMENDACIONES.....	98
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
VIII. ANEXOS.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de algunos materiales sedimentarios según su permeabilidad.....	6
Tabla 2: Calificación estimativa de la permeabilidad.....	6
Tabla 3: Calificación de permeabilidad y posibilidades del acuífero.....	6
Tabla 4: Población por edades del distrito de Paramonga.....	24
Tabla 5: Resistividades características de las aguas subterráneas.....	30
Tabla 6: Clasificación del agua según su dureza.....	41
Tabla 7: Características de la estación hidrométrica “La Rinconada”.....	44
Tabla 8: Características de la estación meteorológica “Paramonga”.....	44
Tabla 9: Características de la estación meteorológica “Paramonga”.....	46
Tabla 10: Distribución de los tipos de pozos en el valle Fortaleza.....	50
Tabla 11: Distribución los pozos según su estado.....	51
Tabla 12: Distribución los pozos según su uso.....	52
Tabla 13: Volumen de agua subterránea utilizado según su uso.....	53
Tabla 14: Ubicación de pozos según sectores.....	54
Tabla 15: Estado de los pozos por sectores.....	55
Tabla 16: Espesores y resistividades de los horizontes del subsuelo.....	59
Tabla 17: Datos estadísticos de las cargas hidráulicas.....	61
Tabla 18: Datos estadísticos de las profundidades de la napa freática.....	62
Tabla 19: Datos estadísticos de niveles mensuales de la napa – zona I.....	63
Tabla 20: Datos estadísticos de niveles mensuales de la napa - zona II.....	64
Tabla 21: Datos estadísticos de niveles mensuales de la napa - zona III.....	65
Tabla 22: Datos estadísticos de niveles mensuales de la napa - zona IV.....	66
Tabla 23: Pozos utilizados para pruebas de bombeo.....	68
Tabla 24: Resultados de conductividad hidráulica.....	69
Tabla 25: Datos estadísticos de valores de conductividad hidráulica (m/d).....	69
Tabla 26: Zonas de conductividad hidráulica.....	70
Tabla 27: Resultados de transmisividad.....	70
Tabla 28: Datos estadísticos de valores de transmisividad (m ² /d).....	70
Tabla 29: Clasificación química del agua de los pozos analizados.....	76
Tabla 30: Volúmenes mensuales de recarga de infiltración por flujo de río.....	77
Tabla 31: Volúmenes mensuales de agua destinada para el riego.....	78

Tabla 32: Volúmenes de recarga por riego.....	79
Tabla 33: Valores de volúmenes mensuales de explotación por pozos.....	80
Tabla 34: Valores mensuales de descarga por evapotranspiración.....	80
Tabla 35: Balance hídrico del acuífero.....	81
Tabla 36: Distribución de balance de masas.....	91
Tabla 37: Reservas explotables del acuífero.....	94
Tabla 38: Cálculo del caudal óptimo de explotación.....	94
Tabla 39: Inventario de pozos de agua subterránea.....	106
Tabla 40: Volúmenes de explotación mensual y anual entre el periodo 2009-2017.....	108
Tabla 41: Resumen de la interpretación de los SEV del sector Tunán.....	109
Tabla 42: Resumen de la interpretación de los SEV del sector Manzuelo.....	110
Tabla 43: Resumen de la interpretación de los SEV del sector Quebrada.....	111
Tabla 44: Monitoreo mensual de los niveles de la napa freática para el 2018.....	112
Tabla 45: Prueba de bombeo pozo IRHS 28 (Q1) – Fase de descenso.....	114
Tabla 46: Prueba de bombeo pozo IRHS 28 (Q1) – Fase de recuperación.....	116
Tabla 47: Prueba de bombeo pozo IRHS 33 (Q6) – Fase de descenso.....	117
Tabla 48: Prueba de bombeo pozo IRHS 33 (Q6) – Fase de recuperación.....	118
Tabla 49: Resultados y características del análisis de agua subterránea.....	119
Tabla 50: Pozos de observación y cargas hidráulicas.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Zonas de humedad del subsuelo.....	4
Figura 2: Movimientos del agua en el subsuelo.....	8
Figura 3: Una cuadrícula para el MDF centrado en la cuadrícula.....	20
Figura 4: Geomorfología en la zona de estudio.....	27
Figura 5: Geología en la zona de estudio.....	29
Figura 6: Configuraciones para ejecución de un SEV.....	31
Figura 7: Configuración de electrodos y profundidad del suelo.....	32
Figura 8: Curva de sondeo.....	32
Figura 9: Sección transversal de un acuífero y vista de las cargas hidráulicas.....	35
Figura 10: Ejemplo de representación de datos de abatimientos en gráfico semilogarítmico y recta de interpretación.....	38
Figura 11: Modelado como multifase, proceso iterativo.....	47
Figura 12: Distribución de los tipos pozos.....	51
Figura 13: Distribución de los pozos según su estado.....	52
Figura 14: Distribución de los pozos según su uso.....	53
Figura 15: Estado de los pozos por sectores.....	55
Figura 16: Volumen mensual promedio de explotación de pozos, periodo 2009-2017.....	56
Figura 17: Volumen de explotación anual, periodo 2009-2017.....	57
Figura 18: Curvas Hidroisohipsas y dirección del flujo subterráneo.....	61
Figura 19: Variación mensual de la napa freática para la zona I.....	64
Figura 20: Variación mensual de la napa freática para la zona II.....	65
Figura 21: Variación mensual de la napa freática para la zona III.....	66
Figura 22: Variación mensual de la napa freática en la zona IV.....	67
Figura 23: Distribución espacial del basamento rocoso y la napa freática.....	72
Figura 24: Delimitación de la zona de estudio.....	73
Figura 25: Volumen mensual promedio para riego.....	78
Figura 26: Grilla horizontal del modelo numérico.....	85
Figura 27: Grilla de las celdas activas del modelo numérico en tres dimensiones.....	85
Figura 28: Condiciones de frontera del modelo numérico.....	88
Figura 29: Carga hidráulica simulada vs observada.....	89
Figura 30: Carga hidráulica mensual monitoreada y simulada.....	90

Figura 31: Distribución de balance de masas.....	92
Figura 32: Reserva Potencialmente Explotable.....	94
Figura 33: Análisis de prueba de bombeo pozo IRHS 28 – Fase de descenso.....	121
Figura 34: Análisis de prueba de bombeo pozo IRHS 28 – Fase de recuperación.....	122
Figura 35: Análisis de prueba de bombeo pozo IRHS 33 – Fase de descenso.....	123
Figura 36: Análisis de prueba de bombeo pozo IRHS 33 – Fase de recuperación.....	124
Figura 37: Perfil litológico generalizado.....	125
Figura 38: Diagrama de Piper para 7 pozos – acuífero Fortaleza.....	126
Figura 39: Diagrama de Piper para 8 pozos – acuífero Fortaleza.....	126
Figura 40: Diagrama de Schoeller para 7 pozos – acuífero Fortaleza.....	127
Figura 41: Diagrama de Schoeller para 8 pozos – acuífero Fortaleza.....	127
Figura 42: Diagrama de Wilcox para 7 pozos - acuífero Fortaleza.....	128
Figura 43: Diagrama de Wilcox para 8 pozos – acuífero Fortaleza.....	128
Figura 44: Modelo conceptual I.....	129
Figura 45: Modelo conceptual II.....	130

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: TABLAS Y FIGURAS.....	105
ANEXO 2: MAPAS	131
Mapa 1: Ubicación de zona de estudio	
Mapa 2: Geología	
Mapa 3: Geomorfología	
Mapa 4: Inventario de pozos de agua subterránea	
Mapa 5: Ubicación de los S.E.V.	
Mapa 6: Ubicación de secciones geoelectricas	
Mapa 6.1: Sección geofísica generalizada A-A'	
Mapa 6.2: Sección geofísica generalizada B-B'	
Mapa 6.3: Sección geofísica generalizada C-C'	
Mapa 6.4: Sección geofísica generalizada D-D'	
Mapa 7: Isóbatas	
Mapa 8: Isópacas	
Mapa 9: Hidroisohipsas	
Mapa 10: Isoprofundidad	
Mapa 11: Zonas de conductividad hidráulica	
Mapa 12: Isoconductividad eléctrica	
Mapa 13: pH	
Mapa 14: Hidrogeoquímica	
Mapa 15: Límites del modelo numérico	

RESUMEN

El trabajo ha tenido como objetivo la obtención del caudal óptimo de explotación del acuífero del valle Fortaleza, entre los sectores Tunán y Manzueto, utilizando una metodología conceptual y numérica; que requirió la caracterización hidrogeológica del ámbito de estudio, en los aspectos geológicos, geomorfológicos, geofísicos, de hidráulica subterránea, geometría y composición del acuífero, hidrogeoquímica, recarga, descarga y balance hídrico subterráneo. Para el desarrollo de los mismos se utilizó información de pruebas de bombeo, análisis fisicoquímicos de diversas muestras de agua, resultados de ensayos geofísicos, aforos de caudales de extracción de pozos y canales, registros de caudales de riego, información meteorológica, niveles de la napa freática, entre otros. Se determinó, de manera conceptual, que el acuífero Fortaleza es de tipo detrítico sin confinamientos, de buena permeabilidad, y con flujo subterráneo de orientación noreste a suroeste. El balance hídrico realizado permitió determinar que el acuífero se encuentra en un estado de subexplotación, pudiéndose aprovechar, racionalmente, un volumen anual de 1,13 hm³ (MMC). El balance de masas, realizado con un software *Modflow*, determinó que existe una reserva aprovechable anual de 44 l/s que, sumado a lo actualmente extraído de 203.07 l/s, se obtiene un caudal óptimo de explotación de 247,49 l/s.

Palabras clave: acuífero Fortaleza, balance hídrico subterráneo, modelamiento conceptual, modelamiento numérico, caudal óptimo de explotación, caracterización hidrogeológica.

ABSTRACT

The work develops the obtaining of the optimal flow of exploitation of the Fortaleza valley aquifer, between the Tunán and Manzuelto sectors, using a conceptual and numerical methodology; which required the hydrogeological characterization of the study area, in the geological, geomorphological, geophysical, underground hydraulic, geometry and composition of the aquifer, hydrogeochemical, recharge, discharge and underground water balance aspects. For their development, information from pumping tests, physicochemical analyzes of various water samples, results of geophysical tests, gauging of extraction flows from wells and canals, records of irrigation flows, meteorological information, levels of the water table, among others. It will be conceptually extended that the Fortaleza aquifer is of the detrital type without confinements of good permeability, with an underground flow from northeast to southwest. The water balance carried out conceptually determines that the aquifer is in a state of underexploitation, being able to rationally take advantage of an annual volume of 1.13 hm³ (MMC). The mass balance carried out numerically with computer software will conclude that there is a rationally usable reserve of 44 l/s per year, which, added to what is currently extracted, gives an optimum exploitation flow of 247.49 l/s.

Keywords: Fortaleza Aquifer, groundwater balance, conceptual modeling, numerical modeling, optimal exploitation flow, hydrogeological characterization.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática

El agua es fundamental para el desarrollo de la vida humana, por ser el principal componente del cuerpo e impulsor del metabolismo, por ello una anomalía cuantitativa o cualitativa provoca perjuicio a la salud. Además, tiene un valor ecosistémico fundamental para el desarrollo de la vida animal y vegetal, que a su vez brindan servicios esenciales para la supervivencia de la especie humana. Por otra parte, es agente importante en el desarrollo económico de la población, interviniendo en crear y mantener puestos de trabajo en todos los sectores de la economía. Se estima que más de mil millones de puestos de trabajo, que representan más del 40 % de la población económicamente activa mundial, dependen significativamente del agua (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos [WWAP], 2016).

A nivel nacional el 97.7 % del agua superficial se encuentra en la vertiente del Atlántico, donde se asienta el 30.0 % de la población, que produce el 17.7 % del Producto Bruto Interno (PBI) del país. Paradójicamente, el otro 1.8 % del recurso hídrico se concentra en la vertiente del Pacífico, donde habita el 65.0 % de la población que produce el 80.4 % del PBI (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2009). La situación sufre mayor adversidad con la estacionalidad, ya que entre los meses de diciembre a marzo se genera el 80.0 % de la precipitación anual, generando un exceso de oferta hídrica que no es aprovechado y discurre al mar (ANA, 2009). Por otro lado, entre abril y noviembre, se sufre de escasas, por lo que el abastecimiento de la demanda de agua se complementa con la explotación de pozos de agua subterránea, en muchas zonas del territorio nacional.

Las aguas subterráneas son un importante recurso natural valioso y alta calidad utilizado para distintos usos, tales como el doméstico, agrícola, industrial, entre otros. Representan en cantidad la segunda mayor reserva de agua continental, siendo el 30.0 % del total (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2002). Además, goza

considerable demanda a nivel mundial, ya que abastece de agua potable, por lo menos, al 50.0 % de la población y representan el 43.0 % de toda el agua utilizada para el riego (Fundación de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación [FAO], 2010).

En el Perú la situación no es muy diferente, las aguas subterráneas tienen una demanda cuantiosa y en aumento progresivo; tanto que en 1955, la explotación en la ciudad de Lima era menor a 1 m³/s, valor que para 1997 alcanzó los 12.4 m³/s (Quintana y Tovar, 2002). Hasta el año 2008, se contabilizó 31899 pozos utilizados, con una explotación que ascendía a 1743 MMC, destinándose 72.9 % de agua subterránea para uso agrícola; 20.5 % para uso poblacional; 6.08 %, para uso industrial, y, 0.40 %, para uso pecuario (ANA, 2010), lo que demuestra la importancia de las aguas subterráneas como fuente de abastecimiento.

Dada la importancia de las aguas subterráneas, es necesario el cuidado de las reservas y optimización de su uso, para ello se requiere el desarrollo de instrumentos de planificación y gestión, entre ellos, los modelos hidrogeológicos, que constituyen una herramienta básica de apoyo y se utilizan para la cuantificación de los ingresos y egresos de volúmenes de agua a través del tiempo, así como el cuidado de su calidad. Asimismo, es posible la predicción del funcionamiento del acuífero sometido a distintos escenarios, por ejemplo, la explotación de nuevos pozos o cambios en los factores de recarga y descarga (Fernández-García y Sánchez-Vila, 2007). Por lo tanto, su uso debe ser gestionado de tal forma que no afecte la disponibilidad hídrica subterránea.

La zona de investigación de la presente investigación se localiza en el valle Fortaleza, lugar donde la empresa Agroindustrial Paramonga SAA, desarrolla sus actividades mediante el cultivo de caña de azúcar en una extensión mayor a las 5000 ha (Agroindustrial Paramonga [AIPSAA], 2013) representando la mayor superficie de los campos cultivables en el sector. Además, dicha actividad representa el mayor consumo de recursos hídricos provenientes de fuentes subterráneas, por tal motivo es de vital importancia su estudio, diagnóstico y gestión. Dicha empresa ha brindado información de hidrología, geología, geofísica, hidrogeología, hidráulica subterránea, hidrogeoquímica, entre otros, que ha permitido la elaboración de la presente investigación.

La cuenca Fortaleza requiere de gran atención para la gestión de los recursos hídricos, obteniendo una prioridad de 2, en una escala del 1 al 4, como consecuencia de la escasez del agua (ANA, 2016). Además, actualmente es una de las cuencas con menor conocimiento del funcionamiento acuífero, por tal motivo, es de vital importancia su estudio y cuantificación, que propicie un óptimo aprovechamiento.

El presente estudio plantea la formulación de un modelo hidrogeológico del valle Fortaleza que represente, con mayor aproximación, el funcionamiento dinámico del acuífero, que pueda ser considerado como herramienta de planificación y gestión, de tal manera que se aproveche racionalmente el recurso hídrico y permita la elaboración de políticas, hasta el momento, inexistente en el sector. Con el modelo numérico generado se podrá simular las condiciones actuales del estado del acuífero y obtener el caudal óptimo de explotación, con la finalidad de lograr que el acuífero sea una fuente hídrica sostenible en el tiempo, previniendo una posible sobreexplotación.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Elaboración de una investigación hidrogeológica que determine el funcionamiento del acuífero para la obtención del caudal óptimo de explotación (reservas renovables) que sea sostenible en el tiempo.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterización hidrogeológica del acuífero.
- Elaboración de modelo hidrogeológico conceptual.
- Formulación del modelo hidrogeológico numérico en régimen transitorio, que permita determinar las reservas hídricas racional y potencialmente explotables.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

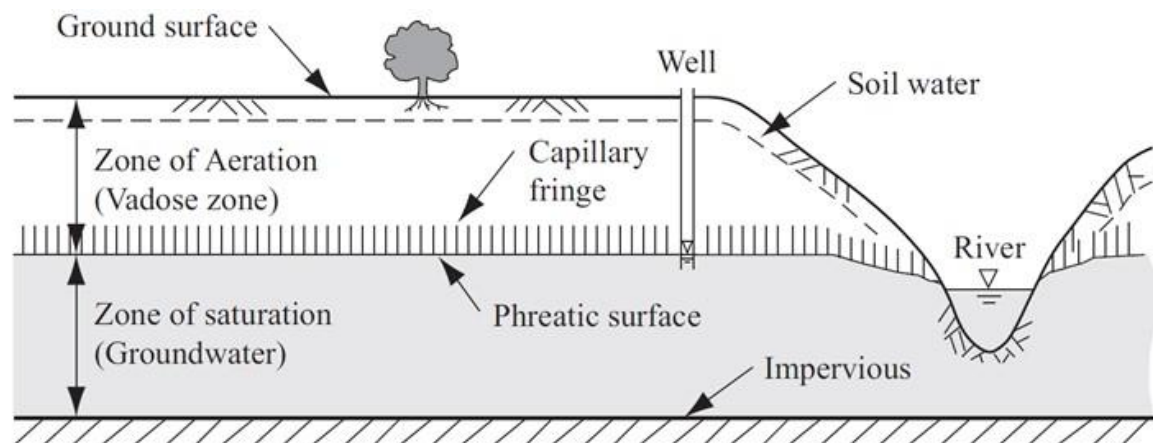
2.1. Acuífero

Todd (1959) refiere el término “acuífero” a su origen latino: “aquí”, que viene de “agua”, y “ferre”, que denota “llevar”. El término acuífero es un término utilizado para una formación geológica porosa que contiene agua a saturación completa y permite que el agua pueda moverse a través de ella bajo condiciones normales (Bear y Cheng, 2009).

El suelo debajo de la superficie de la tierra puede ser dividido, verticalmente, en un número de capas, esencialmente horizontales, según la proporción del espacio vacío que se llena con agua. La Figura 1 proporciona una descripción esquemática conveniente para un suelo homogéneo. Observamos dos zonas principales:

- La zona saturada, en la que todo el espacio vacío es ocupado por el agua.
- La zona no saturada, también, denominada zona de aireación o zona vadosa; donde sólo una parte del espacio vacío está ocupado por agua, y el resto, por aire.

Figura 1: Zonas de humedad del subsuelo



FUENTE: Bear y Cheng (2009)

El agua percola a través de la superficie del suelo, por la influencia de la gravedad, acumulándose por encima de alguna formación rocosa, u otro material impermeable (Bear y Cheng, 2009). Dicha descripción calza, perfectamente, con los acuíferos libres, compuestos principalmente, por material detrítico de naturaleza aluvial.

La zona saturada en la Figura 1 está delimitada, superiormente, por la tabla de agua o superficie freática y por debajo, por una capa impermeable.

2.2. Hidráulica subterránea

El agua subterránea se desplaza desde los niveles energéticos más altos a los más bajos, por lo que su energía procede, esencialmente, de las diferencias de nivel y de presión (Davis y De Wiest, 1971).

El flujo subterráneo en un sistema acuífero se puede evaluar por medio de la ley de Darcy (Freeze y Cherry, 1979) a partir de la diferencia de niveles piezométricos. La ley de Darcy establece que la velocidad de flujo a través de un medio poroso es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la longitud de la trayectoria del flujo (Tinajero, 1982). Dicha ley es la base de diferentes técnicas para describir el comportamiento del flujo en un acuífero, y será utilizada como referente en el presente estudio.

Los parámetros hidráulicos más importantes del acuífero son la porosidad, transmisividad, rendimiento específico, retención específica y gradiente hidráulico. La porosidad, el rendimiento específico y la retención específica describen las cantidades de agua existentes en la formación; asimismo, la transmisividad indica qué tan fácilmente se moverá el agua en la formación. La carga hidráulica y el gradiente hidráulico determinan cómo se mueve el agua a través de la formación y representan la mecánica de la recarga horizontal y vertical de un pozo en operación (AWWA, 2014).

Con el uso de los parámetros mencionados y la ley de Darcy con sus derivados, se podrá explicar el comportamiento del flujo subterráneo en el acuífero en estudio, tomándose como base para el cálculo del radio de influencia, el volumen subterráneo, entre otros. La

Tabla 1 muestra la clasificación geológica e hidrogeológica para distintos valores de conductividad hidráulica según Custodio y Llamas (2001).

Tabla 1: Clasificación de algunos materiales sedimentarios según su permeabilidad

Permeabilidad en (m/día)						
	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
Clasificación Geológica	Gravas Limpias	Gravas y arenas, o arenas gruesas		Arenas Finas o con mezcla de limos	Limos o arcillas arenosas	Arcillas compactas
Clasificación Hidrogeológica	Buen acuífero			Acuífero pobre	Acuitardo	Practicamente impermeable

FUENTE: Custodio y Llamas (2001)

Por otro lado, Villanueva e Iglesias (1984) dan una calificación estimativa según su magnitud que se muestra en la Tabla 2. La transmisividad, también ha sido objeto de experimentación, obteniendo una calificación que se presenta en la Tabla 3, donde, además, se muestra el caudal potencial de explotación de un pozo ubicado en dicho acuífero.

Tabla 2: Calificación estimativa de la permeabilidad

K(m/día)	Calificación estimativa
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$100 < K$	Muy alta

FUENTE: Villanueva e Iglesias (1984)

Tabla 3: Calificación de permeabilidad y posibilidades del acuífero

T(m ² /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m. de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m. de depresión teórica
100 < T < 500	Media	Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m. de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m. de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m. de depresión teórica

FUENTE: Villanueva e Iglesias (1984)

2.2.1. Flujo subterráneo

El agua subterránea se manifiesta de diferentes formas dentro de los vacíos de rocas o la masa del suelo, entre ellas el agua higroscópica, agua de película, agua capilar, agua gravitacional, entre otros (Tang et al., 2017). Excepto el agua higroscópica, los otros tipos de agua están involucrados en las actividades de la zona no saturada y la zona saturada del suelo.

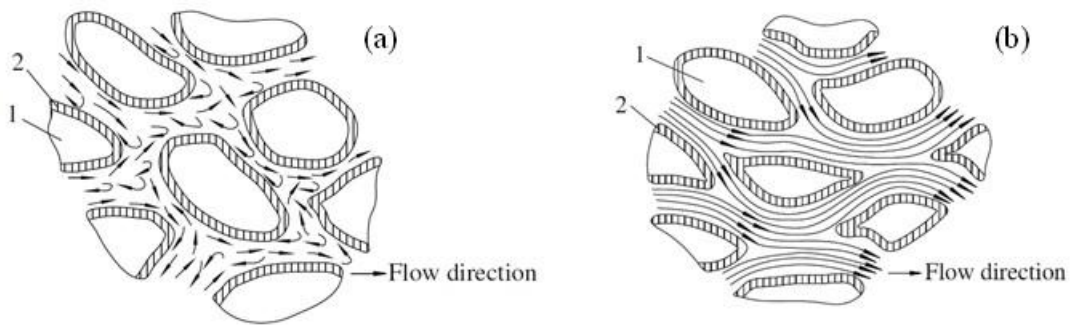
El suelo posee una variedad de tamaños, formas, e interconectividad de espacios vacíos (poros), formando canales de corrientes complejos y tortuosos a través del cual circulan flujos de agua. La dirección del flujo y la velocidad del agua subterránea son diferentes, siendo el flujo más rápido en el centro del poro, mientras que en los lugares que se encuentran en contacto con las partículas, se mueve más lentamente.

De acuerdo con la observación y la verificación experimental, el flujo del agua subterránea puede ser laminar y turbulento (Tang et al., 2017).

Cuando el agua subterránea se mueve de forma continua, con líneas de flujo paralelas, el flujo es laminar; pero si el agua subterránea se mueve de forma discontinua con aceleraciones, desaceleraciones y cambios de dirección sin fin, el flujo es turbulento, tal como se muestra en la Figura 2.

Los resultados de experimentaciones indican que el flujo laminar siempre ocurre cuando la velocidad del flujo es mucho menor, existiendo un valor crítico para distinguir entre flujo laminar y turbulento. Cuando la velocidad de flujo excede este valor, el estado de flujo cambia de laminar a turbulento. El agua subterránea, generalmente, se mueve muy lentamente dentro del medio poroso, por lo tanto, en su mayoría, el movimiento de agua subterránea se puede considerar como flujo laminar. El flujo turbulento se puede encontrar en rocas como el basalto y la piedra caliza que contienen grandes aberturas subterráneas o grandes cavernas kársticas.

Figura 2: Movimientos del agua en el subsuelo



Nota. : (a) flujo turbulento, (b) flujo laminar

FUENTE: Tang et al. (2017)

2.2.2. Homogeneidad e isotropía

La anisotropía se refiere a los vectores de velocidad del agua subterránea. Si la velocidad del agua subterránea es la misma en todas las direcciones espaciales, el medio poroso es isotrópico. Si la velocidad varía en diferentes direcciones, el medio poroso es anisotrópico. De la ley de Darcy se deduce que, si la velocidad del agua subterránea es anisotrópica, la conductividad hidráulica también lo será (Kresic, 2007).

Un medio se define como homogéneo cuando sus propiedades son constantes en cualquier lugar del mismo; si esas propiedades varían de un lugar a otro el medio es heterogéneo (Custodio y Llamas, 2001).

Un enfoque práctico es suponer que, aunque los acuíferos son heterogéneos y anisotrópicos por defecto, se pueden aproximar por algunas características promedio, con una precisión razonable. Este enfoque es en muchos casos el único factible, dadas las limitaciones de los fondos disponibles y el tiempo de las investigaciones.

2.2.3. Prueba de bombeo

Una prueba de bombeo es un procedimiento controlado para estimar los parámetros hidráulicos del acuífero. En un pozo que es bombeado a caudal constante, se observa la variación del abatimiento con respecto al tiempo, también en otros pozos de observación (Bear, 1979).

En la medida el caudal del pozo se mantenga constante, el cono de abatimiento se expandirá (Price, 2008). Es importante la medición de la influencia del cono de abatimiento para determinar las posibles interferencias que puedan acontecer entre pozos de explotación, y así, ubicar nuevos pozos en zonas donde no exista una interferencia significativa.

Theis (1935) presentó una ecuación que relaciona el abatimiento de la superficie piezométrica, a cualquier distancia del pozo de bombeo, con el espesor, la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento del acuífero, además del caudal y tiempo de bombeo. Dicha relación fue determinada para acuíferos confinados.

El uso de la ecuación de Theis no es completamente aplicable en los acuíferos libres debido a un retraso en la liberación de agua del almacenamiento causado por el lento drenaje por gravedad de los medios porosos dentro del cono de depresión y por encima de la superficie de la carga hidráulica, especialmente al comienzo del bombeo (Kresic, 2007), no obstante, puede ser aplicada en acuíferos libres en caso que, durante la ejecución de una prueba de bombeo, el abatimiento en los pozos de observación no superen el 25 % del espesor saturado, en ese caso podría aplicarse la ecuación de Jacob que otorgan ciertos ajustes.

La ecuación (1) expresa la derivada de Jacob para correcciones de valores de abatimientos, donde s' es la reducción corregida, s es la reducción medida en un pozo de monitoreo, y h , el espesor saturado del acuífero no confinado antes del inicio del bombeo.

$$s' = s - \frac{s^2}{2h} \quad (1)$$

La metodología elaborada utilizando los estudios de Theis-Jacob es, por excelencia, el método de interpretación de pruebas de bombeo para acuíferos libres con mayor uso.

2.3. Inventario de fuentes de agua subterránea

Se denomina inventario de fuentes de agua al conjunto de todos los datos e información de cualquier tipo, que se disponga en un área dada. Generalmente, los datos de mayor

importancia recogidos en una campaña de inventario son los de nivel piezométrico, cota del terreno, caudal, régimen de explotación y calidad de agua (Castany, 1975).

El inventario es uno de los métodos de prospección extensivo de mayor empleo, constituyendo, en muchos casos, la base de toda campaña de investigación debido a la cantidad de información, específicamente, hidrogeológica que puede proporcionar (Comision Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea [CDCIHS], 2009). Dicha información goza de gran utilidad para determinar características de gran importancia para el estudio, por ejemplo; los niveles piezométricos, que permiten analizar gradientes hidráulicos; la distribución territorial de pozos, manantiales o sumideros, que determinan las zonas de mejor capacidad hidráulica, o de convergencia de líneas de flujo; entre otros.

2.4. Prospección geofísica aplicada a la hidrogeología

Para un entendimiento integral del funcionamiento del acuífero, es necesario el conocimiento de las diversas litologías que se encuentran formando el subsuelo, las cuales dotan de características hidrogeológicas particulares al acuífero. Castany (1975) manifiesta que los métodos de prospección eléctrica, basados en la resistividad, son los apropiados para determinar la naturaleza, morfología y profundidad del substrato, así como la litología de las capas acuíferas.

Los valores de resistividad característicos de cada tipo de material dependen de diversos factores, tales como; composición, porosidad, tipo de fluido, figuración, metamorfismo, entre otros (CDCIHS, 2009), por lo que es de gran dificultad caracterizar cierto material del suelo o roca con un valor de resistividad específico. Para realizar esta labor se utiliza información geológica de la zona de estudio, que acompaña a la prospección geofísica, que reduce el margen interpretativo para la identificación de los materiales (CDCIHS, 2009).

2.5. Balance hídrico de acuíferos

La valoración precisa de la recarga es de vital importancia para evaluar la disponibilidad de recursos hídricos y la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación (Scalon et al. 2002). En las zonas áridas y semiáridas, donde por lo general la recarga es puntual, su estimación resulta, particularmente, compleja e incierta, y se dificulta su estimación con la existencia de cultivos agrícolas (IAH, 2011).

Existen diversos factores y procesos que inciden en la recarga de un acuífero, entre ellos se pueden distinguir los procesos atmosféricos (evaporación y precipitación), vegetativos (profundidad de raíces, transpiración, intercepción), edáficos e hidráulicos en la zona no saturada (capacidad de infiltración). También, existen variadas metodologías para estimar el volumen de recarga en un tiempo determinado, generalmente agrupados en tres; los basados en la zona superficial del suelo, en la zona saturada del subsuelo y en la zona no saturada del subsuelo.

2.5.1. Balance de zona

Un balance de agua es un recuento del movimiento del agua dentro y fuera de algún volumen de control. El concepto universal de conservación de masa del agua implica que los métodos de balance de agua son aplicables en cualquier escala de espacio y tiempo. Las ecuaciones, generalmente, no están sujetas a suposiciones sobre los mecanismos por los cuales el agua se mueve dentro, a través y fuera del volumen de control de interés (Healy, 2010), por lo tanto, los métodos de balance de agua se pueden usar para estimar la recarga difusa y enfocada, y no se ven afectadas por fenómenos tales como las rutas de flujo preferenciales dentro de la zona no saturada.

El análisis inicial de un balance de agua puede proporcionar información sobre la idoneidad de cualquier técnica de estimación de recarga. El refinamiento del balance de agua y el modelo conceptual del sistema a lo largo de la duración de un estudio pueden guiar aún más el cumplimiento de los objetivos de estudio (Healy, 2010).

Las entradas y salidas de agua pueden ser descritas mediante un balance hidrológico. Si las salidas no son iguales a las entradas, entonces existe un cambio en el almacenamiento. Este balance se representa por la ecuación 2 (Freeze y Cherry, 1979; Tinajero, 1982)

$$ds/dt = I - Q \quad (2)$$

Donde:

ds/dt = cambio en el almacenamiento de agua por unidad de tiempo; I, las entradas de agua al sistema; y, Q, salidas de agua del sistema

Si la ecuación 2 se desarrolla en sus componentes, se obtendrían las ecuaciones 3 y 4 (Karamouz et al., 2011, Mohammadi et al., 2014, Custodio y Llamas, 2001)

$$I = R_{pr} + R_{cn} + R_{ir} + R_{ta} + Q_{se} + Q_i \quad (3)$$

$$Q = ET_o + Q_{ex} + Q_{ss} + Q_o \quad (4)$$

Donde: R_{pr} , R_{cn} , R_{ir} , R_{ta} , y Q_{se} se consideran recarga procedente de la precipitación, infiltración de canales, del riego agrícola, de tanques o reservorios, del caudal superficial entrante, respectivamente; ET_o , Q_{ex} y Q_{ss} , el agua que deja de ingresar al acuífero debido a la evapotranspiración del agua subterránea, a la extracción de agua subterránea (bombeo) y al caudal superficial saliente, respectivamente; y, Q_i y Q_o , son los caudales subterráneo entrantes y salientes, respectivamente.

La ecuación del balance de agua puede personalizarse fácilmente agregando o eliminando términos para representar con precisión las peculiaridades de cualquier sistema hidrológico (Healy, 2010). Es por ello que un refinamiento del balance hídrico basado en una descripción de mayor precisión del sistema hidrológico, puede determinar parámetros detallados de la ecuación de balance hídrico.

Tal como afirma Samper (1997), la mayor parte de los métodos de balance determinan la recarga a partir de los componentes, ya que este tipo de balance se puede hacer en la zona superficial, en la zona no saturada, o en la zona saturada del suelo, por lo que es de libre elección el seleccionar el lugar considerando la disponibilidad y fiabilidad de los datos, fiabilidad de los datos, entre otros factores, para determinar la metodología de mayor precisión para el cumplimiento de los objetivos de estudio.

2.5.2. Métodos basados en la zona no-saturada

Los métodos permiten estimar las tasas de drenaje por debajo de la profundidad de medición dentro de la zona no saturada. La suposición habitual es que el drenaje del agua, eventualmente, alcanzará la napa freática, en aquel momento es que se le puede llamar apropiadamente recarga; sin embargo, puede haber un largo tiempo de retraso por el cual el agua atraviesa ese intervalo de profundidad.

En general, estos métodos producen estimaciones puntuales, por lo tanto, el principal problema es considerar qué tan representativa es la medición en un punto único del flujo a través de la zona no saturada (Healy, 2010), por lo que al extrapolar dichos datos a un área de recarga de acuífero muy amplia, la principal dificultad radica en la variabilidad en el suelo y sus características vegetativas (Kresic, 2007).

Estos métodos pueden ser costosos de implementar y requieren una instrumentación intensiva que es sospechosa de medir imprecisiones. No obstante, bajo ciertas circunstancias, como el movimiento rápido de un frente de humedecimiento desde la superficie de la tierra hasta la napa freática poco profunda, estos métodos tienen una óptima capacidad para proporcionar información detallada sobre los procesos de recarga y los factores que la influyen.

El método se puede dividir en dos clases: balance de agua, con la utilización de lisímetros, y los métodos basados en la ecuación de Darcy, donde son necesarios las características hidráulicas del suelo (Healy, 2010). Los datos recopilados de los lisímetros a menudo se usan para calibrar ecuaciones empíricas o modelos numéricos para determinar otros elementos del balance de agua, como la evapotranspiración (Kresic, 2007).

2.5.3. Métodos basados en la zona saturada

Entre las técnicas más utilizadas para estimar la recarga se encuentran las basadas en la medición de los niveles de agua subterránea a lo largo del tiempo y el espacio. La abundancia de datos de nivel de agua subterránea disponibles y la simplicidad de estos métodos facilitan su aplicación directa (Healy, 2010).

El método de fluctuación de la napa freática utiliza los cambios en los niveles de agua subterránea a lo largo del tiempo para estimar la recarga de acuíferos no confinados. Otros métodos, se basan en la ecuación de Darcy e incluyen un enfoque desarrollado por Theis (1937), el método de Hantush (1956) para estimar el flujo de interfaz y la aplicación de redes de flujo. También, existen enfoques basados en análisis de series temporales de niveles de agua subterránea medidos.

2.5.4. Trazadores químicos

Los trazadores tienen una amplia variedad de usos en estudios hidrológicos; proporcionar estimaciones cuantitativas o cualitativas de recarga, identificar fuentes de recarga, proporcionar información sobre velocidades y tiempos de viaje del movimiento del agua, evaluar la importancia de rutas de flujo preferenciales, proporcionar información sobre dispersión hidrodinámica y proporcionar datos para la calibración del flujo de agua y modelos de transporte de solutos (Walker, 1998; Cook y Herczeg, 2000; Scalon et al. 2002). Los trazadores, generalmente, son iones, isótopos o gases que se mueven con el agua y que se pueden detectar en la atmósfera, las aguas superficiales y en el subsuelo.

Los métodos de cálculo de infiltración que emplean trazadores ambientales se basan en (i) el principio de conservación de masa utilizando trazadores radiactivos u otros indicadores medioambientales introducidos naturalmente; y, (ii) el uso de trazadores radiactivos u otros trazadores introducidos intencionadamente para calcular el índice de movimiento de humedad del suelo (Kresic, 2007). Los trazadores ambientales naturales adecuados son aquellos que no son productos de la pedogénesis, no reaccionan químicamente en el sistema del suelo, no se eliminan sustancialmente por exfiltración y son altamente solubles (Bedinger, 1987).

Siguiendo la nomenclatura de Scalon et al. (2002) los trazadores se agrupan en tres categorías: (1) ambientales naturales, (2) históricos y (3) aplicados. Los trazadores ambientales naturales son aquellos que son transportados o creados dentro de la atmósfera en procesos naturales; estos, se llevan a la superficie de la tierra como deposición atmosférica húmeda o seca. El marcador ambiental natural más comúnmente utilizado es el cloruro (Cl) (Allison y Hughes, 1978). El agua del océano, a través del proceso de evaporación, es la principal fuente de Cl atmosférico. Otros trazadores en esta categoría incluyen cloro-36 (^{36}Cl) y tritio (^3H); dos isótopos se producen naturalmente en la atmósfera; sin embargo, hay fuentes antropogénicas adicionales.

El balance de masa de un trazador ambiental natural en el agua intersticial de la zona no saturada del suelo se puede usar para medir la infiltración donde la única fuente del rastreador es la precipitación atmosférica y donde se sabe, o es insignificante, la escorrentía. La relación para un balance de masa en estado estacionario, según Bedinger

(1987), es:

$$R_q = (P - R_s) \times \left(\frac{C_p}{C_z} \right) \quad (5)$$

Donde: R_q , representa la infiltración y se encuentra en función de P , R_s , C_p , C_z , que representan la precipitación, escorrentía superficial, concentración del trazador en la precipitación y concentración del trazador en la humedad del suelo, respectivamente.

De forma similar al agua intersticial de la zona no saturada, los trazadores ambientales disueltos en agua pueden usarse para medir la infiltración determinando su concentración a diferentes profundidades dentro de la zona saturada y calculando los tiempos de residencia o edad del agua. Sin embargo, se debe tener precaución al interpretar los resultados de dicho análisis porque el movimiento del agua subterránea en la zona saturada es generalmente más rápido, incluida la mezcla con el flujo de agua que llega a la ubicación de la muestra lateral o verticalmente.

2.6. Modelo conceptual

Un modelo conceptual es una simplificación de una situación real que se conoce solo puntualmente a través de un número limitado de datos, y se direccionará de acuerdo a los objetivos y necesidades de simulación del estudio a realizar (Custodio y Llamas, 2001). En consecuencia, a mayor cantidad de datos, el modelo representará con mayor precisión una situación real.

Para establecer el modelo conceptual, a menudo se realizan investigaciones, incluido el análisis de los datos disponibles, el trabajo de campo y de laboratorio, etc. Dichas investigaciones deben proporcionar respuestas a preguntas relacionadas con el dominio, los modos de transporte de agua, fuentes de agua, entre otros. Sin embargo, en ocasiones se deben introducir suposiciones que serán sujetas a una validación a posteriori. (Bear y Cheng, 2009).

Los aspectos mínimos que necesitan abordarse en el desarrollo del modelo conceptual son (Reilly y Harbaugh, 2004):

- i. Recopilación de estudios e información básica.** Información relacionada con formaciones geológicas, dirección del flujo, fronteras hidrológicas, parámetros hidráulicos, extracción o inyección de pozos, cargas observadas, etc. Estudios hidrológicos, geológicos-hidrogeológicos e hidroquímicos.
- ii. Descripción general del sistema de aguas subterráneas.** Con base en los estudios y la información básica, describir el sistema acuífero bajo estudio y la naturaleza de las fronteras.
- iii. Conceptualización del flujo de agua subterránea.** Con información piezométrica, evaluar la configuración y sentido del flujo de agua subterránea en la zona de estudio. Esa parte permite entender el comportamiento dinámico del acuífero en espacio y tiempo, establecer gradientes. Poner énfasis en la cota del terreno para los pozos, los mismos que deben ser congruentes con los niveles piezométricos.
- iv. Descripción del tipo de acuíferos.** En esta parte, debe describirse y evaluarse qué tipos de acuíferos (su geometría, interconexión, geología, geomorfología) fueron considerados para el modelo numérico, y si estos están bien conceptualizados, acorde a la zona bajo investigación.
- v. Componentes y balance hídrico preliminar.** Describir y evaluar los mecanismos de recarga y descarga y/o extracciones, tales como la evapotranspiración, descarga de aguas subterráneas y flujo base, interacción del agua superficial y subterránea, usos de agua, etc., y su variación en el tiempo. Todos los valores estimados deben tener un sustento técnico con metodologías aplicadas acordes a la realidad de cada sistema en estudio. Una vez estimados los componentes de agua, deberá desarrollarse un balance hídrico preliminar que muestre la dinámica de entradas y salidas del sistema acuífero.
- vi. Propiedades hidráulicas.** En esta parte, se debe describir y evaluar las propiedades de transmisión y almacenamiento del acuífero (conductividad hidráulica y porosidad efectiva). Para cada zona o grupo, debe analizarse la pertinencia de los valores asumidos acordes al marco hidrogeológico (litología y geología). Para cada unidad hidrogeológica, establecer un rango de valores, basados en pruebas de bombeo desarrolladas en literatura existente.
- vii. Visualización en 3D, figuras y cortes.** La visualización en 3D del modelo conceptual es importante para evaluar las simplificaciones, condiciones de borde, sentido del flujo, variación espacial de los parámetros, etc. Mostrar en planos la zonificación de la conductividad hidráulica para cada unidad hidrogeológica; según la magnitud del dominio computacional, debe incluirse secciones y cortes del sistema acuífero.

Kresic y Rumbaugh (2000) aseguran que la forma más eficiente de organizar toda la información requerida para el desarrollo del modelo es utilizar un entorno de sistema de información geográfica (SIG). Actualmente, existen herramientas de muy fácil manejo, como parte de un software SIG, que permiten crear visualizaciones en tres dimensiones de todo el entorno acuífero, facilitando el entendimiento del modelo conceptual.

Para Kresic (2007), el modelo conceptual debe responder, fundamentalmente, a las siguientes preguntas:

- ¿De dónde viene el agua en el acuífero, aproximadamente cuánto de ella, y cómo cambia esto en el tiempo?
- ¿En qué direcciones está fluyendo el agua en el acuífero, aproximadamente una cuantificación?, y ¿cómo cambia esto en el tiempo?
- ¿Dónde está el agua que sale del acuífero, aproximadamente cuánto de ella, y cómo cambia esto en el tiempo?

2.7. Modelamiento numérico

Desde hace mucho tiempo han existido esforzados intentos por reproducir el funcionamiento de las aguas subterráneas en su medio con el uso de diversos tipos de modelos con diferente principio de funcionamiento. Todd (1980) los clasificó como: (a) modelos de los medios porosos; a los construidos en tanque de arena y modelos transparentes; (b) analógicos; a los de fluido viscoso, de membrana, térmicos y de papel secante; (c) analógicos eléctricos, a los sólidos conductivos, resistencia-capacitancia-redes y redes de resistencia; y (d) de computadora digital; a los de diferencias finitas, de elementos finitos, e híbridos de computadora.

Prickett (1975) proporcionó una lista detallada de referencias sobre los diversos modelos que existían durante ese tiempo, enumerando las aplicaciones de varios tipos de modelos de aguas subterráneas, incluidas las características del acuífero, el propósito de los modelos y sus bocetos esquemáticos.

Un modelo numérico es una simplificación de un sistema real y de los procesos que ocurren en él, usado generalmente para simular una respuesta ante cierto estímulo (Bear,

1979). Su funcionamiento se realiza a través de ecuaciones gobernantes que se piensa que representan los procesos físicos que ocurren en el sistema, junto con ecuaciones que describe el comportamiento del flujo subterráneo a lo largo de los límites del modelo (Anderson y Woessner, 1992). Una vez que se ha obtenido un modelo matemático para un caso dado, su solución, analítica o numéricamente, puede proporcionar información sobre el futuro comportamiento de los fluidos y contaminantes dentro de los dominios considerados (Bear y Cheng, 2009).

Un modelo numérico se encuentra fundamentado en la física; con la ley de Darcy y la ley de conservación de la masa, que son los principios para definir las ecuaciones del proceso dinámico del flujo de agua subterránea, expresadas generalmente en forma de ecuaciones diferenciales parciales (EDP). Las EDP han sido utilizadas, con gran éxito, en el desarrollo de diversos tipos de sistemas subterráneos sometidos a distintas formas de esfuerzos (Bear y Cheng, 2009; Diersch, 2014), demostrando que puede ser usada con gran fiabilidad.

El método de diferencias finitas (MDF) se relaciona, específicamente, con el código de modelado de flujo de aguas subterráneas ampliamente utilizado en MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1984).

Batu (2006), resume la ecuación del comportamiento de flujo para un acuífero heterogéneo y anisotrópico (ecuación 6), así como su desarrollo por diferencias finitas.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(x, y, z) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(x, y, z) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(x, y, z) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

De la ecuación 6 se puede derivar la ecuación 7.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (7)$$

Donde x , y , y z (unidades de L) son los principales ejes del sistema de coordenadas. En otras palabras, se supone que están alineados a lo largo de las principales conductividades hidráulicas K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} (L/T), respectivamente. El resto de seis componentes (K_{xy} , K_{xz} , K_{yx} , K_{yz} , K_{zx} y K_{zy}) en el tensor de conductividad hidráulica se vuelven igual a cero. En la ecuación (9), h es la carga hidráulica (L), W (1/T) representa el flujo volumétrico por

unidad de tiempo y materializa fuentes o sumideros de agua, S_s (1/L); el almacenamiento específico, y t (T), el tiempo. En general, S_s , K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} pueden ser funciones del espacio y se escriben como la ecuación 8.

$$S_s = S_s(x, y, z), \quad K_{xx} = K_x(x, y, z), \quad K_{yy} = K_y(x, y, z), \quad K_{zz} = K_z(x, y, z) \quad (8)$$

También, h y W pueden ser funciones del espacio y tiempo, escritos como la ecuación 9.

$$h = h(x, y, z, t), \quad W = W(x, y, z, t) \quad (9)$$

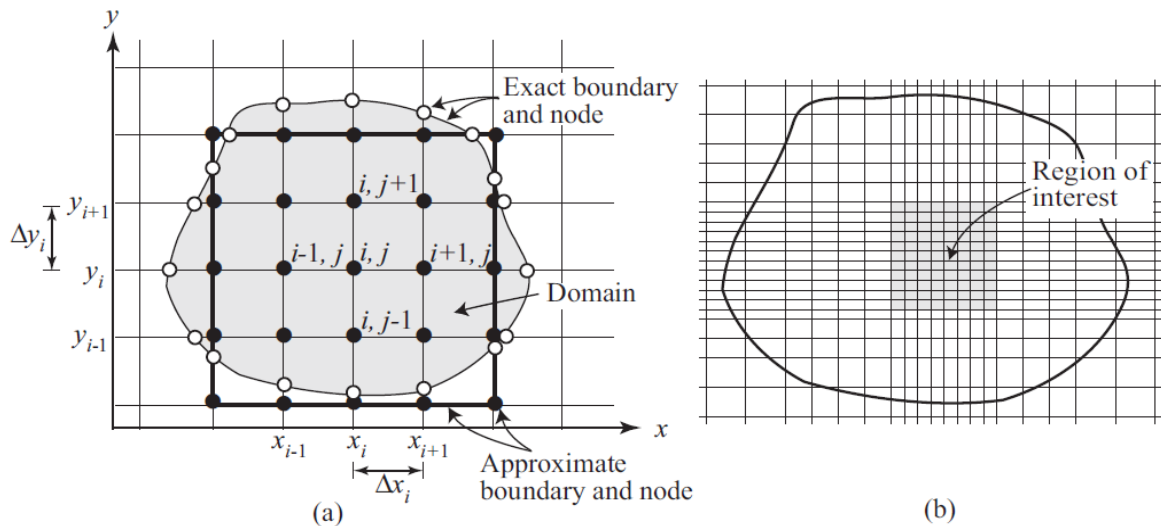
Una solución de la ecuación 7 para el problema del flujo del agua subterránea con sus correspondientes condiciones iniciales y de contorno, es una expresión algebraica para h (x, y, z, t) en sentido analítico, es decir, cuando las derivadas de h (x, y, z, t) con respecto al espacio (x, y, z) y el tiempo t se sustituyen en la ecuación 7, se cumple la ecuación diferencial, sus condiciones iniciales y de contorno, para finalmente, formar un modelo matemático. Una distribución de la carga hidráulica variable en el espacio y tiempo de esta naturaleza caracteriza el sistema de flujo de agua subterránea en el que mide tanto la energía del flujo como el volumen de agua almacenada y puede usarse para determinar direcciones y velocidades de movimiento.

Las diferencias finitas es uno de los métodos numéricos potenciales que se usan para resolver la ecuación 7 y es popular para aplicaciones de modelado de aguas subterráneas. En el enfoque de diferencias finitas, la ecuación. 7 se reemplaza por un conjunto finito de puntos discretos en espacio y tiempo, y las derivadas parciales se reemplazan por diferencias entre los valores funcionales en estos puntos. Este proceso conduce a sistemas de ecuaciones diferenciales algebraicas lineales simultáneas y su solución arroja valores de h (x, y, z, t). Estos, forman una aproximación a la distribución de la cabeza variable en el espacio y en el tiempo que se da por una solución analítica de la misma ecuación diferencial parcial, es decir, la ecuación 7.

Según Bear y Cheng (2009) el primer paso en una implementación típica del método de diferencias finitas (MDF) es dibujar una cuadrícula ortogonal a través del dominio modelado. La Figura 4 muestra una cuadrícula para un dominio planar bidimensional. La cuadrícula se obtiene al dividir los ejes en segmentos y dibujar líneas paralelas a los ejes,

donde segmentos en los ejes pueden ser iguales (cuadrícula uniforme) o diferentes (cuadrícula variable). En general, las líneas se acercan más en áreas donde se busca obtener información más detallada sobre el comportamiento de la variable de estado. La Figura 3 muestra dicha cuadrícula variable.

Figura 3: Una cuadrícula para el MDF centrado en la cuadrícula



Nota. (a) separación igual, (b) separación variable

FUENTE: Bear y Cheng (2009)

Al reemplazar las derivadas que aparecen en el EPD por expresiones aproximadas escritas en términos de valores variables en los puntos de la grilla, que se muestran como puntos en la Figura 4, muestran las correspondientes ecuaciones de diferencias finitas del problema. Anderson y Woessner (1992) consideran dos puntos posteriores a los resultados de un modelamiento: (i) el análisis posterior a la auditoría en el futuro con nuevos datos de campo; y, (ii) rediseño del modelo utilizando información del análisis posterior a la auditoría. Este enfoque expone que el modelamiento es un trabajo que no debe ser considerado como un producto final, sino uno que puede mejorarse con la disposición de nuevos datos de campo, y nuevos métodos de solución.

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

El desarrollo del presente Trabajo de Suficiencia Profesional (TSP) se basó en los diversos estudios, de carácter hidrogeológico, realizados por la denominada Empresa de Ingeniería y Desarrollo SAC (EINDESA), en servicios de consultoría efectuados, generalmente, para la empresa AIPSAA; y de instituciones gubernamentales que se encargan de la gestión de las aguas subterráneas a nivel nacional. Durante la estancia en la empresa se generaron diferentes problemáticas en el desarrollo de los estudios, tales, durante la ejecución de pruebas de bombeo, de sondeos eléctricos verticales (SEV), del monitoreo de niveles freáticos, de la toma de muestras de agua para su análisis en laboratorio, entre otros; así como para el procesamiento e interpretación de la información, y elaboración de los informes correspondientes. Dichas problemáticas fueron óptimamente afrontadas para la óptima culminación de los trabajos de campo y oficina que constituyen el beneficio obtenido por el centro laboral, concluyendo de manera óptima las actividades de consultorías y actividades encomendadas.

Las habilidades durante la formación profesional fueron adquiridas en la especialidad de los Recursos Hídricos, principalmente, en Hidrogeología, compuesto de los diferentes componentes que conforman una investigación en dicha disciplina, tales como la Hidráulica Subterránea, Prospección Geofísica Eléctrica, Hidrología Subterránea, Hidrogeoquímica, entre otros; donde se ejecutaron los trabajos de campo mencionados en el párrafo anterior, así como la elaboración de los informes, culminando con los modelamientos de tipo conceptual y numérico; estos últimos, configuran el aporte que se elaboró en el presentes TSP, donde se integraron todas las investigaciones realizadas en los diversos sectores que conforman el ámbito de estudio, que permitieron elaborar los modelamientos. Asimismo, se ejecutó un trabajo de campo consistente en el monitoreo mensual de los niveles freáticos y la ejecución de una prueba de bombeo para determinar los parámetros hidráulicos del acuífero. El modelo numérico efectuado fue utilizado para la

determinación del caudal óptimo de explotación en el ámbito de evaluación, así como para la determinación de las reservas de agua subterránea potencial y racionalmente, explotables.

3.1. Materiales, equipos y *software*

3.1.1. Materiales

Se utilizaron los planos de ubicación de los distintos predios de la zona de estudio, los planos hidráulicos, de ubicación de pozos, reservorios, entre otros. Asimismo, registros de caudales de explotación, caudales destinados para el riego, monitoreos anteriores de la napa freática, entre otros. También, fichas diseñadas para la toma de datos de los niveles freáticos, y libreta de apuntes de datos u observaciones.

3.1.2. Equipos

Se utilizó una sonda eléctrica de 120 m para el monitoreo de los niveles freáticos en distintos meses del año. También un GPS navegador para la ubicación de los pozos y puntos de interés, cámara fotográfica, y camioneta *Toyota Hilux* brindado por la empresa AIPSAA; y, una laptop *Toshiba Qosmio* con procesador *Intel Core i7* y un *RAM* de 8 Gigabytes.

3.1.3. Programas de cómputo

Los *softwares* utilizados fueron:

- Qgis 2.16.3 y sus complementos.
- AutoCAD Civil 3D 2017
- Cropwat 8.0
- Surfer 13
- Aquachem 2014.2
- AquiferTest 2016.1
- Microsoft Office 2010
- Global Mapper 16

3.2. Ubicación y características de la zona de estudio

3.2.1. Ubicación

Políticamente, el ámbito de estudio se localiza en el distrito de Paramonga, provincia de Barranca, región Lima, entre los sectores Tunán y Manzuelo; hidrográficamente, en la cuenca Fortaleza, al norte de la cuenca Pativilca; y, geográficamente, en la costa central, al oeste de la divisoria continental de aguas, a una altitud que va desde 0 a 100 msnm., entre las coordenadas del Sistema Transversal Mercator (UTM): Este: 186913 m y 200980 m; Norte: 8816320 m y 8831124 m. Ver el Mapa 1 del Anexo 2.

3.2.2. Hidrografía de la cuenca

La cuenca Fortaleza está ubicada entre los paralelos 10° 18' 51'' de latitud sur y los meridianos 77° 36' 21'' de longitud oeste. Pertenece a la región Lima, siendo el límite con la región Ancash por el norte. El río Fortaleza nace de las lagunas altoandinas de Huamblac y Macato, a 4500.00 msnm, aproximadamente, donde sus aguas discurren por las quebradas Upapampa y Mayocancha, que confluyen formando el río Fortaleza.

En su recorrido hacia el océano pacífico, se identifican los siguientes afluentes a la margen derecha: río Marca, río Huayllapampa, Quebradas Rari, Patap, Corralillo; y, por la margen izquierda, río Purísima y las quebradas Carachacra, Huancapampa y Julquillas (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 1994). El área de la cuenca Fortaleza es igual a 2380.09 km².

El recurso hídrico depende, principalmente, de las precipitaciones estacionarias ocurrentes en las faldas occidentales de la Cordillera Negra. La cuenca no cuenta con glaciares de importancia, en consecuencia, el caudal del río es muy escaso en tiempos de estiaje.

3.2.3. Demografía del distrito de Paramonga

El distrito de Paramonga posee una población de 21453 (Tabla 4) personas según el XII Censo Nacional de Población realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) del 2017, valor muy inferior al obtenido tras el XI Censo Nacional de Población efectuado el 2007 por la misma institución, donde se obtuvo una población de

23608 personas, lo cual demuestra una reducción de la población, causada, principalmente, por el fenómeno sociológico de la emigración.

En el 2017, la mayor densidad de población está comprendida entre las edades de 0 a 15 años, representando el 22.21 %, a diferencia de la población mayor a 75 años, que constituyendo solo el 6,60 % del total, representando la menor densidad de población.

Tabla 4: Población por edades del distrito de Paramonga

Edad	Personas	Porcentaje	Porcentaje Acumulado
De 0 a 15 años	4764	22.21%	22.21%
De 15 a 29 años	4236	19.75%	41.96%
De 30 a 44 años	4267	19.90%	61.86%
De 45 a 59 años	3938	18.35%	80.21%
De 60 a 74 años	2833	13.21%	93.42%
De 75 años a más	1415	6.60%	100.00%
Total	21453	100.00%	100.00%

FUENTE: INEI (2017)

El distrito de Paramonga posee numerosos centros poblados, siendo la ciudad de Paramonga la que alberga la mayor cantidad de población. En nuestra zona de estudio identificamos numerosos centros poblados, entre los principales; Cerro Blanco, San Juan de Tunán, Huata, Sigual, Manzuelo, y Lampay.

3.2.4. Agricultura

Es la principal actividad económica en la cuenca que brinda el mayor aporte monetario a la población rural y urbana. Los cultivos de mayor frecuencia en la parte media y alta de la cuenca es la papa, cebada, trigo, maíz, chirimoya, lentejas, tomate, zapallo, palto, melón, yuca, camote, maíz morado, etc.

La topografía de esta parte de la cuenca es muy accidentada, por tal motivo, se utilizan instrumentos artesanales en las labores de campo. El cultivo de mayor importancia económica es la caña de azúcar, que se emplaza principalmente en la parte baja de la cuenca, y es utilizado en la agroindustria.

La empresa Agroindustrial Paramonga es la principal gestora de dicho cultivo, trabajando un área poco mayor a 5000 ha (AIPSAA, 2013), representando la mayor parte de las tierras cultivables, que además es compartido con los usuarios de los bloques de riego Naranjal y Paramonga. La topografía de esta parte de la cuenca es poco accidentada, por lo que se utiliza maquinaria agrícola para las labores de campo.

3.2.5. Vías de comunicación

La cuenca Fortaleza es recorrida de sur a norte por la carretera Panamericana Norte, en la cual, a la altura del kilómetro 205, nace la carretera hacia Huaraz, transitando la totalidad del distrito de Paramonga y la cuenca Fortaleza en dirección suroeste a noreste, con un desplazamiento paralelo al río Fortaleza, ubicándose a su margen izquierda.

Dicha carretera asfaltada posee buena conservación a la fecha, además, tiene una gran importancia socio económica en la cuenca, pues es la principal vía de comunicación con los centros poblados existentes, que comercializan sus productos agrícolas con el resto de la costa peruana, teniendo como principal destino la ciudad de Paramonga. En el Mapa 1 del Anexo 2 puede apreciarse su disposición espacial.

3.2.6. Uso del agua

La principal fuente de agua de la cuenca es el río Fortaleza, no obstante, por el régimen irregular que caracteriza a los ríos de la vertiente del Pacífico, existen dos periodos definidos, caracterizados por el déficit y superávit hídrico. Es por ello que, en el periodo de estiaje, se utiliza el agua subterránea mediante explotación de pozos para suplir la demanda generada por los cultivos de la zona.

3.2.7. Geomorfología

El área de estudio presenta una geomorfología predominante de planicie aluvial (Pl-al) con una ligera pendiente que disminuye en sentido noreste hacia suroeste. Está constituido por cantos rodados, limo, y arena gruesa, que en la capa superior forma tierra de cultivo.

Las colinas o lomadas en roca volcánico-sedimentaria (RCL-rvs) se presentan encajonando la parte aluvial en la parte más baja de la zona de estudio, con una altura máxima de 250

msnm. Asimismo, se extiende por la margen derecha del río fortaleza hasta el límite de nuestra zona de estudio. En la parte media de dicha extensión, se aprecian colinas en roca intrusiva (RCL-ri), por una elevación máxima de 300 msnm.

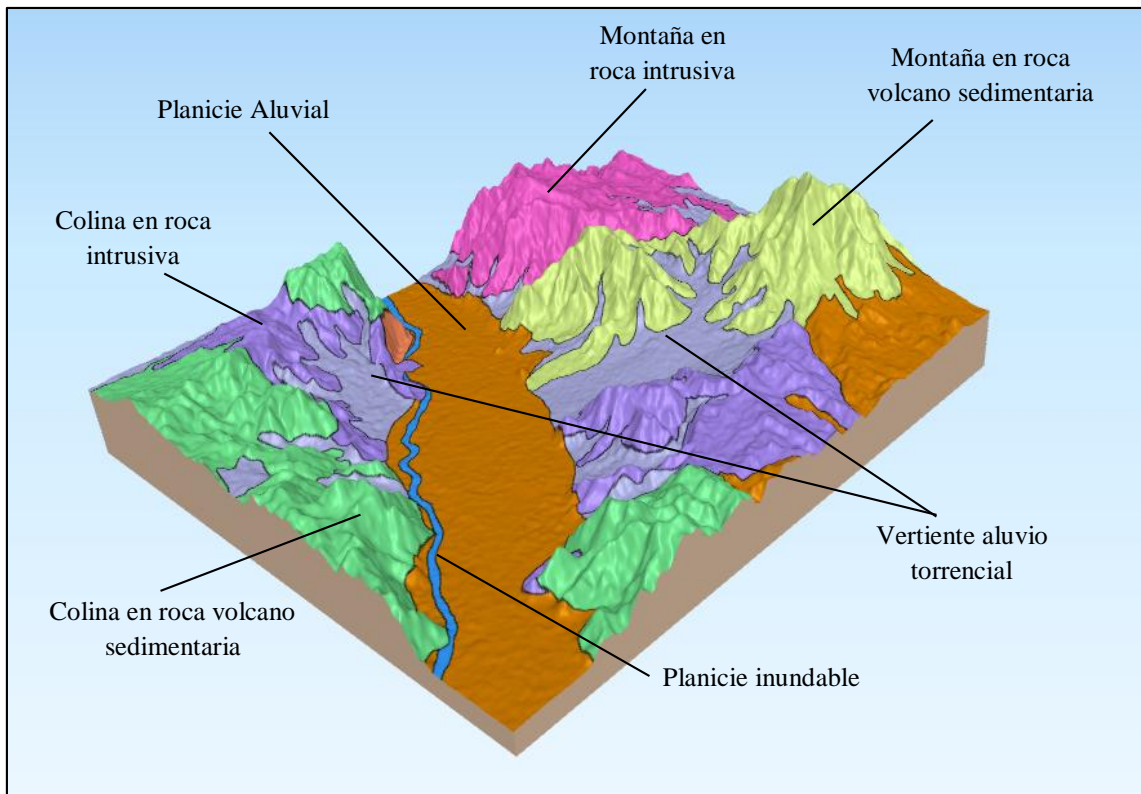
Existen varias zonas donde se evidencian vertientes aluviotorrenciales (P-at) de considerable área, que desemboca en la planicie aluvial, cumpliendo la función de afluente en tiempos de avenida.

Las colinas o lomadas en rocas volcanosedimentarias (RCL-rvs) se presentan encajonando la parte aluvial en la parte más baja de la zona de estudio, con una altura máxima de 250 msnm Asimismo, se extiende por la margen derecha del río Fortaleza hasta el límite de la zona de estudio. En la parte media de dicha extensión, se aprecian colinas en roca intrusiva (RCL-ri), por una elevación máxima de 300 msnm.

A la margen izquierda del río Fortaleza, y en la zonas de mayor elevación con un altitud máxima de 535 m.s.n.m., se identifican montañas en rocas volcanosedimentarias (RM-rvs), y montañas en roca intrusiva (RM-ri), que se extiende con predominancia a medida que recorremos la cuenca hacía las partes más altas. Esta clasificación geomorfológica está constituida de materiales impermeables, que ayudarán a determinar los límites impermeables del acuífero.

La Figura 4 plantea la ubicación de las subunidades geomorfológicas expuestas en los párrafos anteriores, donde podemos identificar su extensión, altitud e influencia en la zona de estudio. Asimismo, el Mapa 3 del Anexo 2 muestra con mayor aproximación las extensiones que abarca la geomorfología.

Figura 4: Geomorfología en la zona de estudio



FUENTE: Elaborado con base en la información brindada por el INGEMMET en la página <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>

3.2.8. Geología

En el ámbito del estudio, afloran rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las rocas presentes en el ámbito del estudio son las rocas ígneas intrusivas que se presentan mayormente de composición granitoide (granito, tonalita, etc) y forman parte del batolito andino que afloran en este sector. La edad de estas rocas se estima que comprenden desde el jurásico hasta el cuaternario reciente tal como se ha descrito en párrafos anteriores.

Los afloramientos rocosos están conformados por los siguientes grupos y formaciones geológicas siguientes:

a. Formación Casma (ki-c)

Dentro del área de estudio la formación está conformada por volcánicos bien estratificados intercalados con sedimentos que se encuentran en la faja costanera al oeste del batolito.

Los estratos de la formación Casma se pueden apreciar al oeste y alrededores de la ciudad de Paramonga, observándose pliegues en la mayor parte de los afloramientos. También aflora en los cerros Lampay, Chusin y el Porvenir.

b. Rocas Intrusivas

Son cuerpos sub volcánicos de intrusiones tempranas y cuerpos plutónicos, que constituyen el Batolito de la Costa.

Tonalita (KTi-t-pu): La mayor parte del afloramiento rocoso está conformado por tonalitas. En general estas rocas son leucocratas de grano medio con grandes cristales de hornablenda y hojuelas de biotitas.

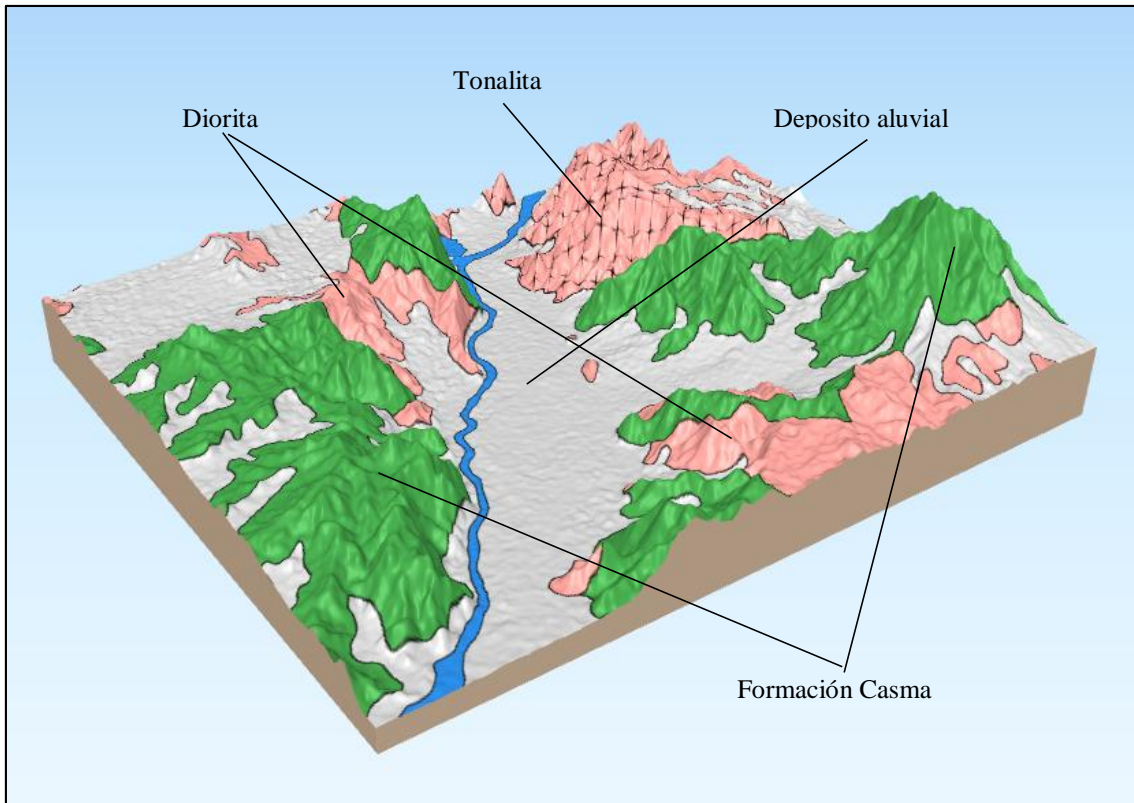
Diorita (KTi-di-pu): La diorita aflora en forma restringida en la zona del estudio, los cuales son cortados por los demás componentes del batolito. La diorita que aflora en el valle Fortaleza, tienen numerosos cristales de hornablenda prismática.

c. Depósitos Aluviales (Q-al)

Estos depósitos ocupan gran parte del área investigada y están constituidos por cantos, guijarros (variado tamaño y composición litológica), gravas, limos y arenas, formando horizontes de espesores variables y se presentan en forma alternada en sentido vertical. Los guijarros, generalmente, están englobados en una matriz compuesta de arena y limo.

La Figura 5 muestra una representación de la ubicación, extensión y altitud de las formaciones geológicas de la zona de estudio. El Mapa 2 del Anexo 2 expone, con mayor aproximación, las extensiones que abarcan las formaciones geológicas.

Figura 5: Geología en la zona de estudio



FUENTE: Elaborado en base a la información brindada por el INGEMMET en la página estatal

<https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>

3.3. Métodos

3.3.1. Inventario de fuentes de agua subterránea

El inventario se ejecutó teniendo en cuenta las recomendaciones de las fichas normalizadas por la ANA, por lo que fue necesario el uso de instrumentos adicionales para la recolección de los datos, tales como; sonda de nivel, winchas, entre otros. Se realizó en el área perteneciente a la empresa AIPSAA, que posee el 90 % de los campos en la zona de estudio, determinando los datos actualizados de los pozos, entre ellos; número IRHS, coordenadas UTM, tipo de pozo, profundidad actual, equipo de bombeo, estado del pozo, tipo de uso, caudal de explotación, régimen de explotación, volumen anual, entre otros.

No se tuvo acceso a los pozos de propiedad privada en las zonas urbanas, por lo que los datos de inventario se basan en el estudio realizado por el INRENA el 2005.

Cabe recalcar que los pozos de propiedad de AIPSAA son los que extraen la mayor cantidad de agua del acuífero Fortaleza, por lo que son los de gran importancia para la determinación de la demanda de agua de la zona en estudio. Dichos pozos son en su totalidad, tubulares, y poseen licencia de derecho de uso de agua otorgado por la ANA.

3.3.2. Prospección geofísica

El método ejecutado para la obtención de resistividades es el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) utilizando la configuración Schlumberger. Los suelos formados por depósitos aluviales, compuestos principalmente de material detrítico, forman acuíferos muy comunes en la costa peruana.

Sus propiedades físicas, como la resistividad eléctrica, dependen fundamentalmente de la distribución del tamaño de grano y la calidad del agua que la satura, por lo que la propiedad electrolítica del agua juega un papel importante (Patra et al. 2016).

Las resistividades elevadas se manifiestan por una porosidad baja, o si la roca se encuentra sobre el nivel freático. Si la resistividad es muy baja, el agua almacenada tendrá un elevado contenido de sales. (Custodio y Llamas, 2001). Obsérvese el Tabla 5 que expone las resistividades del agua en diferentes escenarios.

Tabla 5: Resistividades características de las aguas subterráneas

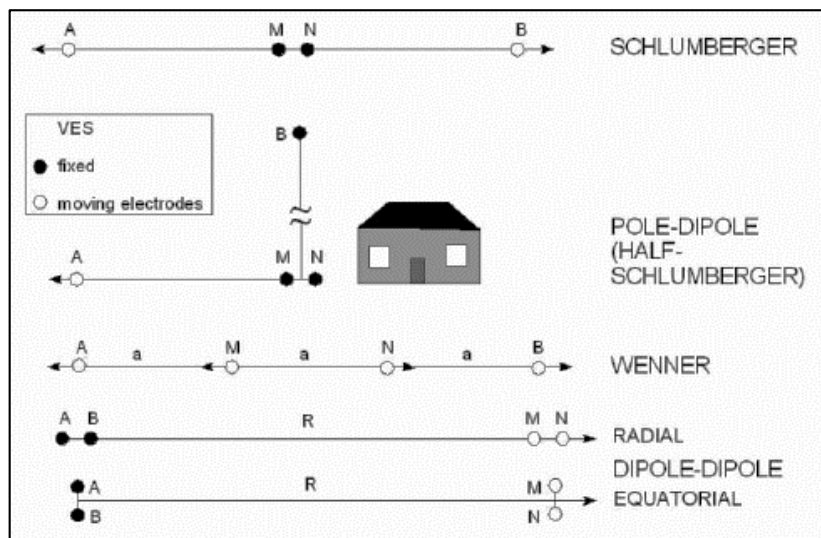
Tipo	Resistividad (Ω m)
Aguas de alta montaña	10^3 a 3×10^3
Aguas dulces superficiales	10 a 10^3
Aguas salobres superficiales	2 a 10
Aguas subterráneas	1 a 20
Aguas de lagos salados	0.1 a 1
Aguas marinas	~0.2
Agua de impregnación de rocas	0.03 a 10

FUENTE: CDCIHS (2009)

Comúnmente, la inyección de corriente se realiza por un equipo emisor, entre los de mayor versatilidad se encuentran los equipos geoelectrónicos, que permiten aplicar todo el espectro

de frecuencias a la resistividad y los sondeos (Kirsch, 2006). El equipo de campo se completa con ruedas de cable y electrodos para inyección de corriente y registro de voltaje. Debido a las ventajas prácticas y metódicas, los SEV utilizan la configuración simétrica de Schlumberger, donde los electrodos de voltaje M, N están estrechamente espaciados y fijados al centro del conjunto y los electrodos de corriente A, B se mueven hacia afuera (Kirsch, 2006). En la Figura 6 se puede apreciar las diferentes configuraciones electrónicas utilizadas en la ejecución de SEV.

Figura 6: Configuraciones para ejecución de un SEV

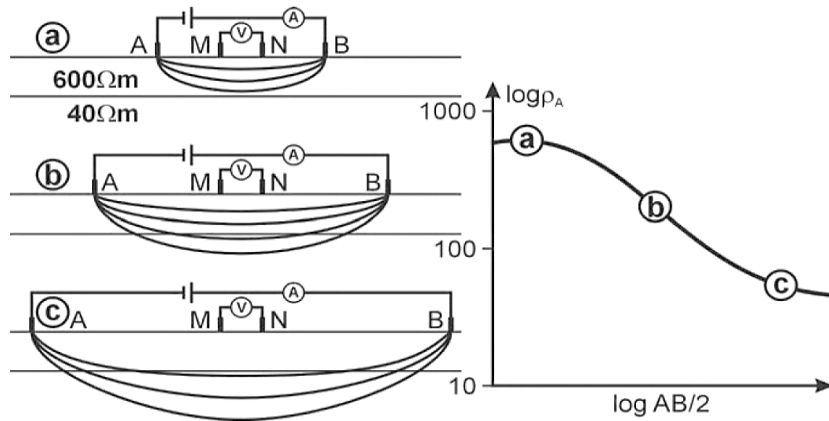


FUENTE: Kirsch (2006)

Las mediciones de resistividades aparentes con un mayor espacio de electrodos de corriente conducen a mayores profundidades de penetración de la corriente inyectada (Kirsch, 2006). Por lo que, para el conocimiento del suelo a profundidades crecientes, se deben aumentar gradualmente el espaciado entre “A” y “B” de los electrodos de inyección de corriente.

Las resistividades aparentes, medidas en campo, se trazan contra el espaciado actual de los electrodos en una escala logarítmica / logarítmica, y se interpolan en una curva continua, que es base para la inversión de datos para obtener la estructura de resistividad y profundidad del suelo (Kirsch, 2006). Obsérvese la Figura 7 para detalle.

Figura 7: Configuración de electrodos y profundidad del suelo

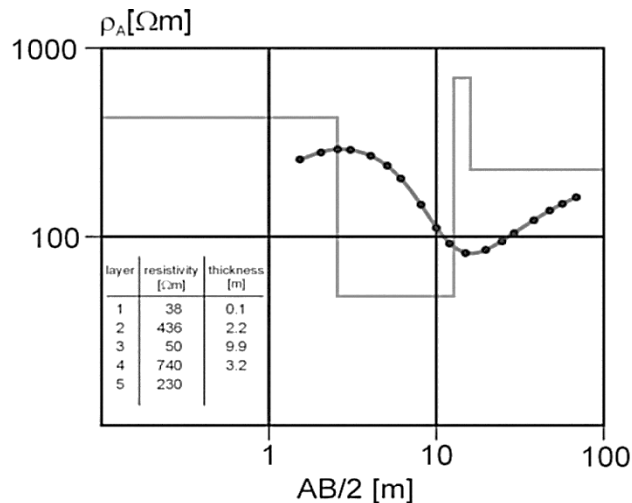


FUENTE: Kirsch (2006)

Para un modelo terrestre de capas horizontales con resistividades y espesores definidos de las capas, se puede calcular la resistividad aparente en función de la separación del electrodo AB. En la práctica, el proceso inverso se debe hacer para deducir el número de capas, sus resistividades y espesores de una curva de sondeo medida (Kirsch 2006).

La Figura 8 describe el modelado de una curva de sondeo: se muestran las resistividades aparentes (puntos), el modelo de capa de mejor ajuste (tabulado y como un gráfico en el diagrama logarítmico) y la curva del modelo relacionado (línea completa). Por razones teóricas, el espesor de la capa más baja siempre se supone infinito.

Figura 8: Curva de sondeo



FUENTE: Kirsch (2006)

Una vez obtenido el número de capas y sus espesores, se construyeron las secciones geoelectricas utilizando cada uno de los sondeos, describiendo la composición y espesores de las unidades hidrogeológicas, la profundidad del basamento rocoso o zona impermeable, el horizonte saturado, insaturado, entre otros.

En el sector se han desarrollado diversos estudios geofísicos con fines hidrogeológicos, a través de medios de financiación privada, de los cuales se han extraído numerosas secciones geoelectricas para una óptima descripción del acuífero.

Con la información geofísica se ha elaborado un mapa del techo del basamento rocoso o impermeable y otro de espesores de los depósitos cuaternarios u horizonte saturado, pertinentes y de gran importancia para la construcción del modelo conceptual y numérico.

3.3.3. Napa freática

La forma clásica de identificar el sentido y la disposición de la napa freática es por observación de los niveles freáticos en los pozos de agua subterránea. Custodio y Llamas (2001) utiliza la ecuación hidrodinámica de Bernoulli para la obtención del flujo subterráneo horizontal, mostrada en la ecuación (10).

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{\rho_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{\rho_2}{\gamma} + z_2 + \Delta h \quad (10)$$

Donde ρ es la presión hidrostática y v es velocidad real; Δh es la pérdida de carga total entre el punto (1), y el punto (2), debido al rozamiento, y γ es el peso específico del fluido, en este caso, el agua. Por último z representa la energía potencial gravitatoria o carga de posición.

En acuíferos libres de formaciones detríticas permeables no consolidadas, como el tratado en la presente tesis, la velocidad el flujo es tan poca magnitud, que la podemos despreciar, en consecuencia, en cualquier punto el estado de carga quedaría representado por la expresión (11).

$$z + \frac{\rho_1}{\gamma} = h \quad (11)$$

Donde “h” refiere el nivel freático en dicho punto.

Los fluidos se ponen en movimiento cuando existen variaciones de la carga hidráulica (h) y las partículas van de los puntos de mayor **h** a los de menor **h**. Dicho movimiento es explicado detalladamente por la Ley de Darcy, que en términos simples, establece que un fluido circula a través de un medio poroso a una velocidad (Q) proporcional al producto del área de la sección transversal (A) por la cual el flujo pasa, el gradiente hidráulico (i) y la conductividad hidráulica (K). Dicha ley representada por la ecuación (12).

$$Q = K \times i \times A \quad (12)$$

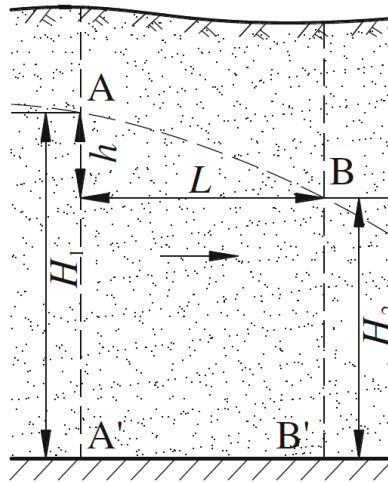
El gradiente hidráulico puede disgregarse en la variación de la carga hidráulica en dos puntos diferentes (ΔH), entre la longitud que los separa (L), obteniendo la expresión (13).

$$Q = K \times \frac{\Delta H}{L} \times A \quad (13)$$

Si el flujo es tan lento que la energía cinética del agua es insignificantes, el gradiente hidráulico puede calcularse a partir de las diferencias de los niveles de agua en los pozos (Price, 2008), es por ello que al conocer los niveles freáticos en los pozos, se logra determinar el sentido del flujo en el acuífero.

La Figura 9 muestra un flujo subterráneo del punto A hacia el punto B, además muestra las cargas H1 y H2, y la distancia que los separa.

Figura 9: Sección transversal de un acuífero y vista de las cargas hidráulicas



FUENTE: Tang et al. (2017)

Con el objetivo de observar las fluctuaciones de la napa freática en el acuífero Fortaleza, la dirección del flujo subterráneo, y su evolución a través del tiempo, se estableció una red de pozos de agua subterránea donde se midieron sus niveles freáticos mensualmente. Las cargas hidráulicas se calcularon restando el nivel de la cota del suelo en el lugar de ubicación del pozo, con la profundidad a la que se encontraba el nivel estático. Este procedimiento se realizó para todos los pozos monitoreados, con datos actualizados a diciembre del 2018, siendo interpolados con el uso del *software* Qgis, para la generación de las curvas hidroisohipsas e isopropundidad. Además, se obtuvieron datos de gradiente hidráulico, direcciones de flujo, variación espacial de profundidades de la napa freática, entre otros.

3.3.4. Prueba de acuífero

Los parámetros imperantes en el comportamiento de la hidráulica subterránea en un acuífero libre son la transmisividad y la porosidad efectiva. Para su determinación se analizaron diversas pruebas de bombeo.

La prueba de bombeo consta, normalmente de dos fases; de descenso y recuperación. El ensayo inicia al instante en el que la bomba es accionada por el operador, y en consecuencia, los niveles de agua subterránea empiezan a abatirse.

Son necesarias personas, ubicadas en el pozo de observación y en el de bombeo, que midan los niveles de agua subterránea durante tiempos regularmente distribuidos en la escala logarítmica utilizando cronómetros, los cuales son sincronizados a la misma hora para obtener medidas a tiempos iguales.

El equipo utilizado fue una sonda eléctrica de una longitud de 120 m, cuyo sensor tuvo contacto con el nivel dinámico al instante que el tiempo establecido lo exigía. Los ensayos de bombeo tienen diversas duraciones, suelen prolongarse hasta la estabilización o casi estabilización de los niveles de agua subterránea.

Al finalizar las pruebas de descenso, se suele aplicar la fase de recuperación, donde la bomba hidráulica es apagada y se toman las medidas del nivel dinámico a determinados tiempos, que van ascendiendo con intención de recuperar el nivel estático inicial. Es importante mencionar que el caudal de bombeo debe tener un valor constante, que exija la misma succión al acuífero durante la totalidad de la duración del ensayo.

El lugar de ensayo debe cumplir ciertas condiciones, tales como; que no existan barreras próximas, que no se esperen cambios laterales de permeabilidad, que no existan bombeos próximos u otras actividades que provoquen variaciones grandes en el nivel del agua, que el nivel freático sea lo suficientemente profundo como para no tener que considerar efectos de evapotranspiración ni recargas rápidas, y que el agua bombeada no regrese al pozo (Custodio y Llamas, 2001).

Si los abatimientos no tienen un valor significativo con respecto al espesor saturado del acuífero, es factible el uso de las fórmulas de los acuíferos confinados, para lo cual los valores de descensos deben ser sometidos a la corrección de Jacob (Custodio y Llamas, 2001), expuesta en la ecuación (14):

$$s' = s - \frac{s^2}{2h} \quad (14)$$

La metodología elaborada utilizando los estudios de Theis-Jacob es, por excelencia, el método de interpretación de pruebas de bombeo para acuíferos libres de mayor utilización.

Parte de los estudios realizados por Theis, que rige los descensos en función del tiempo.

También conocido como método de superposición, los descensos obtenidos se superponen a la curva patrón de Theis, hasta que la coincidencia sea muy cercana, teniendo en cuenta que los ejes de ambos gráficos deben mantenerse paralelos.

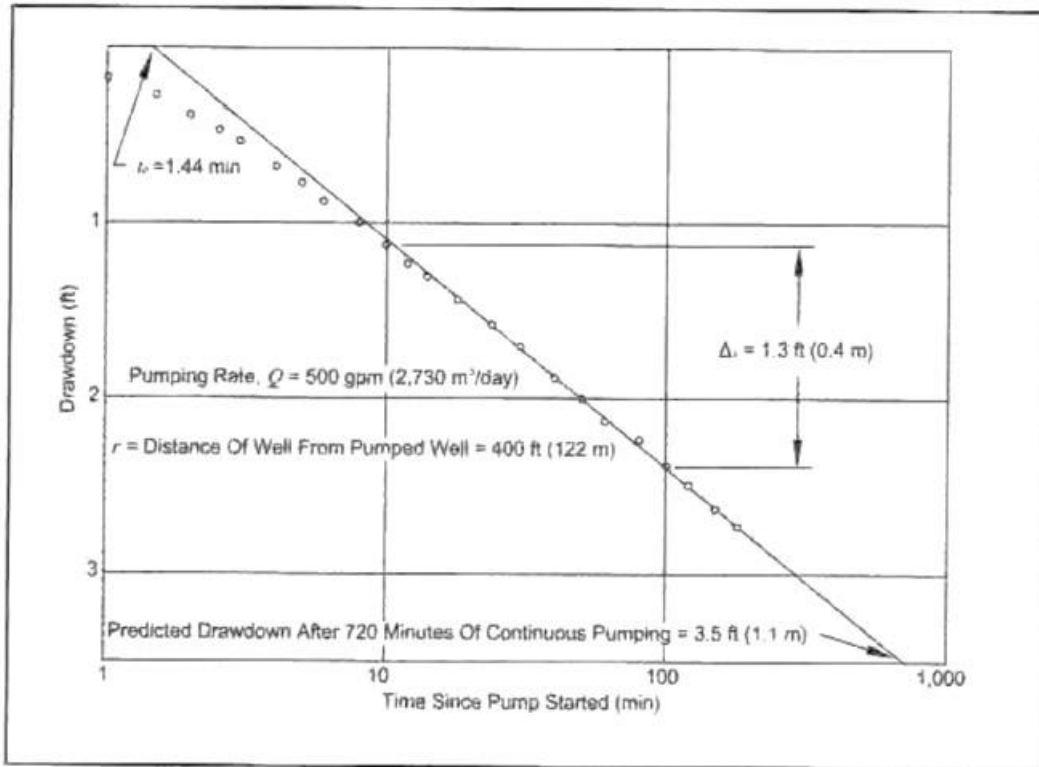
Una vez obtenida dicha coincidencia, se toma un punto cualquiera del gráfico con el que se obtiene dos pares de valores, que son sustituidos en las ecuaciones de Theis para la obtención de los parámetros.

El método de Theis fue muy utilizado, no obstante, actualmente se ha dejado de utilizar porque considera la totalidad de los datos con la misma importancia, sin tener en cuenta que en los tiempos cortos se obtienen valores de abatimiento afectados por problemas de naturaleza hidrogeológica, como el almacenamiento del pozo, penetración incompleta, estabilización del bombeo, entre otros (CDCIHS, 2009).

La metodología añadida por Jacob corrige la deficiencia, dando mayor importancia a los últimos valores, que representan al acuífero estabilizado o cerca de la estabilización. Este método parte de que la fórmula de Theis puede aproximarse por la de Jacob para tiempos grandes, representando los descensos y tiempo en un gráfico semilogarítmico, denotándose que, si despreciamos los primeros datos, el resto de los mismos se disponen a lo largo de una recta (Figura 10). A partir de dicha recta se obtienen los valores de la pendiente; m , y el punto de corte con las abscisas; t_0 .

La ecuación (15) muestra la fórmula de Jacob en términos de logaritmos, que, por analogía, la pendiente permite calcular la transmisividad, tal y como lo expone la ecuación (16). Además del punto con el eje de las abscisas se deduce el coeficiente de almacenamiento con el uso de la expresión (17).

Figura 10: Ejemplo de representación de datos de abatimientos en gráfico semilogarítmico y recta de interpretación



FUENTE: Sterrett (2007)

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r^2 S} = 0.183 \frac{Q}{T} (\log t + \log \frac{2.25T}{r^2 S}) \quad (15)$$

$$T = 0.183Q/m \quad (16)$$

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \quad (17)$$

Donde Q representa el caudal de bombeo; T, la transmisividad; r, la distancia al pozo de observación; S, el coeficiente de almacenamiento y t, el tiempo de bombeo. Para obtener la pendiente en el gráfico semilogarítmico se deben tomar dos puntos que estén distanciados exactamente en un ciclo logarítmico, medir la ordenada en ambos casos y restar.

Actualmente, la interpretación de las pruebas de acuífero se encuentra automatizada con el uso de softwares especializados en el tema, brindando un abanico de métodos, además del expuesto en el presente ítem, para la obtención de los parámetros hidrogeológicos. Las pruebas de bombeo serán procesadas con el software Aquifert Test 2016.1, que grafica los datos de las pruebas de descenso y recuperación, y ajusta con precisión la curva de interpretación para el método seleccionado.

3.3.5. Geometría y composición del acuífero

Para determinar la composición de las unidades hidrogeológicas se utilizó información geológica, geomorfológica y de perfiles litológicos producto de las perforaciones de pozos de aguas subterráneas ubicados dentro del área de estudio.

Además, se emplearon los resultados de sondeos eléctricos verticales (SEV); secciones geo-eléctricas, perfiles geofísicos, que describen la constitución y espesores de las unidades hidrogeológicas, la profundidad de basamento rocoso o zona impermeable, el horizonte saturado, insaturado, entre otros. Dicha información ha sido de vital importancia para la determinación de la geometría del acuífero.

Se utilizó como referencia el mapa de acuíferos del Perú brindado por la ANA, para la delimitación del mismo, existente dentro de la zona de estudio y la determinación de posibles trasvases a otros. Además, se utilizó información basada en el mapa hidrogeológico del Perú, proporcionado por el INGEMMET para conocer la naturaleza geológica del acuífero en estudio.

3.3.6. Flujo subterráneo y almacenamiento del acuífero

Para la obtención del almacenamiento del acuífero en la zona de estudio se utilizó la porosidad efectiva determinada en el ítem 3.2, que, multiplicado con el área de la superficie de la napa freática, y con el espesor promedio del acuífero, se obtiene una aproximación del volumen de agua subterránea almacenado.

El espesor promedio del acuífero Fortaleza se determinó a partir de la herramienta *Zonal Raster Statistics* perteneciente al SIG, donde se hallaron los valores estadísticos de las capas *raster de* napa freática y del basamento rocoso, entre ellos sus altitudes promedio, y que, mediante la diferencia de estas, se obtuvo el espesor promedio.

El caudal de flujo subterráneo fue obtenido a partir de redes de flujo con el uso de los niveles piezométricos en la zona de estudio y con la aplicación de la ecuación de Darcy que requiere de ciertos parámetros tales como: conductividad hidráulica (K), gradiente hidráulico (i), y el área de la sección transversal promedio (A), obtenido del producto entre

el espesor saturado y la longitud de dicha sección promedio.

Las hidroisohipsas son fundamentales para la obtención de las cargas hidráulicas entre los límites de la zona de estudio siguiendo la dirección del flujo subterráneo, es así, que, calculando el cociente con la distancia entre dichas cargas, obtuvimos el gradiente hidráulico.

El valor de K será determinado por el promedio de los valores obtenidos por las distintas pruebas de acuífero ejecutados en la zona de estudio. El espesor promedio del acuífero fue calculado anteriormente para la obtención del almacenamiento del acuífero. Y por último la longitud de la sección transversal en los sectores evaluados se cuantificó de la geometría del acuífero de la zona de estudio, delimitados a partir de la información brindada por la ANA.

3.3.7. Análisis de la calidad del agua

Se trabajaron los resultados obtenidos del análisis en el laboratorio de agua, suelo y medio ambiente de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Dichos resultados muestran las características fisicoquímicas, conductividad eléctrica, pH, entre otros, que se utilizarán para la obtención de los tenores útiles para el presente análisis.

A continuación se describen algunos de los parámetros físico – químicos que fueron analizados (CDCIHS, 2009):

a. Aniones:

- Cl^- : presentes en sales muy solubles, normalmente está asociado a Na^+ . No es toxica hasta muy altas concentraciones.
- SO_4^{2-} : presente en sales de moderada a alta solubilidad (la más insoluble son la de Sr y las de Ba). Se reduce a S o a S^{-2} en presencia de actividad bacteriana y materia orgánica
- HCO_3^- : precipita en forma de $CaCO_3$, $CaMgCO_3$ y otros. No es tóxico, a pesar de que las aguas bicarbonatadas sódicas no son útiles para el riego ni para la bebida

fundamentalmente debido al Na^+ .

b. Cationes:

- Na^+ : presente en sales muy solubles, normalmente está asociado a Cl^- . Las aguas con exceso de Na^+ no son aconsejables para el riego ni para la bebida.
- K^+ : presente en sales muy solubles. Se suele absorber de forma irreversible en arcillas en formación.
- Ca^{2+} : a mayor concentración mayor dureza del agua. Produce incrustabilidad (precipitación de calcita en tuberías) a valores de pH alcalinos.
- Mg^{2+} : muy similar a Ca^{2+} . A mayor concentración mayor dureza del agua. Produce incrustabilidad a valores de pH alcalinos debido a la precipitación de $Mg(OH)_2$ y $MgCO_3$.

c. Dureza: Trata del grado de mineralización en una determinada cantidad de agua, principalmente de iones magnesio y calcio. Los tenores de dichos iones dependen fundamentalmente de las formaciones geológicas atravesadas por el agua de forma previa a su captación, aunque también puede deber su causa a cierto tipo de contaminación.

La medida de la dureza se determina frecuentemente en masa de carbonato de calcio en miligramos por litro ($CaCO_3$ en mg/L). Para su cálculo se considera como si todo el calcio y magnesio estuviesen en forma de carbonato de calcio. De este modo las aguas se clasifican según lo muestra el Tabla 5.

Tabla 6: Clasificación del agua según su dureza

Concentración (Ca+Mg)	Características
0 – 75 mg/l	Blanda
75 – 150 mg/l	Moderadamente dura
150 – 300 mg/l	Dura
Mayor a 300 mg/l	Muy dura

FUENTE: Jairo (2001)

Para la determinación de la dureza se utilizó la fórmula (18) donde se obtiene $CaCO_3$ en mg/L a partir del Ca^{2+} y Mg^{2+} representados en mg/L

$$mg/l \text{ de } CaCO_3 = \left(\frac{Ca^{2+} (mg/l)}{40} + \frac{Mg^{2+} (mg/l)}{24} \right) \times 100 \quad (18)$$

- d. Conductividad eléctrica (CE):** Es la capacidad de un cuerpo o solución a permitir el paso de la corriente eléctrica, o de facilitar el paso de electrones, a través de él. Además, es una variable que indica la concentración global de constituyentes ionizados, mineralización o grado de salinidad del agua subterránea. El valor de la CE se obtuvo directamente de los resultados de los análisis de agua realizados en laboratorio especializado.
- e. Potencial de hidrógeno (pH):** Es la cuantificación de los iones Hidronio (H_3O^+) e indica la medida de la acidez o alcalinidad de una sustancia. Al igual que la CE, se obtuvo directamente de los resultados de los análisis de agua realizados en laboratorio especializado.

Con las concentraciones de aniones y cationes graficadas en los diagramas de Piper, Stiff y Schoeller Berkloff, se obtuvieron las familias químicas a las que pertenecen las muestras de agua analizada.

Se analizó la aptitud para el riego, siguiendo la normativa de Riverside, que determina la clase de agua en función del riesgo de salinización en base a los valores de CE (Conductividad eléctrica expresada en $\mu\text{mhos/cm}$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$) y de la Relación de adsorción del sodio (RAS) el cual indica la posible influencia del ion sodio: una elevada proporción relativa de sodio respecto a los iones calcio y magnesio en el agua de riego puede inducir cambios en estos iones por los de sodio en los suelos, provocando la degradación del mismo con la siguiente pérdida de estructura y permeabilidad. El RAS se determina siguiendo la expresión (19).

$$RAS = \frac{Na^+ (meq/l)}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} (meq/l) + Mg^{2+} (meq/l)}{2}}} \quad (19)$$

Adicionalmente, se analizó las muestras de agua con la norma *Wilcox*, la cual considera como índices para la clasificación de aguas el porcentaje de sodio respecto al de cationes, y la Conductividad Eléctrica.

El análisis químico puede resultar una tarea extenuante si no se utilizan diversas técnicas para su simplificación. Entre las más utilizadas es el empleo de gráficos y diagramas para realizar comparaciones temporales y espaciales, clasificaciones, entre otros (Custodio y Llamas 2001).

Para la gráfica de los diagramas se utilizó el *software Diagrammes* elaborado por el laboratorio de Hidrogeología de la Universidad de *Avignon*, de Francia. Para la elaboración de mapas temáticos del análisis químico se utilizó el software libre *Qgis* v2.16.3 que, en su contenido, muestran las familias químicas a las que pertenecen y como se distribuyen en el espacio.

3.3.8. Recarga del acuífero

Para la determinación de los valores de recarga del acuífero se utilizó el método de balance de zona descrito en el ítem 2.5.1 del marco teórico, el cual se basa en los aportes de agua de precipitaciones (R_{pr}), infiltración por canales (R_{cn}), infiltración por riego agrícola (R_{ir}), infiltración por reservorios o tanques (R_{ta}), infiltración del caudal superficial entrante (Q_{se}) y el caudal del flujo subterráneo entrante (Q_i), siguiendo la expresión (20):

$$I = R_{pr} + R_{cn} + R_{ir} + R_{ta} + Q_{se} + Q_i \quad (20)$$

El balance propuesto se realizó en la zona insaturada del subsuelo, por lo que se descarta el parámetro de caudal del flujo subterráneo entrante (Q_i).

A continuación, se presentará la metodología para el cálculo de la recarga por infiltración de las principales fuentes de recarga descritos:

a. Recarga por el flujo de canales o ríos (R_{cn})

Se identificaron canales existentes y sus características. La infiltración por canales se calculó con la eficiencia de conducción, todo ello incluido en la recarga por riego. La recarga originada por el caudal del río se estimó con los datos de la estación hidrométrica “La Rinconada” ubicada aguas arriba del límite de la zona en estudio, teniendo como fuente al informe del PROFODUA ejecutado por el MINAGRI el año 2005, que analizó dichos caudales al 75% de persistencia. Además, se asumió una tasa de infiltración o recarga acorde a la granulometría

presente en el lecho del río. Obsérvese la tabla siguiente.

Tabla 7: Características de la estación hidrométrica “La Rinconada”

Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Parámetro
10° 26'	77° 44'	300	Caudal (m³/s)

FUENTE: SENAMHI

b. Recarga por precipitación (R_{pr})

Se analizó la información pluviométrica brindada por la estación meteorológica Paramonga, ubicado en la planta industrial de AIPSAA, determinando que no existe infiltración por este concepto dado que la pluviosidad es nula. La Tabla 8 muestra los datos de la estación meteorológica utilizada.

Tabla 8: Características de la estación meteorológica “Paramonga”

Tipo	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Parámetros medidos
Convencional Meteorológica	10° 40' 26"	77° 49' 18"	18	Temperatura Max
				Temperatura Min
				Temperatura Bulbo Seco
				Temperatura Bulbo Húmedo
				Precipitación
				Dirección del viento
				Velocidad del viento
Insolación				

FUENTE: SENAMHI

c. Recarga por riego de cultivos (R_{ir})

Para su cálculo se revisaron los registros del volumen de agua total destinado para el riego en la zona de estudio, proveniente de: canales de agua superficial, pozos de agua subterránea y rebombeos. La eficiencia de riego se determinó explorando el estado de los canales de conducción, la distribución parcelaria, y los métodos de aplicación utilizados.

d. Recarga por infiltración de reservorios o tanques (R_{ta})

Se identificaron los reservorios existentes en la zona de estudio, encontrándose

cubiertos por geomembranas que impiden la infiltración, descartando la recarga por este concepto.

e. Flujo superficial entrante (Q_{se})

Los flujos entrantes son utilizados enteramente en el riego de los cultivos, por lo que la recarga por este concepto se encuentra incluido en el ítem del riego de los cultivos.

3.3.9. Descarga del acuífero

Para la determinación de los valores de descarga del acuífero se utilizó el método de balance de zona descrito en el ítem 2.5.1 del marco teórico, el cual se basa en las pérdidas de agua hacia fuera del sistema hidrológico. Los principales componentes para el cálculo son; la evapotranspiración (ET_o), el volumen de extracción por pozos u otros medios (Q_{ex}), el caudal superficial de salida (Q_{ss}) y el caudal del flujo subterráneo saliente (Q_o).

$$Q = ET_o + Q_{ex} + Q_{ss} + Q_o \quad (21)$$

El balance propuesto se realizó en la zona insaturada del subsuelo, por lo que se descarta el parámetro de caudal del flujo subterráneo saliente (Q_i).

A continuación, se presentará la metodología para el cálculo de la descarga a través de las principales fuentes de descarga descritos:

a. Descarga a cuerpos de agua; manantiales, lagos, etc.

No se han identificado manantiales, lagos, ni ningún otro tipo de descarga de agua del acuífero hacia fuera del sistema.

b. Descarga por pozos (Q_{ex})

Se utilizó la información recolectada en la visita de campo relacionada a los caudales de explotación en los pozos de la empresa AIPSAA. Asimismo, se utilizaron datos de registros de consumos totales mensuales en años anteriores para estimar un consumo promedio mensual, todo ello para nuestra zona de estudio.

c. Descarga por evapotranspiración (ET_o)

Se calculó la evapotranspiración de referencia (Eto) a partir de los registros

meteorológicos tomados por la estación Paramonga expuestos en el Tabla 9. Dicha estación es la única activa en el sector, por tal motivo, se utilizó los valores hallados generalizándolos para toda la zona de estudio. El método utilizado para el cálculo de la Eto es el de Penman Monteith.

Tabla 9: Características de la estación meteorológica “Paramonga”

Mes	Temperatura mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Humedad (%)	Velocidad del viento (km/día)	Insolación	Radiación (MJ/m ² /día)
Enero	19.9	25.5	84	6	5.8	19.2
Febrero	20.8	26.4	85	6	6	19.4
Marzo	20.4	25.8	86	5	6.2	19
Abril	18.9	23.8	87	5	5.5	16.6
Mayo	18.1	22.4	86	5	3.8	12.8
Junio	17.4	21.3	84	5	1.7	9.3
Julio	16.6	19.9	85	5	1.1	8.8
Agosto	15.9	19.4	86	5	1.1	9.6
Septiembre	15.9	19.8	85	6	2.2	12.4
Octubre	16.3	20.9	83	6	3.4	15
Noviembre	17.1	22.1	81	6	4.6	17.1
Diciembre	18.4	23.6	84	6	5.3	18.2
Promedio	18	22.6	85	6	3.9	14.8

FUENTE: AIPSAA (2018)

d. Flujo superficial saliente (Q_{ss})

Se visitó la zona y el sistema hidráulico para la determinación de los flujos superficiales salientes, los cuales fueron nulos.

3.3.10. Balance hídrico subterráneo

El balance hídrico se determinó por el cambio de almacenamiento dentro de la zona de estudio. Dicho cambio es expresado como la diferencia entre lo ingresado menos lo que sale del sistema, para nuestro caso, como la diferencia entre la recarga menos la descarga. La relación se muestra en la expresión (22).

$$ds/dt\alpha = I - Q \quad (22)$$

3.3.11. Elaboración del modelo conceptual

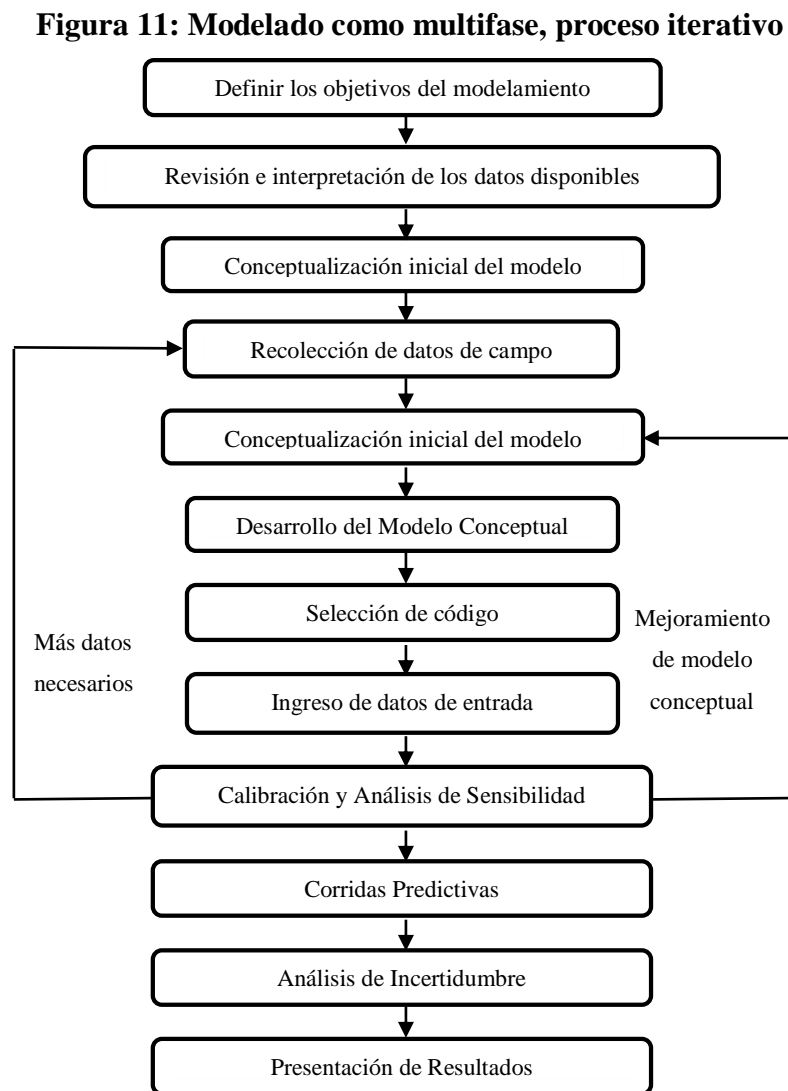
El modelo conceptual se elaboró analizando toda la información relacionada con formaciones geológicas, direcciones del flujo, fronteras hidrológicas, parámetros hidráulicos, explotación de pozos, cargas observadas, entre otros, entendiendo el

comportamiento dinámico del acuífero en espacio y tiempo.

Se describió el tipo de acuífero tratado y se mostró el resumen del balance hídrico preliminar calculado anteriormente. Se construyó una representación gráfica en 3D utilizando el *Software* Qgis con la finalidad de simplificar el entendimiento del modelo. Se siguió la metodología precisada en el ítem 2.6 de la presente investigación.

3.3.12. Elaboración del modelo numérico

Para el desarrollo de un modelo numérico de aguas subterráneas se utilizó un protocolo de modelado a seguir para un trabajo exitoso, el cual se resume en la Figura 11.



FUENTE: Wels et al. (2012)

Para la presente investigación, el modelo numérico fue elaborado utilizando el software *ModFlow*, desarrollado por Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), que posee potencial para manejar grandes cantidades de datos detallados y de alta resolución. Asimismo, cuenta con compatibilidad con *Softwares SIG*, que ayudó a reducir el tiempo de elaboración y brindó resultados gráficos fácilmente entendibles. Para la elaboración del modelo numérico se siguieron los siguientes pasos:

i. Discretización de modelo numérico

Fue realizada en el eje vertical como horizontal, representando la superficie y las capas con una cuadrícula ortogonal de celdas, utilizando el refinamiento para las zonas que necesiten mayor análisis o donde se tengan mayor densidad de datos a ingresar. Se inactivaron las celdas que representen zonas impermeables que hayan sido reconocidos en campo, por donde no transita el flujo subterráneo. Se determinó la orientación de la grilla procurando minimizar el número de celdas inactivas, pretendiendo que uno de los ejes del modelo esté alineado con la dirección de flujo predominante.

ii. Asignación de parámetros

Los parámetros ingresados al modelo se dividieron en tres grupos: (1) tiempo, especificados al modelar en condiciones transitorias, tales como tasas de bombeo de pozos, variación temporal de los caudales de los ríos, la recarga por precipitación, entre otros, (2) espacio, según se definió el espesor de las capas, que trasciende en el intercambio de flujos entre capas, y (3) características hidrogeológicas, tales como conductividad hidráulica, transmisividad, parámetros de almacenamiento y porosidad efectiva, que podrán ser ingresados seleccionando espacios para cada característica hidráulica, pudiendo diferenciar zonas, a medida que se dispongan de una variada y distribuida cantidad de datos.

iii. Condiciones de contorno

Posteriormente a la asignación de parámetros, se definieron las condiciones de contorno utilizando los paquetes de *Modflow* que se ajustaron con mayor precisión a la realidad. Los paquetes se dividen en cuatro grupos: (1) Límites con carga hidráulica conocida, que representan una línea equipotencial que brinda agua al sistema como una fuente inagotable. (2) Límites con flujo dependiente de la carga hidráulica, para el cual se calcula la tasa de flujo, basado en la diferencia principal entre las celdas del límite y las celdas del acuífero

adyacente. Los paquetes que simulan esta condición son; paquete río, paquete drenaje y paquete de límite de carga general. (3) Límite con flujo conocido, representado con los niveles freáticos en acuíferos no confinados, el flujo de entrada y salida a través de los contactos laterales entre diferentes acuíferos, la filtración hacia o desde capas adyacentes y la recarga hacia o desde corrientes superficiales. Dicha información está disponible por monitoreo de los pozos, la precipitación, evapotranspiración, el volumen de riego, entre otros. (4) Límites sin flujo, con el flujo establecido en cero, representado por las celdas inactivas que materializa zonas impermeables.

iv. Calibración

Para el proceso de calibración se variaron los datos de condiciones de contorno, tensiones y parámetros hidrogeológicos, que en su simulación; produzcan resultados que más se aproximen a las mediciones de campo del nivel freático y flujos hidráulicos.

El error aceptable para el presente estudio tuvo valor menor o igual al 10 %. La calibración fue realizada en régimen estacionario, y luego transitorio, es decir que, para el primer caso se tomó un tiempo determinado, y en el segundo, la evolución de los niveles piezométricos a través del tiempo. Para esto se utilizaron los datos de los monitoreos observados mensualmente en los pozos de explotación.

v. Análisis de sensibilidad

Al registrar los cambios realizados durante la calibración y comentar sus resultados, se determinaron también los parámetros que son más sensibles a los cambios con respecto al resultado final de la simulación.

vi. Simulación del modelo

Una vez que el modelo fue calibrado, se procedió a su simulación que determinó la evolución temporal en la morfología de la napa freática y el balance masas que brindó la cuantificación de los ingresos y egresos del sistema acuífero, así como el volumen de agua subterránea que recorre la zona de estudio en un tiempo igual a un año. Todo ello fue de gran utilidad para la cuantificación de las reservas racionalmente explotables y las reservas potencialmente explotables, las cuales sirvieron como base para el cálculo del caudal óptimo de explotación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Inventario de pozos de agua subterránea

4.1.1. Inventario de pozos de agua subterráneo en el valle Fortaleza

Se ha tomado como referencia el inventario publicado el año 2005 por el MINAGRI, donde se registraron un total de 162 pozos cuya agua es utilizada para el abastecimiento de diversas actividades económicas, así como para fines poblacionales.

a. Tipos de pozos inventariados

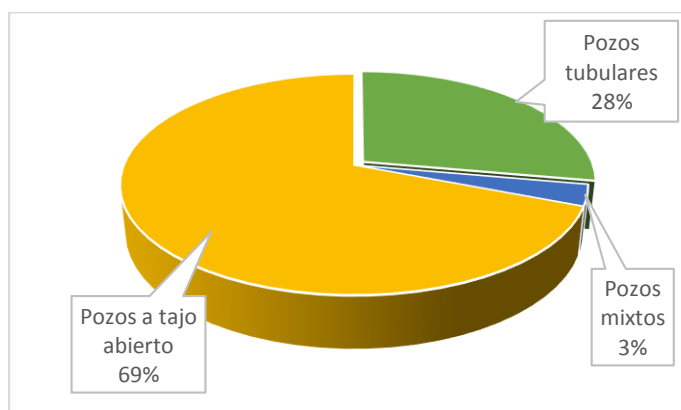
Existen tres tipos de pozos contabilizados: (1) los pozos tubulares, que representan el 27.78 % del total con una cantidad de 45; (2) los pozos a tajo mixtos, con una cantidad de 5 que representa el 3.08 % del total; y (3) los pozos a tajo abierto, cuantificando un valor de 112 representando el 69.14 %. Dichas proporciones se pueden apreciar en la Figura 12 y el Tabla 10.

Tabla 10: Distribución de los tipos de pozos en el valle Fortaleza

Valle Fortaleza	Pozos tubulares		Pozos mixtos		Pozos a tajo abierto		Total	
	n.º	%	n.º	%	n.º	%	n.º	%
	45	27.78	5	30.86	112	69.14	162	100.00

FUENTE: INRENA (2005)

Figura 12: Distribución de los tipos pozos



FUENTE: INRENA (2005)

Los pozos tubulares permiten la explotación de mayores caudales, por ello son utilizados principalmente en la actividad agrícola y están distribuidos en toda la extensión del valle. Los pozos a tajo abierto se encuentran ubicados en las zonas urbanas y son utilizados en su totalidad para fines poblacionales

b. Estado de los pozos

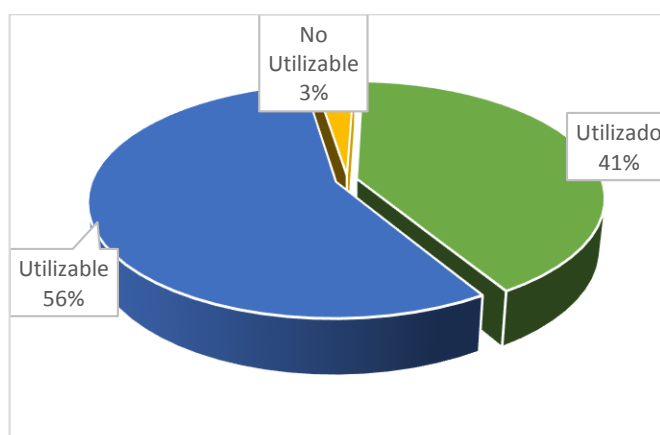
De los 162 pozos registrados, 66 se encuentran utilizados; representando el 40.74 % del total; 91 en estado utilizable representando el 56.18 %; y 5 en estado no utilizable siendo el 3.08 % del total. Dichas proporciones se pueden apreciar en la Figura 13 y el Tabla 11.

Tabla 11: Distribución los pozos según su estado

Valle Fortaleza	Utilizado		Utilizable		No Utilizable		Total	
	n.º	%	n.º	%	n.º	%	n.º	%
	66	40.74	91	56.17	5	3.08	162	100.00

FUENTE: INRENA (2005)

Figura 13: Distribución de los pozos según su estado



FUENTE: INRENA (2005)

Se registraron como utilizados, los pozos que al momento del inventario se encontraban operativos, extrayendo agua para distintos fines. De estos, 33 fueron a tajo abierto, 29 tubulares, y 4 mixtos.

Los pozos utilizables cuantificaron un valor igual a 91, encontrándose en su mayoría en la zona urbana de Paramonga. Se contabilizaron 13 tubulares, 77 a tajo abierto, y 1 mixto.

Se denominaron pozos no utilizables a los que se encontraron derrumbados, con la tubería desviada, con agua salada, o en estado seco. Se registraron un total de 5 pozos en este estado, entre ellos, 3 tubulares y 2 a tajo abierto.

c. Uso de los pozos

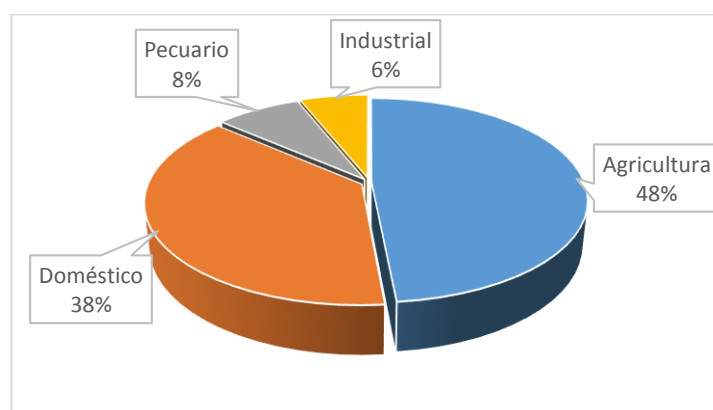
Los 66 pozos contabilizados como utilizados fueron clasificados según su finalidad de uso, siendo la agricultura la actividad que utiliza la mayor cantidad de pozos con un valor igual a 32 (48.48 %); seguido por el uso doméstico, con 25 pozos (37.88 %); luego el fin pecuario, con 5 pozos (7.58 %), y por último el uso Industrial, con 4 pozos (6.06 %). Dichas proporciones se pueden apreciar en el Tabla 12 y La Figura 14.

Tabla 12: Distribución los pozos según su uso

Valle Fortaleza	Agricultura		Doméstico		Pecuario		Industrial		Total	
	n.º	%	n.º	%	n.º	%	n.º	%	n.º	%
	32	48.48	25	37.88	5	7.58	4	6.06	66	100

FUENTE: INRENA (2005)

Figura 14: Distribución de los pozos según su uso



FUENTE: INRENA (2005)

d. Explotación de los pozos

La actividad que demanda mayor cantidad de agua es la agricultura, cuantificando un valor de 10 833 022.28 m³ al año, utilizando principalmente pozos de tipo tubular ubicados en toda la extensión de los campos agrícolas del valle representando el 84% del agua subterránea utilizada.

Los fines domésticos representan la segunda mayor demanda, con un volumen anual de 1 319 347.8 m³, utilizando principalmente pozos de tipo tajo abierto ubicados en las zonas urbanas. Representan el 10.3% del total de agua subterránea utilizada.

Los fines Pecuarios demandan un total de 297 676.3 m³ al año, y los fines industriales, un volumen de 357 433.2 m³ anuales, utilizados sobre todo para las actividades de la planta industrial de la empresa AIPSAA. El Tabla 13 muestra las expuestas proporciones.

Tabla 13: Volumen de agua subterránea utilizado según su uso

Agricultura		Doméstico		Pecuario		Industrial		Total	
Volumen (m ³)	%	Volumen (m ³)	%	Volumen (m ³)	%	Volumen (m ³)	%	Volumen (m ³)	%
10 833 022.28	84.58	1 319 347.8	10.3	297 676.3	2.32	357 433.2	2.79	12 807 480.1	100

FUENTE: INRENA (2005)

4.1.2. Actualización del Inventario de Pozos de Agua Subterránea en la zona de estudio

Se actualizó el inventario de pozos de agua subterránea en gran parte de la zona agrícola del valle, compuesto por los sectores Tunán, Quebrada, Canaval, Don Andrés, Don Fernando, Don Pepe, Caballete y Manzuelo. Se identificaron un total de 26 pozos, donde se recolectó información relacionada a los siguientes términos: número IRHS, coordenadas UTM, tipo de pozo, profundidad actual, equipo de bombeo, estado del pozo, tipo de uso, caudal de explotación, régimen de explotación, volumen anual, entre otros. El Tabla 39 del Anexo 1 muestra el de inventario mostrando el resumen de todos los datos recolectados, asimismo el Mapa 4 del Anexo 2 presenta la ubicación de dichos pozos y lo sectores de la zona de estudio. La Tabla 14 muestra los pozos registrados según el sector en los que se encontraron ubicados.

Tabla 14: Ubicación de pozos según sectores

Sector	Pozos	n.º de Pozos	%
Quebrada	Q2, Q11, Q17, Q25, Q26 y Q28	6	23.08
Canaval	Q1, Q3, Q7 y Q14	4	15.38
Caballete	Q09 y Q04	2	7.69
Don Fernando	Q06 y Q20	2	7.69
Don Pepe	Q19 y Q29	2	7.69
Tunán	Q13, Q15, Q21, Q23, Q24 y Q27	6	23.08
Manzuelo	Manzuelo 1 y Manzuelo 2	2	7.69
Don Andrés	Q16 y Q18	2	7.69
Total		26	100.00

a. Tipos de pozos inventariados

Los pozos, en su totalidad, son de tipo tubular.

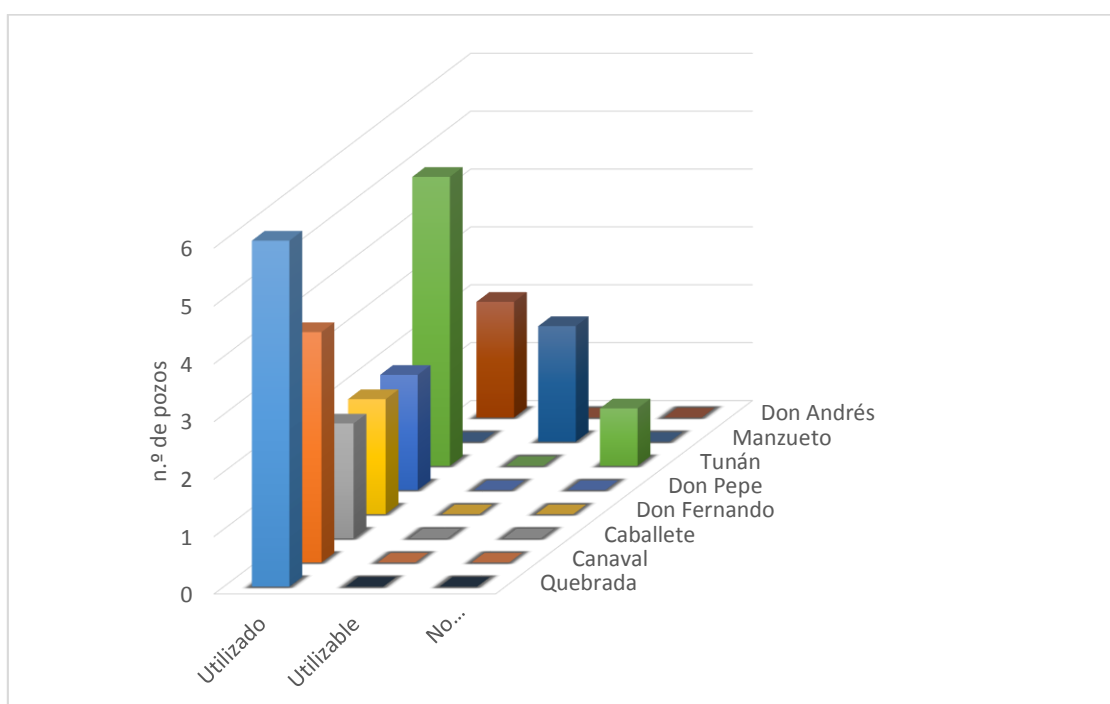
b. Estado de pozos inventariados

De los 26 pozos inventariados, (i) 23 se encontraron en estado utilizado representado el 88.46% del total; (ii) 2 fueron pozos utilizables, ubicados en el sector de Manzuelo, representando el 7.69% del total; y (iii) 1 pozo no utilizable, ubicado en la zona de Tunán, denominado Q-13 (IRHS 10), que por problemas de verticalidad y riesgo de colapso, se dejó de utilizar. El Tabla 15 y la Figura 15 muestran el estado de los pozos ubicados por sectores.

Tabla 15: Estado de los pozos por sectores

Sector	Utilizado		Utilizable		No Utilizable		Total	
	n.º	%	n.º	%	n.º	%	n.º	%
Quebrada	6	23.08	0	0	0	0	7	23.08
Canaval	4	15.39	0	0	0	0	3	15.39
Caballete	2	7.69	0	0	0	0	2	7.69
Don Fernando	2	7.69	0	0	0	0	2	7.69
Don Pepe	2	7.69	0	0	0	0	2	7.69
Tunán	5	19.23	0	0	1	3.85	6	23.08
Manzuelo	0	0	2	7.69	0	0	2	7.69
Don Andrés	2	7.69	0	0	0	0	2	7.69
Total	23	88.46	2	7.69	1	3.85	26	100

Figura 15: Estado de los pozos por sectores



c. Fines uso de los pozos

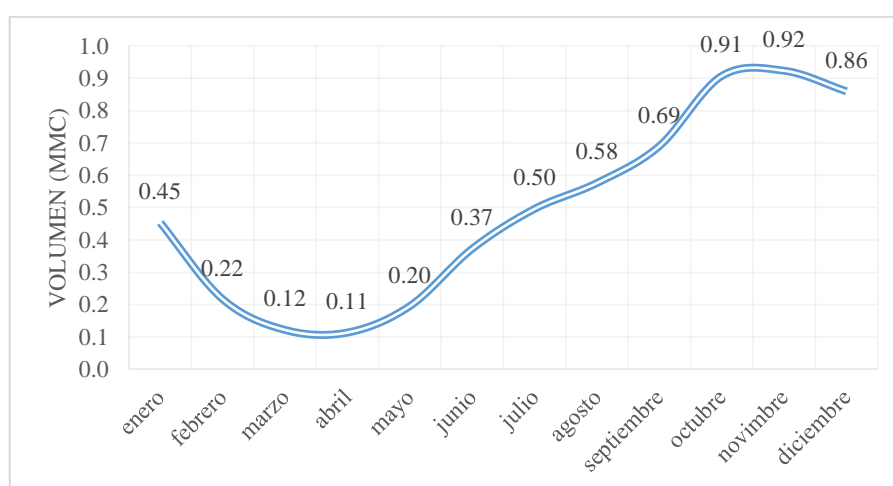
De los 23 pozos utilizados, 22 son destinados a fines agrícolas para el riego de los campos de caña de azúcar. Asimismo, solo uno es utilizado para el abastecimiento poblacional de la localidad Cerro Blanco, siendo este el pozo de nombre Q9, con código IRHS 17. El Mapa 4 del Anexo II muestra la ubicación de dicha localidad y pozos.

d. Explotación de los pozos

Los pozos inventariados son explotados de forma continua para el riego de cultivos de caña de azúcar. El Tabla 40 del Anexo I muestran los volúmenes anuales y mensuales de los pozos desde el año 2009, asimismo la Figura 16 muestra la evolución mensual promedio de los volúmenes de explotación en dichos años.

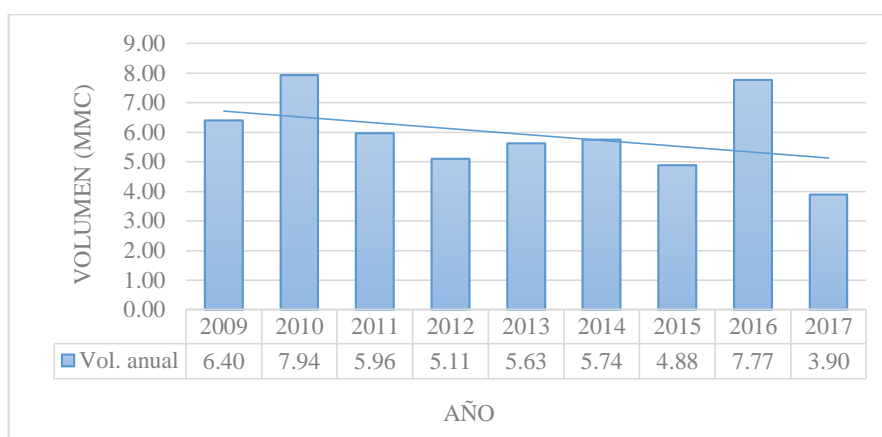
Los pozos explotan distintos caudales que dependen de las características hidráulicas del acuífero en su sector de ubicación. El caudal promedio de explotación es de 30 l/s, siendo el menor de 5 l/s y el mayor de 70 l/s. Los pozos son utilizados con mayor frecuencia durante los meses de estiaje, comprendidos entre junio y enero, no obstante, la explotación disminuye considerablemente en las épocas de avenida que comprenden los meses restantes del año, tal y como lo muestra la Figura 17 que expone los volúmenes promedio mensuales entre el periodo 2009-2017.

Figura 16: Volumen mensual promedio de explotación de pozos, periodo 2009-2017



Se poseen registros de los volúmenes anuales explotados durante los años comprendidos entre el 2009 y 2017, tal y como puede observarse en la Figura 18. El volumen anual promedio alcanza un valor igual a 5.93 hm³, donde el menor volumen anual se produjo en el año 2017 con 3.9 hm³, y el mayor volumen anual, el año 2010, con 7.94 hm³.

Figura 17: Volumen de explotación anual, periodo 2009-2017



e. Características técnicas de los pozos

Los pozos poseen distintas profundidades de perforación, el pozo Q21 (IRHS 15) tiene la mayor profundidad con un valor de 54.4 metros, y el pozo Q9, la menor profundidad con un valor igual a 19 metros. Los pozos son objeto de mantenimiento periódico como consecuencia de la disminución de su rendimiento por arenamiento u otros motivos, que hacen perder la profundidad de perforación inicial. El diámetro de perforación es variable, encontrándose entre 14 a 21 pulgadas.

Se han registrado 23 pozos con equipamiento, cuyos motores varían su potencia entre los valores de 15 u 73 HP, además son de diferentes marcas, entre ellos; Delcrosa, Shanghai, WEP, Chino, General Electric, entre otros. Todas las bombas utilizadas son de tipo de Turbina de Eje Vertical, de la marca Hidrostral.

4.2. Análisis de prospección geofísica

A través del tiempo se han ejecutado diversos estudios geofísicos con fines hidrogeológicos dentro del valle Fortaleza. Los mencionados estudios se han basado, principalmente, en la ejecución de SEV, realizados en zonas de investigación y planificadas para la determinación de zonas geofísicas favorables para la ubicación de pozos tubulares que aumenten la oferta hídrica subterránea.

4.2.1. Prospección Geofísica con fines Hidrogeológicos

Se ha seleccionado la información geofísica concerniente a nuestra zona de estudio, contabilizando un total de 39 SEV, tal y como muestra el Mapa 5 del Anexo 2. Los

sondeos se ubican, principalmente, en tres sectores: Tunán; con 13, Quebrada; con 13, y Manzuelo; con 10. Adicionalmente existen 3 sondeos ubicados en el sector de San Andrés. La interpretación de los SEV fue facilitada por la empresa AIPSAA, cuyos datos se encuentran basados en los informes de consultorías que fueron contratadas para la exploración de sus campos, desde el año 2004 hasta la actualidad. Dicha interpretación fue realizada por sectores y figuran en los Tablas 41, 42 y 43 del Anexo 1.

Con el conocimiento de subsuelo, se han elaborado 4 secciones geoelectricas que exponen, en cortes en dos dimensiones, una aproximación de los horizontes. La ubicación de las secciones puede observarse en el Mapa 6 del Anexo 2. Se han identificado tres horizontes definidos por los valores de resistividad de los materiales componentes del subsuelo, mostrados a continuación:

Horizonte 1: limita con la superficie del suelo y con el nivel freático del acuífero. Está compuesto de materiales finos intercalados con depósitos medios a gruesos tales como limos, arcillas y gravas en estado seco. Este horizonte representa la zona vadosa e insaturada del subsuelo.

Horizonte 2: colinda, por la parte inferior; con el basamento rocoso impermeable, y por la parte superior; con el nivel freático del acuífero. Se compone con material medio a grueso, presentando finos tales como arcillas, arenas, gravas y cantos rodados. Este horizonte representa la zona saturada del subsuelo, con buena permeabilidad por presencia de detritos.

Horizonte 3: Se caracteriza por ser un horizonte impermeable por la naturaleza rocosa que lo compone. Cumple la función hidrogeológica de límite inferior del acuífero.

El Tabla 16 expone las resistividades y espesores de los horizontes del subsuelo utilizados para la realización de las secciones geoelectricas.

Con la información geofísica recopilada se generaron mapas temáticos que ilustran datos geométricos del acuífero en los sectores donde se concentraron la mayor cantidad de SEV, presentados a continuación:

Tabla 16: Espesores y resistividades de los horizontes del subsuelo

Secciones	Características	Horizontes		
		Horizonte 1	Horizonte 2	Horizonte 3
Sección A-A'	Espesores (m)	de 7.3 a 18	De 5 a 87.4	-
	Resistividades (Ohm-m)	De 4.4 a 1174	De 9.7 a 150	Máximo de 5366
Sección B-B'	Espesores (m)	De 9.3 a 12.9	De 81.2 a 98.6	-
	Resistividades (Ohm-m)	De 47.6 a 286.6	de 10.5 a 97.6	Máximo de 365
Sección C-C'	Espesores (m)	De 1.9 a 7.65	De 56.2 a 86.3	-
	Resistividades (Ohm-m)	De 52 a 209	De 16 a 137	Máximo de 181
Sección D-D'	Espesores (m)	De 1.6 a 12.26	De 34.46 a 111	-
	Resistividades (Ohm-m)	De 16.4 a 274.7	De 16.4 a	Máximo de 236.6

a. Isópacas

Para el sector Tunán, se muestran que los horizontes saturados aumentan uniformemente su espesor desde los 70 a los 85 metros, entre los pozos Q-23 hacia el Q-4, siguiendo una orientación hacia el sur.

En el sector Quebrada se muestran que los horizontes saturados sufren de una disminución de su espesor conforme aumenta la cercanía a los límites impermeables laterales (formaciones rocosas). Los espesores de mayor longitud se ubican en las cercanías de los pozos Q-25, Q-26 y Q-11.

En el sector Manzueto se muestran que una disminución de los espesores conforme aumenta la cercanía a los límites impermeables laterales (formaciones rocosas), llegando a valores de 65 metros. Los mayores espesores se ubican en zonas cercanas a la parte media del sector, con valores de 105 metros. Además, se evidencia una disminución de los espesores en dirección suroeste.

b. Isóbatas

Para el sector Tunán, se muestran que el basamento impermeable aumenta en profundidad conforme a la orientación sur, desde el pozo Q-23 y Q24, hacia los pozos Q-15 y Q21.

En el sector Quebrada se muestran que la profundidad del basamento impermeable tiene un incremento en el sentido suroeste, desde el pozo Q-17 hacia el Q-25. Las zonas de menor profundidad se encuentran cercanas al límite impermeable lateral (formaciones rocosas) con un valor de 87 metros, y tiende a incrementarse conforme se aleja de la misma.

En el sector Manzueto se muestran que la profundidad del basamento impermeable

tiene la profundidad menor en las zonas cercanas al límite impermeable lateral (formaciones rocosas) con profundidades de 80 metros. La mayor profundidad del basamento se encuentra en la parte media de los campos, con un valor de 111 metros. La tendencia al incremento de la profundidad del basamento sigue el sentido suroeste.

4.3. Napa freática

La napa freática ha sido analizada con la utilización de los valores obtenidos del monitoreo de aguas subterráneas, ejecutados propiamente desde el mes de agosto a diciembre del 2018, además se utilizó datos de monitoreo ejecutado por la empresa AIPSAA que complementan el año de duración. Los valores medidos en el mes de diciembre del 2018 han sido utilizados para describir la morfología y profundidades de la napa freática, exponiendo las diferencias espaciales de profundidad del nivel de agua subterránea, direcciones de flujo, cargas hidráulicas, gradiente hidráulico, entre otros.

4.3.1. Morfología de la napa freática

Las cargas hidráulicas obtenidas fluctúan entre un valor máximo de 82.48 metros; medido en el pozo Q-23 en el sector de Tunán, y uno mínimo de 28.18 metros; medido en el pozo Manzueto-1 ubicado en el sector de Manzueto. La carga hidráulica promedio es de 62.40 metros. Dichos datos pueden observarse en el análisis de estadística descriptiva expuesto en el Tabla 17.

Se han evidenciado dos direcciones del flujo de mayor preponderancia, (i) la primera, en dirección sur, desde los pozos Q-23 y Q-24 hasta los pozos Q-16 y Q-07, y (ii) la segunda, en dirección suroeste, desde los pozos Q-16 y Q-07 hasta el pozo Manzueto-1.

La napa freática cuenta con una superficie uniforme tal y como lo muestran las curvas Hidroisohipsas en el Mapa 9 del Anexo 2, debido a (1) una recarga difusa por riego en toda nuestra zona de estudio, (2) la recarga uniforme por el río Fortaleza, y (3) la ausencia de interferencias que afecten el recorrido del flujo subterráneo. Obsérvese la Figura 18.

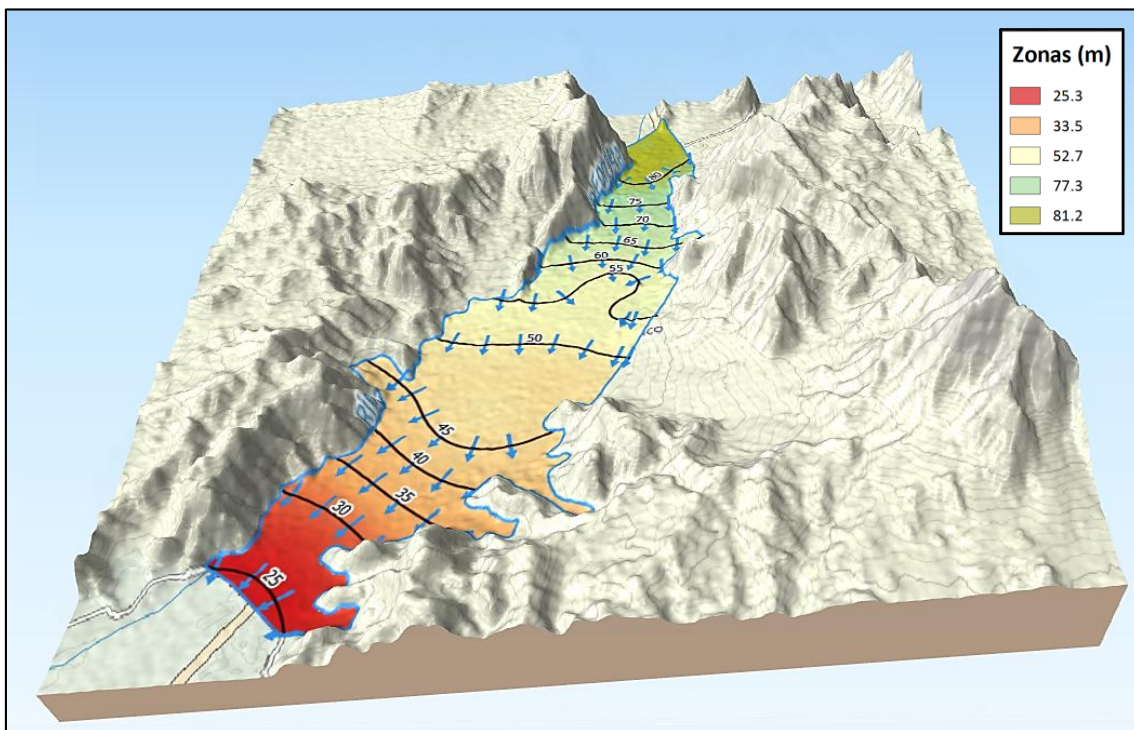
Debido a la napa freática uniforme, el gradiente hidráulico promedio ha sido generalizado

para toda la extensión de la zona de estudio, cuantificando un valor de 0.6%, que indica una depresión de 0.6 metros por cada 100 metros de distancia. Además, se ubica con aproximado paralelismo al relieve topográfico, lo cual respalda su carácter libre de confinamientos.

Tabla 17: Datos estadísticos de las cargas hidráulicas

Indicadores	Valor
Media	62.40
Desviación estándar	15.68
Varianza de la muestra	245.94
Rango	54.30
Mínimo	28.18
Máximo	82.48
Cuenta	26.00

Figura 18: Curvas Hidroisohipsas y dirección del flujo subterráneo



4.3.2. Profundidades de la napa freática

Las profundidades de la napa freática tienen una distribución irregular en la extensión de nuestra zona de estudio. Las mayores profundidades se ubican en la zona noreste, en el sector Tunán, área donde se encuentran el pozo Q-23 que posee la mayor profundidad con

un valor igual a 11.52 metros. Las menores profundidades se ubican en la zona suroeste, en los sectores Manzueto y Don Andrés. En este último se encuentra el pozo Q-29, que posee la menor profundidad con un valor igual a 0.52 metros. La profundidad promedio de la napa freática tiene un valor igual a 6.53 metros. Los datos de estadística descriptiva pueden apreciarse en el Tabla 18.

Queda evidenciado que los valores de menor profundidad se ubican en las zonas cercanas al río Fortaleza; con valores de 5 a 1 metros, y por el contrario, los valores de mayor profundidad se ubican en las cercanías al límite impermeable lateral suroeste; con valores de 10 a 6 metros.

La distribución espacial de las profundidades de la napa freática puede apreciarse en el Mapa 10 del Anexo 2.

Tabla 18: Datos estadísticos de las profundidades de la napa freática

Indicador	Valor
Media	6.53
Desviación estándar	2.89
Varianza de la muestra	8.34
Rango	11.00
Mínimo	0.52
Máximo	11.52
Cuenta	26.00

4.3.3. Variación temporal de la napa freática

En la zona de estudio no existe información de monitoreos mensuales durante años anteriores que permita su análisis. A partir del año 2018 se cuentan con algunas mediciones del nivel freático hasta el mes de agosto que fueron complementadas hasta el mes de diciembre con el objetivo de apreciar la fluctuación de la napa freática durante el mencionado año. El monitoreo de los pozos se realizó respetando la función de explotación para el riego de los campo, por ello, algunos niveles estáticos no pudieron ser medidos en determinados meses. El pozo Manzueto-1 finalizó su perforación en el mes de octubre, por lo que fue a partir de esa fecha en la que inició su monitoreo, asimismo, el pozo manzueto-

2 finalizó su perforación el mes de diciembre por lo que solo se cuenta con la medición de su nivel para esa fecha. El pozo Q-16 no contó con un orificio que permita ingresar la sonda eléctrica para la medición de su nivel, motivo por el cual no se tienen valores para el año 2018. Los valores del monitoreo mensual pueden apreciarse en el Tabla 44 del Anexo 1.

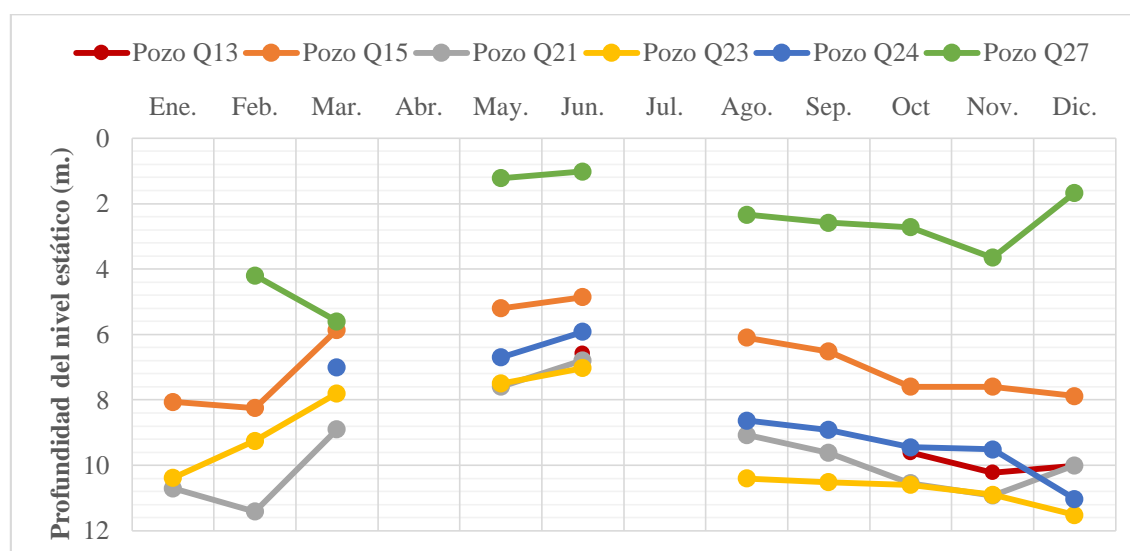
Para facilidad de apreciación, el área de estudio se ha dividido en 4 zonas que agrupan ciertos sectores próximos, las cuales se muestran a continuación:

Zona I: comprendida por el sector Tunán donde se ubican 6 pozos. De la observación se desprende que el pozo Q-24 tiene la mayor variación de nivel de agua, con un valor igual a 5.11 metros, con una profundidad máxima y mínima de 11.03 y 5.92 metros respectivamente. Asimismo, la menor variación de nivel de agua la posee el pozo Q-15, con un valor igual a 3.39 metros, con una profundidad máxima y mínima de 4.86 y 8.25 metros, respectivamente. La desviación estándar muestra un valor próximo entre todos los pozos, sugiriendo que la dispersión de los datos de niveles freáticos muestra cierta similitud. El Tabla 19 expone datos de estadística descriptiva obtenidos para un mayor análisis del comportamiento de las variaciones del nivel freático. La Figura 19 muestra la variación mensual de la napa freática en los pozos de la zona I.

Tabla 19: Datos estadísticos de niveles mensuales de la napa – zona I

Indicadores	Pozos					
	Q13	Q15	Q21	Q23	Q24	Q27
Media	9.11	6.79	9.56	9.59	8.40	2.78
Desviación estándar	1.70	1.24	1.49	1.59	1.71	1.49
Varianza de la muestra	2.90	1.55	2.22	2.54	2.94	2.22
Curtosis	3.54	-1.53	-0.28	-1.23	-0.91	0.07
Coficiente de asimetría	-1.87	-0.36	-0.74	-0.67	-0.07	0.75
Rango	3.64	3.39	4.62	4.49	5.11	4.58
Mínimo	6.58	4.86	6.79	7.03	5.92	1.02
Máximo	10.22	8.25	11.41	11.52	11.03	5.60
Cuenta	4	10	10	10	8	9

Figura 19: Variación mensual de la napa freática para la zona I

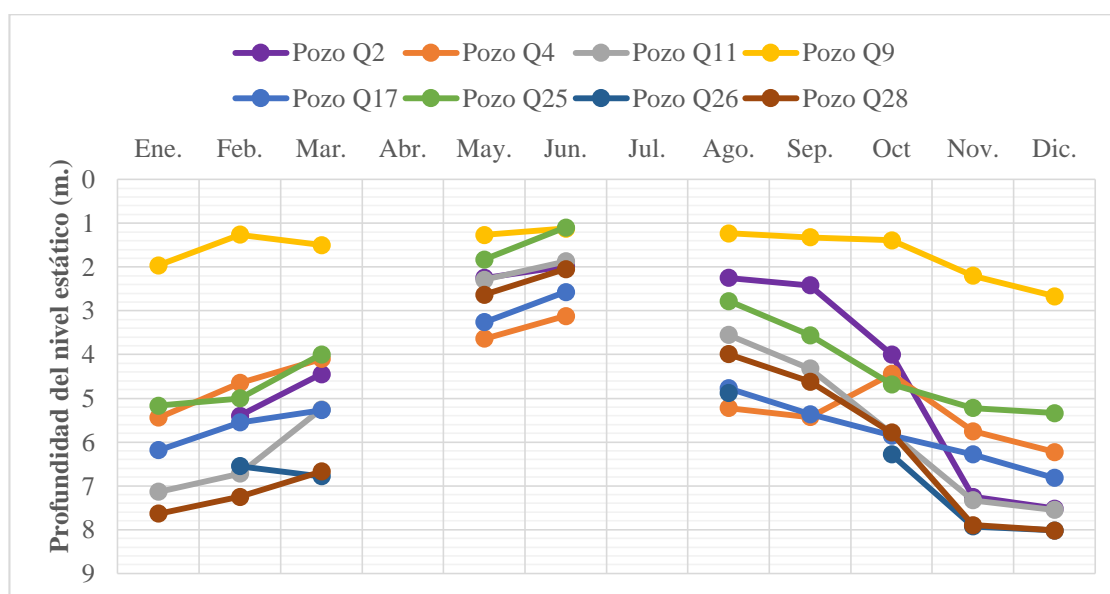


Zona II: comprendida por los sectores Caballete y Quebrada donde se ubican 8 pozos. De la observación se desprende que el pozo Q-28 tiene la mayor variación de nivel de agua, con un valor igual a 5.97 metros, con una profundidad máxima y mínima de 8.02 y 2.05 metros respectivamente. Asimismo, la menor variación de nivel de agua la posee el pozo Q-09, con un valor igual a 1.55 metros, con una profundidad máxima y mínima de 2.67 y 1.12 metros respectivamente. Los valores de desviación estándar sugieren que los pozos Q2, Q11 y Q28 poseen la mayor dispersión de los niveles freáticos, mientras que el pozo Q4, la menor dispersión. Los datos mencionados pueden observarse en el Tabla 20. La Figura 20 muestra la variación mensual de la napa freática para la zona expuesta.

Tabla 20: Datos estadísticos de niveles mensuales de la napa - zona II

Indicadores	Pozo							
	Q2	Q4	Q11	Q9	Q17	Q25	Q26	Q28
Media	4.17	4.80	5.18	1.59	5.19	3.87	6.74	5.65
Desviación estándar	2.17	0.99	2.10	0.51	1.34	1.52	1.16	2.21
Varianza de la muestra	4.70	0.97	4.39	0.26	1.80	2.30	1.35	4.90
Curtosis	-1.19	-0.77	-1.27	0.73	0.43	-0.63	0.14	-1.24
Coficiente de asimetría	0.61	-0.35	-0.47	1.32	-1.06	-0.84	-0.53	-0.55
Rango	5.54	3.11	5.68	1.55	4.25	4.24	3.14	5.97
Mínimo	1.98	3.12	1.87	1.12	2.57	1.10	4.88	2.05
Máximo	7.52	6.23	7.55	2.67	6.82	5.34	8.02	8.02
Cuenta	9	10	10	10	10	10	6	10

Figura 20: Variación mensual de la napa freática para la zona II

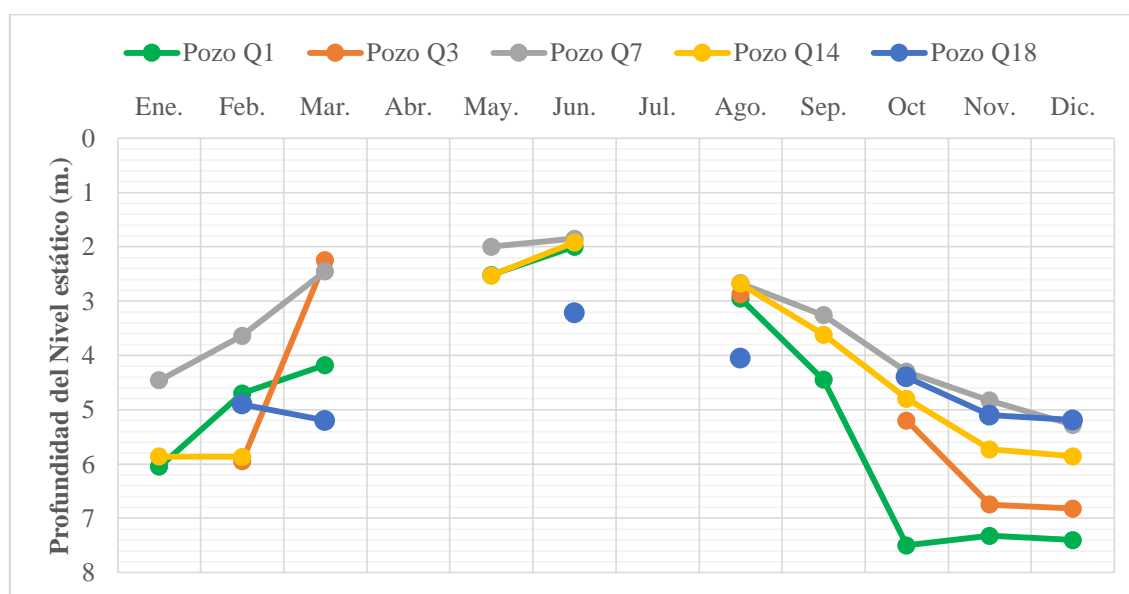


Zona III: comprendida por los sectores Canaval y Don Andrés donde se ubican 5 pozos. De la observación se desprende que el pozo Q-01 tiene la mayor variación de nivel freático, con un valor igual a 5.50 metros, con una profundidad máxima y mínima de 7.50 y 2.00 metros respectivamente. Asimismo, la menor variación de nivel de agua la posee el pozo Q-18, con un valor igual a 1.98 metros y una profundidad máxima y mínima de 5.20 y 3.22 metros respectivamente. La desviación estándar sugiere una mayor dispersión de datos para el pozo Q-01, y menor para el pozo Q-18. El curtosis hallado muestra una distribución simétrica de niveles. El Tabla 21 expone datos de estadística descriptiva obtenidos para la zona. La Figura 21 muestra la variación mensual de la napa freática.

Tabla 21: Datos estadísticos de niveles mensuales de la napa - zona III

Indicadores	Pozo				
	Q-03	Q-18	Q-07	Q-01	Q-14
Media	4.72	4.58	3.47	4.91	4.32
Desviación estándar	1.92	0.74	1.22	2.08	1.64
Varianza de la muestra	3.68	0.55	1.48	4.31	2.69
Curtosis	-2.20	0.60	-1.49	-1.54	-1.91
Coefficiente de asimetría	-0.18	-1.17	0.06	0.04	-0.38
Rango	4.57	1.98	3.43	5.50	3.95
Mínimo	2.25	3.22	1.85	2.00	1.92
Máximo	6.82	5.20	5.28	7.50	5.87
Cuenta	7	7	10	10	9

Figura 21: Variación mensual de la napa freática para la zona III

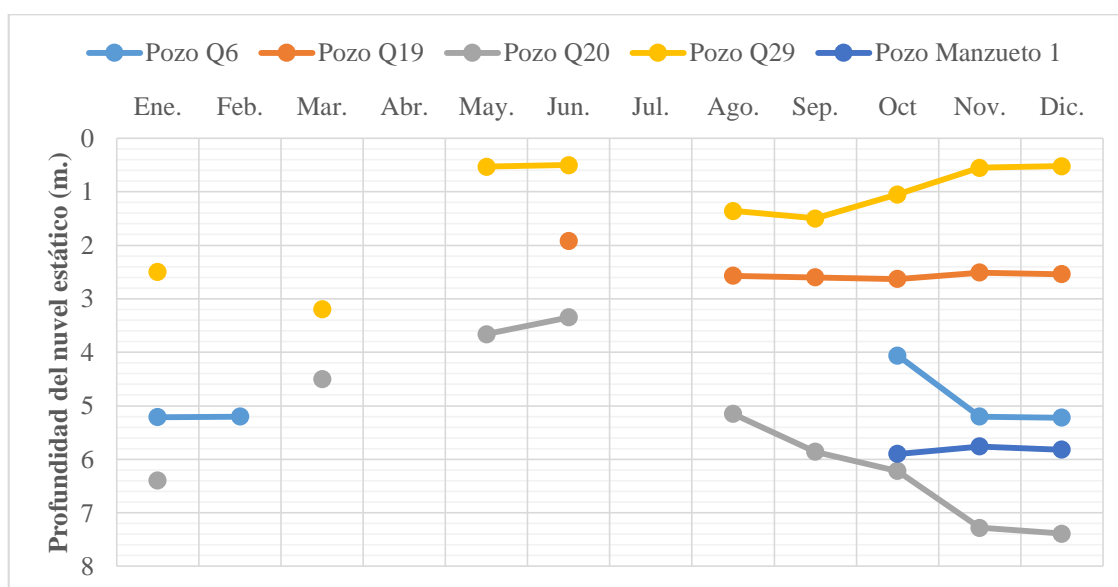


Zona IV: comprendida por los sectores Manzueto, Don Fernando y Don Pepe, donde se ubican 6 pozos. De la observación se desprende que el pozo Q-20 tiene la mayor variación de nivel de agua, con un valor igual a 4.04 metros, con una profundidad máxima y mínima de 7.39 y 3.35 metros respectivamente. Asimismo, la menor variación de nivel de agua la posee el pozo Q-19, con un valor igual a 0.71 metros, con una profundidad máxima y mínima de 2.63 y 1.92 metros respectivamente. El Tabla 22 expone datos de estadística descriptiva obtenidos para un mayor análisis del comportamiento de las variaciones del nivel freático. La Figura 22 muestra la variación mensual de la napa para la zona expuesta.

Tabla 22: Datos estadísticos de niveles mensuales de la napa - zona IV

Indicadores	Pozo				
	Q-06	Q-19	Q-20	Q-29	Manzueto-1
Media	4.98	2.46	5.53	1.30	5.83
Desviación estándar	0.51	0.27	1.47	0.97	0.07
Varianza de la muestra	0.26	0.07	2.16	0.94	0.00
Curtosis	4.99	5.49	-1.24	0.39	-
Coficiente de asimetría	-2.23	-2.31	-0.28	1.17	0.42
Rango	1.16	0.71	4.04	2.70	0.14
Mínimo	4.06	1.92	3.35	0.50	5.76
Máximo	5.22	2.63	7.39	3.20	5.90
Cuenta	5	6	9	9	3

Figura 22: Variación mensual de la napa freática en la zona IV



En resumen, se desprende que existe una variación notoria durante el año. Las mayores profundidades del nivel de la napa freática se presentan durante el mes de diciembre, que representa el punto de inflexión para que sus valores tiendan a ascender, llegando a un valor máximo durante el mes de junio, en el que los niveles empiezan su descenso durante los meses posteriores. Este ciclo es repetitivo para la mayoría de pozos, tal y como puede apreciarse en la mayoría de representaciones gráficas de los monitoreos.

4.4. Hidráulica subterránea

4.4.1. Pruebas de bombeo

En la zona de estudio se han ejecutado diversas pruebas de bombeo por instituciones gubernamentales y la empresa AIPSAA, propietaria de los campos. Las pruebas de mayor antigüedad datan del año 1983, realizado por el ex Instituto Nacional de Ampliación Agrícola (INAF), dentro del marco del Proyecto Especial de Rehabilitación de Tierras Costeras, donde se ejecutaron 4 pruebas por el método del caudal específico en los pozos denominados Q-21, Q-23, Q-24 y el pozo IRHS 52 (inventario de 1983) actualmente inexistente. El MINAGRI ejecutó 04 pruebas de bombeo durante el año 2005, no obstante la ausencia de piezómetros obligó a que 3 de las pruebas se realicen solo en el pozo de bombeo, tales fueron para los pozos Q-13, Q-14, Q-20. La prueba realizada en el pozo Q-17 contó con el piezómetro IRHS 18 (actualmente inexistente), pudiendo calcular los

parámetros hidrodinámicos para ambos pozos. No obstante, no se han considerado los valores de conductividad hidráulica ni transmisividad del pozo IRHS 18 por tener una ubicación desconocida.

El día 18 de septiembre del 2018 la empresa AIPSAA ejecutó una prueba de bombeo en el pozo Q-01, cuyas mediciones han sido reinterpretados con el software Aquifer Test 2016.1 en las fases de descenso y recuperación. Los datos e interpretación pueden apreciarse en las Tablas 45 y 46 y en las Figuras 33 y 34, todos pertenecientes al Anexo 1.

Con el fin de complementar los datos de parámetros hidrodinámicos, el día 20 de diciembre del año 2018 se ejecutó una prueba teniendo como pozo de bombeo a Q-06 y como pozo de observación al Q-20, sin embargo, no acontecieron abatimientos en este último por lo que se interpretó, solamente, los datos obtenidos en el pozo Q-06 para las fases de descenso y recuperación. Los datos e interpretación pueden apreciarse en los Tablas 46 y 47 y en las Figuras 35 y 36, todos pertenecientes al Anexo 1.

Para la presente investigación se utilizarán los resultados de las pruebas de bombeo ejecutadas por el MINAGRI, la empresa AIPSAA, y la UNALM, mostradas en el Tabla 23.

Tabla 23: Pozos utilizados para pruebas de bombeo

Pozo	IRHS	Coordenadas UTM WGS'84		Función	Realizado por:
		Este (m)	Norte (m)		
Q-01	28	197219	8827650	Pozo de bombeo	AIPSAA
Q-06	33	196718	8825027	Pozo de bombeo	UNALM
Q-13	10	197868	8830571	Pozo de bombeo	MINAGRI
Q-14	27	197858	8830131	Pozo de bombeo	MINAGRI
Q-20	32	197602	8828421	Pozo de bombeo	MINAGRI
Q-17	19	197977	8828585	Pozo de bombeo	MINAGRI
-	18	-	-	Piezómetro	MINAGRI

4.4.2. Conductividad Hidráulica (k)

La conductividad hidráulica posee una variación dependiendo del lugar donde se ha ejecutado la prueba. Los valores oscilan entre los 11.32 y 117.17 m/d, tal y como lo

muestra el Tabla 25 de análisis estadístico. El valor promedio tiene un valor igual a 66.23 m/d, que es característico de una composición geológica de gravas y arenas (Custodio y Llamas 2001) propias de una zona de depósito aluvial. Además, se le puede asignar una calificación estimativa de permeabilidad alta según Villanueva e Iglesias (1985), lo que revelan las buenas características hidráulicas del acuífero. Los resultados de K detallados para las fases de descenso y recuperación pueden apreciarse en el Tabla 24.

Tabla 24: Resultados de conductividad hidráulica

Pozo	Conductividad Hidráulica (m/s)			Promedio K (m/d)
	Descenso ($K \times 10^{-4}$)	Recuperación ($K \times 10^{-4}$)	Promedio ($K \times 10^{-4}$)	
Q-01	5.23	11.01	8.12	70.16
Q-06	7.44	13.65	10.55	91.11
Q-13	0.37	2.25	1.31	11.32
Q-14	10.70	16.55	13.63	117.72
Q-20	6.58	3.51	5.05	43.59
Q-17	7.16	8.42	7.79	67.31

Tabla 25: Datos estadísticos de valores de conductividad hidráulica (m/d)

Indicador	Valor
Media	66.87
Desviación estándar	36.91
Varianza de la muestra	1362.45
Rango	106.40
Mínimo	11.32
Máximo	117.72
Cuenta	6.00

Los valores de conductividad hidráulica han sido promediados por sector según la ubicación de los pozos que cuentan con prueba de bombeo, es así como se generó el Mapa 11 del Anexo 2, que delimitan zonas definidas según la conductividad hidráulica promedio. Esta información tendrá una función importante para el desarrollo del ítem de modelamiento numérico. Obsérvese las K por zonas en el Tabla 26.

Tabla 26: Zonas de conductividad hidráulica

Sector	K promedio x 10 ⁻⁴ (m/s)	K promedio (m/d)
Zona I	1.31	11.32
Zona II	9.85	85.06
Zona III	7.80	67.35

4.4.3. Transmisividad (T)

Los valores de transmisividad tienen un promedio igual a 1672 m²/d obteniendo una calificación estimativa de muy alta transmisividad (Villanueva e Iglesias, 1982). Los valores varían desde un mínimo de 298.08 m²/d, en el pozo Q-13; a un máximo de 3456 m²/d, en el pozo Q-06. La estadística de los datos de transmisividad puede apreciarse en la Tabla 28.

Tabla 27: Resultados de transmisividad

Pozo	Transmisividad (m ² /s)			Promedio T (m ² /d)
	Descenso (T x 10 ⁻²)	Recuperación (T x 10 ⁻²)	Promedio (T x 10 ⁻²)	
Q-01	2.09	4.39	3.24	2799.36
Q-06	2.82	5.18	4.00	3456.00
Q-13	0.1	0.59	0.35	298.08
Q-14	0.79	1.22	1.01	868.32
Q-20	1.69	0.90	1.30	1118.88
Q-17	1.59	1.87	1.73	1494.72

Tabla 28: Datos estadísticos de valores de transmisividad (m²/d)

Indicador	Valor
Media	1672.56
Desviación estándar	1210.33
Varianza de la muestra	1464904.47
Rango	3157.92
Mínimo	298.08
Máximo	3456.00
Cuenta	6.00

4.4.4. Porosidad Efectiva

Al haberse ejecutado solo una prueba de bombeo con la medición de un piezómetro de observación, se obtuvo un único valor de porosidad efectiva igual a 1.35% en el pozo de observación IRHS 18, valor característico de un material permeable poroso intergranular

con composición de gravas y arenas, propio de un acuífero en medio aluvial. Dicho parámetro se ha generalizado para toda la zona de estudio.

4.5. Geometría y composición del acuífero

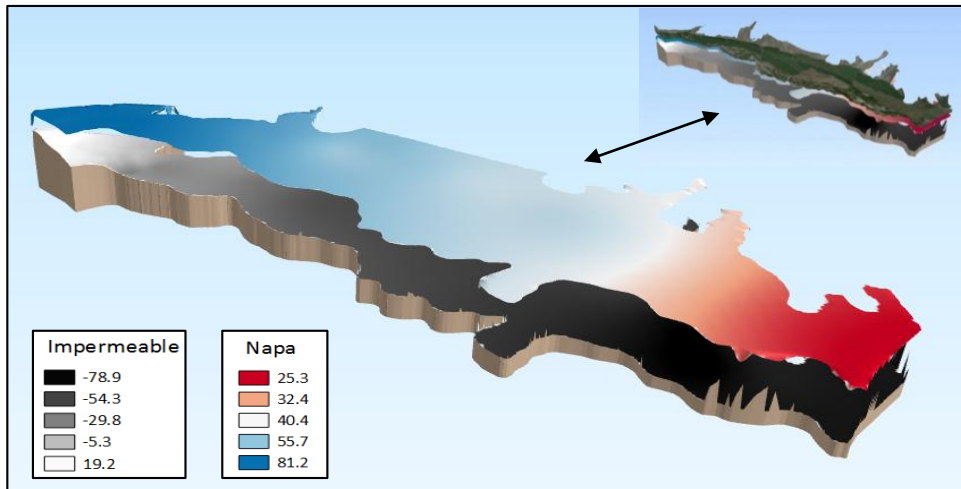
La forma geométrica del acuífero ha sido deducida de la información de niveles piezométricos del nivel estático, así como las investigaciones geofísicas a través de SEV y la descripción geológica de la zona, los cuales han permitido aproximar la distribución espacial del acuífero detallando sus límites verticales y laterales.

4.5.1. Basamento rocoso y napa freática

Se han determinado la distribución espacial de la napa freática en base a las mediciones de los niveles estáticos, desarrollados a detalle en el Ítem 4.3. La media del nivel piezométrico se obtuvo con la herramienta *Zonal Raster Statistics* del software SIG, donde cuantificó un valor igual a 51.33 metros. La morfología de la napa freática sugiere un gradiente hidráulico de 0.6% conforme la orientación suroeste, desde el sector Tunán; donde se ubican los valores mayores de carga hidráulica, hacia el sector Manzuelo; donde se ubican los menores. La napa posee una tendencia regularmente paralela a la pendiente topográfica, lo cual demuestra el carácter libre de confinamientos del acuífero.

Al igual que la napa freática, el basamento posee orientación similar, disminuyendo su altitud conforme a la dirección del río Fortaleza, en dirección suroeste. Representa el límite vertical inferior del acuífero. La media de su altitud, obtenido gracias al SIG, cuantificó un valor de -47.08 metros. La Figura 23 muestra la distribución espacial en tres dimensiones de la superficie topográfica, la napa freática y el basamento rocoso, dando énfasis en estos dos últimos en metros sobre el nivel del mar (msnm).

Figura 23: Distribución espacial del basamento rocoso y la napa freática



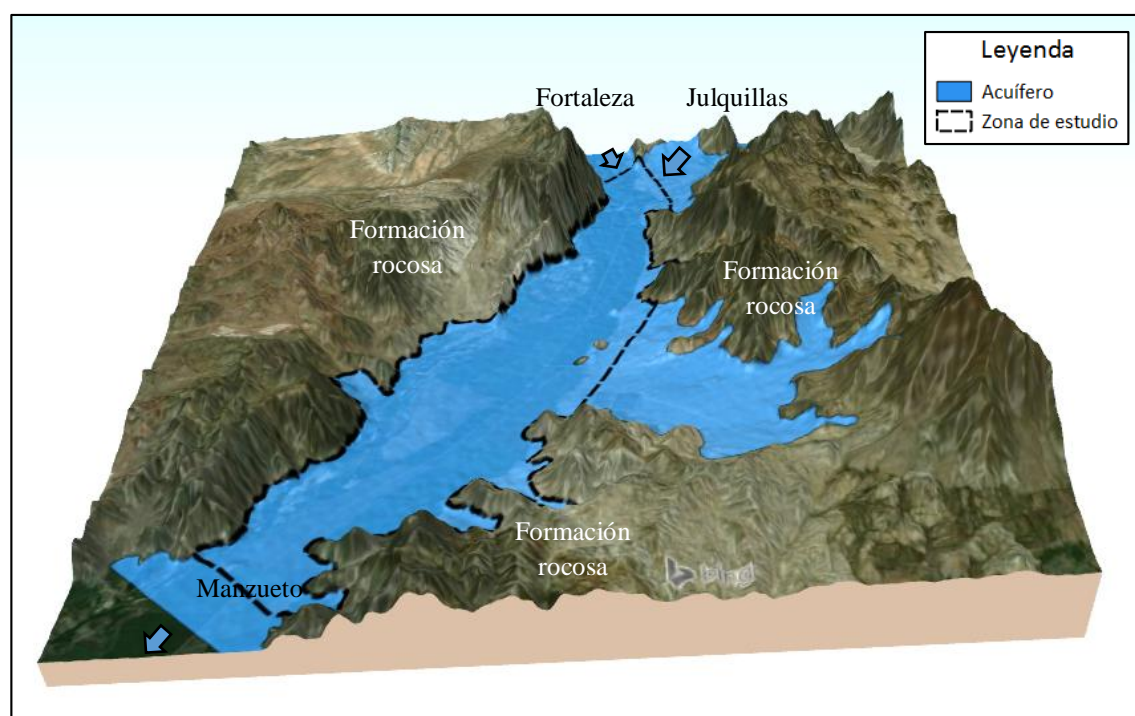
4.5.2. Espesor del acuífero

El espesor saturado cuantificó una media de 98.41 metros para diciembre del 2018, encontrando sus mayores valores en las zonas de menor altitud; sector Manzuelo, y sus menores valores en las zonas de mayor altitud; sector Tunán, sugiriendo que conforme se sigue la orientación suroeste, el espesor saturado aumenta su magnitud. El espesor saturado varía dependiendo directamente de las fluctuaciones de la napa freática, las cuales toman sus mayores valores en los meses de lluvia y los menores, en estiaje.

4.5.3. Condiciones de límites laterales

El acuífero en estudio se encuentra delimitado de forma natural a través de afloramientos rocosos localizados a ambos flancos del curso fluvial del río Fortaleza, tal y como se muestra en la Figura 24, los cuales se encuentran comprendidos por la Formación Casma, de origen volcánico, y por las Dioritas y Tonalitas, de origen volcánico intrusivo, que, para efectos del desarrollo de la presente investigación, se asumirán como formaciones impermeables. Geomorfológicamente dichas formaciones se presentan como montañas y colinas en roca intrusiva, y volcanos sedimentaria de pronunciada altitud.

Figura 24: Delimitación de la zona de estudio



4.5.4. Composición litológica

El acuífero se encuentra almacenado en pleno depósito aluvial compuestos por sedimentos no consolidados de edad cuaternaria que se acumulan en el valle, formando parte del cono deyectivo del río Fortaleza. Producto de ello, se ha evidenciado su composición detrítica en los perfiles litológicos de las perforaciones de los pozos mostradas en la Figura 37 del Anexo 1, donde se han extraído cantos rodados de variadas dimensiones, arenas gruesas y finas, gravas, y en algunos sectores a máxima profundidad: arcillas suaves y duras. Superficialmente se han encontrado rellenos de origen antrópico de espesor variable entre 1 y 6 metros, representado por tierra de cultivo agrícola. Es preciso añadir que ninguna perforación obtuvo una profundidad que evidencie fehacientemente la profundidad del basamento rocoso base del acuífero.

4.6. Flujo subterráneo y almacenamiento del acuífero

4.6.1. Origen y caudal de Flujo subterráneo

Se ha identificado que el flujo subterráneo que recorre la zona de estudio proviene de las quebrada Julquillas y Fortaleza en su límite noreste, que además, aumenta su caudal con las distintas formas de recarga representadas principalmente por la percolación del agua de

riego y del flujo fluvial del río Fortaleza. La Figura 45 del Anexo 1 muestra dichas recargas. El flujo subterráneo de la zona de estudio fue calculado a partir de las redes de flujo producto de las cargas hidráulicas de mayor y menor valor en la zona de estudio, las cuales cuantificaron un gradiente hidráulico de 0.6%. Asimismo, el área de la sección promedio, producto de: (i) la longitud superficial de la sección transversal promedio con (ii) el espesor saturado promedio determinaron un área de 196 812 m². La conductividad hidráulica promedio utilizada se obtuvo en el Ítem 4.4 de Hidráulica Subterránea, el cual obtuvo un valor igual a 66.87 m/d. El flujo subterráneo cuantificó un valor igual a 914.29 l/s, que para un tiempo de un año determina un caudal de 28.83 MMC.

4.6.2. Almacenamiento del reservorio acuífero

Para el cálculo del almacenamiento acuífero se utilizaron los componentes descritos a continuación: (i) la porosidad efectiva determinada en el ítem 3.2 cuantificó un valor igual a 0.0135, (ii) el espesor promedio del acuífero se obtuvo de la diferencia entre la altitud promedio de la napa freática con la altitud promedio del basamento rocoso, que con el uso del software GIS, cuantificaron 51.33 msnm y -47.08 msnm respectivamente, produciendo un espesor promedio igual a 98.41 m, y por último (iii) la superficie de la napa freática adquirió 1882.33 ha. El producto de los componentes mencionados produjo un volumen de agua subterránea igual a 25.01 MMC.

4.7. Hidrogeoquímica

La evaluación de los resultados de laboratorio de muestras de agua permite, en primera instancia, conocer la calidad del recurso hídrico almacenado en el acuífero de la zona de estudio. Esta actividad depende, entre otros factores, de (1) la litología del acuífero, (2) la velocidad de circulación, (3) y la calidad del agua infiltrada y su relación con trasvases.

Se han analizado un total de 15 muestras de agua tomadas en diferentes pozos distribuidos en toda la extensión de nuestra zona de estudio, durante el mes de junio del 2017 y septiembre del 2018. El análisis físico químico fue realizado en el Laboratorio de Agua y Suelo de la Universidad Agraria La Molina (UNALM), los cuales ofrecen resultados cuantitativos de la concentración de iones: Calcio (Ca⁺²), Magnesio (Mg⁺²), Sodio (Na⁺), Potasio (K⁺), Cloro (Cl⁻), Sulfato (SO⁻⁴), Bicarbonato (HCO⁻³), Carbonato (CO⁻²), y Nitrato (NO⁻³). Además de las características físicas de Temperatura (°C), potencial de

Hidrógeno (pH), y Conductividad Eléctrica (dS/m a 25 °C). Dichos resultados pueden observarse en el Tabla 49 del Anexo 1.

4.7.1. Características Físicas

a. Conductividad Eléctrica (CE).- Los valores de conductividad eléctrica varían entre los valores de 0.62 y 1.31 dS/m, con una media de 0.88 dS/m, que corresponde a aguas dulces de mediana mineralización. Se ha elaborado un plano de conductividad (Plano 12 del Anexo 2) que expone su variabilidad espacial, evidenciando dos zonas de conductividad: (1) la zona noreste; con las CE de mayor valor, y la zona suroeste; con las CE más bajas. Cabe mencionar que el agua de los pozos Q-21, Q-03 y Q-14 son los que presentan el mayor valor de CE, y tienen una ubicación cercana al límite impermeable a la margen izquierda del río fortaleza. Los valores de CE se encuentran dentro del rango permitido por el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) categoría 3, cuyo máximo valor es de 1.5 dS/m.

b. Potencial de Hidrógeno (pH).- Los valores de pH fluctúan entre los valores de 6.38 y 7.71, con una media de 7.33, valor muy cercano al neutro. A partir de los 15 resultados se han realizado el Mapa 13 de pH (Anexo 2), donde se logra identificar dos zonas con una notoriedad de variación de pH: la zona noreste; con pH ligeramente alcalino, y la zona suroeste, con pH ligeramente ácido. Los valores de pH se encuentran dentro del rango permitido por el Ambiental (ECA) categoría 3.

4.7.2. Características Químicas

a. Clasificación química

Se puede identificar una predominancia del catión Calcio y del anión Bicarbonato, aunque en algunos casos el anión Cloro tiende a tener una mayor concentración. Para visualizar los datos y facilitar su clasificación se han ploteado los diagramas de Stiff (Mapa 14 del Anexo 2), Piper (Figuras 38 y 39 del Anexo 1) y Schoeller (Figura 40 y 41 del Anexo 1). La clasificación química predominante, con el 80% de muestras, es del tipo Bicarbonatada Cálcica (Tabla 29), que corresponden a

aguas jóvenes de recorrido local, poca profundidad de infiltración, y poco tiempo de residencia en el subsuelo. Es importante indicar que las concentraciones del ion nitrato tienen valores muy bajos, cercanos a cero, lo cual indica la ausencia de problemas de contaminación relacionados al riego de cultivos, teniendo en cuenta que en la zona de estudio se practica una agricultura intensiva.

Tabla 29: Clasificación química del agua de los pozos analizados

Pozo	IRHS	Coordenadas UTM WGS'84		Clasificación
		Este (m)	Norte (m)	
Q-01	28	197219	8827650	Bicarbonatada Cálcica
Q-03	25	197372	8827107	Bicarbonatada Cálcica
Q-04	16	197548	8829950	Clorurada Cálcica
Q-06	33	196718	8825027	Bicarbonatada Cálcica
Q-07	29	196862	8826256	Bicarbonatada Cálcica
Q-11	20	197602	8828421	Bicarbonatada Cálcica
Q-13	9	197868	8830571	Bicarbonatada Cálcica
Q-16	31	196380	8826192	Bicarbonatada Cálcica
Q-17	18	197977	8828585	Bicarbonatada Cálcica
Q-19	35	195559	8825585	Bicarbonatada Cálcica
Q-21	15	197934	8829853	Clorurada Cálcica
Q-24	8	197780	8830812	Bicarbonatada Cálcica
Q-25	21	197600	8828143	Bicarbonatada Cálcica
Q-27	11	197527	8830487	Clorurada Cálcica
Q-29	36	195506	8824769	Bicarbonatada Cálcica

b. Aptitud para riego

Tal y como se muestra en el Tabla 49 del Anexo 1, la clasificación predominante es del tipo C₃S₁, que representan a aguas altamente salinas, que no pueden usarse en suelos con mal drenaje, debiendo regar solo especies vegetales muy tolerantes a sales. Además, presentan una baja concentración en sodio, y pueden utilizarse para riego de cultivos con pocas posibilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Las Figuras 42 y 43 del Anexo 1 muestran la clasificación de los pozos según la norma Wilcox.

c. Dureza

Los valores de dureza varían entre un máximo de 465.0 mg/L de CaCO₃ y un mínimo de 272.5 mg/L de CaCO₃, indicando que se trata de un agua dura a muy

dura. Otro parámetro importante para la clasificación de la dureza son los Grados Hidrométricos Franceses (°F), que en el presente análisis alcanza un valor máximo y mínimo de 46.54 y 27.28°F, que representan un agua dura. La determinación de la dureza demuestra que el agua posee un alto grado de mineralización; en particular, una alta concentración de magnesio y calcio. El Tabla 49 del Anexo 1 muestran los parámetros de dureza calculados para las 15 muestras.

4.8. Recarga del acuífero

a. Recarga por el flujo de canales o ríos (Rc)

Este tipo de recarga se estimó utilizando los caudales del río Fortaleza al 75% de persistencia brindados por el PROFODUA, donde expone que, entre los meses de octubre a junio no existe agua disponible en el río, ya que se encuentra repartida para el riego de los campos de las comisiones de regantes del valle. No obstante, en los meses de julio, agosto y septiembre existe un superávit hídrico, que en total cuantifica un valor igual a 20.99 MMC. Se ha asumido una tasa de infiltración o recarga de 0.1, teniendo en cuenta la granulometría de una mezcla de arenas limpias y gravas, predominante en el lecho del río, obteniendo una recarga anual de 2.1 MMC, que expresado en l/s obtiene un valor igual a 262.9. El Tabla 30 muestran los caudales mensuales de superávit hídrico y los destinados a la recarga del acuífero. Los canales son revestidos, y la infiltración por dicho concepto se calculó con la eficiencia de conducción, todo ello incluido en la recarga por riego.

Tabla 30: Volúmenes mensuales de recarga de infiltración por flujo de río

Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Superávit (MMC/mes)	0	5.71	11.34	3.94	0	0	0	0	0	0	0	0
Recarga (MMC/mes)	0	0.57	1.13	0.39	0	0	0	0	0	0	0	0
Recarga (l/s)	0	213.2	423.4	152.0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total (MMC/año)												2.10

b. Recarga por precipitación (Rv)

Los valores de precipitación brindados por la estación meteorológica “Paramonga” evidencian la ausencia de lluvias durante todos los meses de año. La ausencia de lluvias tipifica la aridez característica de esta parte de la costa peruana causada por

la presencia de los andes y la corriente marina fría de Humboldt. También se presenta una alta humedad con un cielo nuboso y neblinas con garúas en los meses de invierno.

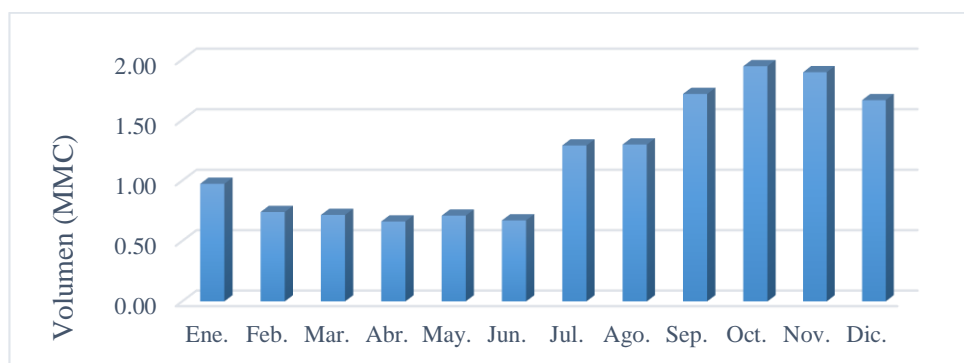
c. Recarga por riego de cultivos (Rr)

Según los registros de la empresa AIPSAA, el volumen de agua promedio destinado para el riego dentro de nuestra zona de estudio cuantifica un valor igual a 14 286 994.30 m³ con valores mensuales mayores durante los meses de julio a diciembre, y menores, durante los meses de enero a junio tal y como lo muestra el Tabla 31 y la Figura 25.

Tabla 31: Volúmenes mensuales de agua destinada para el riego

Ítem	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Caudal (MMC/mes)	0.97	0.74	0.72	0.66	0.71	0.67	1.29	1.30	1.72	1.95	1.90	1.67
Caudal (l/s)	363.7	306.0	267.5	255.5	265.3	259.0	482.0	484.8	662.1	726.5	731.4	621.7
Total (MMC)												14.29

Figura 25: Volumen mensual promedio para riego



La eficiencia de riego estimada para el sector de estudio es de 43,2%, donde se identificó una conducción externa mediante canales revestidos de concreto en regular estado de conservación, una distribución parcelaria a través de tuberías y una aplicación por la técnica del riego por goteo con un manejo regular. El volumen anual de infiltración por este concepto asciende a un valor igual a 8 115 012.78 m³, que, en promedio, representa un caudal de aporte constante de 257.33 l/s. Los volúmenes mensualizados en las unidades de MMC/mes y en l/s pueden apreciarse en el Tabla 32.

Tabla 32: Volúmenes de recarga por riego

Ítem	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Recarga (MMC/mes)	0.55	0.42	0.41	0.38	0.40	0.38	0.73	0.74	0.97	1.11	1.08	0.95
Recarga (l/s)	206	173	151	145	150	147	274	275	376	413	415	353
Total de recarga (MMC)												8.12

d. Recarga por infiltración de reservorios o tanques

En la zona de estudio existen 5 reservorios. Se encuentran cubiertas por un material compuesta de geomembrana sintética que impermeabiliza el contacto con el suelo, impidiendo la infiltración del agua hacia el subsuelo. Es por tal motivo que el aporte de agua al acuífero, por este término, tendrá un valor nulo.

e. Flujo superficial entrante (Q_{se})

Los flujos entrantes son utilizados enteramente en el riego de los cultivos, por lo que la recarga por este concepto se encuentra incluido en el ítem del riego de los cultivos.

4.9. Descarga del acuífero**a. Descarga a cuerpos de agua; manantiales, lagos, etc.**

No se han identificado manantiales, lagos, ni cuerpos de agua en el sector, que puedan representar una descarga significativa para el acuífero.

b. Descarga por pozos (E_p)

Los valores de los volúmenes de explotación se muestran en el desarrollo del ítem 4.1 de inventario de pozos. Con la finalidad de obtener un volumen promedio mensual real de explotación se prescindió de volúmenes anormales en el proceso de promediación. Dichos valores deben error a motivos antropogénicos; como el tiempo de mantenimiento del pozo que lo hace disfuncional por cierto tiempo, problemas con el funcionamiento o descalibración del dispositivo de medición volumétrico, entre otros. Es así como se obtiene un valor de volumen anual promedio igual a 6 404 146.70 m³, equivalente a 203.07 l/s, extraídos por una batería de 25 pozos que operan en el sector. Los caudales extraídos promedios

mensuales se pueden observar en el Tabla 33.

Tabla 33: Valores de volúmenes mensuales de explotación por pozos

Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Caudal (MMC/mes)	0.55	0.27	0.17	0.16	0.28	0.47	0.49	0.64	0.73	0.87	0.92	0.86
Caudal (l/s)	205.6	112.5	62.1	59.8	103.6	179.5	183.0	239.4	282.7	324.7	356.3	321.0
Total (MMC/año)												6.40

c. Descarga por Evapotranspiración (Et)

En base a los valores de Evapotranspiración potencial calculados en el ítem 3.2.2, se procedió a la obtención de los valores de evapotranspiración real, utilizando los datos de Kc para el cultivo de caña de azúcar, mostrados por el PROFODUA para el valle Fortaleza. Utilizando dichos parámetros y el área donde la napa freática tiene una profundidad máxima de dos metros (FAO), con un valor igual a 287.28 hectáreas, se logró adquirir la descarga por este concepto cuyas magnitudes mensuales se muestran en el Tabla 34, cuantificando un total de 2.69 MMC/año.

Tabla 34: Valores mensuales de descarga por evapotranspiración

Componente	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Etp (mm/día)	3.54	3.70	3.59	2.99	2.24	1.69	1.60	1.74	2.16	2.60	2.97	3.23
Kc	0.93	0.98	1.04	1.15	1.19	1.17	1.11	0.85	0.73	0.73	0.81	0.91
Etr (mm/día)	3.29	3.63	3.73	3.44	2.67	1.98	1.78	1.48	1.58	1.90	2.41	2.94
Etr (l/s)	109.5	120.6	124.1	114.3	88.6	65.7	59.1	49.2	52.4	63.1	80.0	97.7
Etr (MMC/mes)	0.29	0.29	0.33	0.30	0.24	0.17	0.16	0.13	0.14	0.17	0.21	0.26
Total (MMC/año)												2.69

d. Flujo superficial saliente (Q_{ss})

No existen flujos superficiales salientes adicionales al río Fortaleza, cuya recarga fue calculada anteriormente.

4.10. Balance hídrico

El balance hídrico está determinado por el cambio de almacenamiento, representado por la diferencia entre los ingresos y los egresos a nuestro sistema acuífero. El detalle de dicha diferencia puede observarse en el siguiente Tabla 35 donde se observa un aumento de volumen de almacenamiento por un valor de 1.13 MMC/año, que indica que existe una

cantidad de recarga que supera al total de descargas. El principal aportante se produce por la infiltración por riego y la principal descarga de debe a la explotación por pozos.

Tabla 35: Balance hídrico del acuífero

Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total (MMC/año)
Recarga													
Por riego (l/s)	206.6	173.8	151.9	145.1	150.7	147.1	273.8	275.4	376.1	412.6	415.4	353.1	10.22
Por río (l/s)	0	213	423	152	0	0	0	0	0	0	0	0	
Descarga													
Por pozos (l/s)	205.6	112.5	62.1	59.8	103.6	179.5	183	239.4	282.7	324.7	356.3	321	9.09
Etr (l/s)	109.5	120.6	124.1	114.3	88.6	65.7	59.1	49.2	52.4	63.1	80.0	97.7	
Δ Almacenamiento													1.13

4.11. Modelamiento conceptual

La zona de estudio se encuentra conformada, en su mayoría, por depósitos aluviales compuestos por sedimentos no consolidados de edad cuaternaria que poseen una alta permeabilidad, la cual ha permitido el almacenamiento de agua subterránea durante millones de años, y, en consecuencia, conformar el reservorio acuífero de tipo libre y de conformación detrítica por materiales como cantos rodados, arenas gruesas y finas, gravas, y arcillas, depositados gravitacionalmente en la zona de estudio. Los límites del acuífero se deben a formaciones de muy baja permeabilidad causados principalmente por la geodinámica interna, que se presentan como montañas y colinas en roca intrusiva y volcánica sedimentaria, que condiciona la forma del acuífero haciéndola alargada con orientación noreste - suroeste. Además, forma el basamento rocoso que cumple la función de retener la infiltración vertical, indicando la máxima profundidad del acuífero.

Se ha considerado una sola capa o unidad hidroestratigráfica, con límite vertical superior representado por la superficie topográfica, e inferior, por el basamento rocoso de muy baja permeabilidad. Además, posee una conductividad hidráulica media igual a 66.23 m/d, la cual debe su valor a la porosidad intergranular del subsuelo y es calificado estimativamente como de buena permeabilidad. También, una porosidad efectiva de 1.35% propio de depósitos aluviales, el cual se generalizó para la zona de estudio. El espesor saturado del acuífero posee un valor medio de 98.41 metros para diciembre del 2018, con menores espesores en la zona noreste, que tienden a aumentar en dirección suroeste.

El flujo de agua subterránea de la zona de estudio debe su caudal a las interconexiones hidráulicas con las quebrada Julquillas y Fortaleza en el límite noreste. El flujo subterráneo aumenta su caudal por las distintas formas de recarga en el valle, donde el agua infiltra a través del suelo, recorre la zona insaturada del subsuelo, y en última instancia, recarga el acuífero. Partiendo desde el sector noreste, el flujo subterráneo toma la dirección sur; hasta el término del sector Quebrada, y posteriormente, dirección suroeste; hasta el término del sector Manzuelo, obteniendo un nivel máximo y mínimo de carga hidráulica igual a 81 y 30 m.s.n.m. respectivamente. La napa freática posee una disposición regularmente paralela al relieve topográfico, con una gradiente hidráulica de 0.6%, confirmando su carácter libre de confinamientos. El flujo subterráneo cuantifica un volumen anual igual a 28.83 MMC. La Figura 44 del Anexo 1 muestra la dirección del flujo, además de la piezometría y los límites de la zona de estudio.

El monitoreo de los niveles de la napa freática muestra que sus menores profundidades están presentes durante el mes de junio el cual representa el punto de inflexión para que la napa tienda a descender paulatinamente hasta el mes de diciembre, que es cuando empieza su recuperación hasta el mes de junio del próximo año. Dicho comportamiento guarda una relación directamente proporcional con la intensidad de riego y la explotación de los pozos de agua subterránea.

Los pozos son la principal fuente de riego durante los meses de junio a diciembre (estiaje), mas no, en los meses posteriores de diciembre a abril (avenidas), periodo en el cual reducen su funcionamiento permitiendo la recuperación de la napa freática, además durante dicho tiempo se tiene como principal fuente de agua al río Pativilca y Fortaleza, que recargan el acuífero a través del riego, favoreciendo la elevación de los niveles de la napa freática hasta junio, mes en el cual la explotación por pozos aumentan gradualmente debido a la falta de agua de los ríos, deprimiendo la napa freática hasta el mes de diciembre. El ciclo de evolución de la morfología de la napa freática descrito anteriormente es repetitivo durante los años debidos principalmente a la oferta hídrica brindada por la estacionalidad hidrológica, las tasas temporales de explotación de pozos, y el riego de los campos agrícolas.

La química del agua subterránea muestra los mayores valores de mineralización en la zona

noreste, y los menores, en la zona suroeste. Además, pertenece mayormente al grupo de las bicarbonatadas cálcicas, que corresponden a aguas jóvenes de recorrido local y poca profundidad de infiltración. Obsérvese la Figura 45 del Anexo I.

La principal fuente de recarga se debe a la percolación del agua proveniente del riego de la caña de azúcar, seguido por la percolación de agua a través de los subálveos del río Fortaleza originado por el tránsito de caudal en los meses de avenidas, cuantificando un total estimado en 10.22 MMC. La ausencia de lluvias tipifica la aridez característica de esta parte de la costa peruana, y descarta la recarga por este concepto. La principal forma de descarga se realiza a través de la explotación con pozos tubulares, que analizándolos individualmente evidencian un potencial heterogéneo en la zona de estudio, con un caudal medio, máximo y mínimo igual a 30, 70 y 5 l/s respectivamente, seguido por los egresos debido a la evapotranspiración, el cual se cuantificó teniendo la suposición de que ocurre en los sectores que poseen un nivel freático superior a los dos metros de profundidad. Los egresos de agua subterránea cuantificaron un valor anual igual a 9.09 MMC.

El cambio de almacenamiento anual muestra que existe un superávit de agua subterránea por un valor de 1.13 MMC, debido a que el total de recarga supera a las descargas del acuífero, determinando un estado de subexplotación.

4.12. Modelamiento numérico

4.12.1. Dominio del modelo

El dominio del modelo se ubica en la cuenca Fortaleza, limitada en el suroeste por el sector Manzueto, y, por el noreste por el sector Tunán. Para determinar los límites de modelamiento numérico, se tomó como referencia la base conceptual y se delimitó un polígono rectangular mostrado en el Mapa15, que incluye la zona de estudio y sectores de importancia hidrogeológica, tales como afloramientos rocosos, depósitos aluviales, cursos fluviales, pozos de extracción, piezometría, entre otros. Las coordenadas de los límites del polígono son las siguientes; por el norte, 8831409 m; por el sur, 8821775 m; por el oeste, 192785 m; y por el este, 198798 m. El área de la zona de modelamiento vista en planta cuantifica 58.57 km², con un perímetro de 31292 m.

Los límites verticales del modelo fueron establecidos por: el Modelo de Elevación Digital (DEM), alcanzando una cota topográfica máxima y mínima de 658 y 14 msnm, respectivamente; y las cotas del basamento rocoso identificadas por la exploración geofísica, con una cota mínima y máxima de 36 y -82 msnm, respectivamente. De manera similar que la topografía, el basamento posee la misma tendencia en su morfología, disminuyendo su altitud conforme la dirección de las aguas del río Fortaleza; de noreste a suroeste.

4.12.2. Discretización del sistema

La discretización se realizó según lo sugerido en el ítem 4.5, de geometría del acuífero, donde se definen los límites del acuífero con base en límites naturales del medio compuesto, principalmente, por la geología y la topografía, todo ello incluido en el ámbito de evaluación. Se construyeron cuadrángulos que configuran una grilla uniforme en la horizontal cubriendo la totalidad del dominio del modelo. Dichos cuadrángulos forman prismas cuadrangulares en la vertical, los cuales rellenan el espesor procedente de la diferencia entre la superficie topográfica y la del basamento rocoso. Estos, fueron tomados como límite superior e inferior del modelo, respectivamente.

Para la discretización horizontal, se establecieron 100 columnas y 161 filas, configurando una longitud de celda de 60 m por lado. Asimismo, dada la homogeneidad litoestratigráfica e hidráulica del subsuelo, se consideró la creación de una sola capa que abarque la totalidad del dominio vertical.

Una vez obtenida la grilla en la horizontal y vertical, y con la identificación de las zonas de no flujo representadas por los límites del acuífero, se procedió a la asignación de celdas inactivas, las cuales no serán objeto de análisis por el modelo dado que la mayoría no conducen ni almacenan agua subterránea, y otras se encuentran fuera del ámbito de evaluación. La Figura 26 muestra la discretización en vista de planta, con celdas con coloración verde las cuales representan la zona inactiva. Las celdas de color negro representan la zona activa. La Figura 27 representa las celdas activas en tres dimensiones que, posteriormente, serán objeto de simulación.

Figura 26: Grilla horizontal del modelo numérico

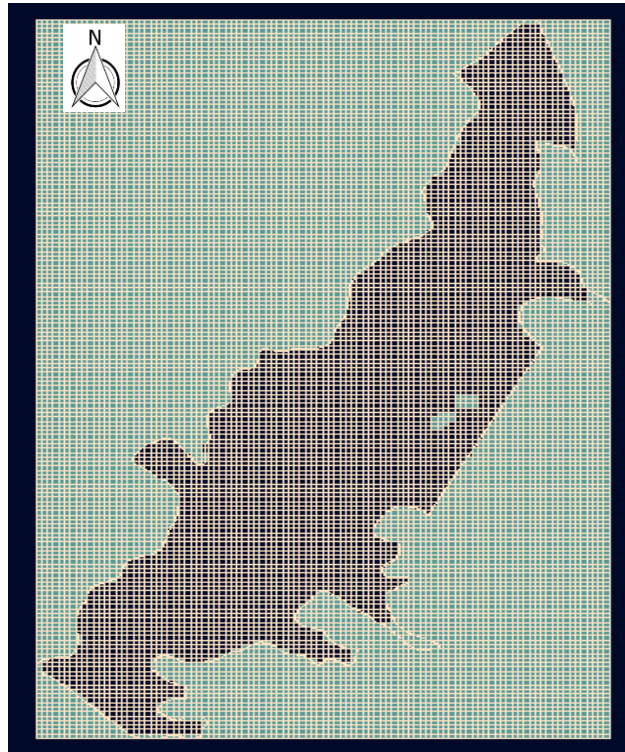
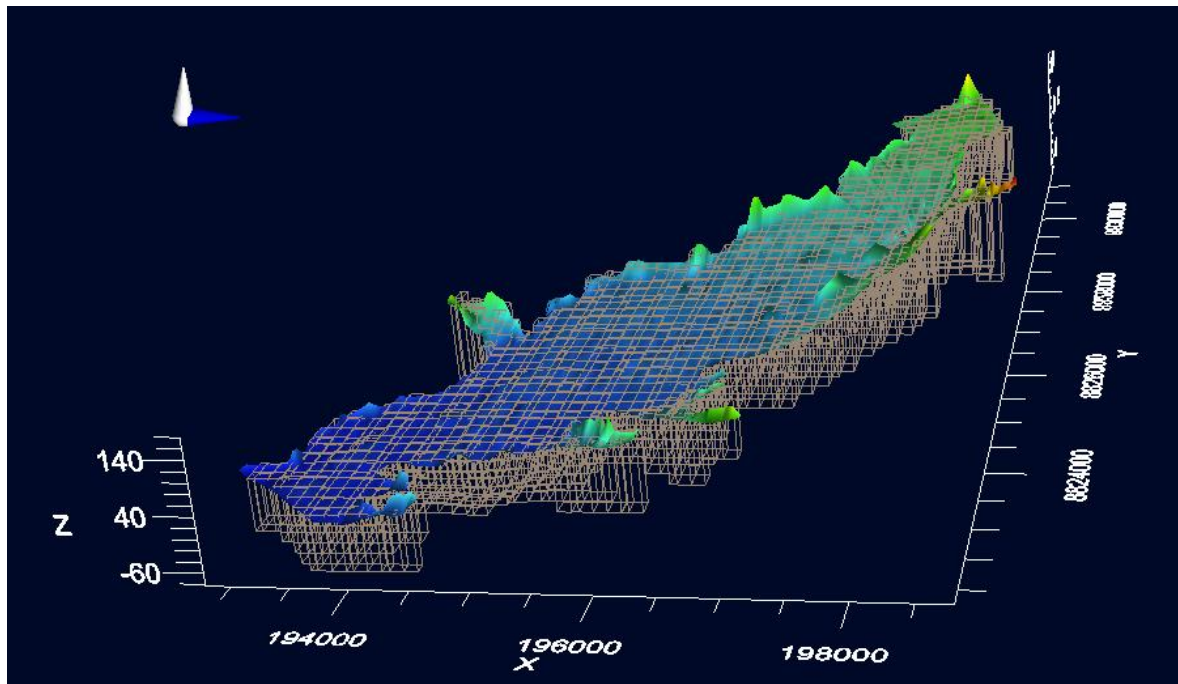


Figura 27: Grilla de las celdas activas del modelo numérico en tres dimensiones



4.12.3. Definición de condiciones iniciales

Las condiciones iniciales representan las propiedades intrínsecas del acuífero tales como conductividad hidráulica y porosidad efectiva. Dichos parámetros fueron determinados con base en pruebas de bombeo realizadas en la zona de estudio presentado en el ítem 4.4 de hidráulica subterránea, Obtuvieron los valores siguientes:

- a. **Conductividad Hidráulica:** fue considerada como constante vertical dentro de la única unidad hidroestratigráfica del acuífero. Dada la variedad de los valores de conductividad hidráulica y la ubicación de la prueba de bombeo, se definieron tres zonas diferentes las cuales pueden apreciarse en el Mapa 11 encontrado en el Anexo 2, y será tomado como condición inicial para una primera simulación del modelo que, posteriormente, será objeto de calibración para las simulaciones posteriores. Los valores de las zonas cuantifican valores iguales a 11.32, 85.06 y 67.35 m/d y fueron ingresados teniendo en cuenta sus límites, en la grilla activa del modelo.
- b. **Porosidad Efectiva:** obtuvo un valor generalizado para toda la zona activa del modelo, cuantificando un valor de 1.35%, producto de la única prueba de bombeo que determinó dicho parámetro.

4.12.4. Definición de condiciones de frontera

Las condiciones de frontera impuestas al modelo representan las situaciones de efecto e intervención directa sobre el funcionamiento del acuífero. Su selección se basó en la descripción conceptual y pueden observarse gráficamente en la Figura 28. Las mismas, se describen a continuación:

a. **Constant Head**

Es utilizado para fijar el valor de las cargas hidráulicas en celdas seleccionadas independientemente de las condiciones del sistema en las celdas de la grilla circundante, y que actúa como una fuente constante de agua que recarga o descarga al acuífero. Fueron ingresadas en las interconexiones hidráulicas ubicadas en los límites del dominio del modelo, localizadas; por el noreste, en el sector de Tunán; y por el suroeste, en el sector Manzueto.

b. Well

Este paquete se aplica de forma puntual y representan los pozos de extracción o inyección de agua. Para el presente modelo se ingresaron veinticuatro pozos de extracción, propiedad de la empresa AIPSAA, asignando sus ubicaciones y los volúmenes reales de explotación que son utilizados para sus labores de riego de cultivos agrícolas, registrados por dicha empresa. Además, se ingresaron los detalles de horarios de bombeo para cada pozo en específico y las características técnicas propias de los pozos, como; longitud, cota, y ubicación de la tubería filtro.

c. Recharge

Simula una recarga superficialmente distribuida del acuífero. Para el presente modelo, representa el agua proveniente de la percolación por el riego efectuado a los campos agrícolas. El paquete fue ingresado en los polígonos que delimitan los campos agrícolas y su estimación cuantitativa se estableció en base al balance conceptual, a partir de la eficiencia de riego que se maneja para la zona de estudio, considerando un 43.2%, todo ello descrito en el ítem 4.8.

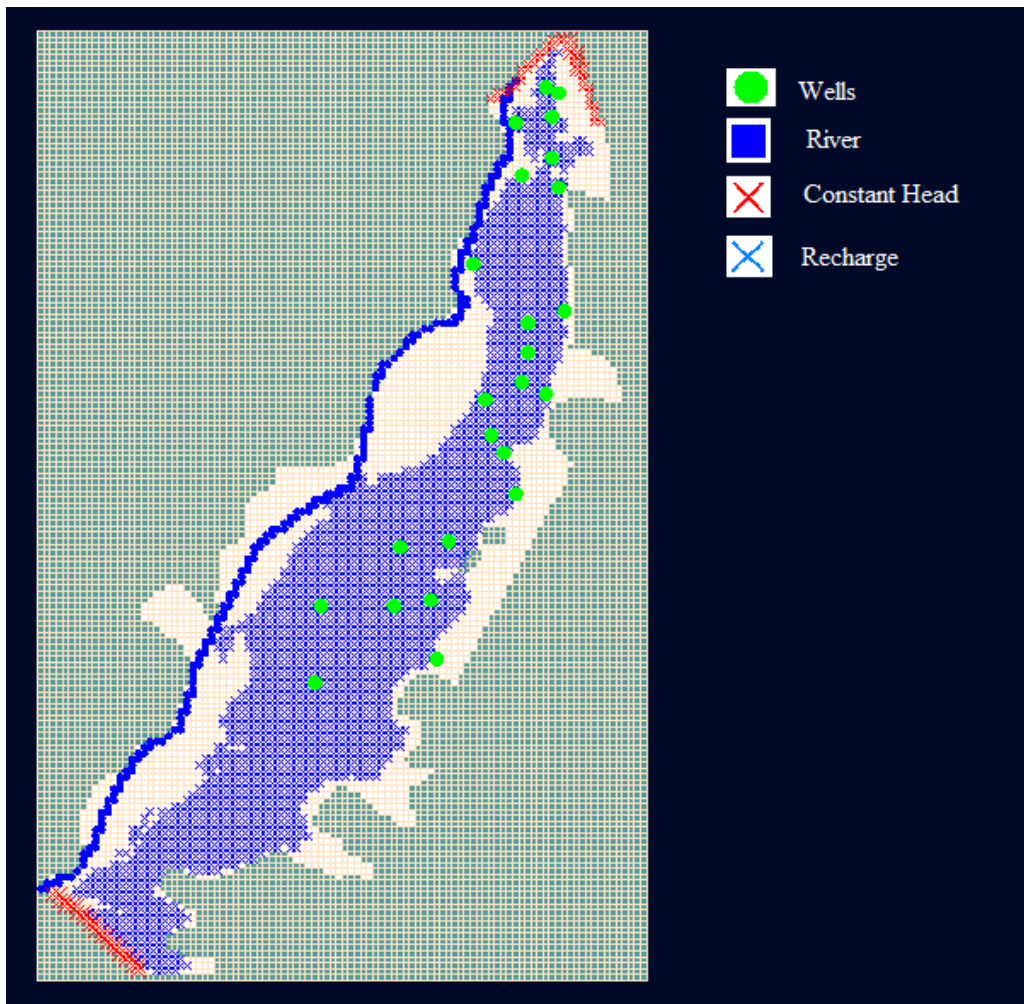
d. Rivers

La condición simula la influencia de un cuerpo de agua superficial sobre el flujo de agua subterránea. Los ríos, arroyos, canales, o pantanos pueden recargar o descargar agua al o del acuífero, dependiendo del gradiente hidráulico entre el cuerpo de agua superficial y el acuífero. Este paquete se ingresó en el cauce fluvial del río Fortaleza, representando su funcionalidad sobre el acuífero.

e. Evapotranspiration

Simula la descarga de agua debido a la transpiración de las plantas y la evaporación directa. Su ocurrencia se basa en dos supuestos: (i) cuando el nivel freático está sobre la superficie del suelo, representada por la parte superior de la unidad litoestratigráfica y (ii) cuando la elevación de la napa freática está por encima de la profundidad de extinción, representada por la profundidad de raíces de las plantas. Para el presente modelo se ingresó la tasa de evapotranspiración propia de la zona descrito en el ítem 4.8, y una profundidad de extinción de 2 metros; propia del cultivo predominante en el ámbito de evaluación.

Figura 28: Condiciones de frontera del modelo numérico



4.12.5. Definición de pozos de observación

Los pozos de observación han sido seleccionados con base en su ubicación, cantidad y consistencia de mediciones de los niveles estáticos: los pozos se encuentran distribuidos estratégicamente en toda la extensión de la zona de estudio, de tal forma que representen al área total simulada y poseen una cantidad de datos aceptable para el año de calibración. Algunos pozos fueron excluidos debido a la inconsistencia de sus mediciones, hecho que queda evidenciado en los hidrogramas de monitoreos vistos en el ítem 4.3.1, donde, en algunos casos, puede observarse la presencia de cambios abruptos en su tendencia. Los pozos de observación seleccionados y su carga hidráulica pueden apreciarse en el Tabla 50 del Anexo 1.

4.12.6. Calibración

La calibración consiste en un proceso iterativo que mejora la aproximación de los valores de los niveles freáticos simulados con los observados. Para ello, realiza ciertos ajustes a las propiedades del acuífero, como la geometría de la unidad estratigráfica o los parámetros hidráulicos. Para el presente modelo la calibración utilizará este último, partiendo de la premisa que la obtención de dichos parámetros tiene cierta incertidumbre y margen de error. Se utilizó la calibración semiautomática PEST planteada por Doherty (2015) que varió las conductividades hidráulicas guiado por puntos pilotos que tomaron los valores de los parámetros hidráulicos obtenidos por las pruebas de acuífero, ingresando su valor y ubicación. Además, se ingresó un rango de variación de conductividades hidráulicas característico de la naturaleza hidráulica de la unidad litoestratigráfica, conservando la consistencia con el modelamiento conceptual.

La calibración se obtuvo una media residual absoluta de 1.67 metros entre todas las medidas, que representa el promedio de la diferencia entre los valores de carga hidráulica simulados y observados. La Figura 29 muestra gráficamente la aproximación entre los valores de carga hidráulica simulados y observados, sugiriendo un buen ajuste. La tendencia del monitoreo de la carga hidráulica para todos los pozos de observación y los valores simulados durante el año 2018, pueden ser apreciados en la Figura 30, sugiriendo, en la mayoría de los casos, una buena calibración.

Figura 29: Carga hidráulica simulada vs observada

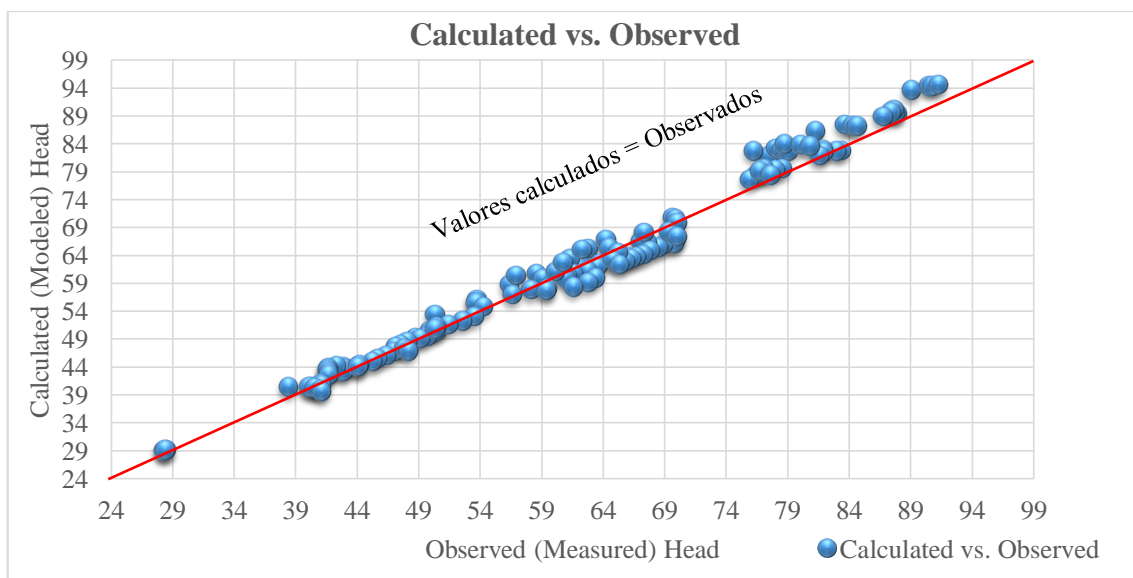
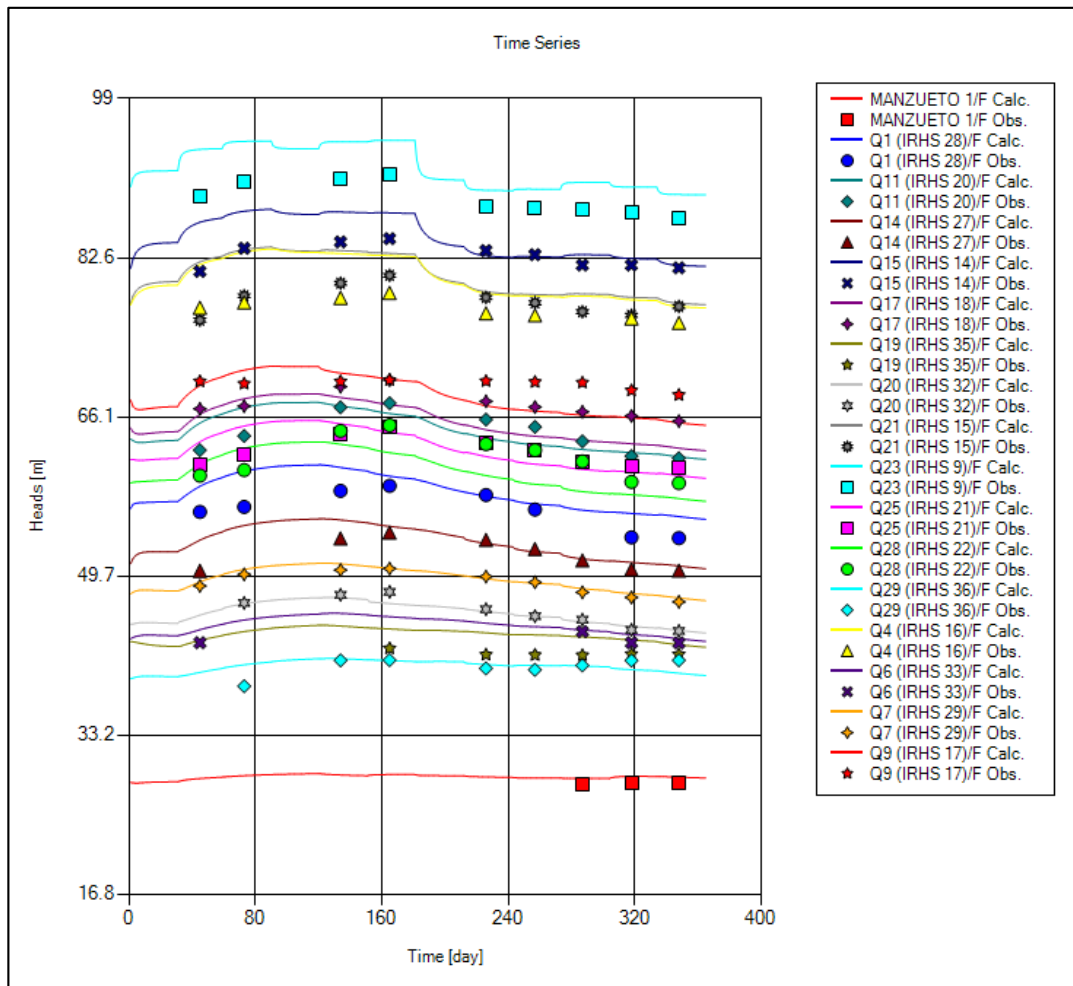


Figura 30: Carga hidráulica mensual monitoreada y simulada



Para el análisis de resultados se tomarán como referencia dos enfoques de análisis: cuantitativo y cualitativo.

Bajo un enfoque cuantitativo, se obtuvo como resultado un error cuadrático medio normalizado (NRMS) de 3.42%, valor menor a 10%, el cual comúnmente es considerado como máximo para modelos numéricos, por lo tanto, la presente calibración se califica como de buen ajuste.

Bajo un enfoque cualitativo, se han analizado las tendencias de las fluctuaciones cargas hidráulicas durante el año. Se ha obtenido un buen ajuste para la mayoría de pozos denotando un comportamiento coherente y aproximado, excepto para el pozo Q9, el cual presenta una tendencia plana que no es reflejada por la simulación. No obstante, al ser la

única discrepancia, la calibración puede ser considerada como aceptable.

4.12.7. Simulación y balance de masas del acuífero

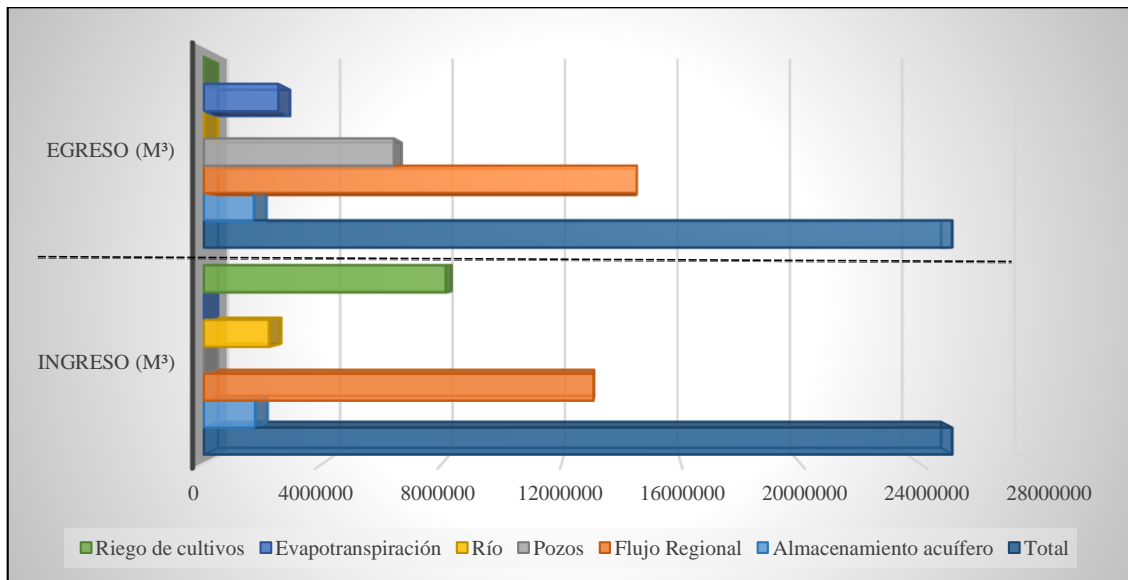
El balance de masas mostró los volúmenes anuales de ingreso y egreso del sistema acuífero en la zona de estudio, presentados en el Tabla 36 y Figura 31, descritos a continuación:

- Los ingresos al sistema acuífero deben el mayor volumen anual al flujo regional, cuantificado 13.07 MMC (MMC), seguido por la percolación del agua de riego, con un volumen igual a 8.11 MMC MMC, y por último la percolación debido a la corriente fluvial del río Fortaleza el cual aporta un volumen igual a 2.20 MMC. El total de ingresos al sistema cuantifica un volumen de 23.28 MMC.
- Al igual que la recarga, la descarga de mayor volumen anual se debe al flujo regional que egresa del sistema, cuantificando 14.53 MMC, seguido por la explotación de los pozos de extracción, con un valor igual a 6.38 MMC, y finalmente, la evapotranspiración, que descarga un volumen de 2.51 MMC hacia la atmósfera. El volumen anual total que egresa del sistema acuífero cuantifica 23.41 MMC.
- Producto de los cambios de almacenamiento a lo largo del año, existe cierto volumen que queda acumulado en el acuífero lo cual indica un almacenamiento positivo, cuantificado por la diferencia entre 1.72 MMC y 1.69 MMC, resultando un volumen igual a 37121.4 m³. Dicho almacenamiento alimenta al sistema anualmente.

Tabla 36: Distribución de balance de masas

Detalle	Recarga (m ³)	Recarga (MMC)	Descarga (m ³)	Descarga (MMC)
Pozos	0	0.00	6381447	6.38
Río	2196452	2.20	0	0.00
Evapotranspiración	0	0.00	2505910	2.51
Riego de cultivos	8114308	8.11	0	0.00
Flujo Regional	13067035	13.07	14527553	14.53
Almacenamiento acuífero	1724901	1.72	1687779	1.69
Total	25102696	25.10	25102688	25.10

Figura 31: Distribución de balance de masas



Para la aceptabilidad de los resultados de balance de masa se evaluó el error que corresponde a la diferencia entre los ingresos y egresos de agua subterránea del sistema acuífero. El modelo generó un error de balance de masa igual a 0.003%, valor de mínima magnitud que indica estabilidad y robustez de la simulación.

Para determinar el balance hídrico del sistema acuífero a causa de los factores anteriormente hallados, podemos aplicar los métodos siguientes:

- En la presente investigación, el balance hídrico es representado por la diferencia entre las recargas del sistema debido a factores externos comprendidos por la percolación del agua de riego y la del flujo del río Fortaleza, y las descargas del sistema, comprendidos por el funcionamiento de pozos de extracción y la evapotranspiración. Dichos volúmenes cuantifican 10.31 MMC (recarga); y 8.89 MMC (descarga), resultando una diferencia positiva igual a 1.42 MMC.
- La diferencia del flujo regional de ingreso y egreso, determina un valor igual a 1.46 MMC. Debido a que el cambio de almacenamiento acuífero es positivo (37 121 m³), este representa un ingreso al sistema acuífero, por lo cual debemos hallar su diferencia para determinar el balance hídrico, obteniéndose un valor de 1.42 MMC.

El valor de balance hídrico obtenido igual a 1.42 MMC indica un superávit hídrico subterráneo, es decir que la recarga es mayor que la descarga del acuífero en la zona de

estudio. Dicho volumen egresa del sistema como parte del flujo regional de salida, viéndose su afloramiento aguas abajo de la zona de estudio, en forma de drenes o como agua de recuperación del río Fortaleza.

Es preciso añadir que la simulación determinó que el flujo subterráneo que transita por el subsuelo en la zona de estudio cuantifica un valor anual igual a 25.10 MMC.

4.13. Análisis de reserva acuífero

4.13.1. Reserva Racionalmente Explotable

Representa el volumen de explotación sostenible, con tendencia al equilibrio de balance hídrico del sistema acuífero y aproximadamente igual a la recarga anual. La reserva racionalmente explotable cuantifica un volumen igual a 7.80 MMC, resultado de la suma de las recargas por los conceptos de percolación del agua de riego y del flujo del río Fortaleza, descontado por los volúmenes de descarga natural; evapotranspiración.

El volumen explotado por los pozos representa el 81.79% de las reservas racionalmente explotables, tal y como puede apreciarse en el Tabla 37. En consecuencia, el índice de uso obtiene un valor de 0.82, revelando que la zona de estudio se encuentra en un estado de subexplotación.

4.13.2. Reserva Potencialmente Explotable

Indica el volumen total aún no explotado que puede ser aprovechado en el futuro. En términos cuantitativos es representado por la diferencia entre la reserva racionalmente explotable y el volumen de agua subterránea extraído artificialmente. Para la presente investigación adquiere un volumen de 1.42 MMC. La Tabla 37 muestra que las reservas potencialmente explotables representan el 18.21% de las reservas racionalmente explotables.

Tabla 37: Reservas explotables del acuífero

Reservas Racionalmente Explotables (MMC/año)	Volumen explotado de pozos		Reservas Potencialmente Explotables		Índice de Uso
	Volumen (MMC/año)	Porcentaje de uso (%)	Volumen (MMC/año)	Porcentaje de significancia (%)	
7.80	6.38	81.79	1.42	18.21	0.82

4.14. Caudal óptimo de explotación

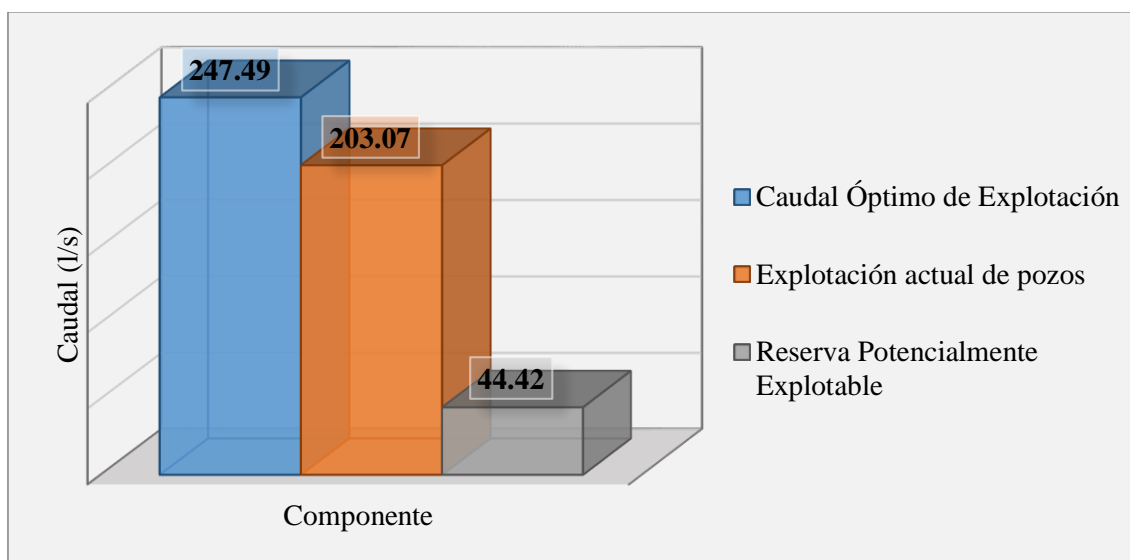
Para el presente documento, el caudal óptimo de explotación es representado cuantitativamente por la reserva racionalmente explotable, por tal razón, su valor se obtiene por la suma entre el volumen actualmente explotado y las reservas potencialmente explotables. Su cálculo puede apreciarse en el Tabla 38, determinándose un caudal óptimo igual a 247.49 l/s.

Tabla 38: Cálculo del caudal óptimo de explotación

Detalle	Caudal (l/s)
Explotación actual de pozos	203.07
Reserva Potencialmente Explotable	44.42
Caudal Óptimo de Explotación	247.49

La Figura 32 muestra las proporciones del caudal óptimo de explotación, la explotación actual de pozos y las reservas potencialmente explotables.

Figura 32: Reserva Potencialmente Explotable



Es preciso añadir que el caudal óptimo de explotación está sujeto a la recarga del sistema acuífero, el cual debe su mayor caudal, en mayor medida, a la percolación del agua de riego. Al ser dicha actividad, el principal destino del agua, un incremento de su dotación aumentaría la recarga del acuífero, en consecuencia, se incrementaría el caudal óptimo de explotación de manera directamente proporcional. Por otro lado, una mayor extracción de las aguas subterráneas conllevaría a un aumento en la profundidad de la napa freática en ciertos sectores, que, en consecuencia, reduciría el caudal de evapotranspiración del acuífero. A causa de ello, el caudal óptimo de explotación podría aumentar.

V. CONCLUSIONES

- Se determinó el funcionamiento del acuífero en base a la caracterización hidrogeológica de la zona de estudio y la interrelación de su información, destacando lo siguiente:

Debido a que, la composición litológica detrítica homogénea evidenciada por los perfiles de perforaciones y los ensayos de prospección geofísica, se ha determinado una sola capa o unidad hidroestratigráfica, con límite vertical superior representado por la superficie topográfica, e inferior, por el basamento rocoso de muy baja permeabilidad. Los límites laterales se presentan como montañas y colinas en roca intrusiva y volcánica sedimentaria, que condicionan la forma del acuífero haciéndolo alargado con orientación noreste – suroeste. La composición litológica del acuífero ha concedido buenas características hidráulicas y de almacenamiento, con una permeabilidad media de 66.23 m/d, calificado estimativamente como de alta permeabilidad.

El flujo de agua subterránea de la zona de estudio debe su caudal a las interconexiones hidráulicas con las quebradas Julquillas y Fortaleza en el límite noreste, y aumenta su caudal debido a las distintas formas de recarga en el valle. El ingreso de flujo subterráneo a la zona de estudio junto a la disposición de los límites laterales y del basamento rocoso han determinado que, partiendo desde el sector noreste, el agua subterránea tome dirección sur; hasta el término del sector Quebrada, y posteriormente, dirección suroeste; hasta el término del sector Manzueto. La napa freática posee una disposición regularmente paralela al relieve topográfico, con un gradiente hidráulico de 0.6%, evidenciando su carácter libre de confinamientos.

Los pozos son la principal fuente de riego durante los meses de junio a diciembre (estiaje), mas no, en los meses posteriores de diciembre a abril (avenidas), periodo en el cual reducen su funcionamiento permitiendo la recuperación de la napa freática, además durante dicho tiempo se tiene como principal fuente de agua al río Pativilca y Fortaleza, que recargan el acuífero a través del riego, favoreciendo la elevación de los niveles de la napa freática hasta junio, mes en el cual la explotación por pozos

aumentan significativa y gradualmente debido a la falta de agua de los ríos, deprimiendo la napa freática hasta el mes de diciembre. El ciclo de evolución de la morfología de la napa freática descrito anteriormente es repetitivo durante los años debidos principalmente a la oferta hídrica brindada por la estacionalidad hidrológica, las tasas temporales de explotación de pozos, y el riego de los campos agrícolas.

La química del agua subterránea muestra los mayores valores de mineralización en la zona noreste, y los menores, en la zona suroeste. Además, pertenece mayormente al grupo de las bicarbonatadas cálcicas, que corresponden a aguas jóvenes de recorrido local y poca profundidad de infiltración.

La principal fuente de recarga se debe a la percolación del agua proveniente de riego de la caña de azúcar, seguido por la percolación de agua a través de los subálveos del río Fortaleza originado por el tránsito de caudal en los meses de avenidas. La principal forma de descarga se realiza a través de la explotación con pozos tubulares, seguido por los egresos debido a la evapotranspiración. El balance hídrico conceptual ha estimado que anualmente, existe un cambio de almacenamiento positivo, existiendo un volumen de 1.13 MMC que podría explotarse.

- Se elaboró el modelo numérico hidrogeológico, el cual, a través del análisis de balance de masas, ha logrado cuantificar las reservas racionalmente explotables en 7.80 MMC/año, de las cuales son extraídas parcialmente un volumen igual a 6.38 MMC/año, produciéndose un índice de uso de 0.82 y dando cabida a la existencia de las reservas potencialmente explotables por un volumen de 1.42 MMC, y estableciendo al acuífero en un estado de subexplotación.
- Se determinó el caudal óptimo de explotación del acuífero en 247.49 l/s, de los cuales son aprovechados 203.07 l/s, dejando la posibilidad de explotar 44.42 l/s.

VI. RECOMENDACIONES

- Dada la existencia de reservas potencialmente explotables, se recomienda la perforación de pozos de extracción que puedan suplir la demanda hídrica insatisfecha en la zona de estudio de una forma sustentable.
- El modelo hidrogeológico puede ser optimizado con la obtención de datos que mejoren la precisión de la caracterización basada en: la zonificación hidráulica del acuífero, la morfología de la napa freática, morfología de los límites impermeables, la zonificación hidrogeoquímica y condiciones de frontera, este último, referido a la representación de la dinámica de los ingresos y egresos de agua subterránea al acuífero en la zona de estudio.
- Es recomendable la ejecución de ensayos geoelectrónicos con fines hidrogeológicos en sectores inexplorados para una aproximación de la composición litoestratigráfica del subsuelo, los límites impermeables del acuífero y la localización de la napa freática.
- La caracterización hidrogeoquímica puede obtener mayor representatividad con el análisis de un mayor número de muestras de agua subterránea extraídas en zonas estratégicamente localizadas para una correcta reproducción de la variabilidad espacial físicoquímica del acuífero. Además, se sugiere el análisis y monitoreo de ciertos contaminantes que puedan afectar la finalidad de uso del agua.
- Para un conocimiento de mayor precisión de las fluctuaciones del nivel freático, se recomienda monitorear la red de pozos de explotación en un periodo mínimo mensual, para lo cual deben encontrarse en reposo de funcionamiento de por lo menos 2 días aproximadamente, lo cual permitiría la recuperación del nivel estático de la napa freática.
- La caracterización hidráulica del acuífero es trascendente para una correcta representación de su funcionamiento, es por ello que se sugiere la ejecución de un mayor número de ensayos de bombeo los cuales posibilitarán zonificar la zona de estudio de acuerdo a la variabilidad hidráulica obtenida. Para lo cual, dichos ensayos deben estar ubicados en sectores estratégicamente proyectados de tal forma que

permita una óptima representatividad espacial de la transmisividad, conductividad hidráulica y almacenamiento.

- La percolación debido al riego de cultivos agrícolas es la principal fuente de recarga del acuífero, es por ello que se sugiere realizar ensayos que determinen la eficiencia de riego en la zona de estudio para poder cuantificar con mayor precisión las tasas de recarga debido a este concepto.
- Para mayor aproximación del caudal de infiltración debido a la percolación por el flujo del río Fortaleza, se sugiere ejecutar aforos diferenciales en zonas estratégicamente seleccionadas basadas en la variabilidad litológica del cauce fluvial, principalmente durante las épocas de lluvias, frecuentes en los meses de enero, febrero y marzo.
- Se sugiere realizar una verificación periódica del funcionamiento de los caudalímetros de los pozos de explotación, y el mantenimiento y calibración de ser el caso. Todo ello con la finalidad de conocer con precisión los caudales extraídos del acuífero.
- El modelo numérico hidrogeológico deberá ser actualizado conforme se obtengan actualizaciones de datos referentes a la evolución temporal de la napa freática, tasas de explotación de agua subterránea, cambio de uso de suelo, entre otros, los cuales modifican los parámetros y condiciones de modelamiento.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agroindustrial Paramonga. (2013). Memoria 2013.
- Allison, GB; Hughes, MW. (1978). The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer. *Austral. J. Soil.*
- Anderson, MP; Woessner, WW. (1992). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport.* Academic Press.
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2009). *Tendiendo puentes hacia el trabajo conjunto entorno al agua: la experiencia peruana.* Comisión Nacional Preparatoria: V Foro Mundial del Agua (ed.).
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2010). *Recursos hídricos del Perú en cifras.*
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2016). *Priorización de cuencas para la Gestión de los Recursos Hídricos.*
- American Water Works Association [AWWA]. (2014). *Manual of water supply practices M21, Groundwater.* 4th ed. Denver, CO: AWWA. <https://www.awwa.org/portals/0/files/publications/documents/m21lookinside.pdf>
- Batu, V. (2006). *Applied flow and Solute transport modeling in aquifers: fundamental principles and analytical and numerical methods.* Taylor and Francis Group.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of groundwater.* 1a. ed. McGraw-Hill.
- Bear, J; Cheng, A. (2009). *Modeling groundwater flow and contaminant transport.* Springer London.
- Bedinger, MS. (1987). *Summary of infiltration rates in arid and semiarid regions of the world, with and annotated bibliography.* s.e.
- Castany, G. (1975). *Prospección y explotación de las aguas subterráneas.* Omega.
- Comision Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea [CDCIHS]. (2009). *Hidrogeología: Conceptos básicos de hidrología subterránea.* 1a. ed. Escuder, R; Fraile, J; Jordana, S; Ribera, F; Sánchez-Villa, X; Vázquez-Suñé, E (eds.). Barcelona, Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. 768 p.
- Cook, PG; Herczeg, AL. (2000). *Environmental tracers in subsurface hydrology.* Kluwer Academic Publishers .

- Custodio, E; Llamas, M. (2001). Hidrología subterránea. 2a. ed. Barcelona, Omega.
- Davis, SN, De Wiest, R. (1971) Hidrogeología. Ediciones Ariel.
- Diersch, H. 2014. FEEFLOW, Finite element modeling of flow, mass and heat transport in Porous and Fractured Media. s.e.
- Doherty, J. (2015). Calibration and uncertainty analysis for complex environmental models. Brisbane. Watermark Numerical Computing.
- Fernández-García, D; Sánchez-Vila, X. (2007). Gestión de los recursos hídricos: Los modelos hidrogeológicos como herramienta auxiliar.
- Freeze, AR; Cherry, JA. (1979). Groundwater. Prentice-Hall, Inc. <https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Groundwater%20book%20-%20English.pdf>
- Fundación de las naciones unidas para la agricultura y alimentación [FAO] (2010). La riqueza de los residuos: La Economía del Uso de Aguas Residuales en la Agricultura. s.e.
- Healy, RW. (2010). Estimating groundwater recharge. 1 st. ed. United Kingdom, Cambridge University Press. 245 p.
- IAH asociación internacional de hidrogeólogos (2011). Cuatro décadas de investigación y formación aguas en aguas subterráneas: Libro Homenaje al Profesor Emilio Custodio. Cabrera, M del C; Lambán, LJ; Manzano, M; Valverde, M (eds.). Asociación Internacional de Hidrogeólogos.
- Instituto nacional de recursos naturales. (1994). Diagnóstico de la calidad del agua de la vertiente del pacífico. Cuenca del río Fortaleza, Pativilca y Supe. Lima, Perú, s.e.
- Jairo, A. (2001). Potabilización del agua. 3rd ed. Ed. Alfa Omega.
- Karamouz, M; Ahmadi, A; Akhbari, M. (2011). Groundwater hydrology: engineering, planning and management. Ed. Taylor and Francis Group.
- Kirsch, R. (2006). Groundwater geophysics: a tool for hydrogeology. Springer Verlag.
- Kresic, N. (2007). Hydrogeology and groundwater modeling. Taylor & Francis Group 2(11):1-791. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Kresic, N; Rumbaugh, J. (2000). GIS and data management for ground water modeling. National Ground Water Association.
- McDonald, M; Harbaugh, W. (1984). A modular three-dimensional finite-difference ground water flow model. U.S. Geological Survey, National Center
- Mohammadi, Z; Salimi, M; Faghih, A. (2014). Assessment of groundwater recharge in a semi-arid groundwater system using water balance equation, southern Iran (en línea). Journal of African Earth Sciences 95:1-8. <http://www.sciencedirect.com/science/>

- article/pii/S1464343X14000326 [Consulta: 26 de noviembre de 2018].
- Patra, HP; Adhikari, SK; Kunar, S. (2016). Groundwater prospecting and management (en línea). Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1148-1>.
- Price, M. (2008). Agua subterránea. Limusa. <https://www.geologiaviva.info/wp-content/uploads/2021/06/LIBRO-DE-AGUA-SUBTERRANEA-Michael-Price.pdf>
- Prickett, TA. (1975). Modeling techniques for groundwater evaluation. V.T. Chow. Academic Press
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] (2002). Estados del medio ambiente y medidas normativas: 1972-2002 (en línea). s.e. Disponible en http://www.grida.no/geo/geo3/spanish/pdfs/chapter2-8_urban.pdf.
- Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos [WWAP] (2016). Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2016: Agua y Empleo. UNESCO.
- Quintana, J; Tovar, J. (2002). Evaluación del acuífero de Lima (Perú) y medidas correctoras para contrarrestar la sobreexplotación. Boletín Geológico y Minero
- Reilly, TE; Harbaugh, A. (2004). Guidelines for evaluating groundwater flow models. Usgs. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Samper, FJ. (1997). Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balance de agua: utilización, calibración y errores. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Scalon, BR; Healy, RW; Cook, PG. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeol. j.
- Tang, Y; Zhou, J; Yang, P; Yan, J; Zhou, N. (2017). Groundwater engineering (en línea). 2 a. ed. Shanghai, China, Tongji University Press. 410 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48581-1>.
- Theis, C.V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Am. Geophys. Union Trans.
- Tinajero, G. (1982). Aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea (geohidrología). Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México, D.F. 232 pp.
- Todd, DK. (1959). Annotated bibliography on artificial recharge of ground water through 1954. US Geological Survey Water-Supply Paper.
- Todd, DK. (1980). Groundwater hydrology. John Wiley and Sons.
- Villanueva, M; Iglesias, A. (1984). Pozos y acuíferos: técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. s/e. Instituto Geológico y Minero de España. Talleres Gráficos

IBERGESA. https://www.igme.es/biblioteca/Libros_agotados/pozos_acuiferos_2.pdf

Walker, GR. (1998). Using soil water tracers to estimate recharge. In the basic of recharge and discharge.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: TABLAS Y FIGURAS

Tabla 39: Inventario de pozos de agua subterránea

IRHS	NOMBRE DEL POZO	COTA		PERFORACIÓN			EQUIPO DE BOMBEO				NIVELES DE AGUA Y CAUDAL			EXPLOTACIÓN			COORDENADAS UTM WGS 84	
		TERRENO msnm	TIP O	AÑO	PROF. ACTUAL	MOTOR			BOMBA		FECHA	NIVEL ESTÁTICO (m)	CAUDAL (l/s)	ESTADO DEL POZO	USO	VOLUMEN (m³/año)	m E	m N
						MARCA	TIPO	HP	MARCA	TIPO								
28	AIPSAA Q1	61.00	T	1951	40	SHANGHAI	E	25	HIDROSTAL	T.E.V	21/12/2018	7.40	22	UTILIZADO	A	21000	197219	8827650
24	AIPSAA Q2	60.20	T	1951	38.5	DELCROSA	E	40	HIDROSTAL	T.E.V	20/12/2018	7.52	46	UTILIZADO	A	660000	197294	8827325
25	AIPSAA Q3	58.40	T	1951	36.95	SHANGHAI	E	25	HIDROSTAL	T.E.V	23/12/2018	6.82	18	UTILIZADO	A	77000	197372	8827107
16	AIPSAA Q4	82.10	T	1951	39.5	G.E.	E	30	HIDROSTAL	T.E.V	22/12/2018	6.23	26	UTILIZADO	A	60480	197548	8829950
33	AIPSAA Q6	48.00	T	1951	38	E.M.	E	50	HIDROSTAL	T.E.V	20/12/2018	5.22	56	UTILIZADO	A	46000	196718	8825027
29	AIPSAA Q7	52.00	T	1951	37.5	DELCROSA	E	20	HIDROSTAL	T.E.V	21/12/2018	5.28	34	UTILIZADO	A	103688	196862	8826256
17	AIPSAA Q9	71.50	T	1955	19	WEG	E	15	HIDROSTAL	T.E.V	21/12/2018	2.67	12	UTILIZADO	D	40320	197096	8829029
20	AIPSAA Q11	69.30	T	1956	29.68	JM GE	E	15	HIDROSTAL	T.E.V	20/12/2018	7.55	10	UTILIZADO	A	150000	197602	8828421
10	AIPSAA Q13	91.00	T	1956	30	-	-	-	-	-	22/12/2018	10.02	-	NO UTILIZABLE	-	-	197868	8830571
27	AIPSAA Q14	56.20	T	1952	38.2	SHANGHAI	E	25	HIDROSTAL	T.E.V	20/12/2018	5.86	29	UTILIZADO	A	475000	197492	8826722
14	AIPSAA Q15	89.00	T	1958	35	G. E.	E	15	HIDROSTAL	T.E.V	22/12/2018	7.88	15	UTILIZADO	A	230000	197858	8830131
31	AIPSAA Q16	50.50	T	1962	26.5	NEWMAN	E	50	HIDROSTAL	T.E.V	15/02/2018	2.91	70	UTILIZADO	A	475000	196380	8826192
18	AIPSAA Q17	72.30	T	1959	25.5	CHINO	E	40	HIDROSTAL	T.E.V	20/12/2018	6.82	5	UTILIZADO	A	375000	197977	8828585
34	AIPSAA Q18	46.00	T	1960	40	DELCROSA	E	40	HIDROSTAL	T.E.V	21/12/2018	5.19	29	UTILIZADO	A	620000	196329	8825555
35	AIPSAA Q19	44.48	T	1960	39	CHINO	E	50	HIDROSTAL	T.E.V	20/12/2018	2.54	45	UTILIZADO	A	100000	195559	8825585
32	AIPSAA Q20	51.10	T	1964	31.47	CHINO	E	50	HIDROSTAL	T.E.V	21/12/2018	7.39	30	UTILIZADO	A	675000	196649	8825638
15	AIPSAA Q21	87.00	T	1969	54.4	CHINO	E	40	HIDROSTAL	T.E.V	20/12/2018	10.00	15	UTILIZADO	A	230000	197934	8829853
9	AIPSAA Q23	98.20	T	1969	30.5	DELCROSA	E	15	HIDROSTAL	T.E.V	22/12/2018	11.52	15	UTILIZADO	A	250000	197917	8830760

T = Tubular E = Eléctrico T.E.V. = Turbina Eje Vertical D = Doméstico A = Agrícola S/R: Sin registro

«Continuación»

IRH S	NOMBRE DEL POZO	COTA		PERFORACIÓN			EQUIPO DE BOMBEO				NIVELES DE AGUA Y CAUDAL			EXPLOTACIÓN			COORDENADAS UTM WGS 84	
		TERRENO (m.s.n.m.)	TIPO	AÑO	PROF. ACTUAL	MOTOR			BOMBA		FECHA	NIVEL ESTÁTICO (m)	CAUDA L (l/s)	ESTADO DEL POZO	USO	VOLUME N (m3/año)	m E	m N
						MARCA	TIPO	HP	MARCA	TIPO								
8	AIPSAA Q24	91.00	T	1969	52.4	CHINO	E	73	HIDROSTAL	T.E.V	22/12/2018	11.03	20	UTILIZADO	A	393120	197780	883081 2
21	AIPSAA Q25	66.35	T	1977	32.9	DELCROSA	E	30	HIDROSTAL	T.E.V	20/12/2018	5.34	30	UTILIZADO	A	555000	197600	882814 3
23	AIPSAA Q26	63.60	T	1979	35.7	DELCROSA	E	30	HIDROSTAL	T.E.V	21/12/2018	8.02	35	UTILIZADO	A	510000	197577	882783 9
11	AIPSAA Q27	83.10	T	2004	42	WEP	E	50	HIDROSTAL	T.E.V	22/12/2018	1.67	39	UTILIZADO	A	201600	197527	883048 7
22	AIPSAA Q28	67.20	T	2004	37.75	DELCROSA	E	40	HIDROSTAL	T.E.V	20/12/2018	8.02	33	UTILIZADO	A	485000	197782	882773 2
36	AIPSAA Q29	41.00	T	2005	35.9	CHINO	E	50	HIDROSTAL	T.E.V	21/12/2018	0.52	45	UTILIZADO	A	181440	195506	882476 9
S/R	MANZUETO 1	34.00	T	2018	50	-	-	-	-	-	22/12/2018	5.82	-	UTILIZABLE	-	-	193800	882315 2
S/R	MANZUETO 2	35.00	T	2018	49	-	-	-	-	-	27/11/2018	4.00	-	UTILIZABLE	-	-	194648	882341 9

T = Tubular E = Eléctrico T.E.V. = Turbina Eje Vertical D = Doméstico A = Agrícola S/R: Sin registro

Tabla 40: Volúmenes de explotación mensual y anual entre el periodo 2009-2017

Año/mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total (m³)
2009	463254	172169	138019	180103	289184	181130	418226	657690	1074414	1097172	1031301	698516	6401178
2010	292683	259712	211930	146770	220476	578641	1008017	877182	1039974	1207604	1057490	1035839	7936318
2011	144456	141809	160070	140387	152099	678362	455886	483720	577210	1048572	1109696	867792	5960059
2012	304308	304308	192687	180966	115529	219015	546662	602156	580151	689408	712420	657728	5105338
2013	731914	298641	184484	164073	238706	453803	443557	444452	551978	606434	653359	859088	5630489
2014	685980	474400	30206	27335	17278	385860	490690	582681	489308	844059	912072	804627	5744496
2015	82315	14420	15907	20392	40506	72598	402793	668407	734280	900360	1014885	912649	4879512
2016	912649	253799	50544	41869	649329	760392	673212	813334	813790	995116	927792	882827	7774653
2017	463923	33010	110283	118254	33319	23213	25108	54836	350812	776233	893663	1019676	3902330
Promedio (MMC)	453498	216919	121570	113350	195158	372557	496017	576051	690213	907218	923631	859860	

FUENTE: Elaboración propia en base a información de AISAA, 2018

Tabla 41: Resumen de la interpretación de los SEV del sector Tunán

SEV	Año de ejecución	Capas						
		R1 (Ohm-m) Capa 1 (m)	R2 (Ohm-m) Capa 2 (m)	R3 (Ohm-m) Capa 3 (m)	R4 (Ohm-m) Capa 4 (m)	R5 (Ohm-m) Capa 5 (m)	R6 (Ohm-m) Capa 6 (m)	R7 (Ohm-m) Capa 7 (m)
1	2013	36	4.6	1.7	9.7	5366	4854	
		1.5	4.1	4.4	5	88		
2		38	995	36	85	8.3	14	
3		1.8	6.4	9.3	19.9	42		
		426	136	1372	150	16	143	
4		1.8	2.22	4.9	11	24		
		838	553	76	70	26	61	
5		4.2	4.5	9.5	19	41		
		1280	1174	28	37	13	79	
6		6	12	12.4	25	50		
		404	70	15	1.3	4.95		
7		11	16	22	7.9			
		223	95.3	27.7	14.9	90.8		
8		12.9	16.9	19.8	46.9			
	118	97.6	45.5	10.5	95.3			
9	12.9	12.5	13.4	55.3				
	131	248	46.6	15.3	121.4			
10	4.08	8.36	26.4	70				
	171	47.6	286.6	52.93	27.94	365		
11	2.05	1.95	5.27	20.89	77.74			
	226.9	91.8	219.7	66.8	217.7			
12	1.1	1.78	1.97	71.7				
	43.4	103.1	242.6	78.48	166.1			
13	0.74	6.9	9.1	47.3				
	44.4	440	29.9	403	67.2	17.2	3639	
	0.7	0.6	1.8	4.7	34.2	66.9		

FUENTE: Elaboración propia en base a información de AIPSAA, 2018

Tabla 42: Resumen de la interpretación de los SEV del sector Manzueto

SEV	Año de ejecución	Capas					
		R1 (Ohm-m)	R2 (Ohm-m)	R3 (Ohm-m)	R4 (Ohm-m)	R5 (Ohm-m)	R6 (Ohm-m)
		Capa 1 (m)	Capa 2 (m)	Capa 3 (m)	Capa 4 (m)	Capa 5 (m)	Capa 6 (m)
14	2016	148.8	435.4	30.43	63.1	708	
		1.33	1.46	7.88	31.03		
15		86.9	274.7	19.2	112.2	21.27	148.7
16		1.43	1.54	4.49	21.46	39.22	
		79.4	31.6	108	22.4	46.4	143
17		0.98	1.34	2.69	5.8	95.8	
		69.9	122.7	25.12	95.15	39.3	184.8
18		1.67	4.18	7.93	43.9	57.5	
		38.3	64.25	16.4	72.6	28.6	235.6
19		1.47	4.45	6.33	45.6	54.4	
		130.8	19.95	110.8	14.7	115.1	
20		4.7	8.7	12.4	54.7		
		91.4	133	23.9	47.6	154	
21		1.5	1.4	13.1	71.9		
		74.5	656	26.8	172	52.1	489
22		1.3	1.9	9	31.4	58.6	
		146.8	88	42.4	54.1	197	
23		1.9	3.2	21	54.4		
		31.2	53.4	23.3	45.2	100	
			2.05	1.46	12.4	20.6	

FUENTE: Elaboración propia en base a información de AIPSAA, 2018

Tabla 43: Resumen de la interpretación de los SEV del sector Quebrada

SEV N°	Año de ejecución	Capas				
		R1 (Ohm-m)	R2 (Ohm-m)	R3 (Ohm-m)	R4 (Ohm-m)	R5 (Ohm-m)
		Capa 1 (m)	Capa 2 (m)	Capa 3 (m)	Capa 4 (m)	Capa 5 (m)
24		245	52	34.4	173	
		4.33	16.1	77.2		
25		123	73	27.3	89.7	181
		7.85	11.2	33.6	41.5	
26		87.52	137	98.8	19.95	33.19
		1.97	4.73	12.1	39.2	
27		41	57.24	71.33	23	178.9
		5.5	5.84	18.71	77.58	
28		209	60.7	16.5	64.5	
		5.59	20.3	61.9		
29		52.6	79	24.7	36.3	
		5.13	10.2	40.2		
30	2018	139.4	87.8	41.5	14.3	118
		4.91	13.9	16	71.3	
31		153	316	117	28.4	62.9
		2.65	3.36	22.8	79.9	
32		262	206	63.7	23	67.6
		3.4	6.72	29	67	
33		30.8	66.6	48.4	21.8	208
		5.66	5.07	30.7	78.2	
34		89.1	63.1	188	148	
		4.07	28.7	49.5		
35		96.6	132	44.7	207	
		6	7.92	38		
36	2006	80	658.9	66.2	188.9	
		1.2	8.9	45.4		

FUENTE: Elaboración propia en base a información de AIPSAA, 2018


Tabla 44: Monitoreo mensual de los niveles de la napa freática para el 2018

Pozo	IRHS	Ubicación	Monitoreo de niveles estáticos (profundidad en m.)											
Pozo	IRHS	Ubicación	Monitoreo de niveles estáticos (m)											
			Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct	Nov.	Dic.
Q1	28	Quebrada	6.05	4.70	4.18	-	2.52	2.00	-	2.95	4.45	7.50	7.32	7.40
Q2	24	Quebrada	-	5.40	4.45	-	2.25	1.98	-	2.25	2.42	4.00	7.25	7.52
Q3	25	Canaval	-	5.95	2.25	-	-	3.20	-	2.87	-	5.20	6.75	6.82
Q4	16	Caballete	5.44	4.65	4.10	-	3.64	3.12	-	5.22	5.43	4.44	5.75	6.23
Q6	33	Don Fernando	5.21	5.20	-	-	-	-	-	-	-	4.06	5.20	5.22
Q7	29	Canaval	4.46	3.64	2.45	-	2.00	1.85	-	2.67	3.26	4.30	4.83	5.28
Q9	17	Caballete	1.97	1.26	1.50	-	1.27	1.12	-	1.23	1.32	1.39	2.20	2.67
Q11	20	Quebrada	7.14	6.72	5.25	-	2.29	1.87	-	3.55	4.32	5.80	7.33	7.55
Q13	10	Tunán	-	-	-	-	-	6.58	-	-	-	9.61	10.22	10.02
Q14	27	Canaval	5.87	5.87	-	-	2.53	1.92	-	2.68	3.62	4.80	5.73	5.86
Q15	14	Tunan	8.07	8.25	5.86	-	5.20	4.86	-	6.10	6.52	7.60	7.60	7.88
Q16	31	Signal	-	2.91	-	-	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A	S/A
Q17	18	Quebrada	6.19	5.55	5.27	-	3.26	2.57	-	4.77	5.36	5.85	6.28	6.82
Q18	34	Don Andrés	-	4.90	5.20	-	-	3.22	-	4.05	-	4.40	5.10	5.19
Q19	35	Don Andrés	-	-	-	-	-	1.92	-	2.57	2.60	2.63	2.51	2.54
Q20	32	Don Fernando	6.40	-	4.50	-	3.66	3.35	-	5.15	5.86	6.22	7.28	7.39
Q21	15	Tunán	10.71	11.41	8.90	-	7.60	6.79	-	9.07	9.62	10.55	10.92	10.00
Q23	9	Tunán	10.39	9.25	7.80	-	7.50	7.03	-	10.40	10.52	10.60	10.90	11.52

			Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct	Nov.	Dic.
Q24	8	Tunán	-	-	7.00	-	6.70	5.92	-	8.63	8.92	9.45	9.51	11.03
Q25	21	Quebrada	5.17	5.00	4.00	-	1.83	1.10	-	2.78	3.56	4.68	5.22	5.34
Q26	23	Quebrada	-	6.55	6.78	-	-	-	-	4.88	-	6.28	7.93	8.02
Q27	11	Tunán	-	4.20	5.60	-	1.22	1.02	-	2.34	2.58	2.72	3.65	1.67
Q28	22	Quebrada	7.64	7.25	6.67	-	2.63	2.05	-	3.99	4.62	5.78	7.90	8.02
Q29	36	Signal	2.50	-	3.20	-	0.53	0.50	-	1.36	1.50	1.05	0.55	0.52
Manzuetto-I	-	Manzuetto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.90	5.76	5.82
Manzuetto-II	-	Manzuetto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.00

«Continuación»

Tabla 45: Prueba de bombeo pozo IRHS 28 (Q1) – Fase de descenso

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA		Pumping Test - Water Level Data	
		Project: Prueba de Bombeo Pozo IRHS 28	
		Number: -	
		Client: -	
Location: Valle Fortaleza		Pumping Test: Prueba de bombeo Q1	Pumping Well: Pozo IRHS 28
Test Conducted by: César Alvarado		Test Date: 18/09/2017	Discharge Rate: 37.5 [l/s]
Observation Well: Pozo IRHS 28		Static Water Level [m]: 2.54	Radial Distance to PW [m]: -
	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]
1	0	2.54	0.00
2	1	4.25	1.71
3	2	4.70	2.16
4	3	5.34	2.80
5	4	5.45	2.91
6	5	5.67	3.13
7	6	5.65	3.11
8	6.5	5.72	3.18
9	7	5.81	3.27
10	7.5	5.82	3.28
11	8	5.88	3.34
12	8.5	5.98	3.44
13	9	6.05	3.51
14	9.5	6.15	3.61
15	10	6.18	3.64
16	10.5	6.19	3.65
17	11	6.25	3.71
18	12	6.30	3.76
19	12.5	6.32	3.78
20	13	6.33	3.79
21	13.5	6.33	3.79
22	14	6.34	3.80
23	14.5	6.35	3.81
24	15	6.36	3.82
25	15.5	6.36	3.82
26	16	6.35	3.81
27	17.5	6.35	3.81
28	18	6.36	3.82
29	19	6.24	3.70
30	20	6.33	3.79
31	21	6.20	3.66
32	22	6.30	3.76
33	23	6.29	3.75
34	24	6.28	3.74
35	25	6.30	3.76
36	26	6.30	3.76
37	28	6.30	3.76
38	29	6.40	3.86
39	30	6.33	3.79

«Continuación»


 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA				Pumping Test - Water Level Data
				Project: Prueba de Bombeo Pozo IRHS 28
				Number: -
				Client: -
	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]	
40	31	6.40	3.86	
41	32	6.40	3.86	
42	33	6.45	3.91	
43	35	6.30	3.76	
44	37	6.30	3.76	
45	39	6.45	3.91	
46	41	6.30	3.76	
47	43	6.30	3.76	
48	45	6.30	3.76	
49	47	6.29	3.75	
50	50	6.24	3.70	
51	55	6.26	3.72	
52	60	6.24	3.70	
53	65	6.26	3.72	
54	70	6.22	3.68	
55	75	6.26	3.72	
56	80	6.29	3.75	
57	85	6.32	3.78	
58	90	6.34	3.80	
59	95	6.36	3.82	
60	100	6.38	3.84	
61	105	6.395	3.855	
62	110	6.41	3.87	
63	115	6.425	3.885	
64	120	6.44	3.90	
65	130	6.45	3.91	
66	140	6.46	3.92	
67	150	6.46	3.92	
68	170	6.47	3.93	
69	190	6.48	3.94	
70	210	6.49	3.95	
71	240	6.50	3.96	
72	270	6.50	3.96	
73	300	6.51	3.97	
74	330	6.52	3.98	
75	360	6.53	3.99	
76	420	6.54	4.00	
77	480	6.55	4.01	

Tabla 46: Prueba de bombeo pozo IRHS 28 (Q1) – Fase de recuperación


 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA		Pumping Test - Water Level Data	
		Project: Prueba de Bombeo Pozo IRHS 28	
		Number: -	
		Client: -	
Location: Valle Fortaleza		Pumping Test: Prueba de bombeo Q1	
Test Conducted by: César Alvarado		Pumping Well: Pozo IRHS 28	
Test Date: 18/09/2017		Discharge Rate: 37.5 [l/s]	
Observation Well: Pozo IRHS 28		Static Water Level [m]: 2.54	
		Radial Distance to PW [m]: -	
	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]
1	0.08	3.04	0.50
2	0.17	3.086	0.546
3	0.27	3.115	0.575
4	0.4	3.134	0.594
5	0.56	3.153	0.613
6	0.75	3.171	0.631
7	1	3.186	0.646
8	1.21	3.195	0.655
9	1.47	3.209	0.669
10	1.8	3.228	0.688
11	2.23	3.247	0.707
12	2.82	3.266	0.726
13	3.67	3.29	0.75
14	4.25	3.318	0.778
15	5	3.341	0.801
16	6	3.374	0.834
17	7.4	3.388	0.848
18	9.5	3.421	0.881
19	11	3.45	0.91
20	13	3.473	0.933
21	15.8	3.492	0.952
22	20	3.511	0.971
23	27	3.544	1.004
24	31.31	3.572	1.032
25	37.18	3.595	1.055
26	45.67	3.633	1.093
27	59	3.666	1.126
28	83	3.717	1.177
29	104	3.773	1.233
30	139	3.825	1.285
31	209	3.857	1.317
32	419	4.00	1.46

Tabla 47: Prueba de bombeo pozo IRHS 33 (Q6) – Fase de descenso


 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA		Pumping Test - Water Level Data			
		Project: PRUEBA DE BOMBEO POZO IRHS 33			
		Number: -			
		Client: -			
Location: Valle Fortaleza		Pumping Test: Prueba de Acuífero Q6		Pumping Well: Pozo IRHS 33	
Test Conducted by: César Alvarado		Test Date: 20/12/2018		Discharge Rate: 63 [l/s]	
Observation Well: Pozo IRHS 33		Static Water Level [m]: 4.24		Radial Distance to PW [m]: -	
	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]		
1	1	6.79	2.55		
2	2	7.34	3.10		
3	3	7.64	3.40		
4	4	7.84	3.60		
5	5	7.89	3.65		
6	7	7.89	3.65		
7	9	7.90	3.66		
8	11	7.90	3.66		
9	13	7.90	3.66		
10	15	7.93	3.69		
11	20	7.97	3.73		
12	25	7.98	3.74		
13	30	8.01	3.77		
14	35	8.02	3.78		
15	40	8.03	3.79		
16	50	8.055	3.815		
17	60	8.07	3.83		
18	70	8.10	3.86		
19	80	8.11	3.87		
20	90	8.12	3.88		
21	110	8.14	3.90		
22	130	8.15	3.91		
23	150	8.17	3.93		
24	170	8.23	3.99		
25	190	8.24	4.00		
26	210	8.27	4.03		
27	240	8.285	4.045		
28	270	8.30	4.06		
29	300	8.31	4.07		
30	330	8.32	4.08		
31	360	8.33	4.09		

Tabla 48: Prueba de bombeo pozo IRHS 33 (Q6) – Fase de recuperación


 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA		Pumping Test - Water Level Data	
		Project: PRUEBA DE BOMBEO POZO IRHS 33	
		Number: -	
		Client: -	
Location: Valle Fortaleza	Pumping Test: Prueba de Acuífero Q6	Pumping Well: Pozo IRHS 33	
Test Conducted by: César Alvarado	Test Date: 20/12/2018	Discharge Rate: 63 [l/s]	
Observation Well: Pozo IRHS 33	Static Water Level [m]: 5.28	Radial Distance to PW [m]: -	
	Time [min]	Water Level [m]	Drawdown [m]
1	0.12	5.293	0.009
2	0.27	5.302	0.018
3	0.46	5.311	0.027
4	0.73	5.33	0.046
5	1.11	5.339	0.055
6	1.38	5.348	0.064
7	1.71	5.357	0.073
8	2.17	5.357	0.073
9	2.8	5.375	0.091
10	3.75	5.384	0.10
11	4.43	5.393	0.109
12	5.33	5.402	0.118
13	6.6	5.429	0.145
14	8.5	5.447	0.163
15	11.67	5.456	0.172
16	13.62	5.474	0.19
17	16.27	5.488	0.204
18	20.11	5.511	0.227
19	26.14	5.538	0.254
20	37	5.568	0.284
21	46.5	5.597	0.313
22	62.33	5.623	0.339
23	94	5.664	0.38
24	189	5.709	0.425

Tabla 49: Resultados y características del análisis de agua subterránea

Pozo	IRHS	Cond. Elect.	pH	Calcio	Magnesio	Sodio	Potasio	Cloruros	Sulfatos	Bicarbonato	Carbonato	Nitratos	Dureza		RAS	Clasificación para riego
		dS/m	Unidad de Ph	Ca ²⁺ meq/L	Mg ²⁺ meq/L	Na ⁺ meq/L	K ⁺ meq/L	Cl ⁻ meq/L	SO ₄ ⁻² meq/L	HCO ₃ ⁻¹ meq/L	CO ₃ ⁻² meq/L	NO ₃ ⁻ meq/L	mg/L de CaCO ₃	°F		
Q-01	28	0.76	7.58	4.59	1.18	1.51	0.04	2.32	1.58	3.59	0	0.1	288.5	28.9	0.89	C3S1
Q-03	25	1.09	7.52	6.5	1.73	2.43	0.04	3.83	1.74	4.83	0	0.14	411.5	41.2	1.20	C3S1
Q-04	16	0.91	6.99	5.8	1.58	1.78	0.07	3.96	1.59	3.63	0	0.07	369.0	36.9	0.93	C3S1
Q-06	33	0.76	6.38	4.73	1.33	1.6	0.03	1.8	0.64	5.16	0	0.08	303.0	30.3	0.92	C3S1
Q-07	29	0.76	7.21	4.11	1.6	1.59	0.04	1.84	1.31	4.32	0	0.08	285.5	28.6	0.94	C3S1
Q-11	20	0.88	7.6	5.25	1.46	1.95	0.05	2.26	1.71	4.24	0	0.06	335.5	33.6	1.06	C3S1
Q-13	9	0.93	7.68	3.48	2.64	3.37	0.04	1.87	2.17	5.24	0	0.13	306.0	30.6	1.93	C3S1
Q-16	31	0.76	7.17	4.03	1.53	1.97	0.04	1.92	0.81	4.91	0	0.07	278.0	27.8	1.18	C3S1
Q-17	18	0.96	7.64	5.75	1.31	2.36	0.04	3.04	1.94	4.47	0	0.02	353.0	35.3	1.26	C3S1
Q-19	35	0.62	7.71	4.44	1.01	1.11	0.03	1.5	1.63	3.62	0	0.05	272.5	27.3	0.67	C2S1
Q-21	15	1.31	7.67	7.11	2.19	3.93	0.07	5.56	4.3	3.39	0	0.08	465.0	46.5	1.82	C3S1
Q-24	8	0.9	7.07	5.9	1.56	1.63	0.07	3.68	1.49	3.85	0	0.09	373.0	37.3	0.84	C3S1
Q-25	21	0.84	7.59	5.04	1.73	1.95	0.04	3.38	1.31	4.7	0	0.1	338.5	33.9	1.06	C3S1
Q-27	11	0.91	7.01	6.25	1.53	1.4	0.07	3.80	1.63	3.80	0	0.09	389.0	38.9	0.71	C3S1
Q-29	36	0.77	7.09	4.35	1.46	1.91	0.04	1.84	0.64	5.31	0	0.1	290.5	29.1	1.12	C3S1

FUENTE: Elaboración propia en base a información de AIPSA, 2018

Tabla 50: Pozos de observación y cargas hidráulicas

Pozo	IRHS	Ubicación	Carga hidráulica (msnm)									
			Ene.	Feb.	Mar.	May.	Jun.	Ago.	Sep.	Oct	Nov.	Dic.
Q1	28	Quebrada	54.95	56.30	56.82	58.48	59.00	58.05	56.55	53.50	53.68	53.60
Q4	16	Caballete	76.61	77.40	77.95	78.41	78.93	76.83	76.62	77.61	76.30	75.82
Q6	33	Don Fernando	42.79	42.80	-	-	-	-	-	43.94	42.80	42.78
Q7	29	Canaval	47.84	48.66	49.85	50.30	50.45	49.63	49.04	48.00	47.47	47.02
Q9	17	Caballete	69.09	69.79	69.55	69.78	69.93	69.82	69.73	69.66	68.85	68.38
Q11	20	Quebrada	62.27	62.68	64.15	67.11	67.53	65.85	65.08	63.60	62.07	61.85
Q14	27	Canaval	50.24	50.23		53.57	54.18	53.42	52.48	51.30	50.37	50.24
Q15	14	Tunán	81.34	81.15	83.54	84.20	84.54	83.30	82.88	81.80	81.80	81.52
Q17	18	Quebrada	66.32	66.95	67.23	69.24	69.93	67.73	67.14	66.65	66.22	65.68
Q19	35	Don Andrés	-	-	-	-	42.21	41.56	41.53	41.50	41.62	41.59
Q20	32	Don Fernando	45.00	-	46.90	47.74	48.05	46.25	45.54	45.18	44.12	44.01
Q21	15	Tunán	76.83	76.12	78.63	79.93	80.74	78.46	77.91	76.98	76.61	77.53
Q23	9	Tunán	87.82	88.95	90.40	90.70	91.17	87.80	87.68	87.60	87.30	86.68
Q24	8	Tunán	-	-	84.57	84.87	85.65	82.94	82.65	82.12	82.06	80.54
Q25	21	Quebrada	61.03	61.20	62.20	64.37	65.10	63.42	62.64	61.52	60.98	60.86
Q28	22	Quebrada	59.67	60.05	60.63	64.67	65.25	63.31	62.68	61.52	59.40	59.28
Q29	36	Signal	39.00	-	38.30	40.97	41.00	40.14	40.00	40.45	40.95	40.98
Manzuetto-I	-	Manzuetto	-	-	-	-	-	-	-	28.22	28.36	28.30

FUENTE: Elaboración propia en base a información de AIPSA, 2018

Figura 33: Análisis de prueba de bombeo pozo IRHS 28 – Fase de descenso

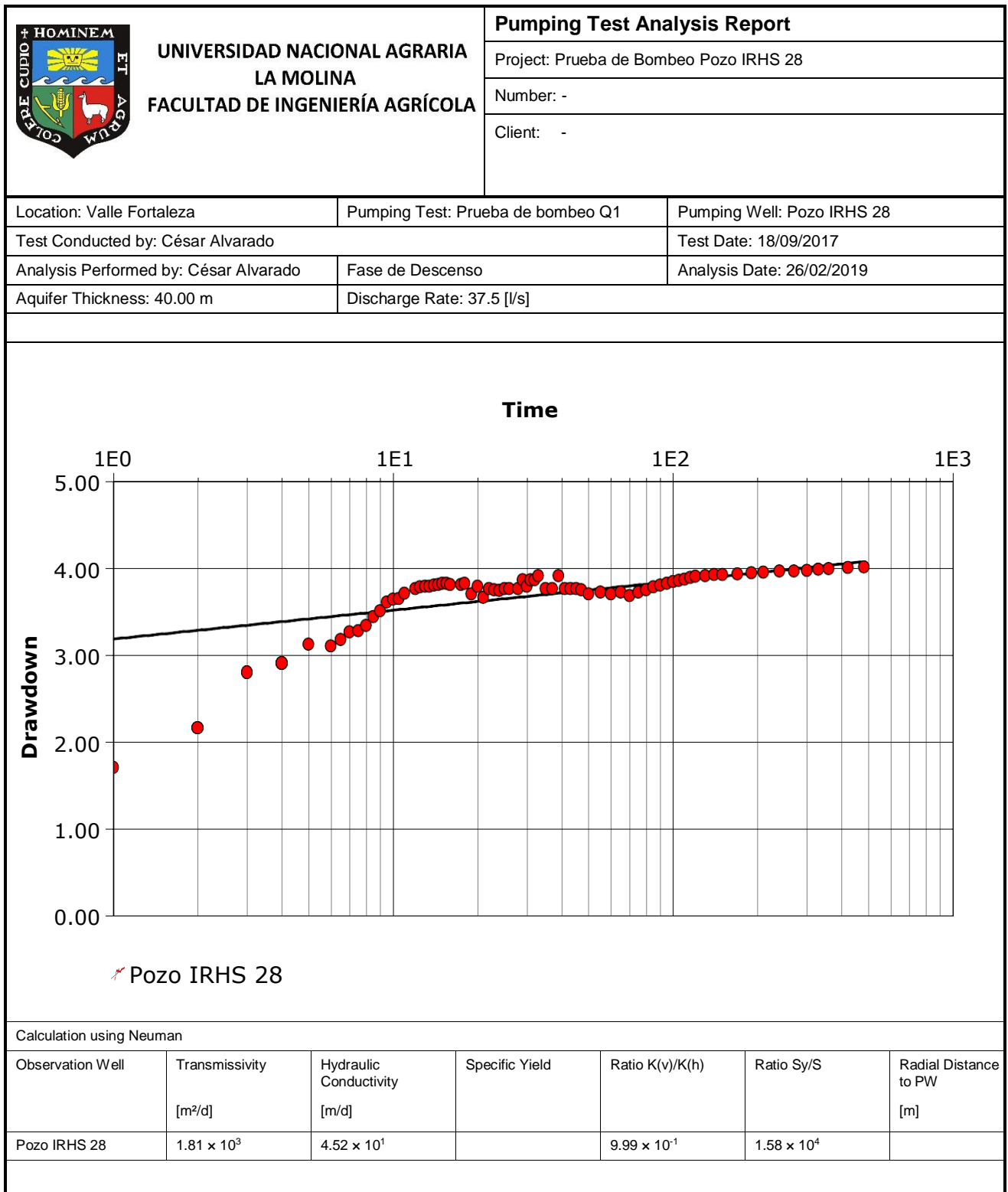


Figura 34: Análisis de prueba de bombeo pozo IRHS 28 – Fase de recuperación

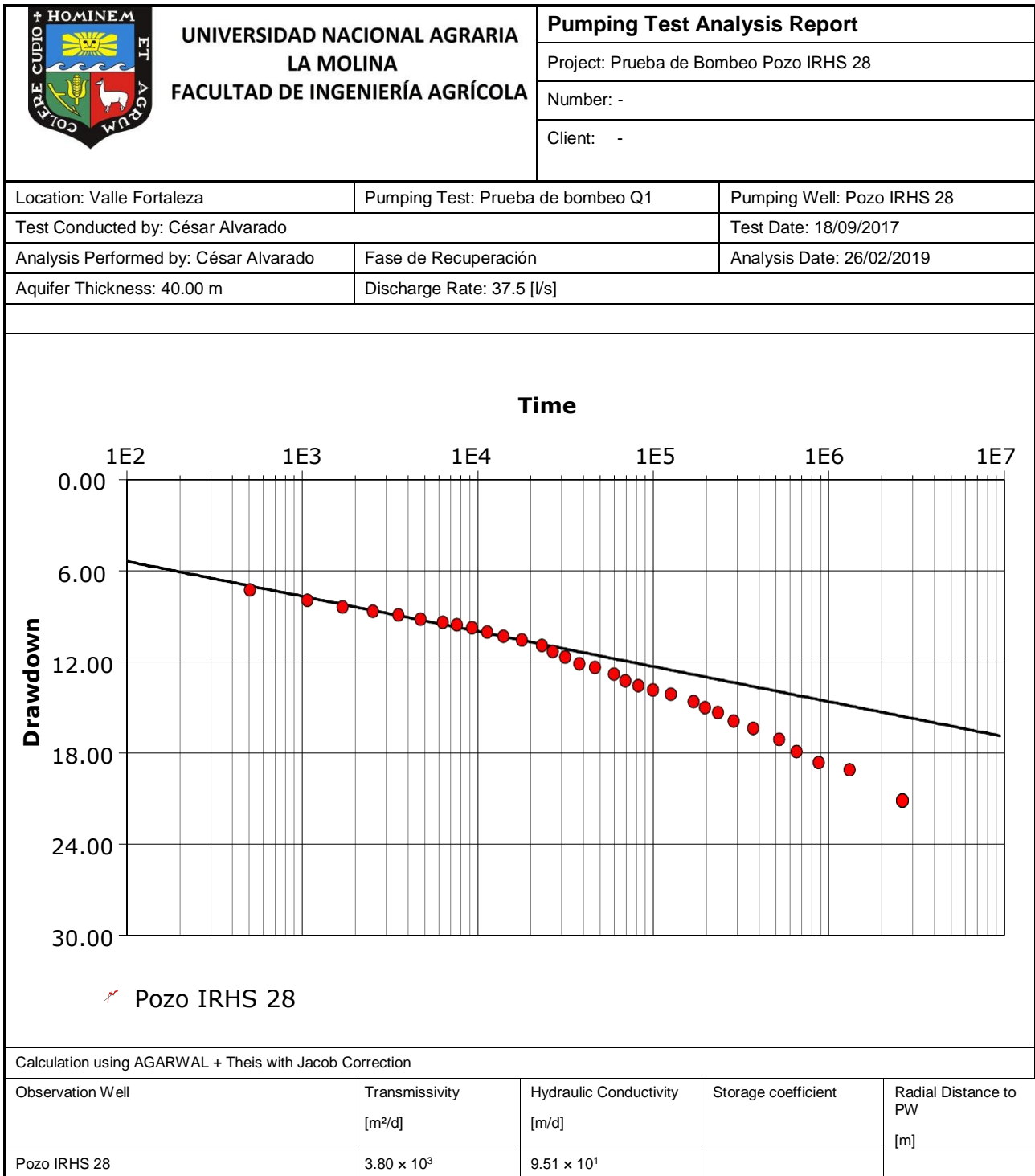


Figura 35: Análisis de prueba de bombeo pozo IRHS 33 – Fase de descenso

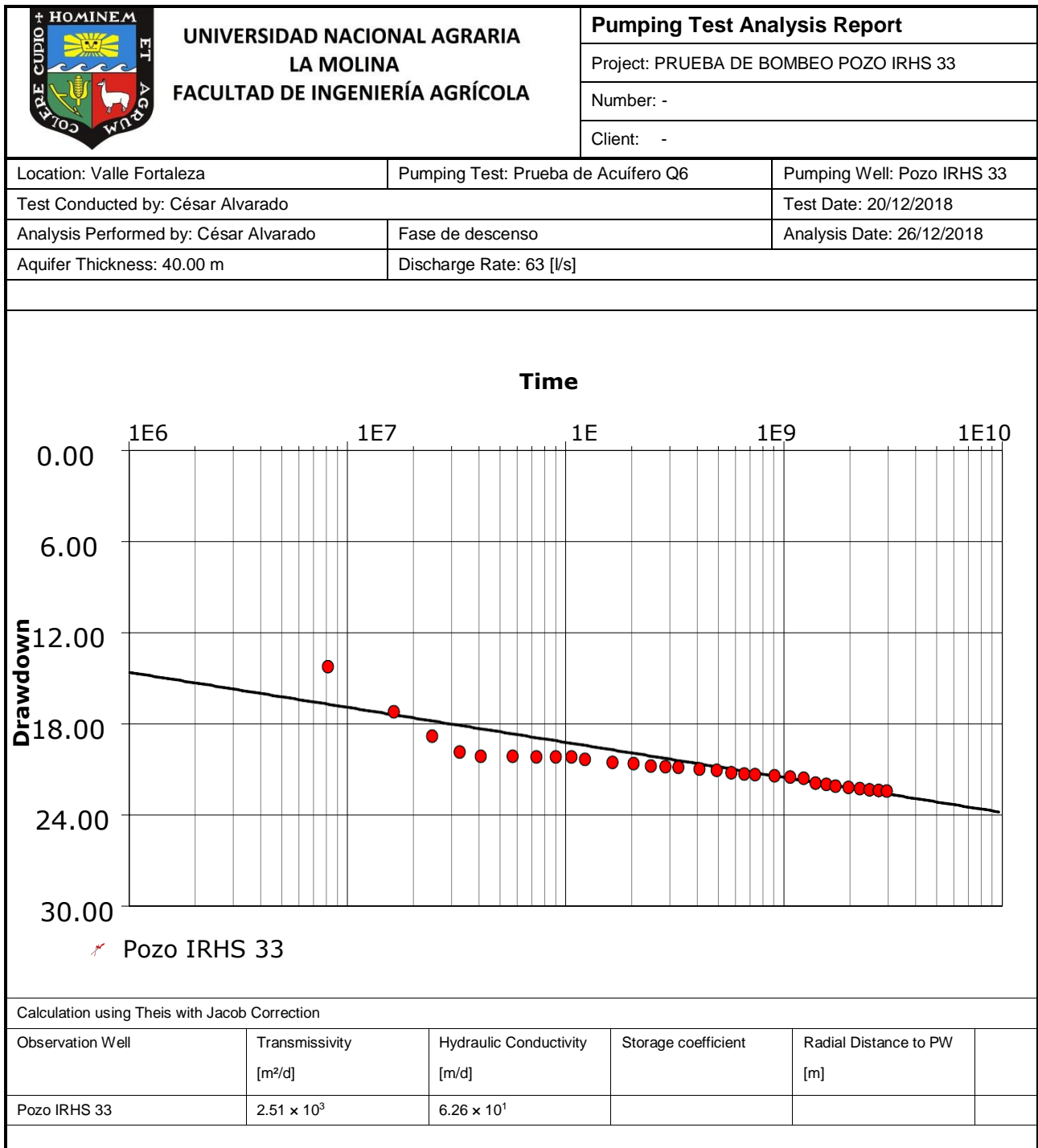


Figura 36: Análisis de prueba de bombeo pozo IRHS 33 – Fase de recuperación

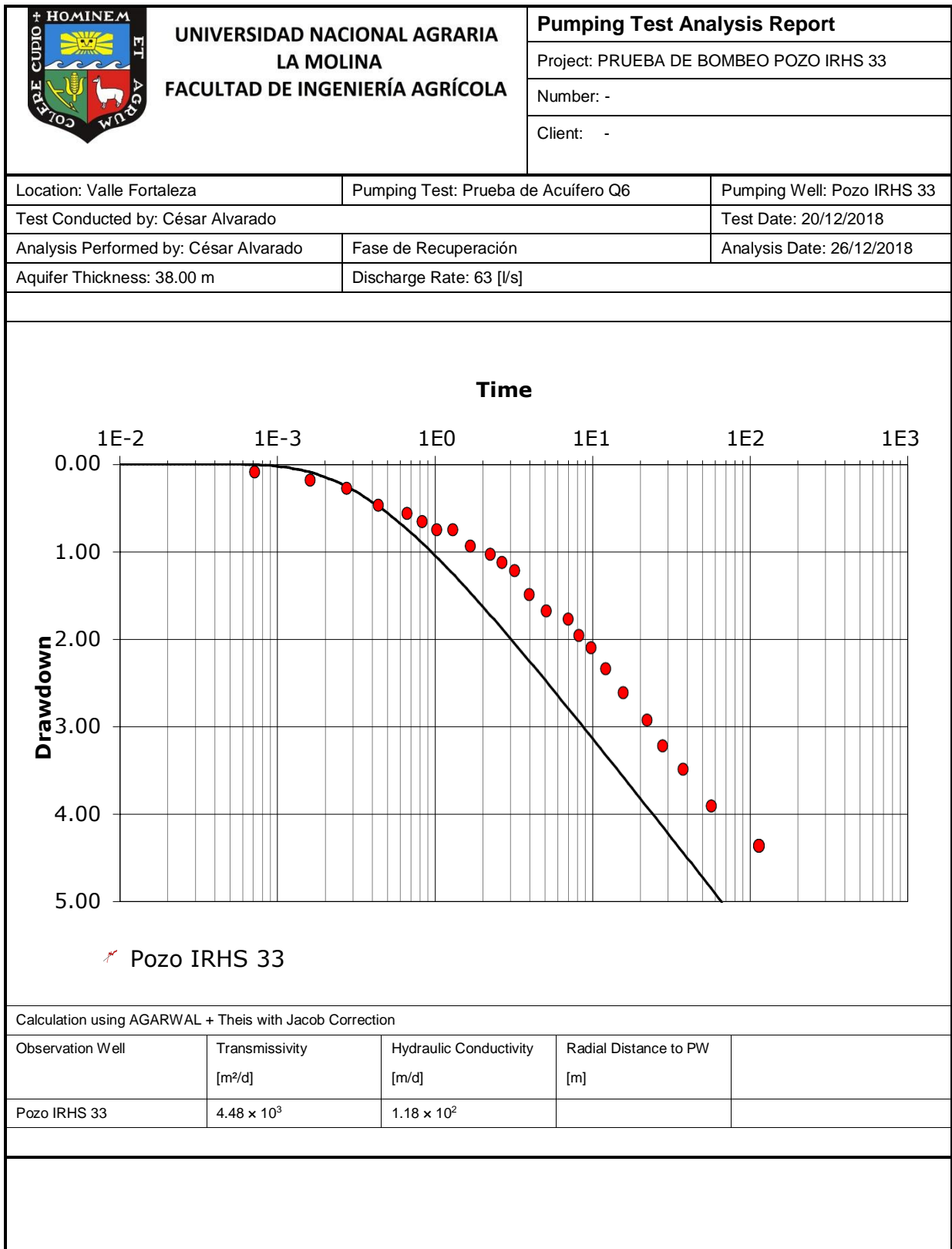


Figura 37: Perfil litológico generalizado

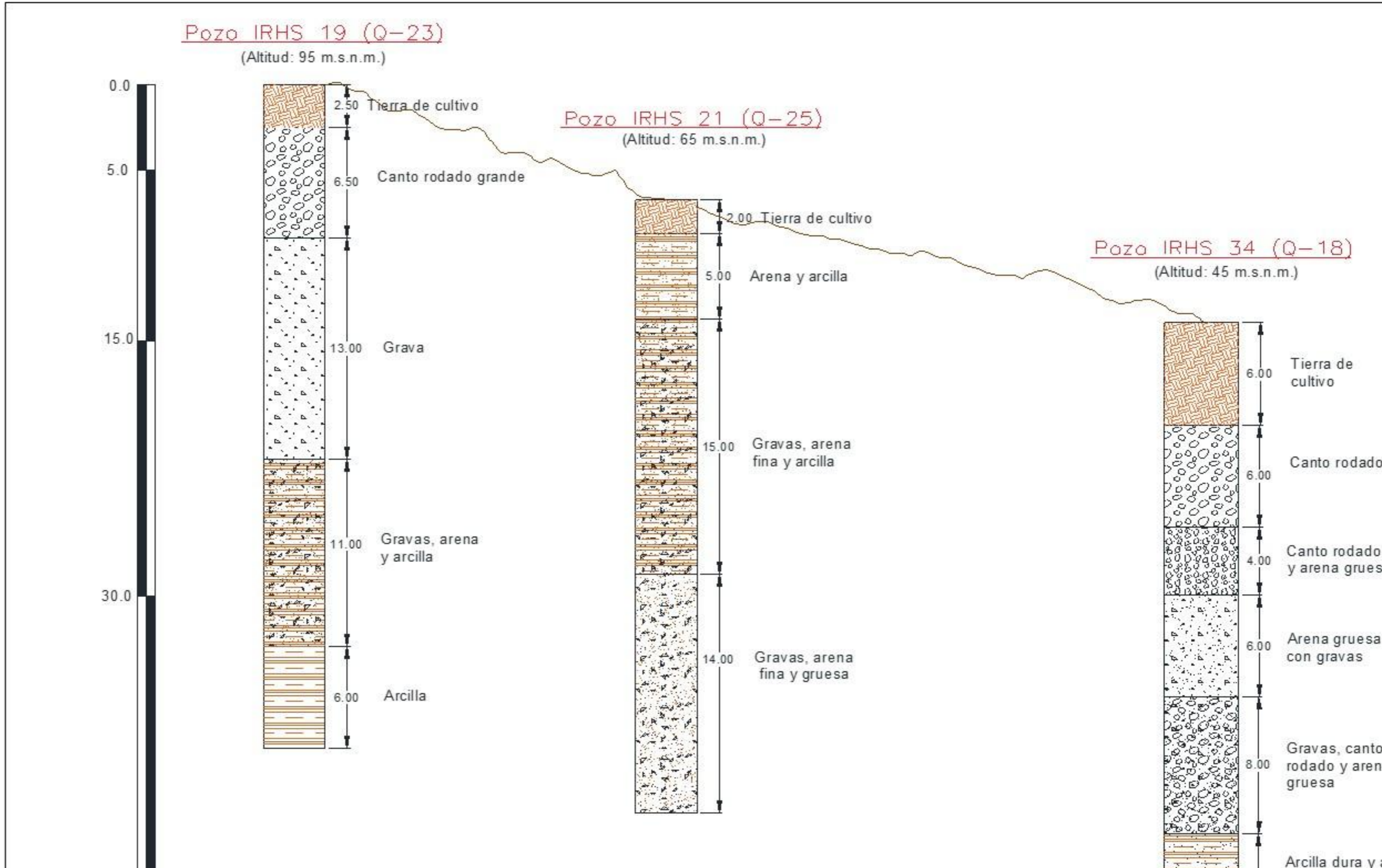


Figura 38: Diagrama de Piper para 7 pozos – acuífero Fortaleza

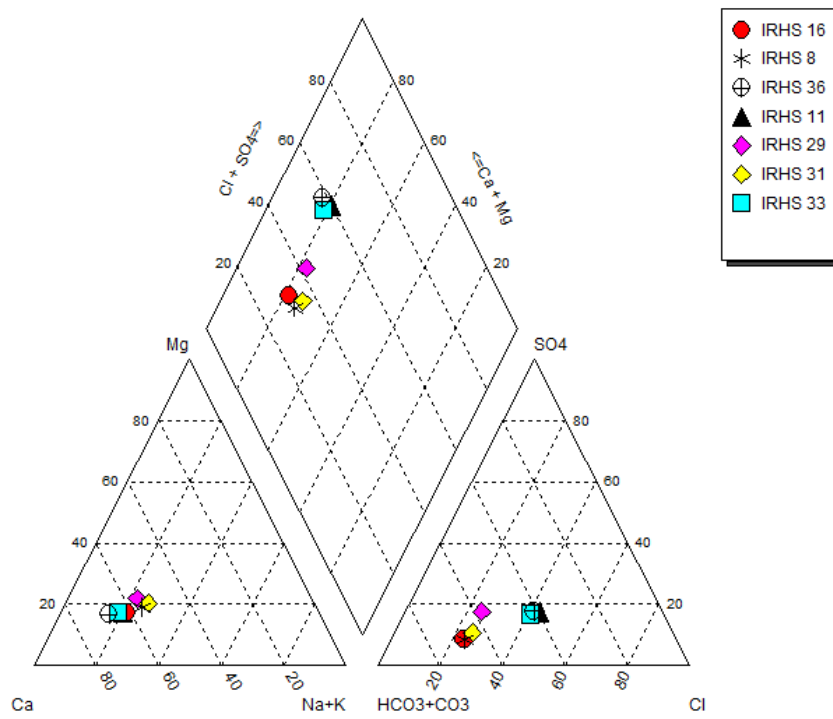


Figura 39: Diagrama de Piper para 8 pozos – acuífero Fortaleza

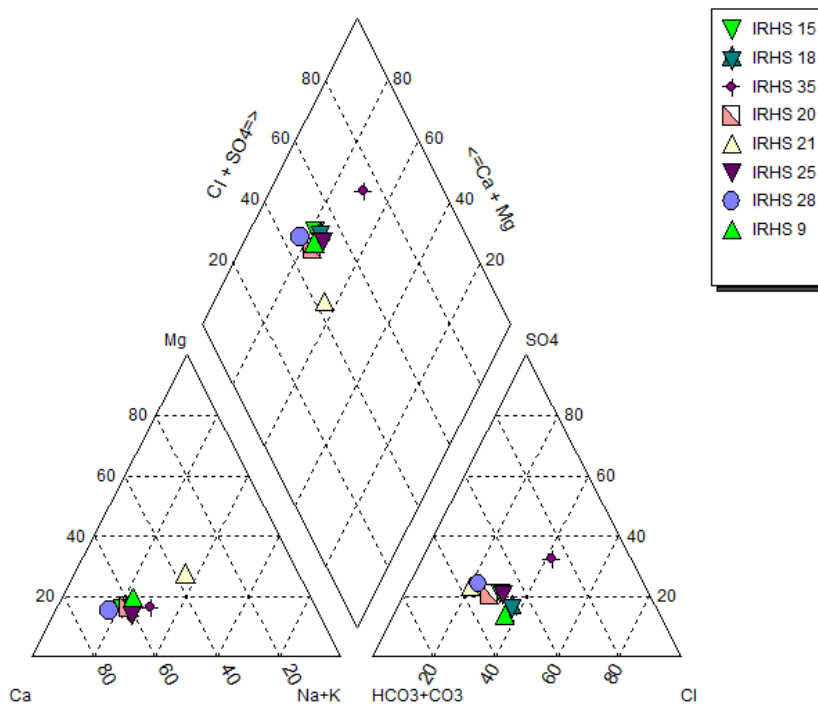


Figura 40: Diagrama de Schoeller para 7 pozos – acuífero Fortaleza

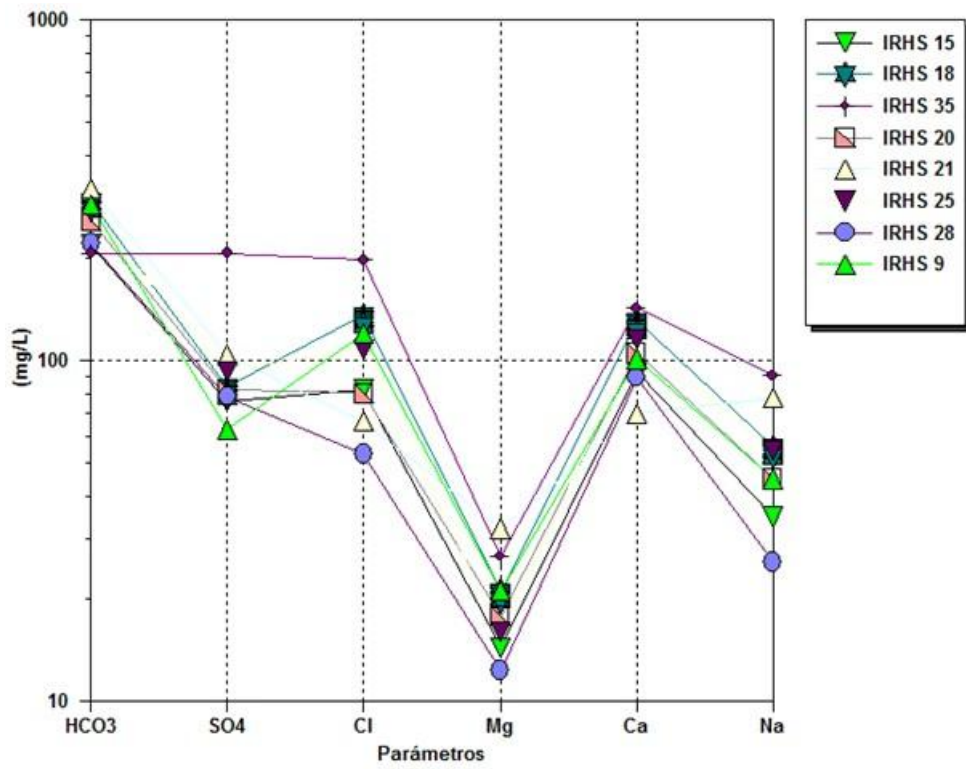


Figura 41: Diagrama de Schoeller para 8 pozos – acuífero Fortaleza

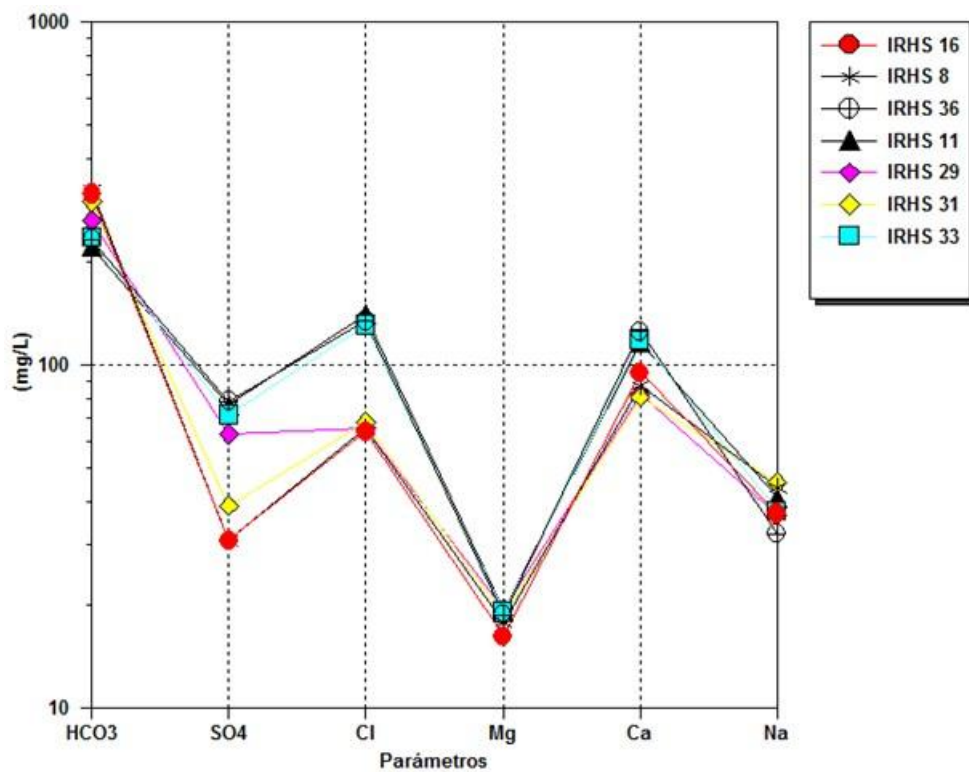


Figura 42: Diagrama de Wilcox para 7 pozos - acuífero Fortaleza

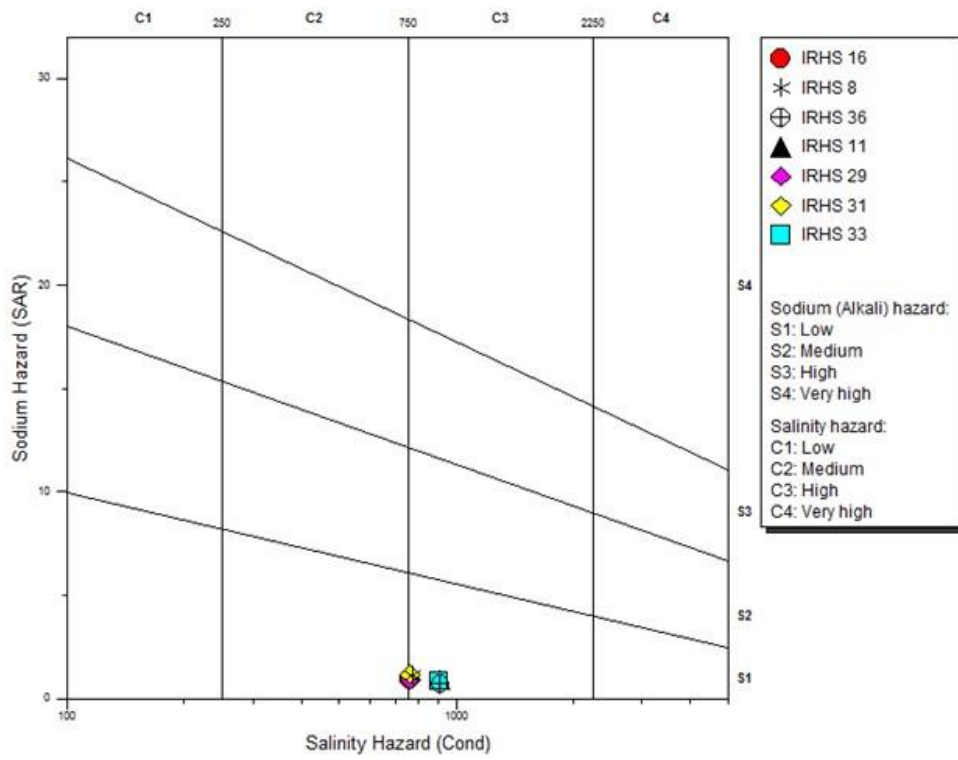


Figura 43: Diagrama de Wilcox para 8 pozos – acuífero Fortaleza

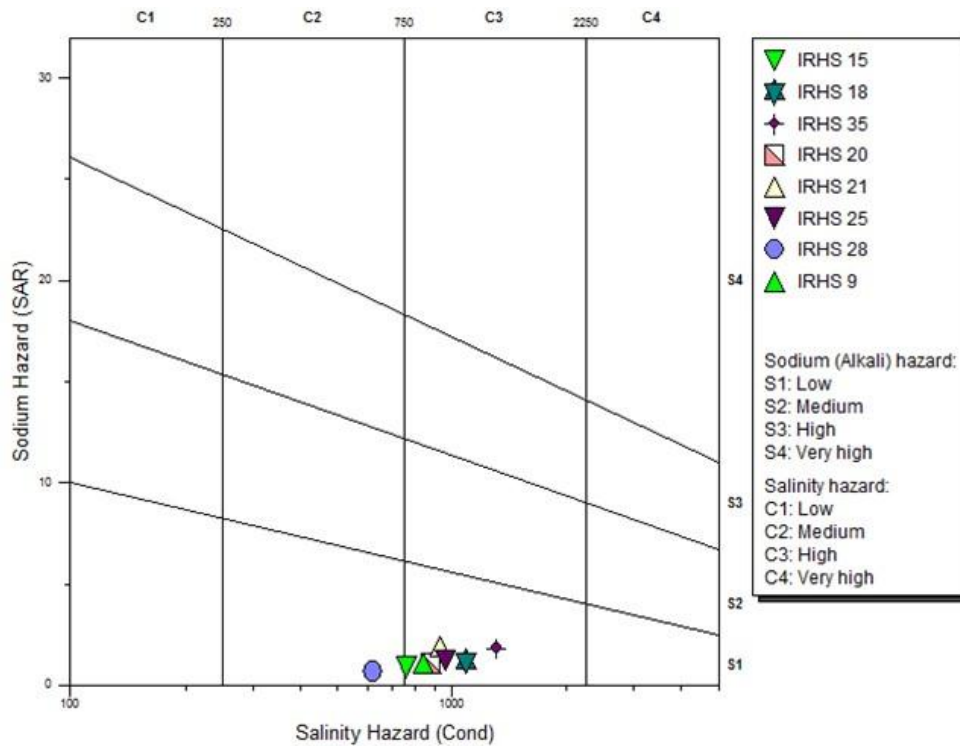


Figura 44: Modelo conceptual I

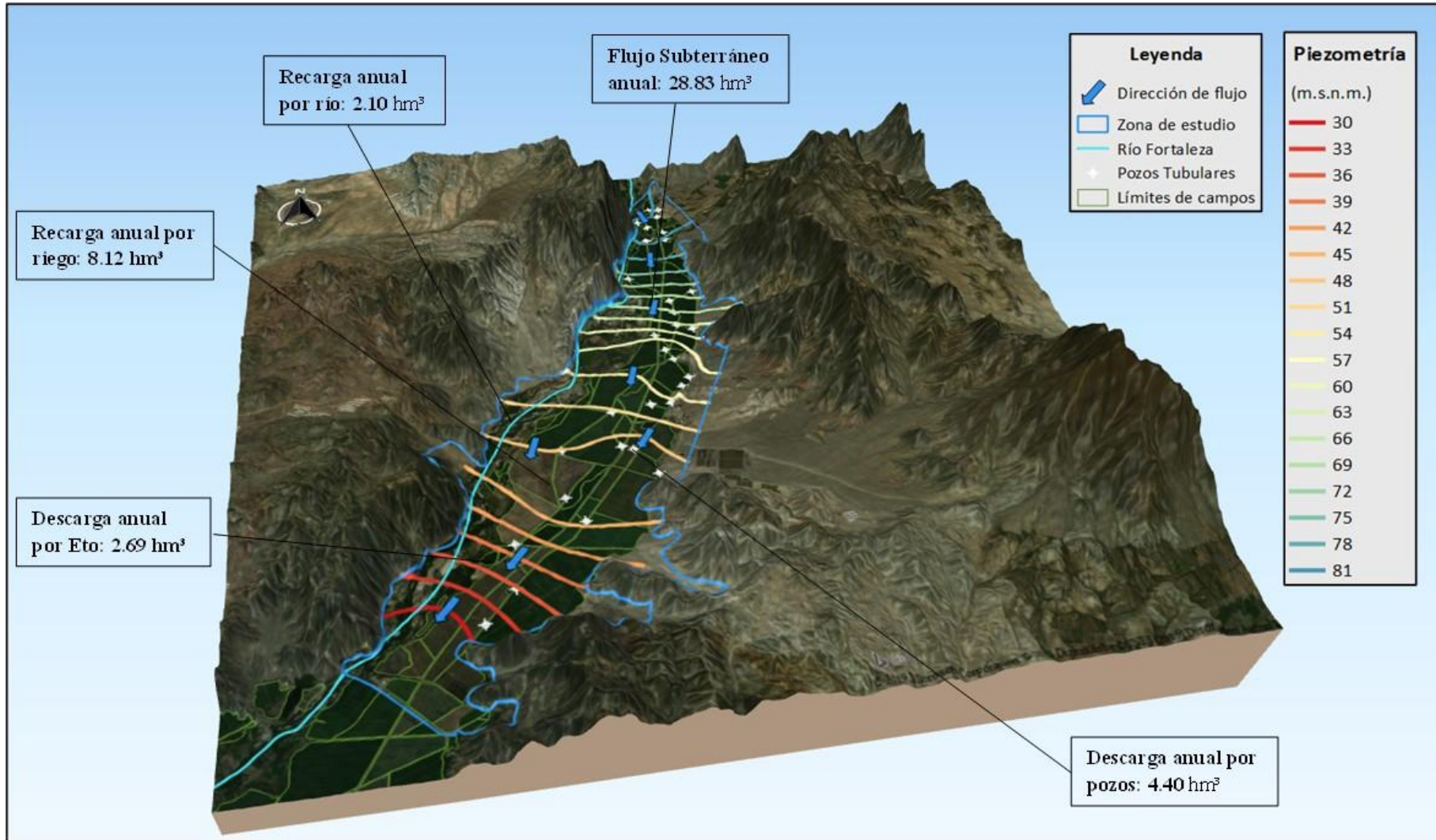
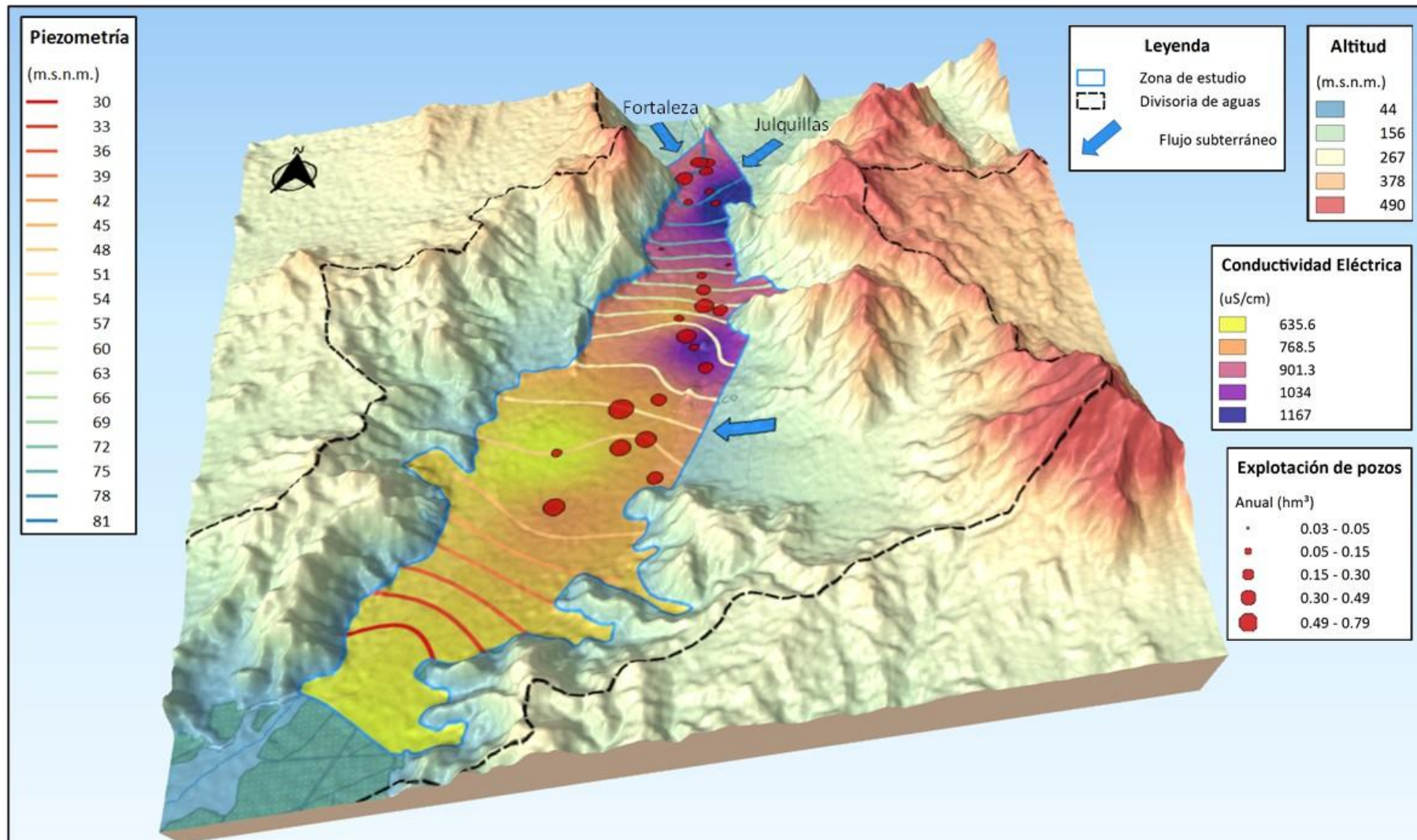
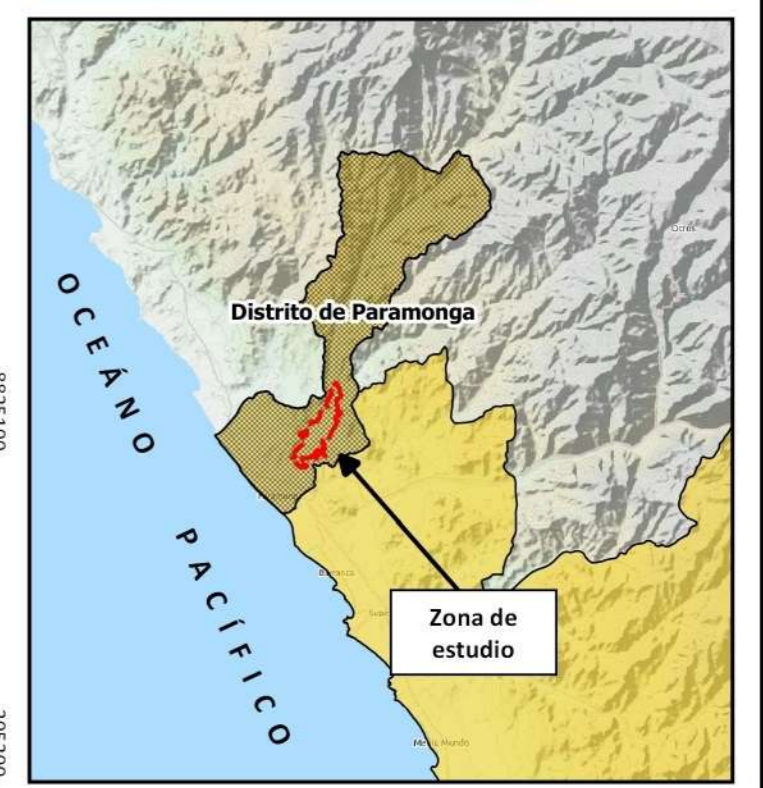
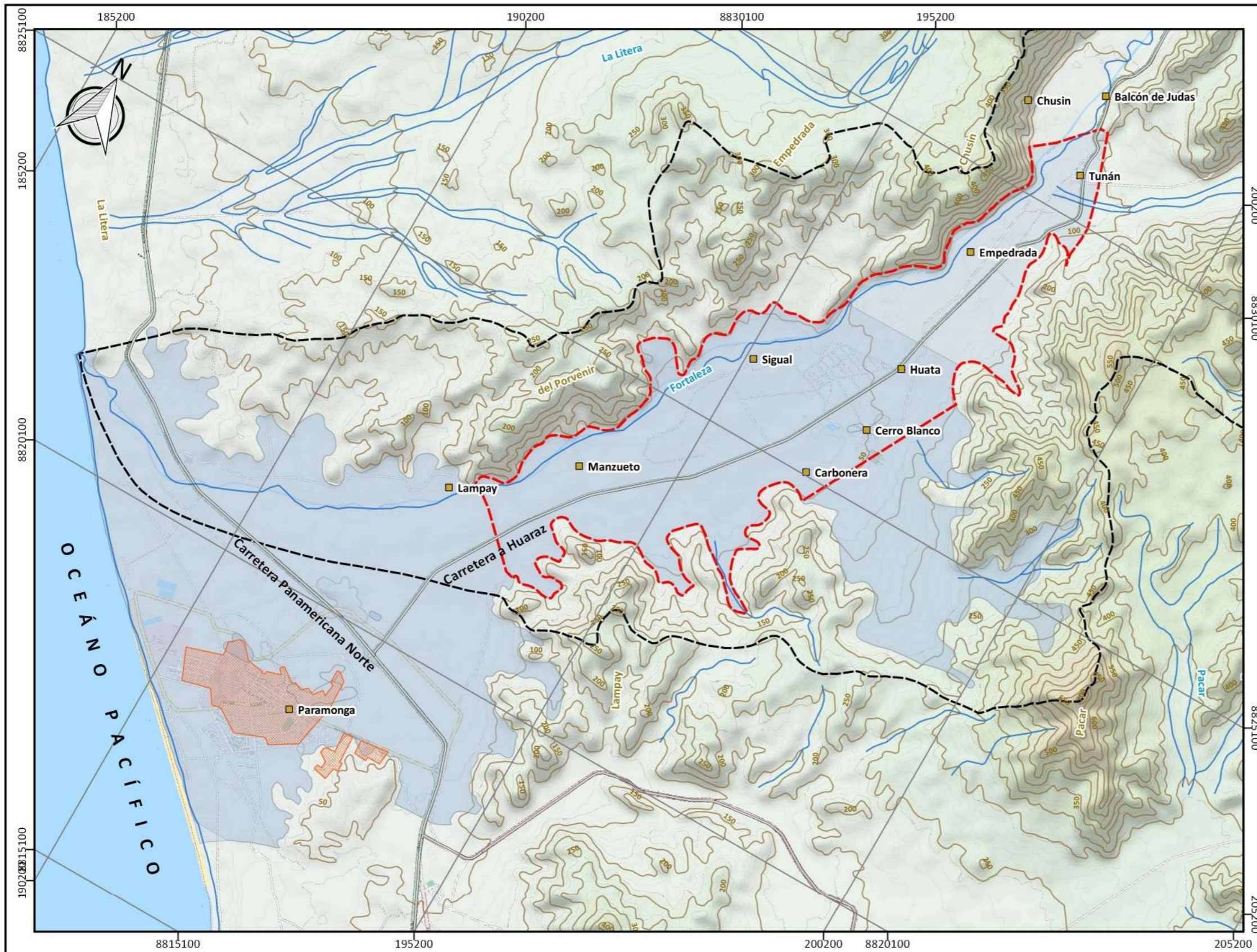


Figura 45: Modelo conceptual II



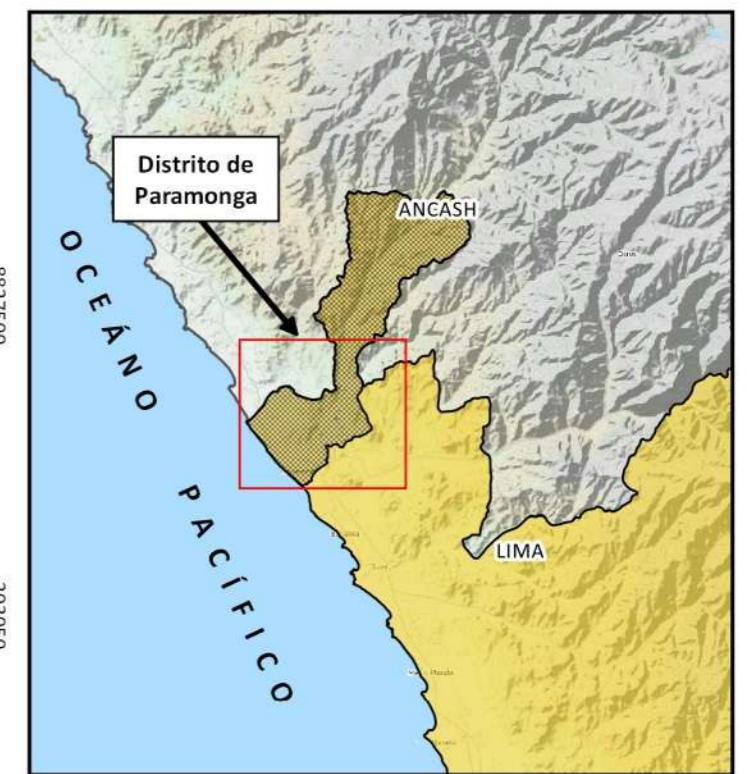
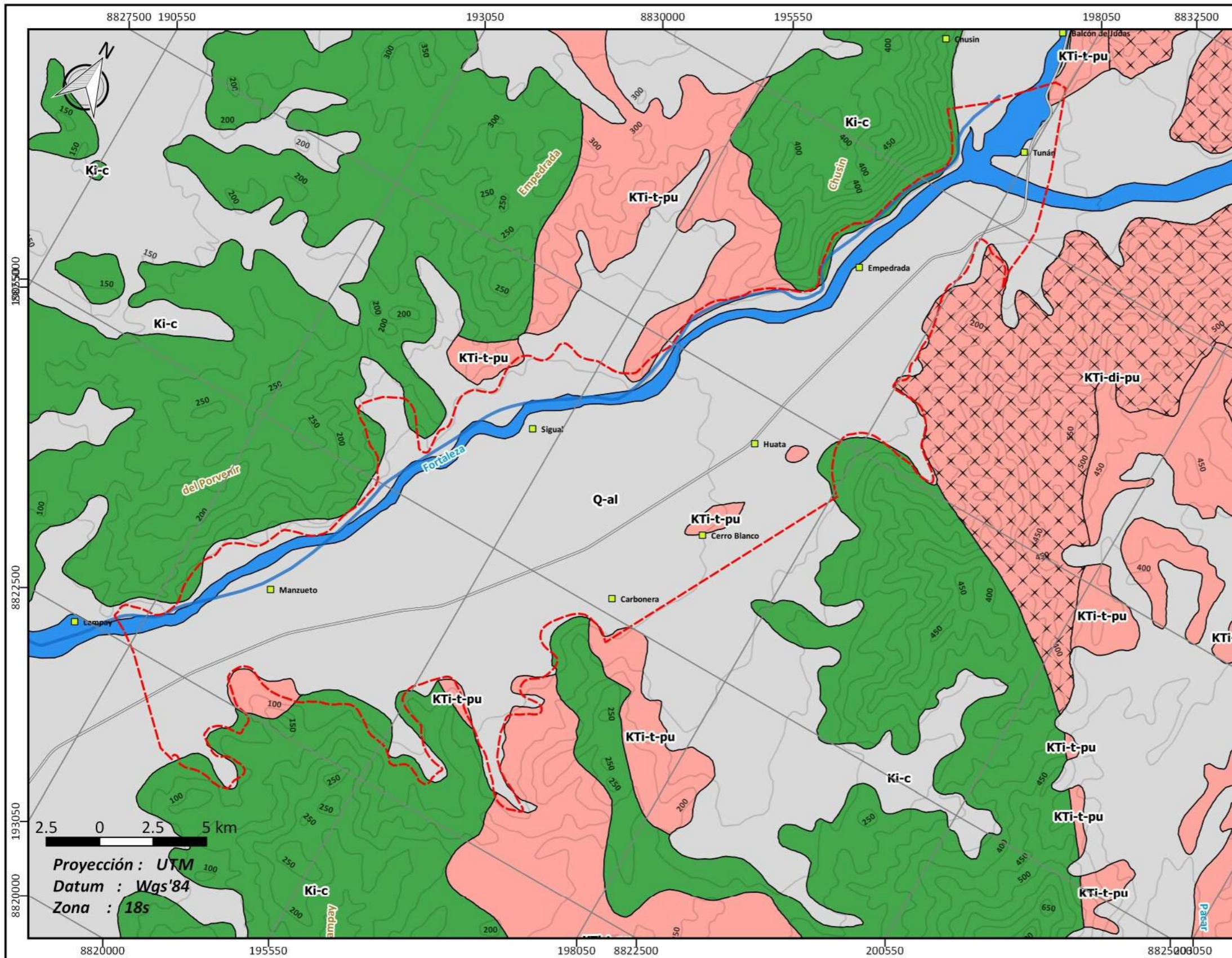
ANEXO 2: MAPAS



Proyección : UTM
 Datum : Wgs'84
 Zona : 18s

Leyenda	
	Zona de estudio
	Cuenca Fortaleza
	Casco Urbano
	Centro Poblado
	Vías de transporte
	Curvas de nivel 50m
	Ríos

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS			 Mapa n.º: <h1 style="font-size: 2em;">1</h1>
Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA			
Plano: Ubicación de la zona de estudio			
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: 1 / 80 000	
Fuente: INRENA, AIPSAA, ANA	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado	



Proyección : UTM
Datum : Wgs'84
Zona : 18s

Leyenda	
	Zona de estudio
	Curvas de nivel 50m
	Huella Fluvial
	Carretera
	Localidad

SISTEMA	SERIE	FORM. O GRUPO	SED. y VOLC.
CUATERNARIO		Depósitos Aluviales	Q-al
TERCIARIO	Interior	Volcánico Callpuy	KTI-vca
	Superior	Discord.	
CRETACEO	Interior	Fm. Casma	KI-c

ROCAS INTRUSIVAS DEL CRETACEO SUPERIOR TERCARIO INFERIOR EN ORDEN APROXIMADA DE SUS EDADES RELATIVAS		
	Tonalita	COMPLEJO PURMACANA
	Diorita	

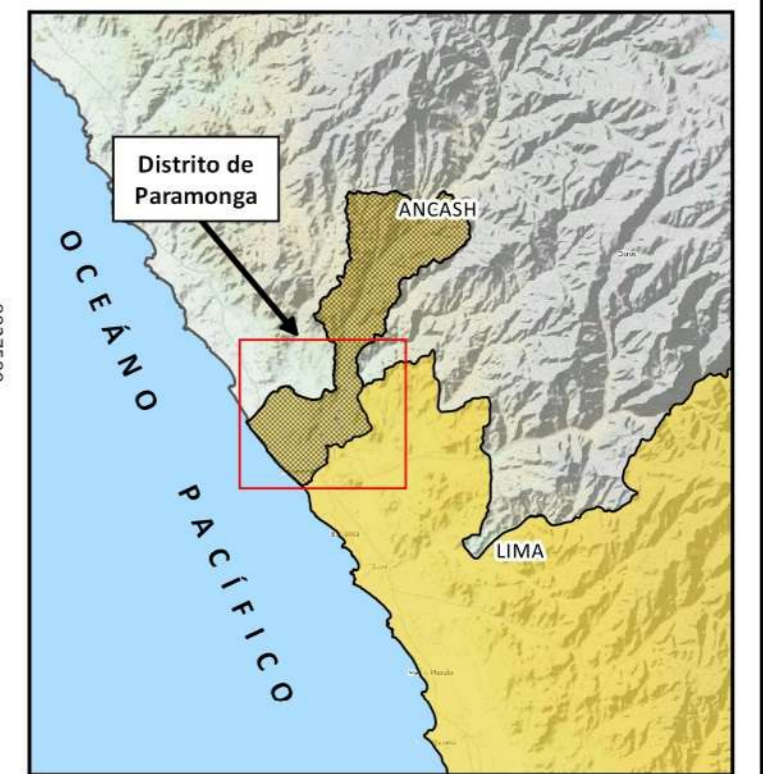
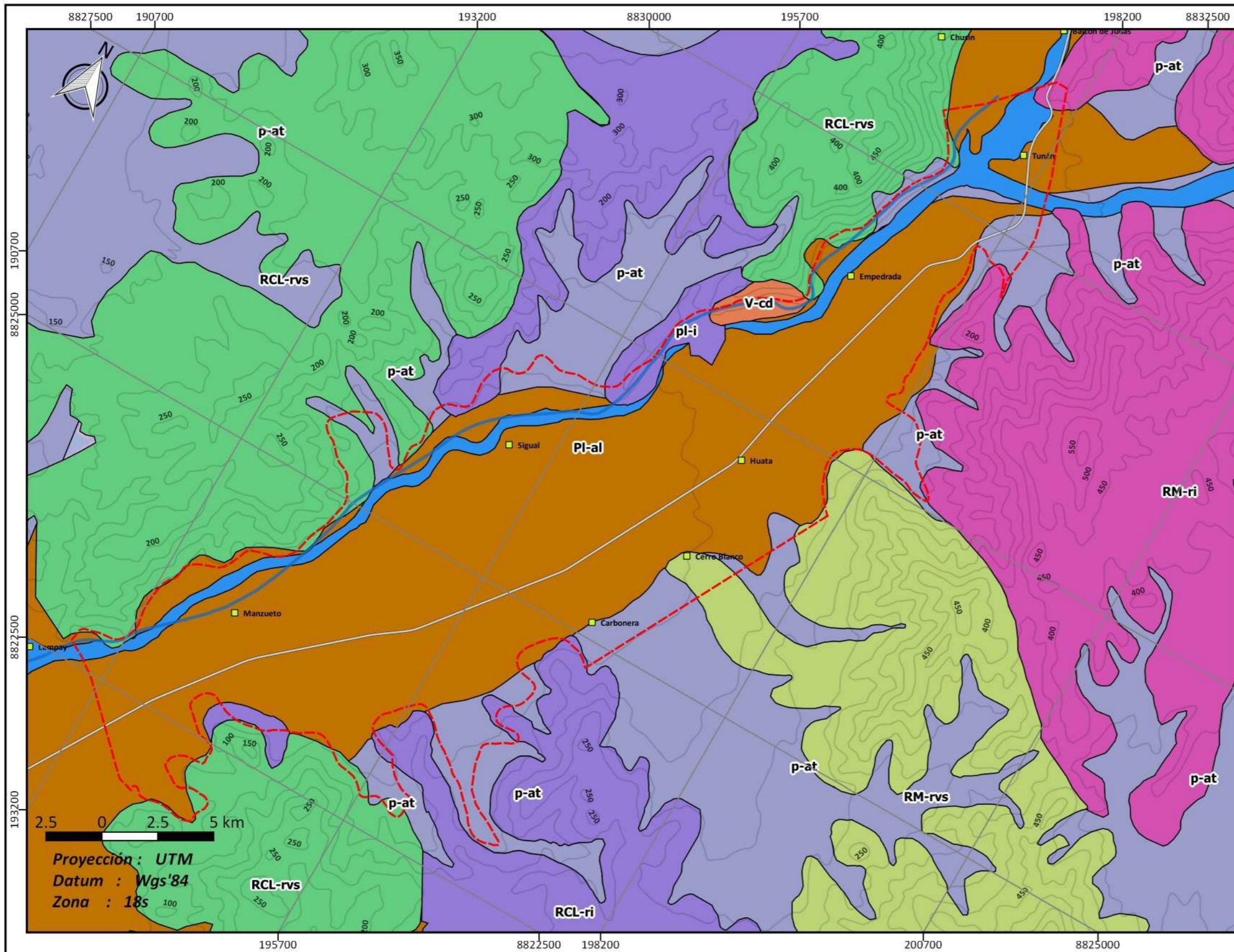


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS



Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLOGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA		
Plano: Geología de la zona de estudio		
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: 1/40000
Fuente: INGENMET - IGN	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado

Plano n.º: **2**



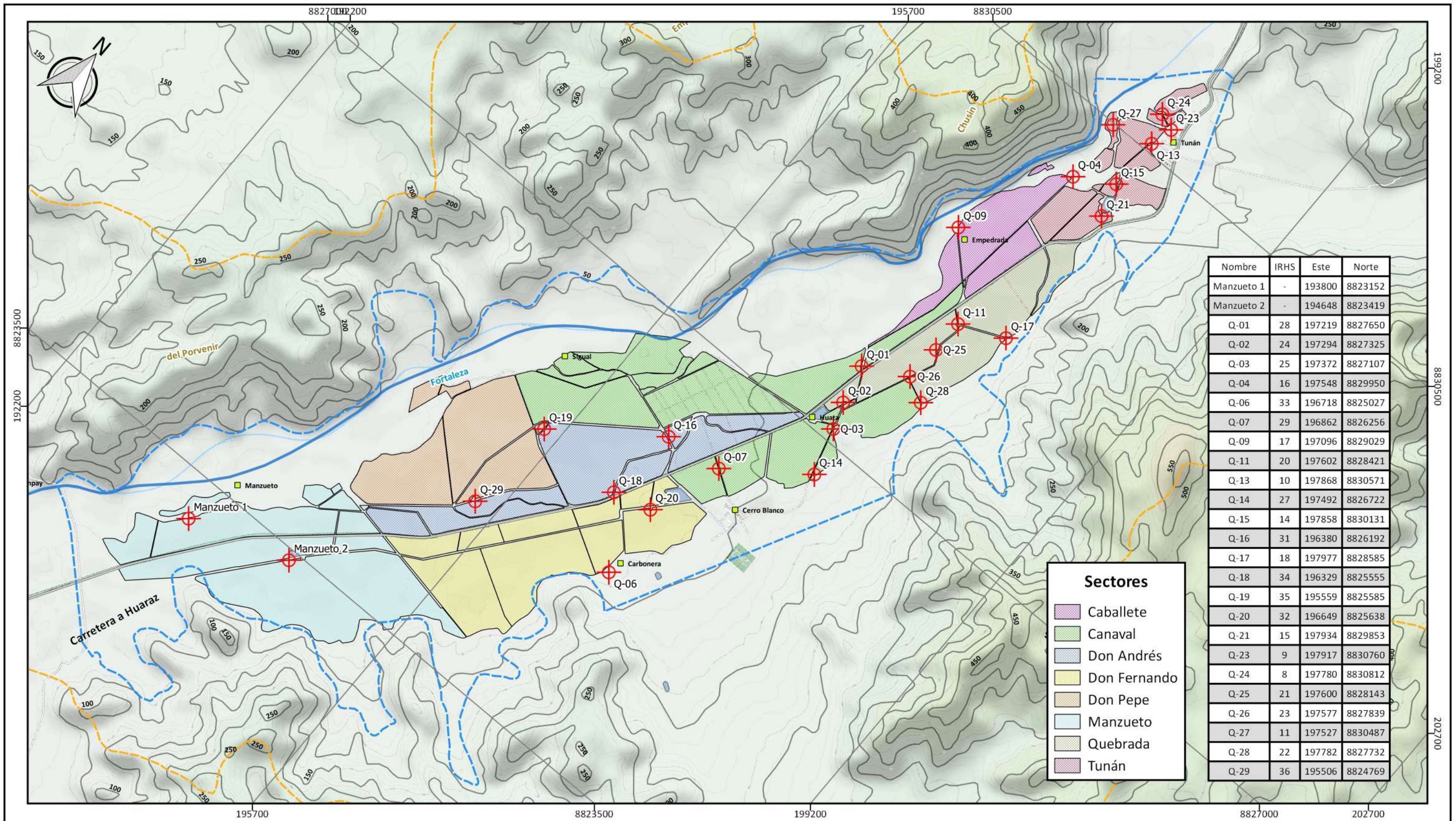
Leyenda

- Zona de estudio
- Curvas de nivel 50m
- Carretera
- Localidad

Subunidad Geomorfológica

<ul style="list-style-type: none"> RCL-ri: Colina o lomada en roca intrusiva RCL-rvs: Colima o lomada en roca volcano-sedimentaria RM-ri: Montaña en roca intrusiva RM-rvs: Montaña en roca volcánico-sedimentaria V-cd: Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial 	<ul style="list-style-type: none"> PI-i: Llanura o planicie inundable PI-al: Llanura o planicie aluvial p-at: Vertiente o Piedemonte aluvio-torrencial
--	--

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS			3
Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA			
Plano: Geomorfología de la zona de estudio			
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: 1/40000	
Fuente: INGEMMET - IGN	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado	



Nombre	IRHS	Este	Norte
Manzueto 1	-	193800	8823152
Manzueto 2	-	194648	8823419
Q-01	28	197219	8827650
Q-02	24	197294	8827325
Q-03	25	197372	8827107
Q-04	16	197548	8829950
Q-06	33	196718	8825027
Q-07	29	196862	8826256
Q-09	17	197096	8829029
Q-11	20	197602	8828421
Q-13	10	197868	8830571
Q-14	27	197492	8826722
Q-15	14	197858	8830131
Q-16	31	196380	8826192
Q-17	18	197977	8828585
Q-18	34	196329	8825555
Q-19	35	195559	8825585
Q-20	32	196649	8825638
Q-21	15	197934	8829853
Q-23	9	197917	8830760
Q-24	8	197780	8830812
Q-25	21	197600	8828143
Q-26	23	197577	8827839
Q-27	11	197527	8830487
Q-28	22	197782	8827732
Q-29	36	195506	8824769

Sectores	
	Caballete
	Canaval
	Don Andrés
	Don Fernando
	Don Pepe
	Manzueto
	Quebrada
	Tunán

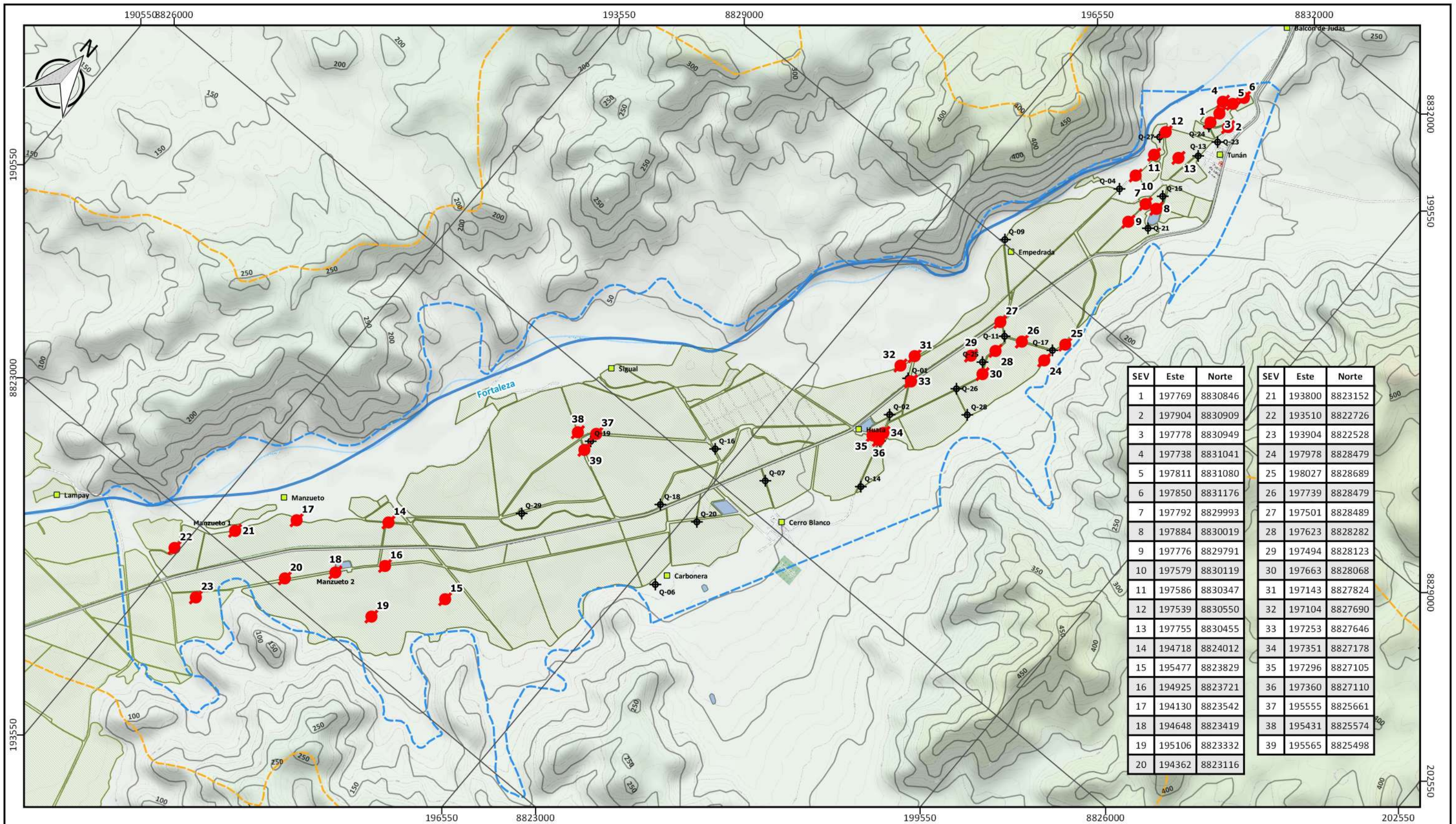


Proyección : UTM
Datum : Wgs'84
Zona : 18s

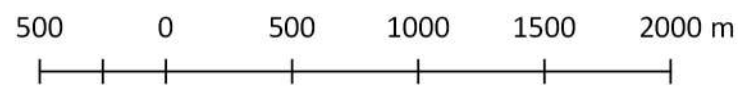
Leyenda	
	Pozos tubulares
	Zona de estudio
	Río Fortaleza
	Centro Poblado
	Vías de transporte
	Curvas de nivel 50m
	Divisoria de aguas

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA			4
Plano: Inventario de pozos de agua subterránea			
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: 1 / 30 000	
Fuente: UNALM, AIPSAA, ANA	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado	



SEV	Este	Norte	SEV	Este	Norte
1	197769	8830846	21	193800	8823152
2	197904	8830909	22	193510	8822726
3	197778	8830949	23	193904	8822528
4	197738	8831041	24	197978	8828479
5	197811	8831080	25	198027	8828689
6	197850	8831176	26	197739	8828479
7	197792	8829993	27	197501	8828489
8	197884	8830019	28	197623	8828282
9	197776	8829791	29	197494	8828123
10	197579	8830119	30	197663	8828068
11	197586	8830347	31	197143	8827824
12	197539	8830550	32	197104	8827690
13	197755	8830455	33	197253	8827646
14	194718	8824012	34	197351	8827178
15	195477	8823829	35	197296	8827105
16	194925	8823721	36	197360	8827110
17	194130	8823542	37	195555	8825661
18	194648	8823419	38	195431	8825574
19	195106	8823332	39	195565	8825498
20	194362	8823116			



Proyección : UTM
 Datum : Wgs'84
 Zona : 18s

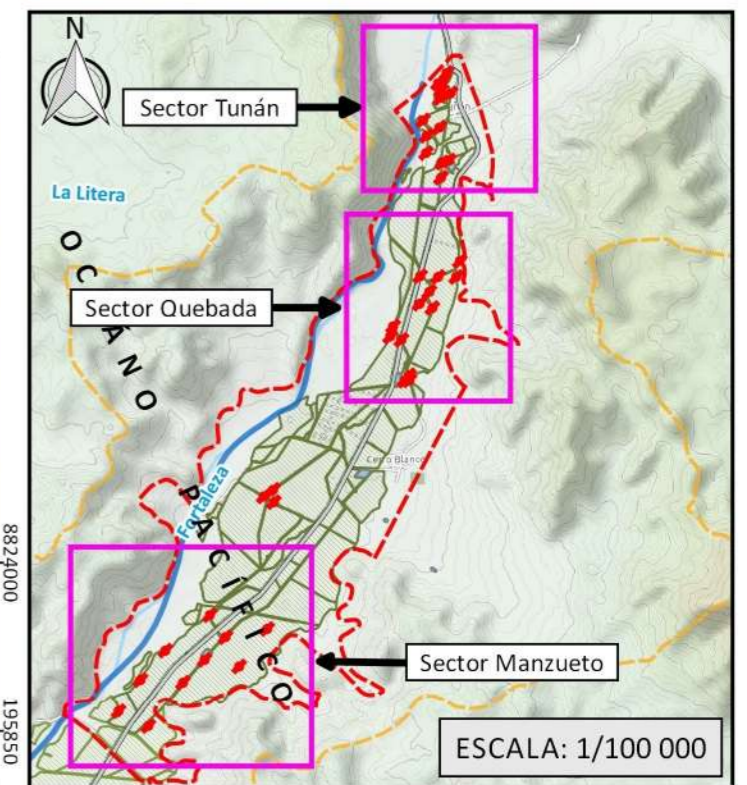
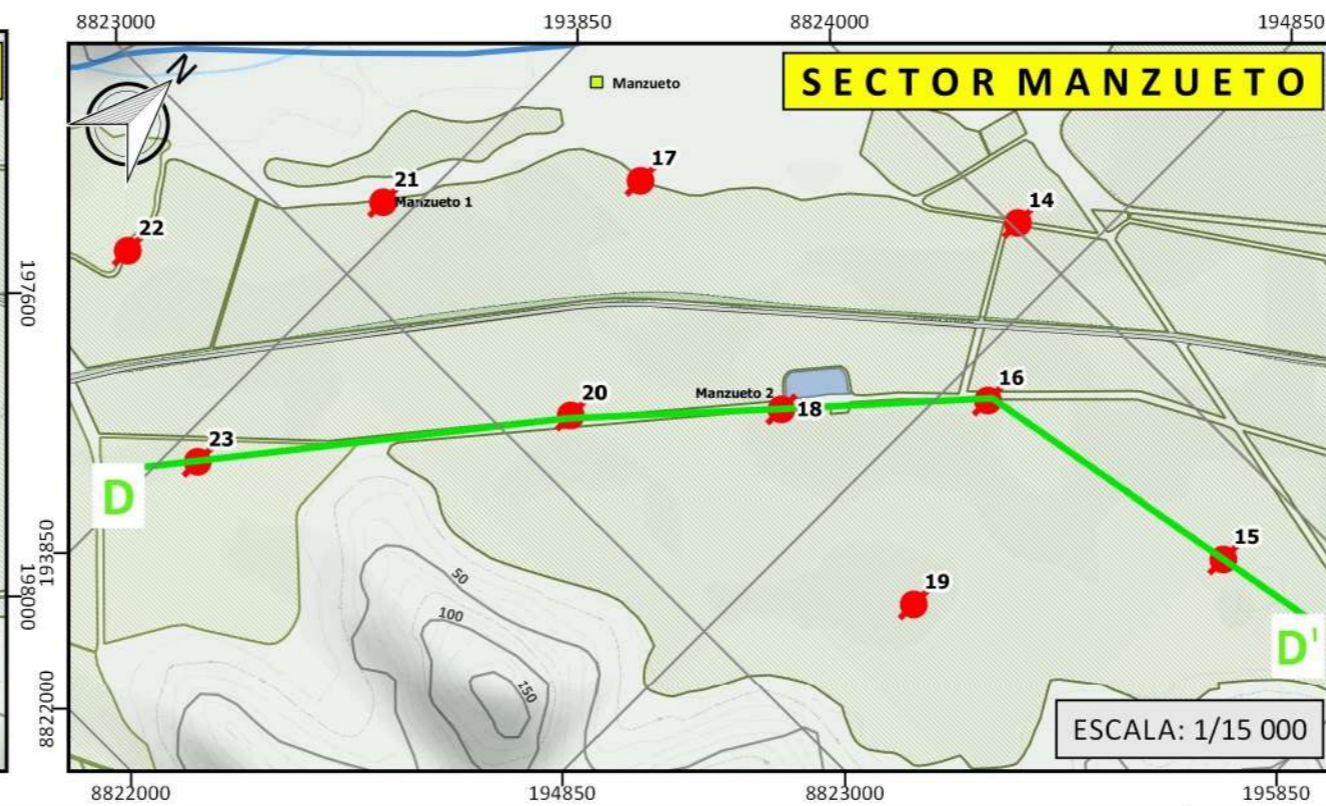
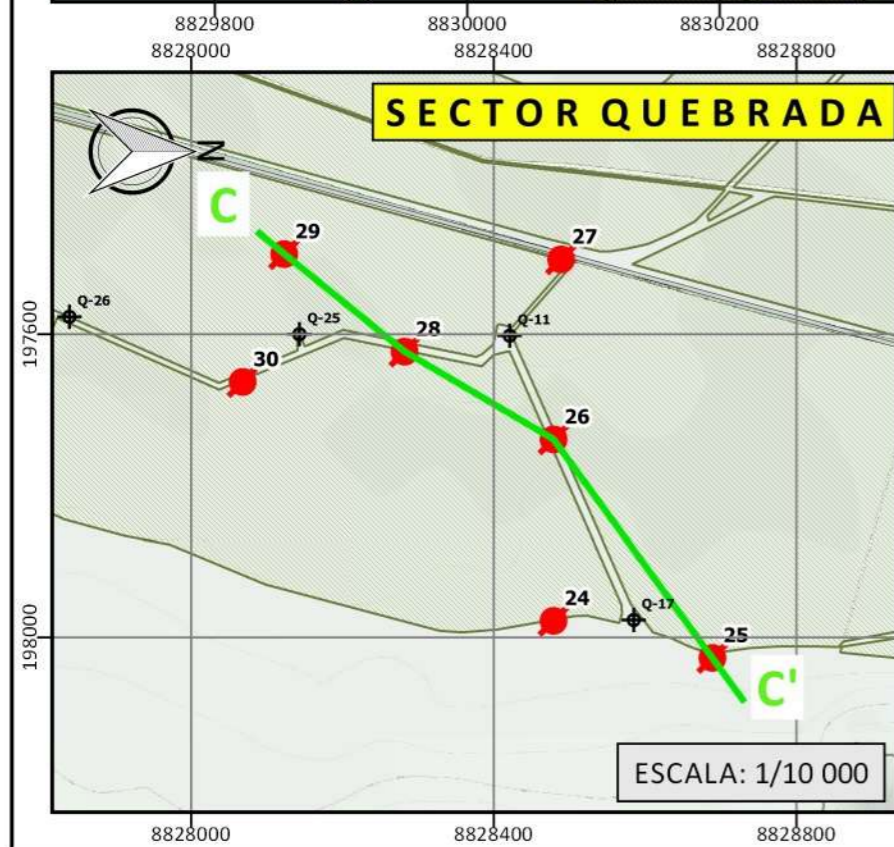
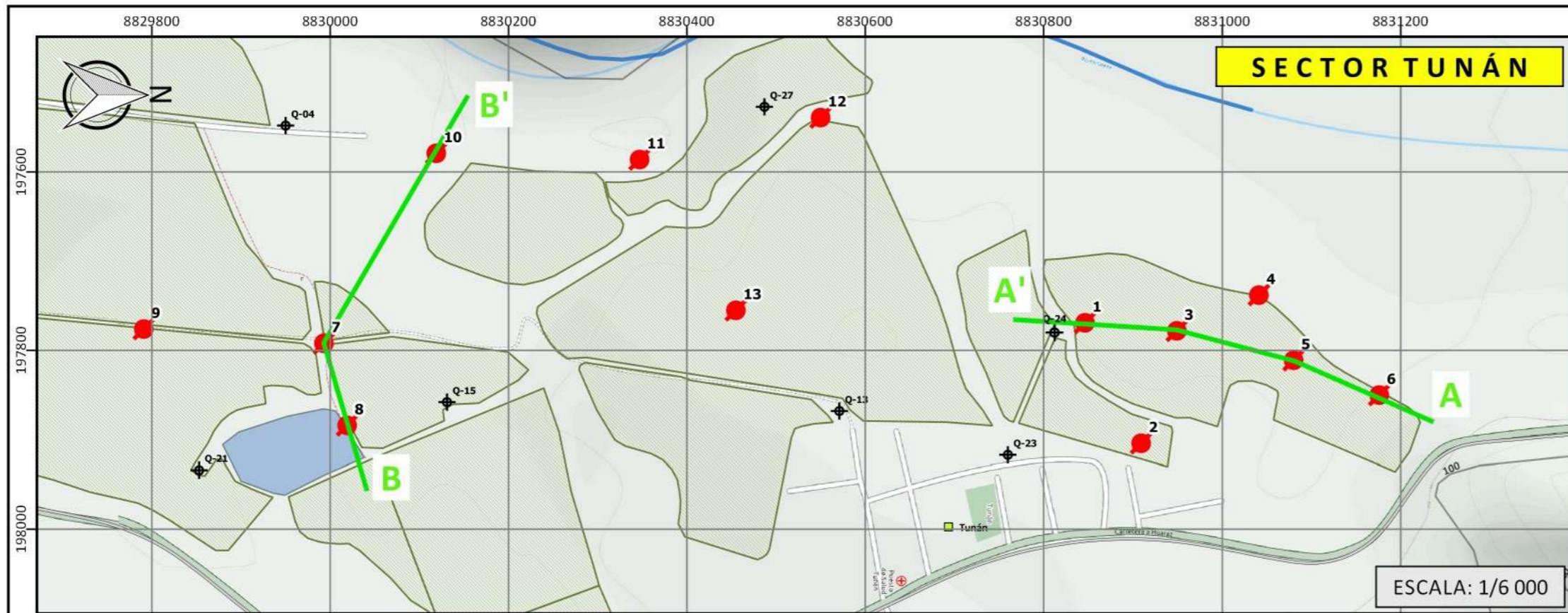
Leyenda			
	S.E.V.		Campos de cultivo
	Pozos tubulares		Centro Poblado
	Río Fortaleza		Curvas de nivel 50m
	Zona_Estudio_pozos		Divisoria de aguas



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS



Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA			Mapa n.º: 5
Plano: Ubicación de Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V.)			
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: Indicada	
Fuente: AIPSAA, UNALM, IGN	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado	



Proyección : UTM
Datum : Wgs'84
Zona : 18s

Leyenda

- Secciones Geoeléctricas
- S.E.V.
- ⊕ Pozos tubulares
- Río Fortaleza
- Campos de cultivo
- Centro Poblado
- Vías de transporte
- Curvas de nivel 50 m.
- Zona de estudio



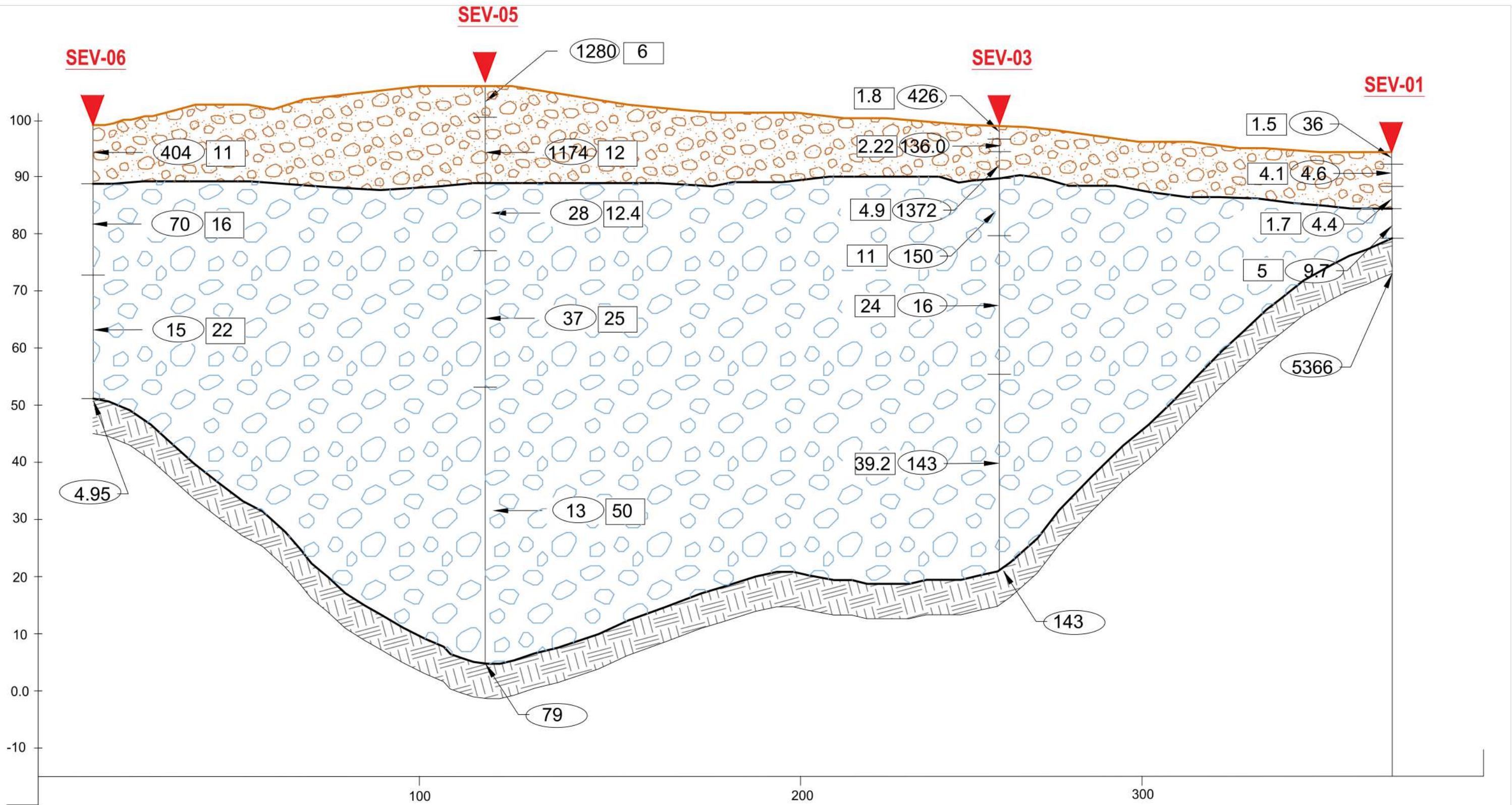
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS



Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA		
Plano: Ubicación de Secciones Geoeléctricas		
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: Indicada
Fuente: INRENA, AIPSAA, ANA	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado

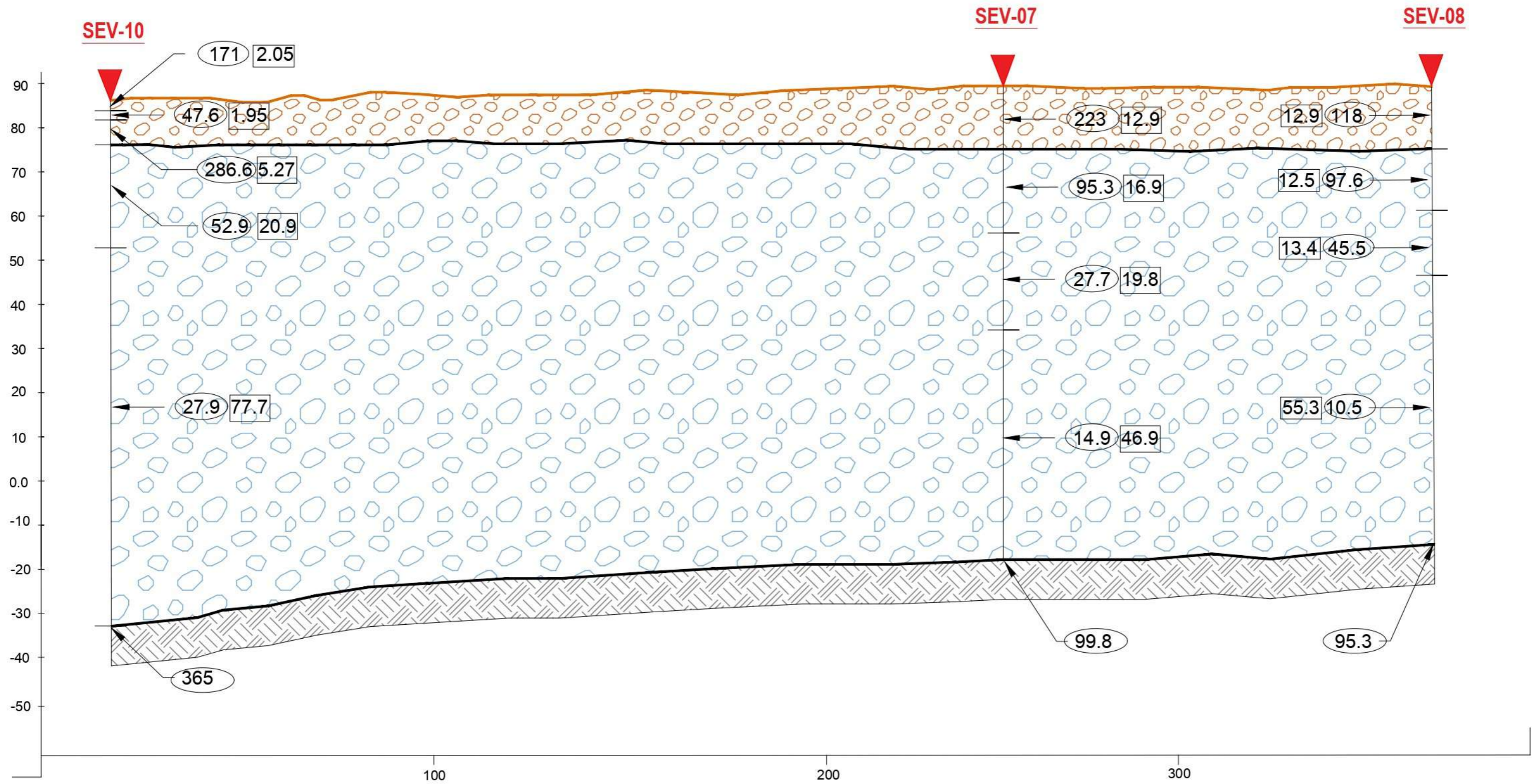
Mapa n.º:

6



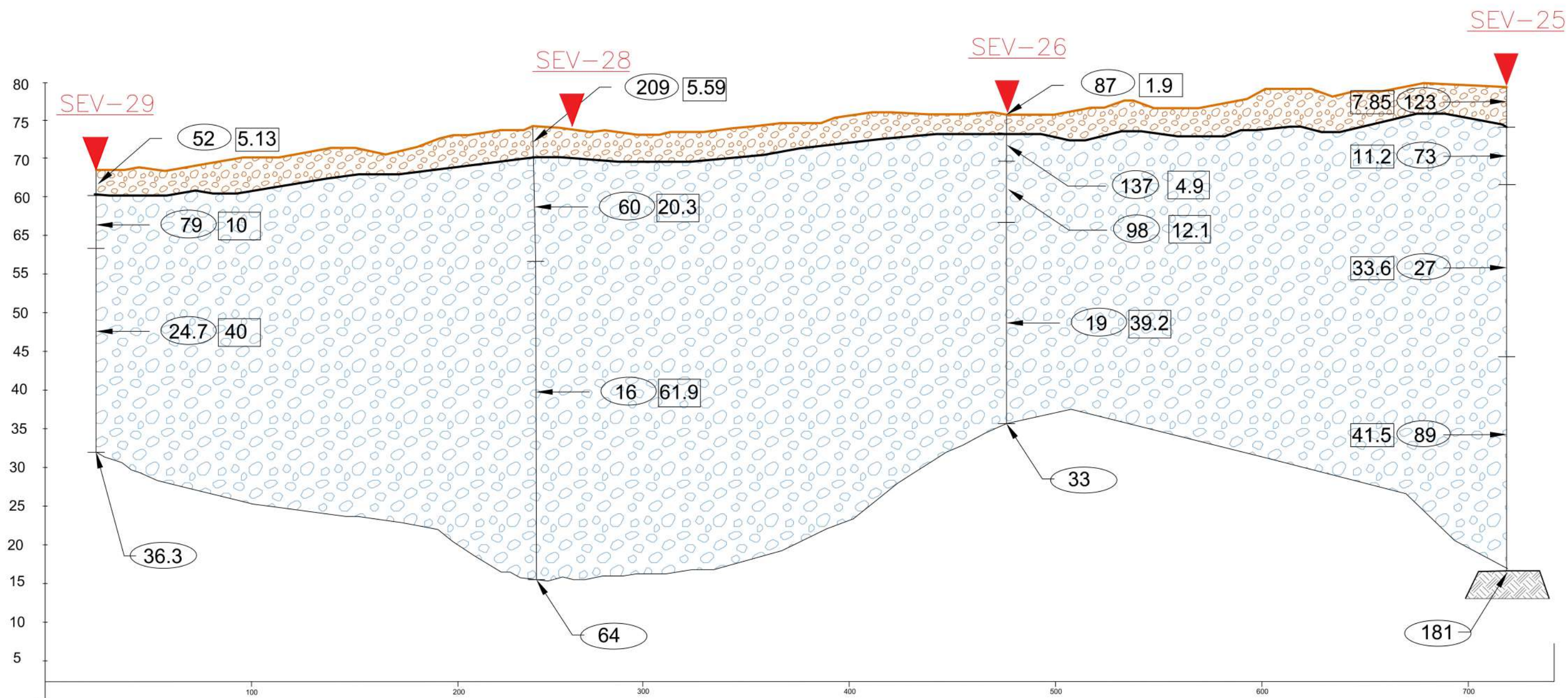
LEYENDA	
$\textcircled{87.7}$	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN OHM-M
$\boxed{143}$	ESPESOR DE LA CAPA EN METROS.
H5	HORIZONTE
	SUPERFICIE DEL SUELO.
	Horizonte superficial con presencia de material fino intercalado con depósitos medios a gruesos tales como limos, arcillas y gravas en estado seco
	Horizonte con presencia de material fino impermeable representado por el basamento rocoso
	Horizonte saturado, con presencia de material medio a grueso y presencia de finos tales como arcillas, arenas, gravas y canto rodado.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS			
Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA			
Plano: Sección Geofísica Generalizada A - A'			Mapa n.º: 6.1
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: Horizontal :1/1000 Vertical :1/1500	
Fuente: AIPSA	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado	



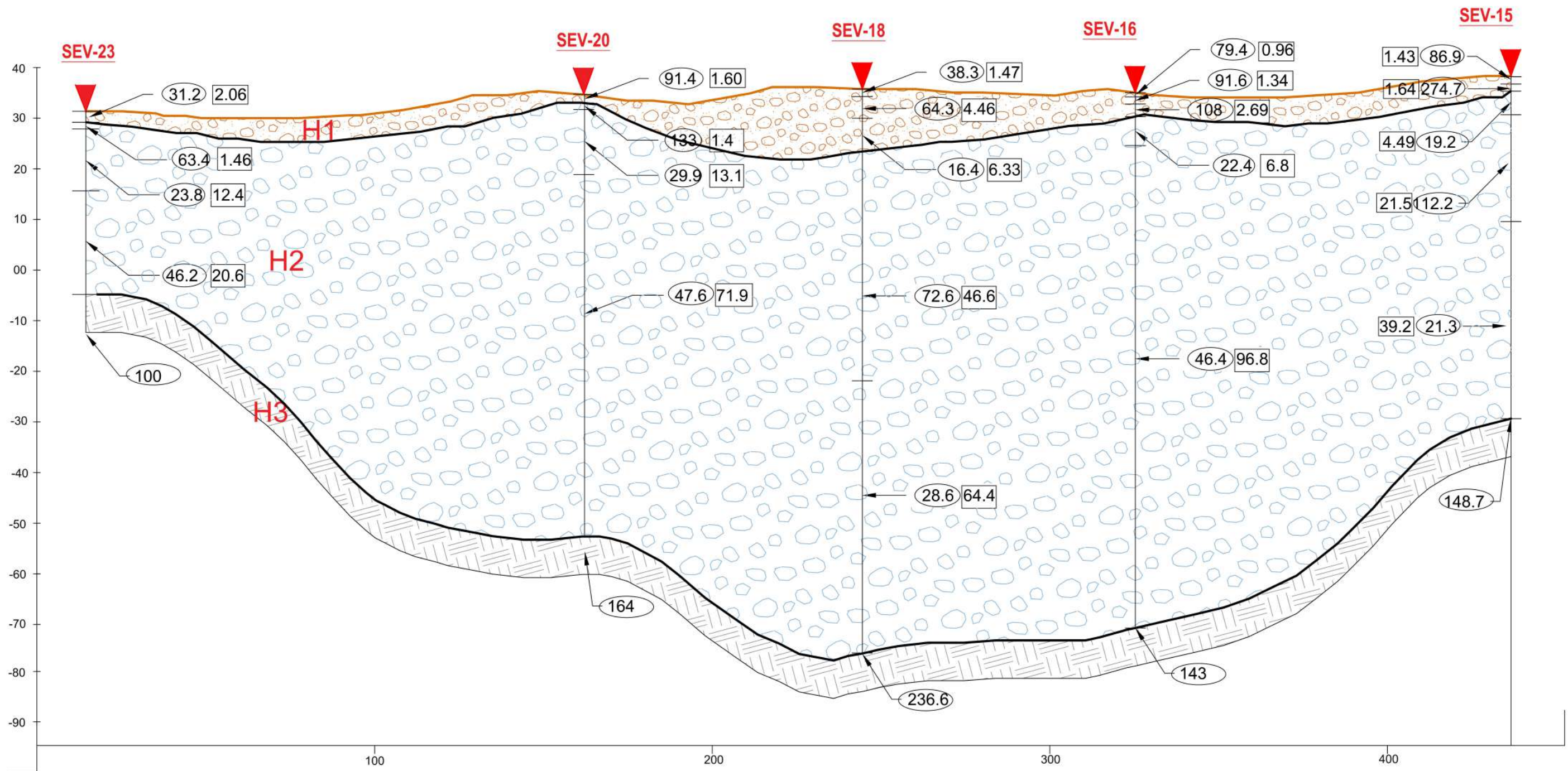
LEYENDA	
(87.7) RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN OHM-M	Horizonte superficial con presencia de material fino intercalado con depósitos medios a gruesos tales como limos, arcillas y gravas en estado seco
[143] ESPESOR DE LA CAPA EN METROS.	Horizonte con presencia de material fino impermeable representado por el basamento rocoso
H5 HORIZONTE	Horizonte saturado, con presencia de material medio a grueso y presencia de finos tales como arcillas, arenas, gravas y canto rodado.
SUPERFICIE DEL SUELO.	

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS			
Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLOGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA			
Plano: Sección Geofísica Generalizada B - B'			Mapa n.º:
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: Horizontal :1/1000 Vertical :1/1250	
Fuente: AIPSAA	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado	
			6.2



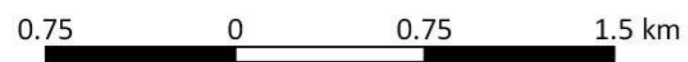
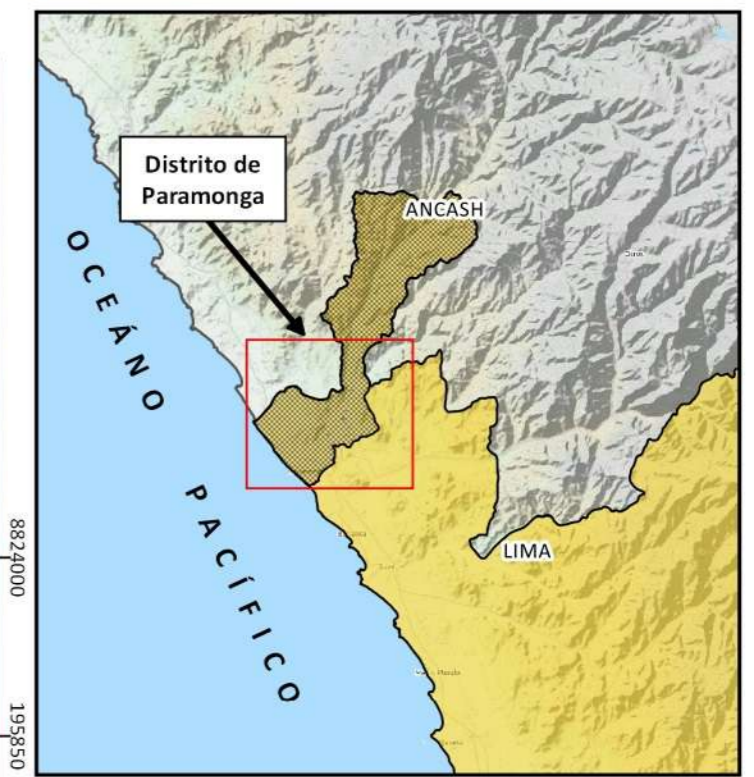
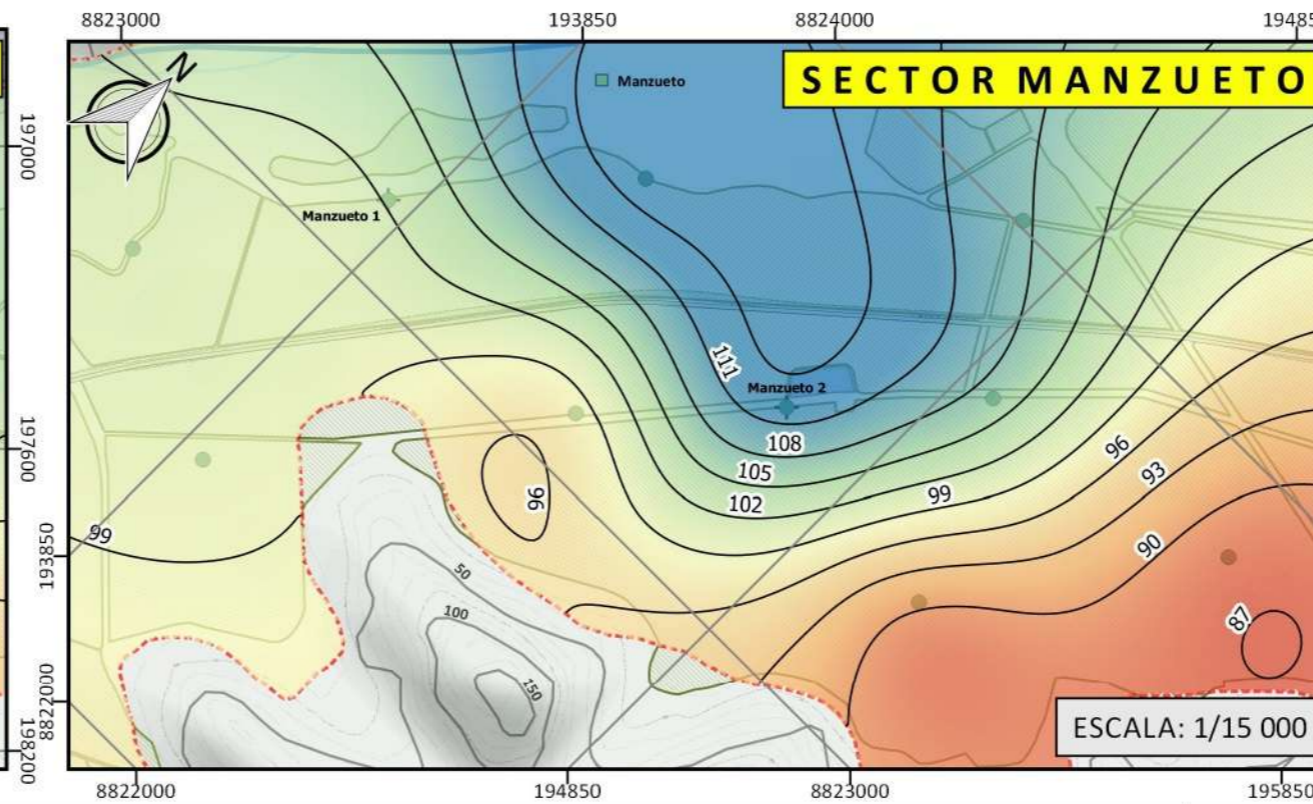
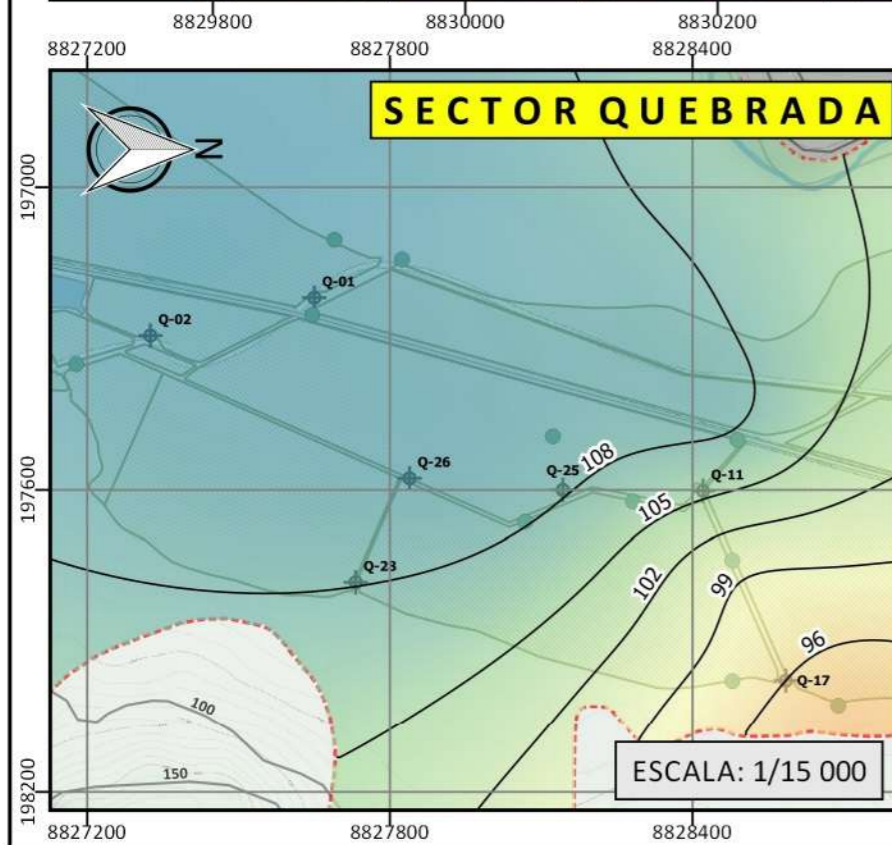
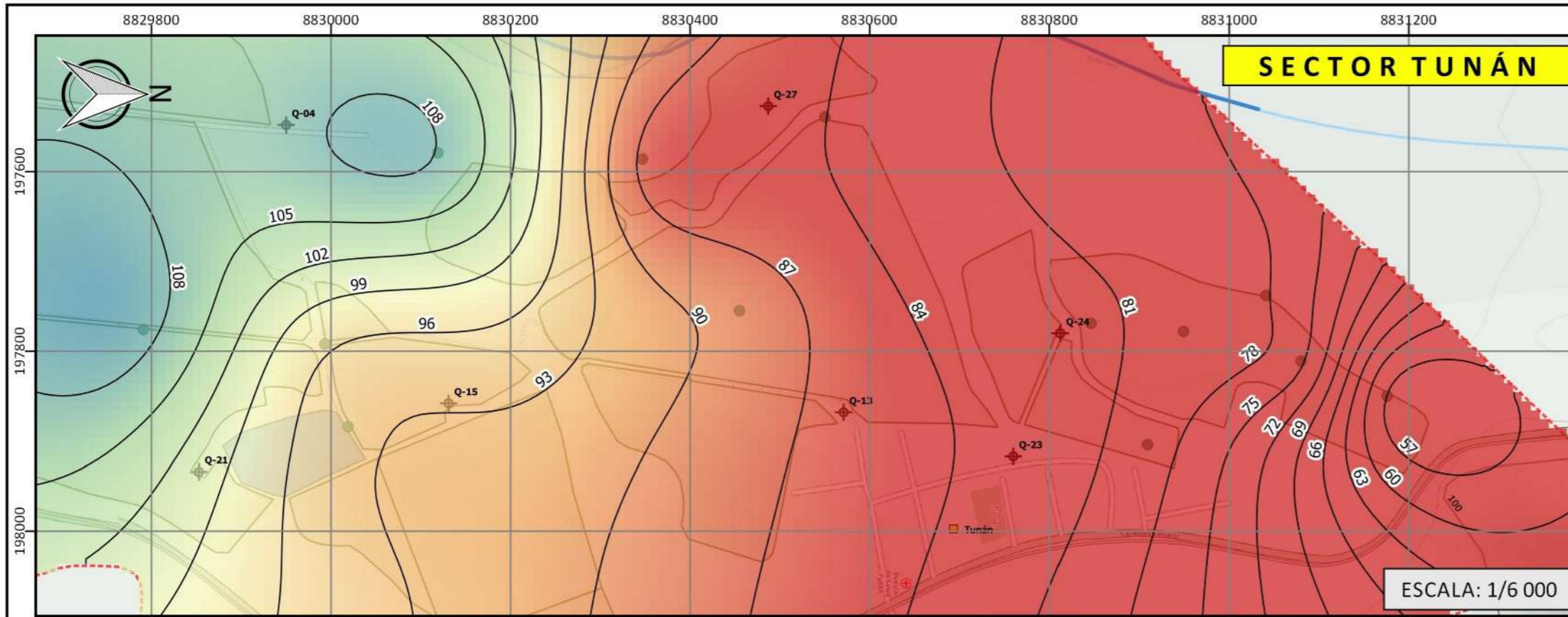
LEYENDA	
(MPI)	MÁXIMA PROFUNDIDAD DE INVESTIGACIÓN
(87.7)	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN OHM-M
[143]	ESPESOR DE LA CAPA EN METROS.
H5	HORIZONTE
~	SUPERFICIE DEL SUELO.
	Horizonte superficial con presencia de material fino intercalado con depósitos medios a gruesos tales como limos, arcillas y gravas en estado seco
	Horizonte con presencia de material fino impermeable representado por el basamento rocoso
	Horizonte saturado, con presencia de material medio a grueso y presencia de finos tales como arcillas, arenas, gravas y canto rodado.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS			
Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLOGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA			
Plano: Sección Geofísica Generalizada C - C'			Mapa n.º:
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: Horizontal :1/2000 Vertical :1/2500	
Fuente: AIPSA	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado	
			6.3



LEYENDA			
87.7	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN OHM-M		Horizonte superficial con presencia de material fino intercalado con depósitos medios a gruesos tales como limos, arcillas y gravas en estado seco
143	ESPESOR DE LA CAPA EN METROS.		Horizonte con presencia de material fino impermeable representado por el basamento rocoso
H5	HORIZONTE		Horizonte saturado, con presencia de material medio a grueso y presencia de finos tales como arcillas, arenas, gravas y canto rodado.
	SUPERFICIE DEL SUELO.		

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS			
Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA			
Plano: Sección Geofísica Generalizada D - D'			Mapa n.º:
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: Horizontal :1/1250 Vertical :1/1875	6.4
Fuente: AIPSA	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado	

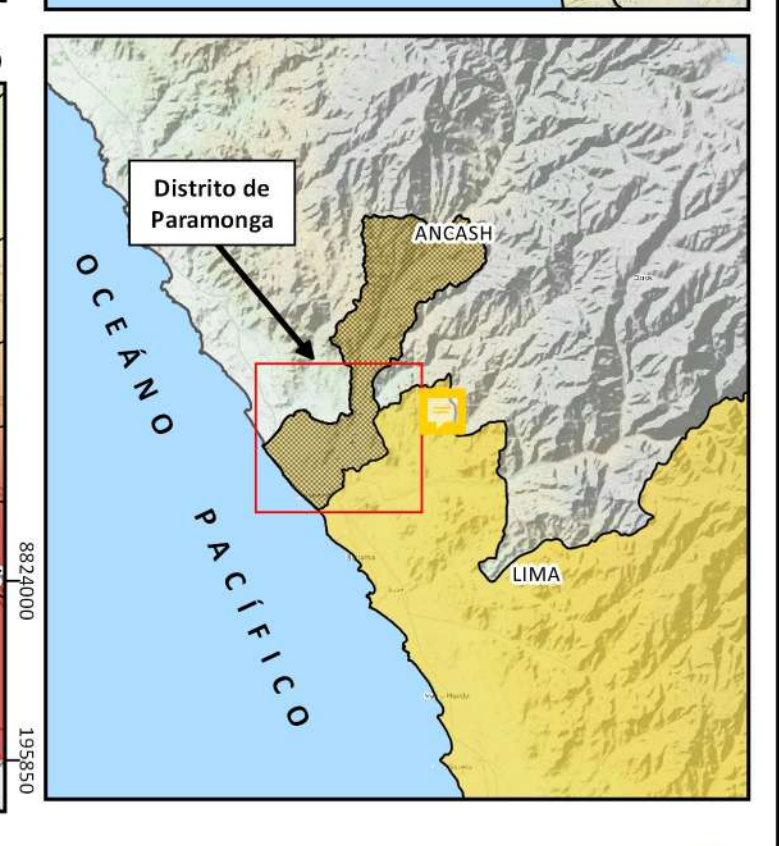
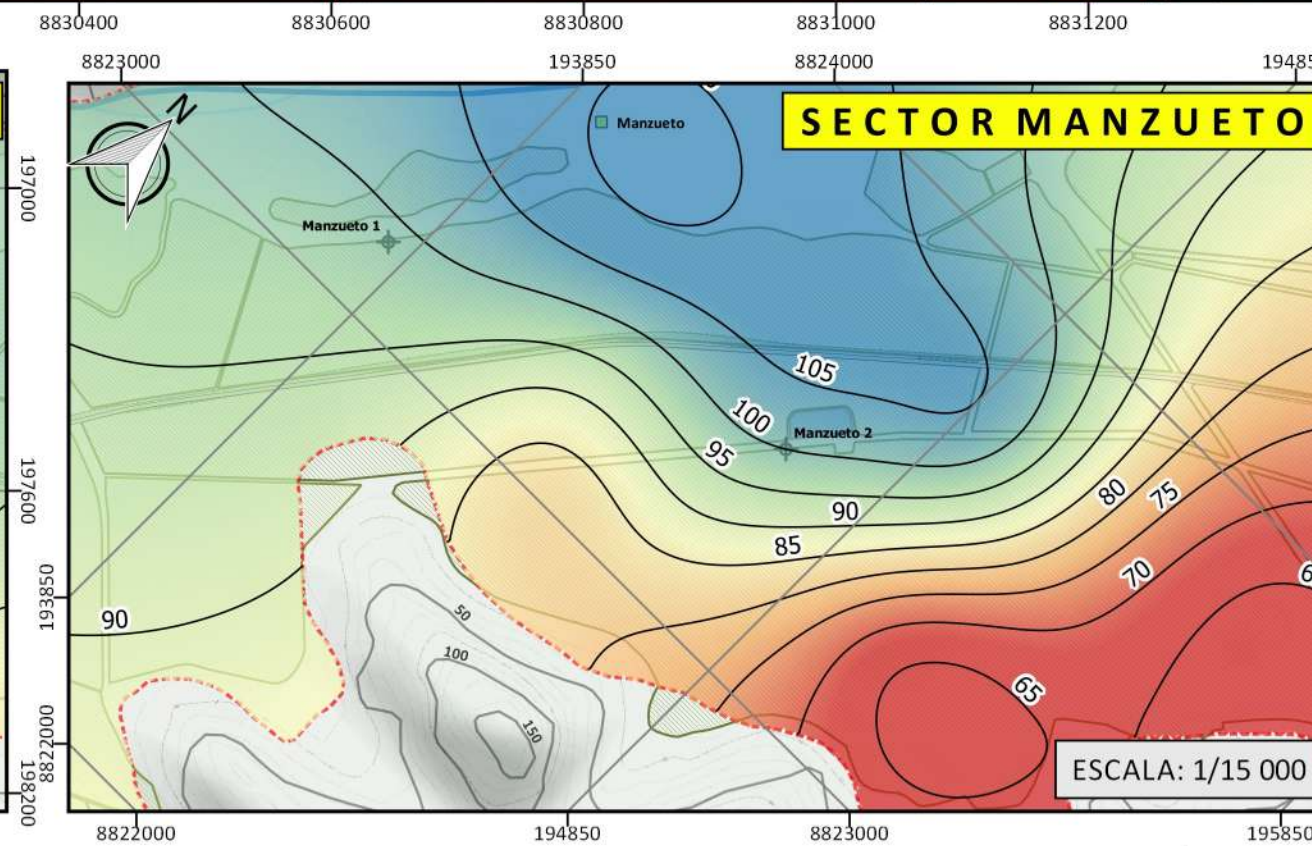
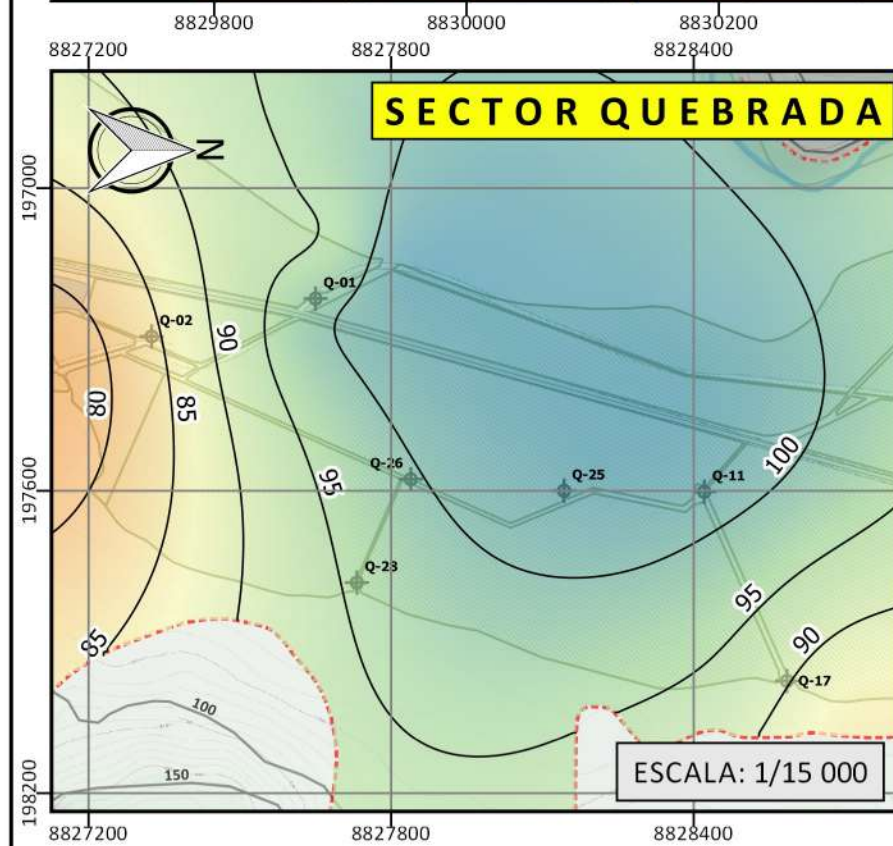
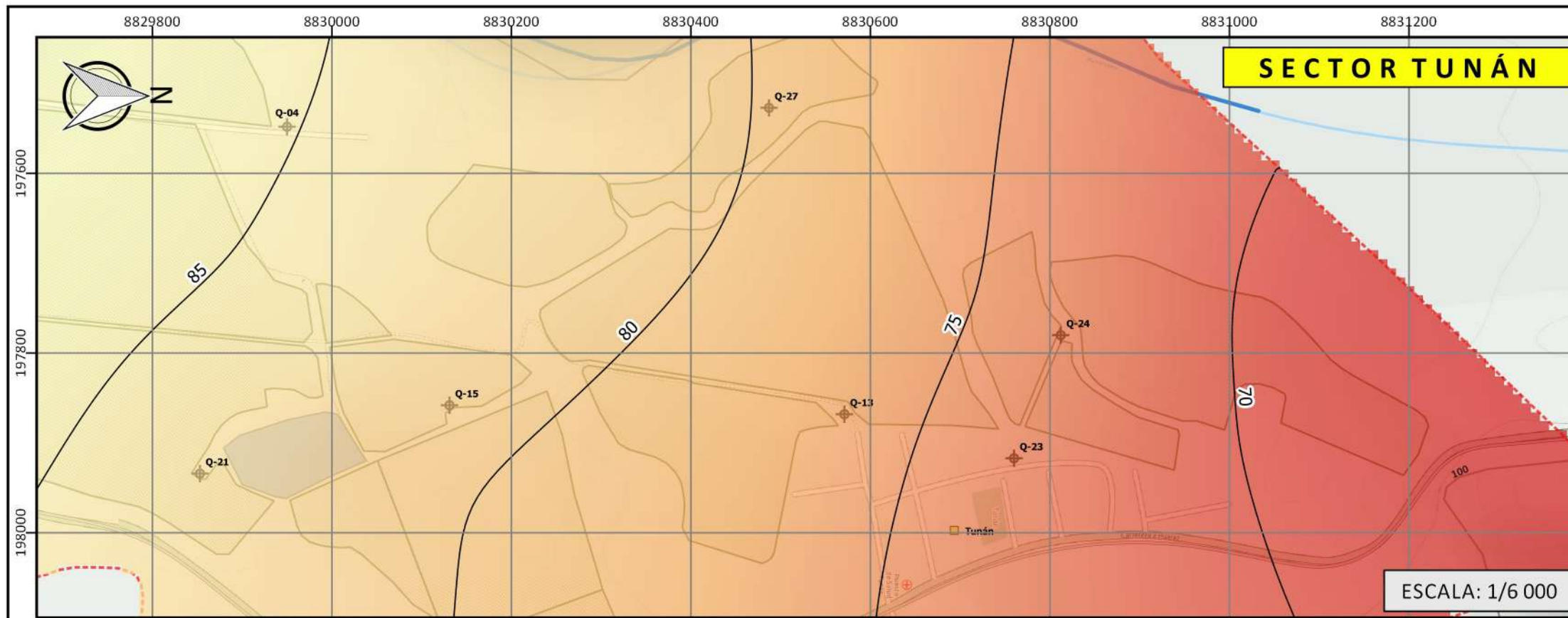


Proyección : UTM
Datum : Wgs'84
Zona : 18s

Leyenda

Zonas Isóbatas (m)	— Curvas Isóbatas (3m)	— Curvas de nivel 50m
84.85	— Zona des estudio	
91.61	⊕ Pozos tubulares	
98.37	— Río Fortaleza	
105.1	▨ Campos de cultivo	
111.9		

<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS</p>			<p>Mapa n.º:</p> <h1>7</h1>
<p>Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA</p>			
<p>Plano: Isóbatas</p>			
<p>Departamento: Lima</p>	<p>Provincia: Barranca</p>	<p>Escala: Indicada</p>	
<p>Fuente: AIPSAA</p>	<p>Fecha: Octubre 2022</p>	<p>Elaborado por: César Alvarado</p>	

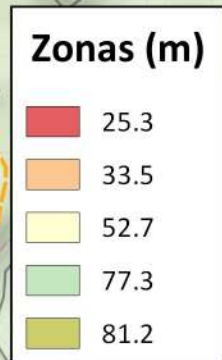
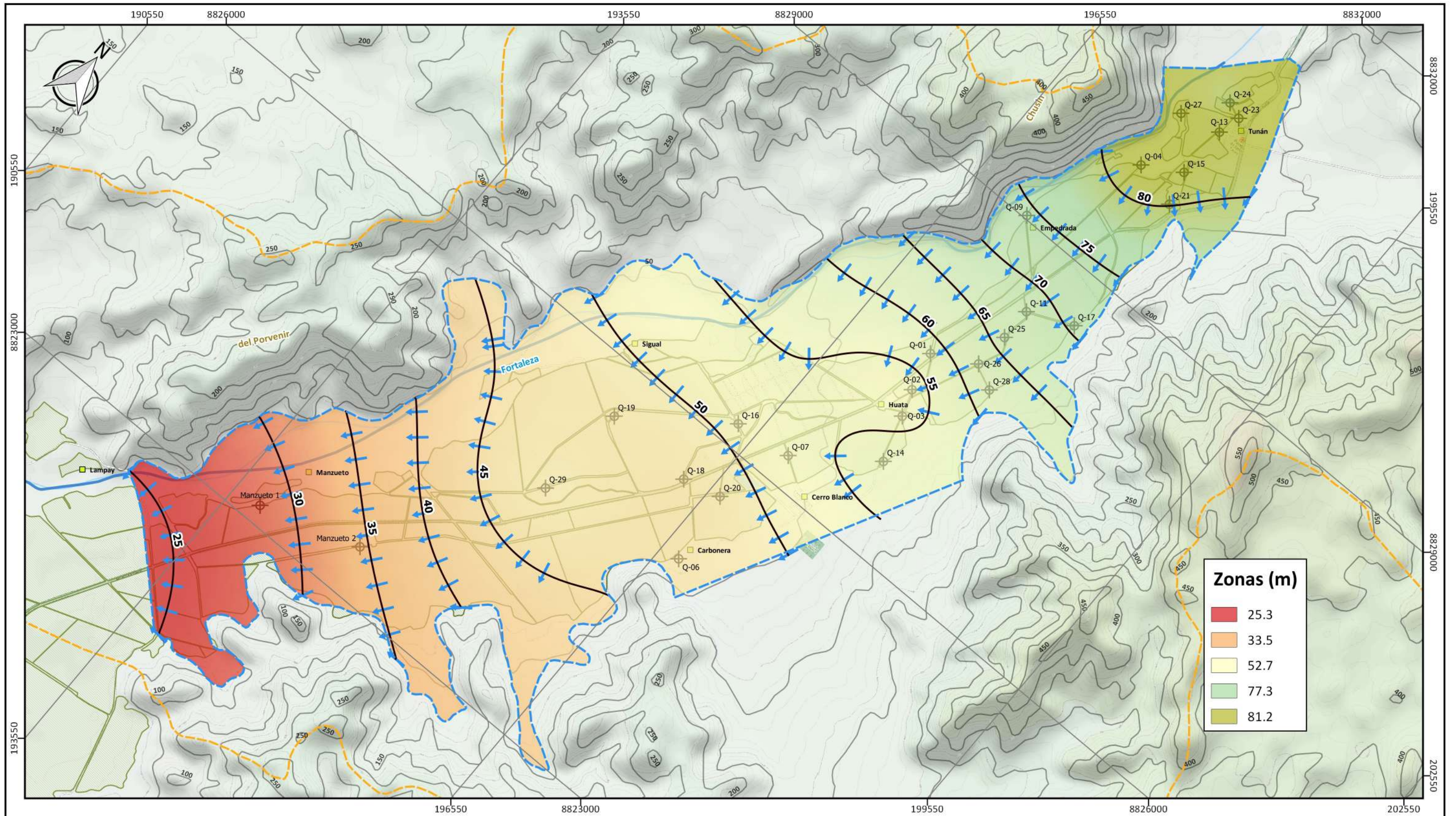


Proyección : UTM
Datum : Wgs'84
Zona : 18s

Leyenda

Zonas Isópacas (m)	— Curvas Isópacas 5m	— Curvas de nivel 50m
67.9	□ Zona des estudio	
77.3	⊕ Pozos tubulares	
86.8	— Río Fortaleza	
96.2	□ Campos de cultivo	
106		

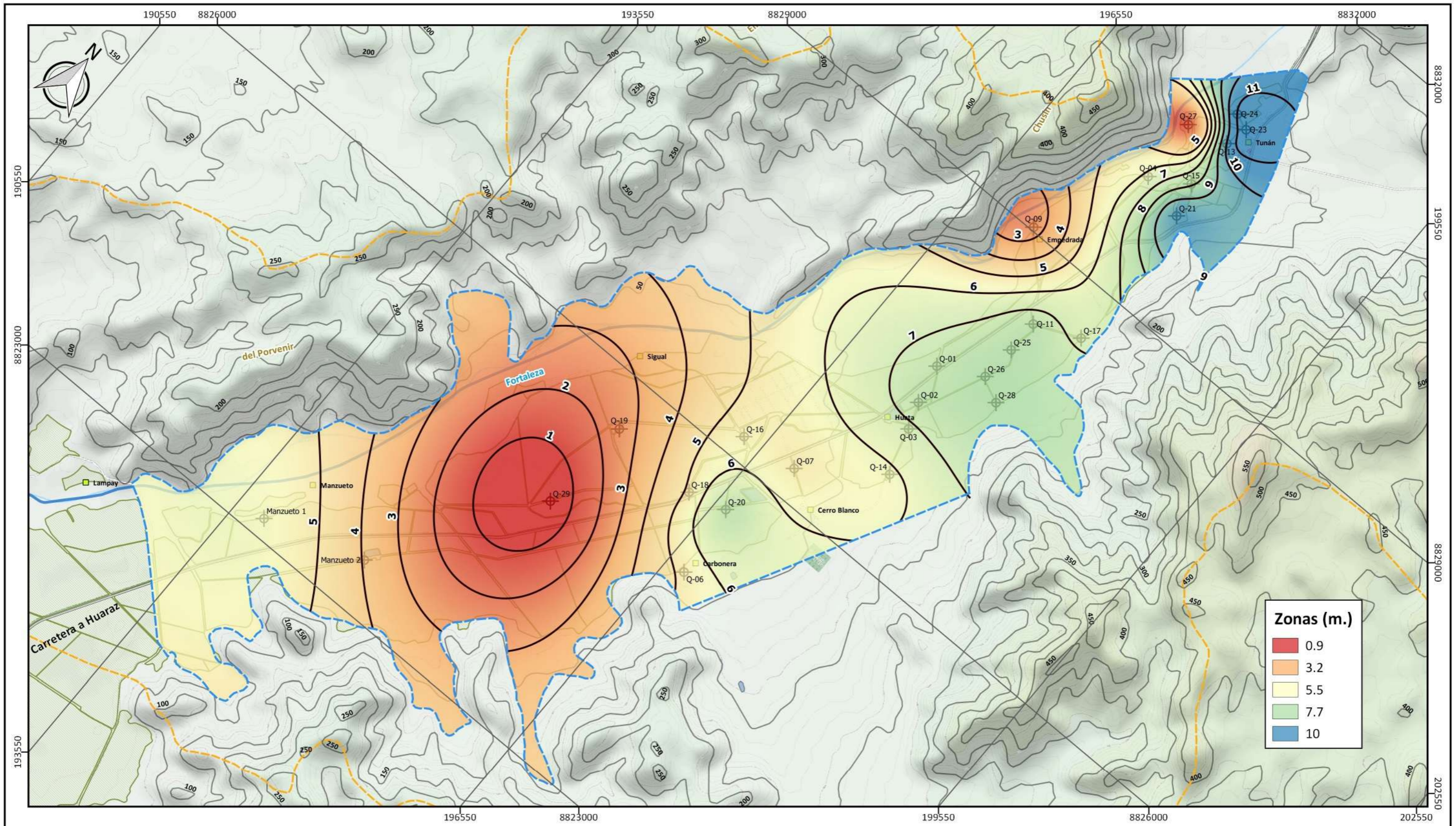
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS		
Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA		
Plano: Isópacas		
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: Indicada
Fuente: AIPSAA	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado
		Mapa n.º: <h1>8</h1>



Proyección : UTM
 Datum : Wgs'84
 Zona : 18s

Leyenda	
	Curvas Hidroisohipsas 5 m.
	Lineas de flujo
	Pozos tubulares
	Río Fortaleza
	Curvas de nivel 50 m.
	Zona de Estudio
	Divisoria de aguas

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS		
Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA		
Plano: Hidroisohipsas		
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: 1/30 000
Fuente: AIPSAA	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado
		9



5 0 5 10 km

Proyección : UTM
Datum : Wgs'84
Zona : 18s

Leyenda

- Curvas Isopropundidad
- Río Fortaleza
- Curvas de nivel 50 m.
- ⊕ Pozos Tubulares
- Zona de estudio
- Divisoria de aguas



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS



Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA

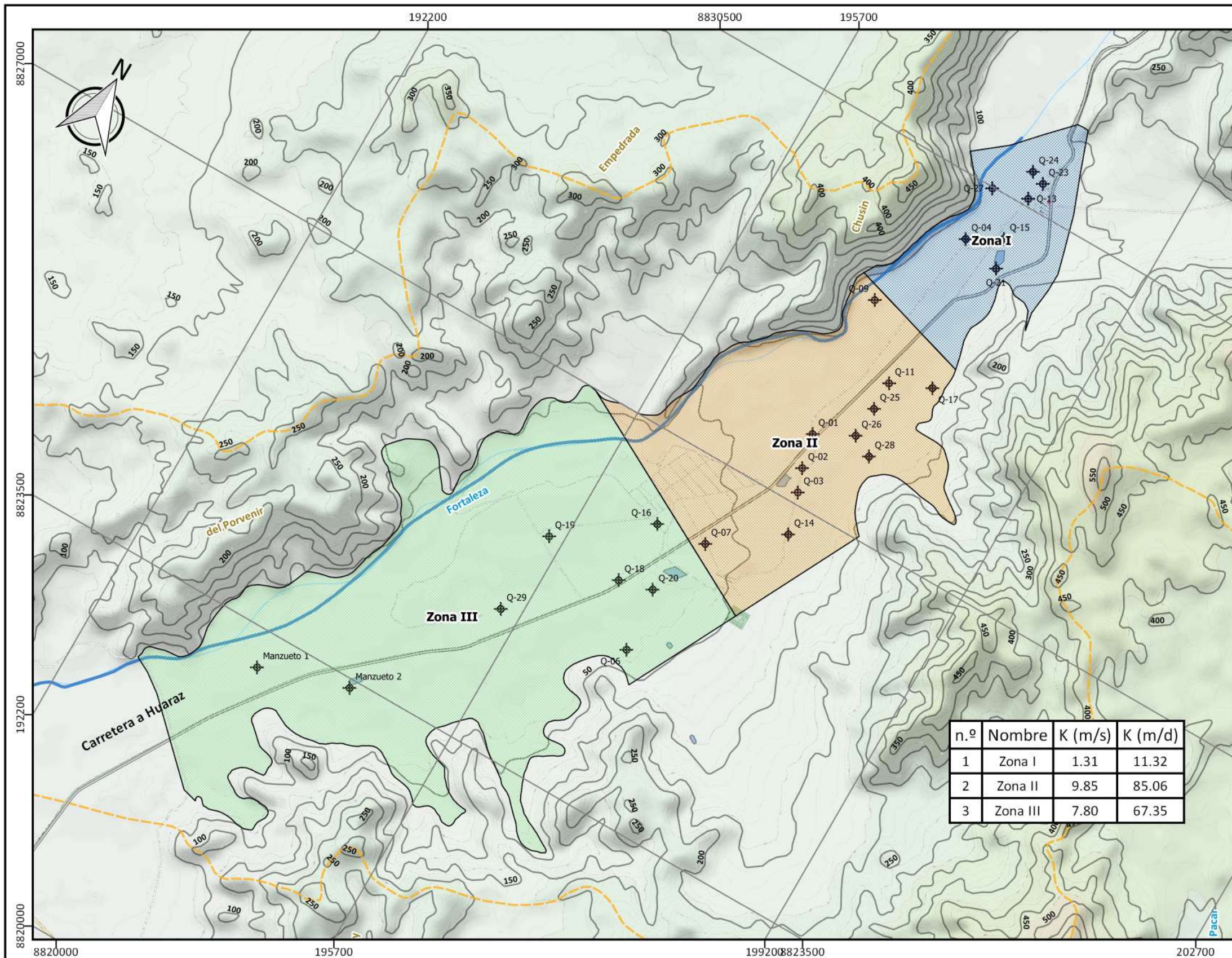
Mapa n.º:

Plano: Isopropundidad

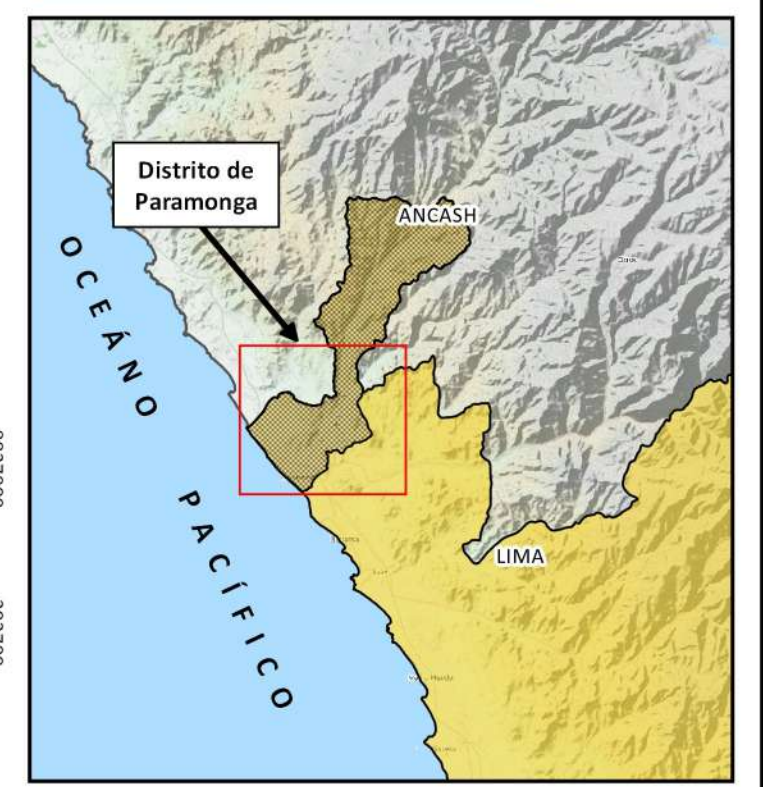
Departamento: Lima Provincia: Barranca Escala: 1 / 30 000

Fuente: AIPSA, IGN, UNALM Fecha: Octubre 2022 Elaborado por: César Alvarado

10



n.º	Nombre	K (m/s)	K (m/d)
1	Zona I	1.31	11.32
2	Zona II	9.85	85.06
3	Zona III	7.80	67.35



Proyección : UTM
Datum : Wgs'84
Zona : 18s

Leyenda

- Zonas de Conductividad Hidráulica
 - Zona I
 - Zona II
 - Zona III
- Pozos Tubulares
- Río Fortaleza
- Cuenca Fortaleza
- Curvas de nivel 50m

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

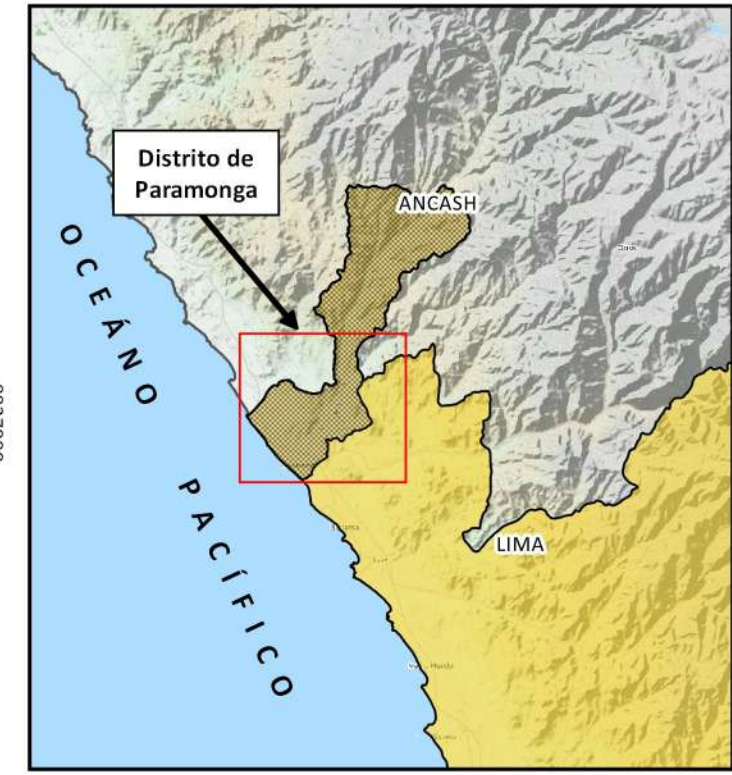
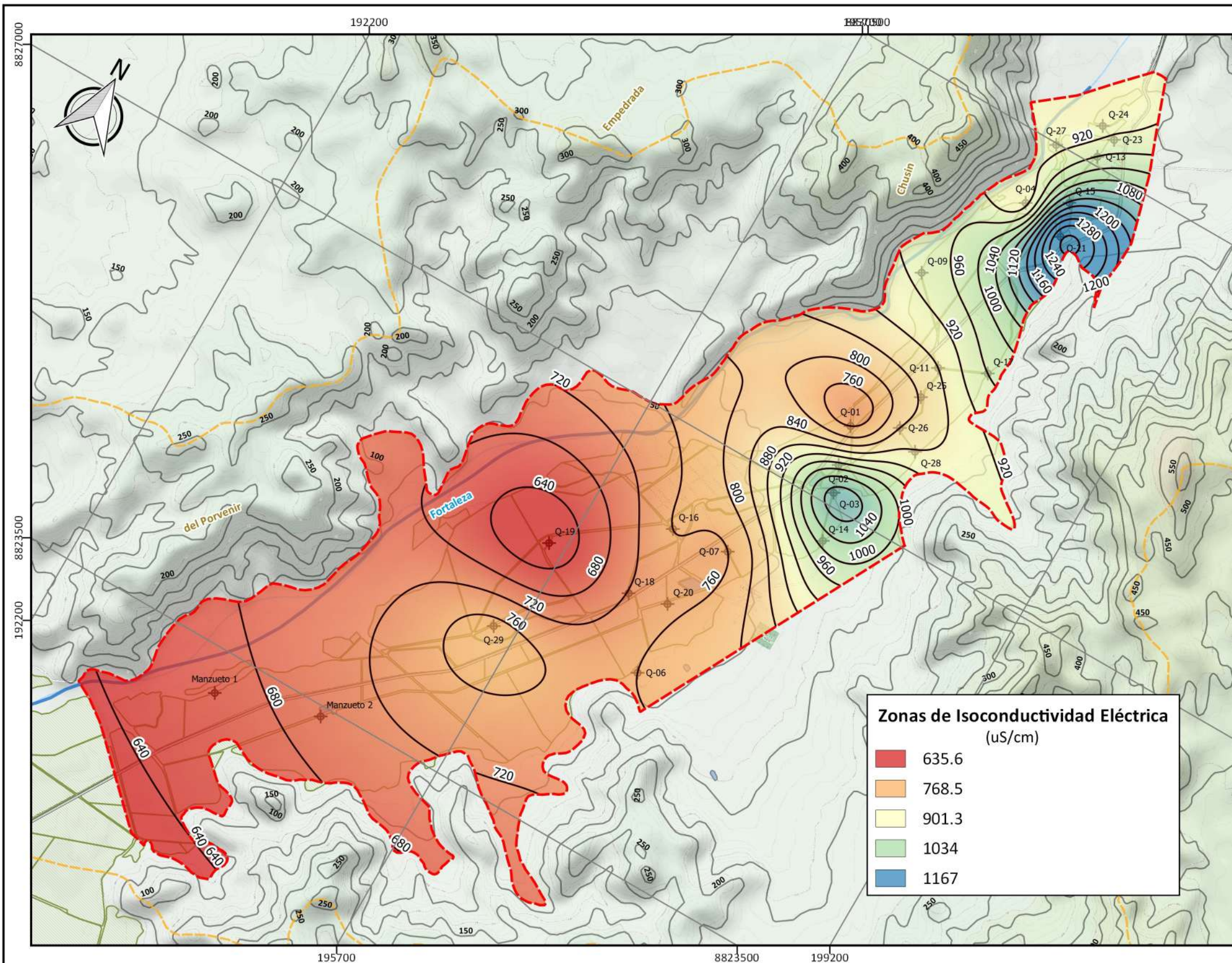
Título: INVESTIGACION HIDROGEOLOGICA PARA LA OBTENCION DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA

Plano: Zonas de Conductividad Hidráulica

Departamento: Lima | Provincia: Barranca | Escala: 1 / 40 000

Fuente: AIPSA, MINAGRI | Fecha: Octubre 2022 | Elaborado por: César Alvarado

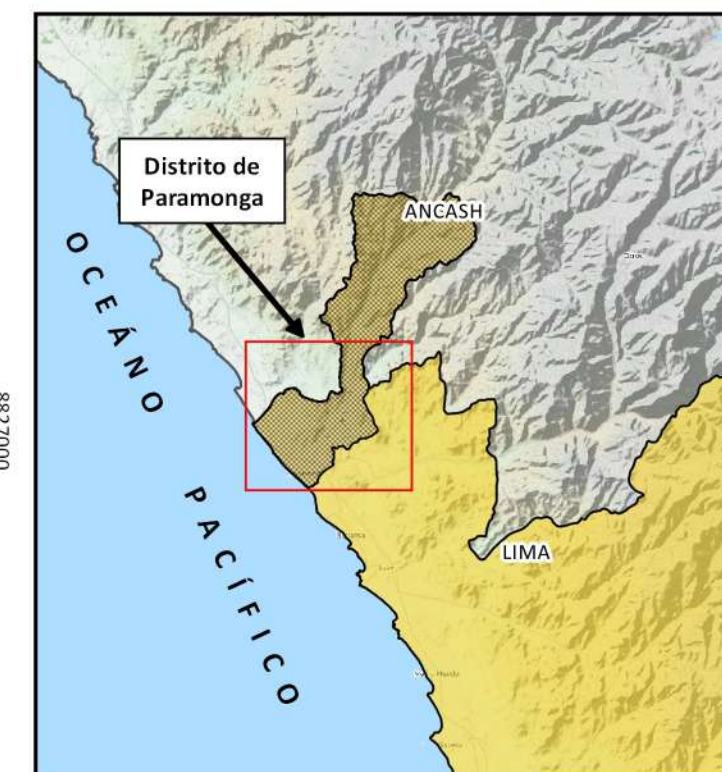
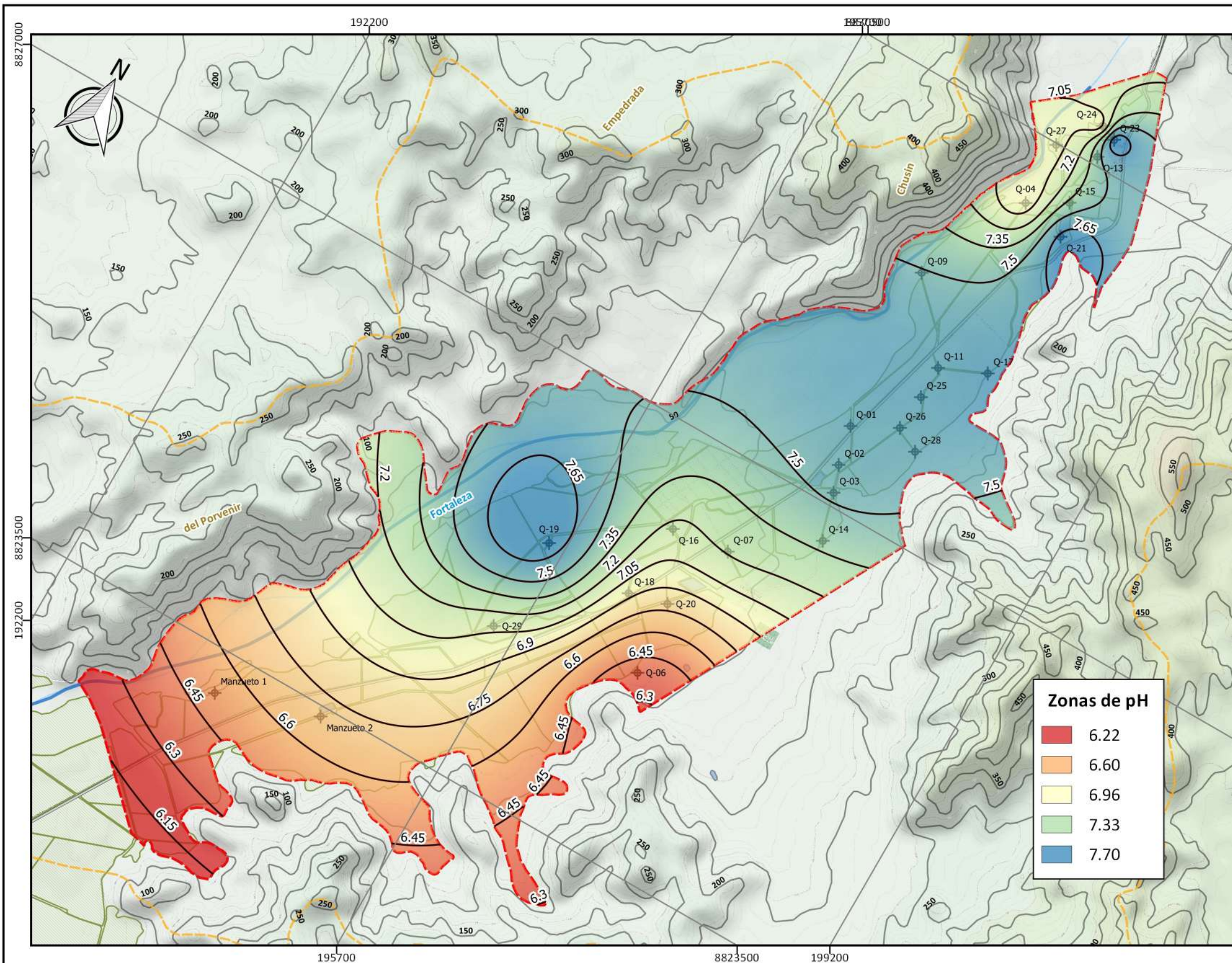
Mapa n.º: **11**



Proyección : UTM
 Datum : Wgs'84
 Zona : 18s

Leyenda	
	Curvas de Isoconductividad Eléctrica
	Pozos tubulares
	Río Fortaleza
	Curvas de nivel 50m
	Zona de estudio
	Cuenca Fortaleza

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS		
Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA		
Plano: Isoconductividad Eléctrica		
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: 1 / 35 000
Fuente: AIPSAA	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado
Mapa n.º:		12



5 0 5 10 km

Proyección : UTM
Datum : Wgs'84
Zona : 18s

Leyenda

- Curvas de pH
- ◆ Pozos tubulares
- Río Fortaleza
- Curvas de nivel 50m
- ▭ Zona de estudio
- ▭ Cuenca Fortaleza



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS



Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA

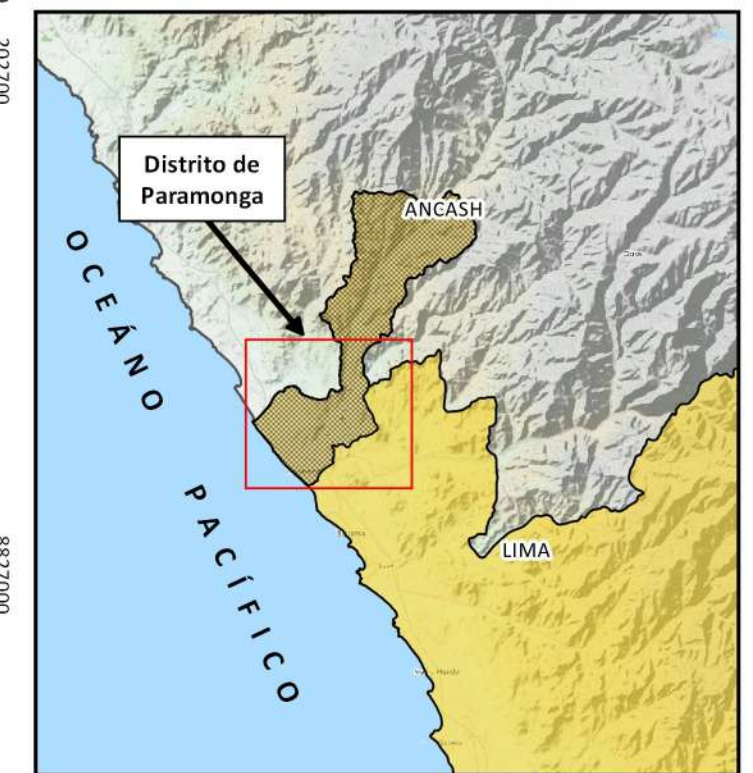
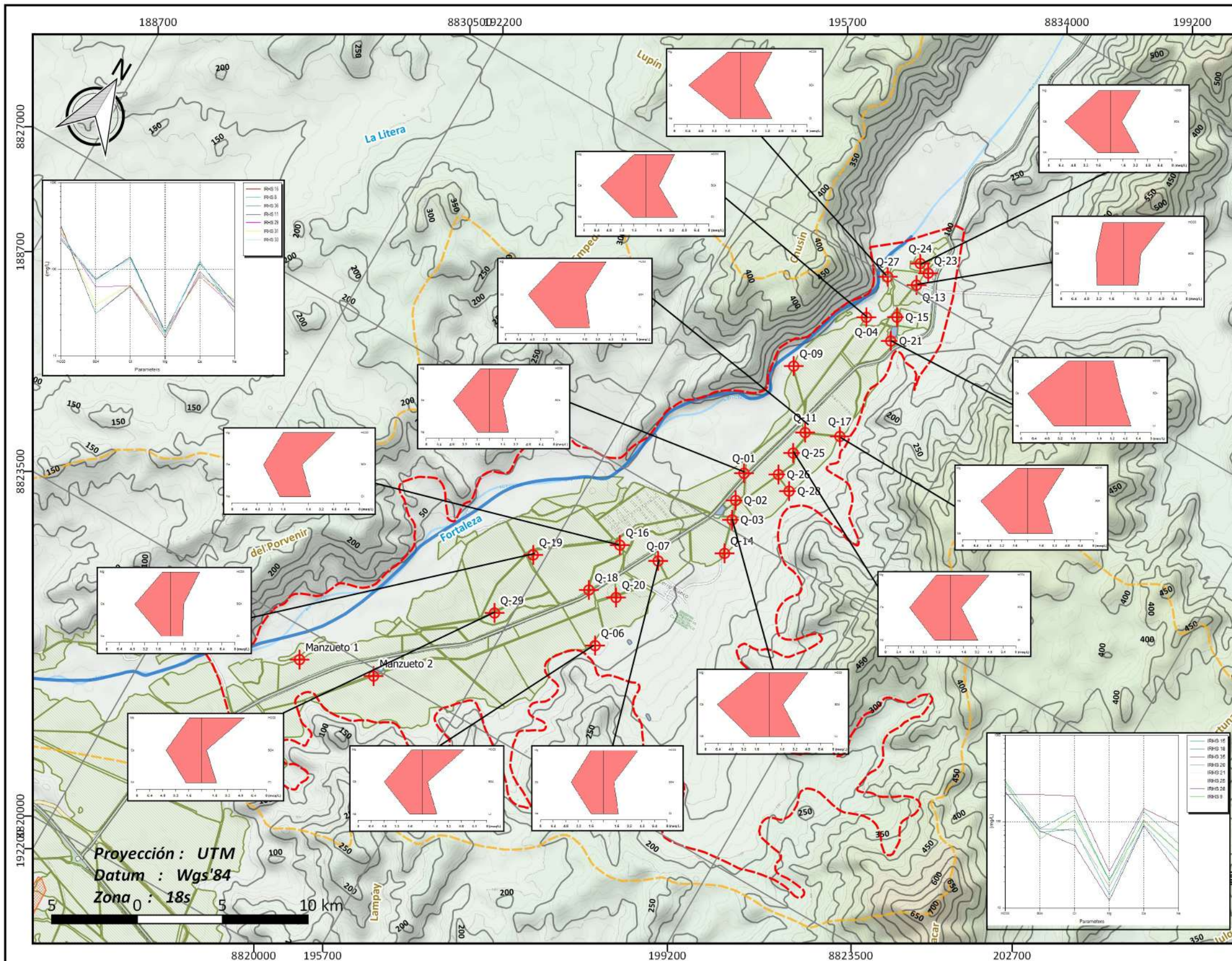
Mapa n.º:

Plano: pH

Departamento: Lima Provincia: Barranca Escala: 1 / 35 000

Fuente: AIPSAA Fecha: Octubre 2022 Elaborado por: César Alvarado

13



- Leyenda**
- Curvas de pH
 - ◆ Pozos tubulares
 - Río Fortaleza
 - Curvas de nivel 50m
 - ▭ Zona de estudio
 - ▭ Cuenca Fortaleza

Pozo	IRHS	Conductividad dS/m	pH Unidad de Ph	Calcio Ca ²⁺ meq/L	Magnesio Mg ²⁺ meq/L	Sodio Na ⁺ meq/L	Potasio K ⁺ meq/L	Cloruros Cl ⁻ meq/L	Sulfatos SO ₄ meq/L	Bicarbonato HCO ₃ ⁻ meq/L	Carbonato CO ₃ ⁻² meq/L	Nitratos NO ₃ ⁻ meq/L
Q-01	28	0.76	7.58	4.59	1.18	1.51	0.04	2.32	1.58	3.59	0	0.1
Q-03	25	1.09	7.52	6.5	1.73	2.43	0.04	3.83	1.74	4.83	0	0.14
Q-04	16	0.91	6.99	5.8	1.58	1.78	0.07	3.96	1.59	3.63	0	0.07
Q-06	33	0.76	6.38	4.73	1.33	1.6	0.03	1.8	0.64	5.16	0	0.08
Q-07	29	0.76	7.21	4.11	1.6	1.59	0.04	1.84	1.31	4.32	0	0.08
Q-11	20	0.88	7.6	5.25	1.46	1.95	0.05	2.26	1.71	4.24	0	0.06
Q-13	9	0.93	7.68	3.48	2.64	3.37	0.04	1.87	2.17	5.24	0	0.13
Q-16	31	0.76	7.17	4.03	1.53	1.97	0.04	1.92	0.81	4.91	0	0.07
Q-17	18	0.96	7.64	5.75	1.31	2.36	0.04	3.04	1.94	4.47	0	0.02
Q-19	35	0.82	7.71	4.44	1.01	1.11	0.03	1.5	1.63	3.62	0	0.05
Q-21	15	1.31	7.67	7.11	2.19	3.93	0.07	5.56	4.3	3.39	0	0.08
Q-24	8	0.9	7.07	5.9	1.56	1.63	0.07	3.68	1.49	3.85	0	0.09
Q-25	21	0.84	7.59	5.04	1.73	1.95	0.04	3.38	1.31	4.7	0	0.1
Q-27	11	0.91	7.01	6.25	1.53	1.4	0.07	3.8	1.63	3.8	0	0.09
Q-29	36	0.77	7.09	4.35	1.46	1.91	0.04	1.84	0.64	5.31	0	0.1



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS



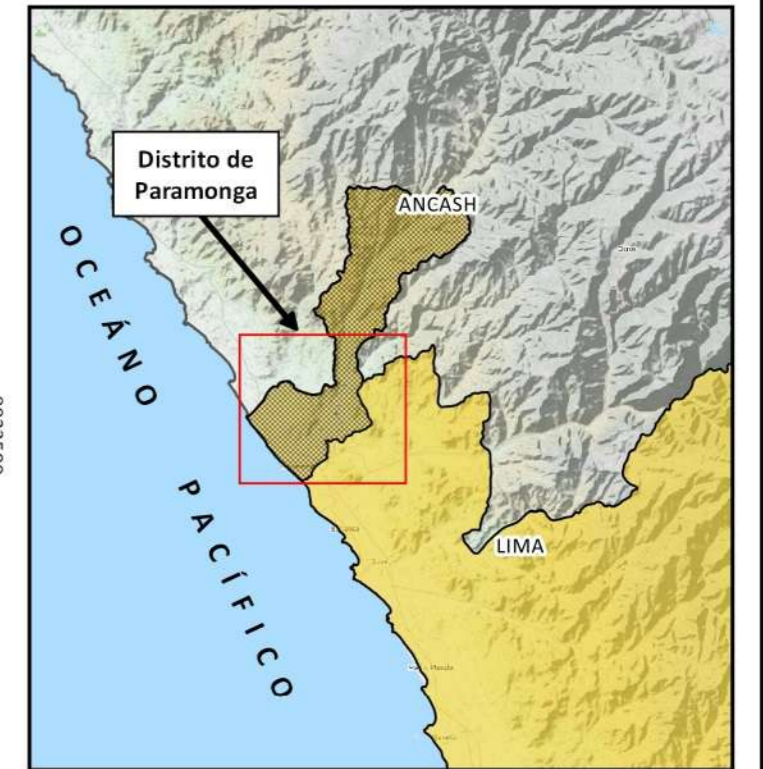
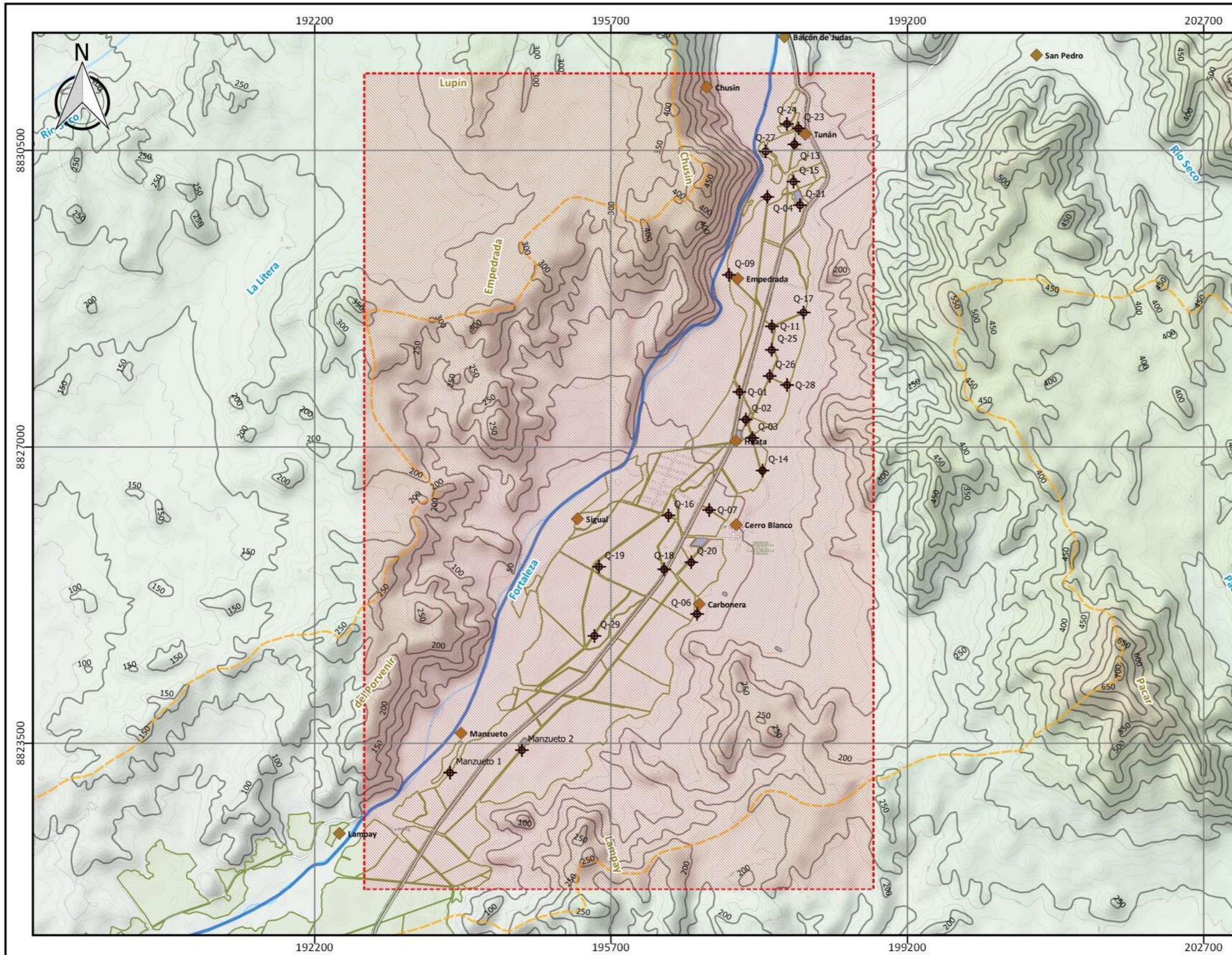
Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA

Plano: Hidrogeoquímica

Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: 1 / 50 000
Fuente: AIPSAA	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado

Mapa n.º:

14



Proyección : UTM
Datum : Wgs'84
Zona : 18s

Coordenadas de Límites				Geometría	
Este	Oeste	Norte	Sur	Área (km ²)	Perímetro (m)
198798	192785	8831409	8821775	58.57	31269

Leyenda

- Límites del modelo
- Pozos tubulares
- Río Fortaleza
- Curvas de nivel 50m
- Cuenca Fortaleza



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS



Título: INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE EXPLOTACIÓN EN EL ACUÍFERO FORTALEZA			Mapa n.º: 15
Plano: Delimitación de la zona de modelamiento numérico			
Departamento: Lima	Provincia: Barranca	Escala: 1 / 50 000	
Fuente: AIPSAA	Fecha: Octubre 2022	Elaborado por: César Alvarado	