UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA – TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TESIS

Presentada por:

Bach. REGGIE KATHLEEN FLORES TITO

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO – GEOTÉCNICO

TACNA – PERÚ

2026

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia

HOJA DE JURADO

TESIS

"EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA – TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS"

Presentado por la bachiller Reggie Kathleen Flores Tito
Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo – Geotécnico

Tesis sustentada y aprobada el 16 de abril del 2026 (R.F. Nº957-2026-FIAG/UNJBG) con el siguiente jurado:

Presidente :.....
Mstro. Ing. Michael Alex Miranda Choque

Secretario :.....
Mgr. Ing. Gloria Marina Choque Machaca

Vocal :.....
M.Sc. Ing. Gina Macklina Chambi Tapahuasco

Asesor de Tesis: :.....
Mgr. Ing. Fredy Cleto Cabrera Olivera

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHOMANN
VICERRECTORADO ACADÉMICO
BIBLIOTECA
Ciudad Universitaria Av. Miraflores/Av. Cusco S/N Teléfono: 052-583000 Anexos: 2342 Casilla 316

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, FREDY CLETO CABRERA OLIVERA, en mi condición de ASESOR acreditado con Resolución de Facultad N° 902-2024-FIAG/UNJBG del 22 de noviembre del 2024, de la tesis denominada: **EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA – TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**. Presentado por la **Bachiller Reggie Kathleen Flores Tito**. Para optar el título profesional de INGENIERO GEÓLOGO-GEOTÉCNICO.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual de la UNJBG; considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es **14 %**. Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis y/o trabajo enunciado líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para optar el título profesional de **INGENIERO GEÓLOGO-GEOTÉCNICO**, según corresponda para su publicación en el Repositorio Institucional.

Tacna, 13 de abril del 2026

FIRMA ASESOR
Fredy Cleto Cabrera Olivera
DNI: 29293902

Huella dactilar

FIRMA AUTOR
Nombres y apellidos: Reggie Kathleen Flores Tito
DNI: 48142427

Huella dactilar

Dedicatoria

Dedicado a mis padres Roberto Flores Contreras, María Tito Huanca y hermanos, por ser los pilares más importantes de mi vida y demostrarme cada día su cariño y apoyo incondicional, que contribuyeron en mi formación personal y profesional.

Agradecimientos

Agradezco a Dios, por darme la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional; a mi familia por su amor y apoyo incondicional; a mi asesor Mgr. Ing. Fredy Cabrera Olivera por la valiosa guía y asesoramiento en el desarrollo de la presente tesis.

Asimismo, agradezco al Ing. Alejandro Mita, Ing. Walther Pacheco y en especial al Ing. Edgar Acosta Pinto por su apoyo, tiempo y conocimiento brindado que contribuyeron en la mejora de esta tesis.

Índice

Portada i

Hoja de jurados ii

Certificado de similitud iii

Dedicatoria iv

Agradecimientos v

Índice vi

Índice de tablas xvii

Índice de figuras xxi

Índice de anexos xxix

Resumen xxxii

Abstract xxxiv

Introducción 1

Capítulo I: Aspectos generales 3

1.1. Ubicación y acceso a la zona de estudio 3

1.1.1. Ubicación 3

1.1.2. Accesibilidad 4

1.2. Hidrografía 5

1.3. Clima 5

1.3.1. Precipitación 7

1.3.2. Temperatura 9

1.3.3. Humedad relativa 11

1.3.4. Velocidad del viento 12

1.3.5. Evaporación 13

1.3.6. Evapotranspiración potencial 15

1.3.7. Balance hídrico climático 17

1.4. Vegetación 19

1.5. Planteamiento del problema 19

1.6. Formulación del problema 21

1.6.1. Problema general 21

1.6.2. Problemas específicos 21

1.7. Objetivos 21

1.7.1. Objetivo general 21

1.7.2. Objetivos específicos 22

1.8. Hipótesis 23

1.8.1. Hipótesis general 23

1.8.2. Hipótesis especificas 23

1.9. Variables e indicadores 24

1.9.1. Variables independientes 24

1.9.2. Variables dependientes 24

1.9.3. Operacionalización de variables e indicadores 25

1.10. Justificación de la investigación 27

1.11. Alcances y limitaciones de la investigación 28

Capítulo II: Marco teórico 29

2.1. Antecedentes de la investigación 29

2.2. Bases teóricas 36

2.2.1. Aguas subterráneas 36
2.2.2. Acuífero 38
2.2.2.1. Definición de acuífero 38
2.2.2.2. Clasificación de acuíferos 38
2.2.2.3. Parámetros hidrogeológicos 41
2.2.2.4. Recarga y descarga natural de acuíferos 46
2.2.3. Evaluación hidrogeológica 49
2.2.3.1. Prospección geofísica 50
2.2.3.1.1. Método de resistividad 51
2.2.3.1.2. Resistividad de los suelos y rocas 53
2.2.3.1.3. Arreglo de electrodos 56
2.2.3.1.4. Sondajes eléctricos verticales 58
2.2.3.2. Pruebas de bombeo 61
2.2.3.2.1. Tipos de ensayos 62
2.2.3.2.2. Métodos de interpretación pruebas de bombeo 62
2.2.3.2.3. Interpretación pruebas de bombeo acuíferos libres 64
2.2.3.3. Hidrogeoquímica 72
2.2.3.3.1. Diagramas de clasificación 72
2.2.3.3.2. Normativa peruana para consumo humano y riego de cultivos 81
2.2.3.4. Balance hídrico subterráneo 83
Capítulo III: Metodología 84
3.1. Tipo de investigación 84
3.2. Nivel de investigación 84

3.3. Diseño de investigación 84

3.4. Población y muestra 85

3.5. Etapas de la investigación 85

3.5.1. Etapa preliminar 85

3.5.2. Trabajos de campo 85

3.5.3. Etapa de gabinete 86

Capítulo IV: Características geológicas y geomorfológicas del área de estudio 89

4.1. Geomorfología regional 89

4.1.1. Faja litoral 89

4.1.2. Cadena costanera 90

4.1.3. Terraza aluvial 91

4.1.4. Pampa costanera 91

4.2. Geomorfología local 93

4.2.1. Terraza baja aluvial (Tb-al) 93

4.2.2. Terraza marina (T-m) 94

4.2.3. Piedemonte aluvio torrencial (P-at) 95

4.2.4. Vertiente aluvial (V-al) 95

4.2.5. Mantos de arena (M-a) 96

4.2.6. Superficie de flujo piroclástico (Sfp) 97

4.2.7. Superficie de flujo piroclástico disectado (Sfp-d) 98

4.2.8. Colina y lomada en roca volcano-sedimentaria (RCL-rvs) 99

4.2.9. Colina y lomada en roca sedimentaria (RCL-rs) 100

4.3. Geología regional 101

4.3.1. Mesozoico/Jurásico inferior 103

4.3.1.1. Formación Chocolate (Ji-cho) 103

4.3.2. Mesozoico/Jurásico medio-superior 104

4.3.2.1. Formación Socosani (Jm-so) 104

4.3.3. Mesozoico/Jurásico superior 105

4.3.3.1. Grupo Yura - Formación Puente-Cachíos (Jms-pu,ca) 105

4.3.4. Neógeno/Mioceno inferior-medio 106

4.3.4.1. Formación Huaylillas (Nm-hu_s) 106

4.3.5. Cuaternario/Holoceno 107

4.3.5.1. Depósito aluvial (Qh-al) 107

4.3.5.2. Depósito fluvial (Qh-fl) 107

4.3.5.3. Depósito eólico (Qh-eo) 108

4.3.5.4. Depósito de playa (Qh-pl, Qh-pl1) 108

4.3.5.5. Depósito de yeso (Qh-ye) 109

4.3.6. Rocas intrusivas 109

4.4. Geología local 110

4.4.1. Formación Chocolate (Ji-cho) 111

4.4.2. Depósitos cuaternarios 112

4.4.2.1. Depósito fluvial (Qh-fl) 112

4.4.2.2. Depósito aluvial (Qh-al) 112

4.4.2.3. Depósito de playa (Qh-pl) 113

4.5. Geología estructural regional 113

4.5.1. Falla Miraflores 113

4.5.2. Falla Chombo 115

4.5.3. Lineamiento Calvario 116

4.5.4. Lineamiento Los Pabellones – Magollo 117

4.5.5. Lineamiento Sama 118

4.5.6. Lineamiento Punta Morena 118

4.5.7. Diques 118

4.6. Geología estructural local 119

4.7. Geología del subsuelo 119

4.7.1. Litología de pozos perforados en la zona 119

4.7.1.1. Pozo PP-01 Wayu Perú 120

4.7.1.2. Pozo Rosita 121

4.7.1.3. Pozo PP-01 Laguna Azul 122

4.7.2. Descripción de cortes geológicos regionales 123

4.7.2.1. Corte geológico regional A-A' 124

4.7.2.2. Corte geológico regional B-B' 126

4.7.2.3. Corte geológico regional C-C' 127

4.7.2.4. Corte geológico regional D-D' 129

4.7.3. Descripción de cortes geológicos locales 130

4.7.3.1. Corte geológico local E-E' 131

4.7.3.2. Corte geológico local F-F' 133

4.7.3.3. Corte geológico local G-G' 134

4.7.3.4. Corte geológico local H-H' 135

Capítulo V: Prospección geofísica 138

5.1. Método geofísico 138

5.2. Equipo utilizado 138

5.3. Adquisición de datos de campo 139

5.4. Procesamiento e interpretación de datos de campo 141

5.5. Correlación de sondajes eléctricos verticales y perfiles litológicos de pozos 145

5.6. Resultados obtenidos 147

5.7. Secciones geológica-geofísicas 156

5.7.1. Sección geológica-geofísica A-A' 156

5.7.2. Sección geológica-geofísica B-B' 158

5.7.3. Sección geológica-geofísica C-C' 160

5.7.4. Sección Geológica-Geofísica D-D' 162

5.7.5. Sección geológica-geofísica E-E' 164

5.7.6. Sección geológica-geofísica F-F' 166

5.7.7. Sección geológica-geofísica G-G' 168

5.7.8. Sección geológica-geofísica H-H' 171

5.7.9. Sección geológica-geofísica I-I' 173

5.7.10. Sección geológica-geofísica J-J' 175

5.7.11. Sección geológica-geofísica K-K' 177

5.7.12. Sección geológica-geofísica L-L' 180

5.7.13. Sección geológica-geofísica M-M' 182

5.7.14. Sección geológica-geofísica N-N' 184

5.7.15. Sección geológica-geofísica O-O' 186

5.7.16. Sección geológica-geofísica P-P' 189

5.7.17. Sección geológica-geofísica Q-Q' 191

5.7.18. Sección geológica-geofísica R-R' 193

5.8. Planos geofísicos 195

5.8.1. Techo basamento impermeable 198

5.8.2. Espesor total del horizonte saturado 199

5.8.3. Resultados cuantitativos del horizonte saturado (resistividad verdadera) 200

5.8.4. Resistencia transversal del horizonte permeable saturado 202

5.9. Ubicación de zonas favorables 203

Capítulo VI: Inventario de fuentes de agua subterránea 205

6.1. Tipo de fuentes de agua inventariadas 205

6.2. Estado de las fuentes de agua inventariadas 208

6.3. Uso de las fuentes inventariadas 210

6.4. Equipo de bombeo 211

6.5. Rendimiento de las fuentes de agua inventariadas 212

6.6. Explotación del acuífero 213

6.7. Situación legal de las fuentes de agua 215

Capítulo VII: Hidrodinámica subterránea 216

7.1. Pruebas de bombeo 217

7.2. Procesamiento e interpretación de datos de pruebas de bombeo 220

7.3. Resultados de parámetros hidráulicos 230

7.3.1. Transmisividad (T) y permeabilidad (K) 230

7.3.2. Coeficiente de almacenamiento (S) 230

Capítulo VIII: Hidrogeoquímica 231

8.1. Parámetros físico-químicos in situ 231

8.1.1. Conductividad eléctrica (C.E.) 233

8.1.2. pH 235

8.2. Análisis físico-químico en laboratorio 236

8.2.1. Recolección de muestras de agua subterránea 236

8.2.2. Parámetros analizados en laboratorio 236

8.2.3. Balance iónico de las muestras 239

8.2.4. Representación gráfica para clasificación hidroquímica del agua 241

8.2.4.1. Diagrama de Piper 241

8.2.4.2. Diagrama de Stiff 244

8.2.4.3. Diagrama de Schoeller 246

8.2.5. Comparación de resultados con los estándares nacionales de calidad ambiental del agua 248

Capítulo IX: Resultados y discusión 261

9.1. El reservorio acuífero 261

9.1.1. Geometría del reservorio 261

9.1.1.1. Forma y límites 261

9.1.1.2. Dimensiones 262

9.1.2. Naturaleza y origen del acuífero 262

9.1.3. Litología 264

9.2. La napa freática 266

9.2.1. Naturaleza, origen de las aguas subterráneas y frentes de recarga 266

9.2.2. Profundidad del techo de la napa 270

9.2.3. Morfología del techo de la napa freática 271

9.3. Caracterización hidrodinámica del acuífero 273

9.3.1. Evaluación de resultados de pruebas de bombeo 273

9.3.2. Zonificación hidráulica del acuífero 275

9.3.2.1. Distribución de la transmisividad 275

9.3.2.2. Distribución de la permeabilidad 277

9.4. Caracterización hidrogeoquímica del acuífero 279

9.4.1. Evaluación de resultados de diagramas hidroquímicos 279

9.4.2. Zonificación hidrogeoquímica del acuífero 280

9.4.2.1. Distribución de la conductividad eléctrica 280

9.4.2.2. Distribución del ion cloruro 282

9.4.2.3. Distribución del ion sulfato 284

9.4.2.4. Distribución del ion sodio 285

9.4.2.5. Distribución del ion calcio 286

9.5. Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas 287

9.5.1. Aptitud del agua para consumo humano 287

9.5.1.1. Análisis de la calidad de agua de acuerdo a la comparación con los estándares de calidad ambiental (ECA) para consumo humano 287

9.5.1.2. Potabilidad de las aguas 290

9.5.2. Aptitud del agua para uso agrícola 292

9.5.2.1. Análisis de la calidad de agua de acuerdo a la comparación con los estándares de calidad ambiental (ECA) para riego de cultivos 292

9.5.2.2. Clases de agua según el RAS y la conductividad eléctrica 294

9.6. Caudal de flujo subterráneo 297

9.7. Balance hídrico 298

9.8. Reservas de agua subterránea del acuífero Pampa Molina-Sama 301

9.8.1. Modelo 3D del reservorio acuífero 301

9.8.2. Reservas totales 309

9.8.3. Reservas explotables 310

9.9. Modelo hidrogeológico conceptual 311

9.10. Propuesta preliminar de la red piezométrica e hidrogeoquímica de monitoreo del agua subterránea 320

9.11. Verificación de la confiabilidad de la data 325

Capítulo X: Conclusiones y recomendaciones 330

10.1. Conclusiones 330

10.2. Recomendaciones 333

Bibliografía 336

Anexos 343

Índice de tablas

Tabla 1 *Coordenadas UTM WGS-84 de delimitación de la zona de estudio..... 3*

Tabla 2 *Características de las estaciones meteorológicas involucradas..... 6*

Tabla 3 *Precipitación promedio mensual (mm)..... 8*

Tabla 4 *Temperatura máxima promedio mensual (°C) 9*

Tabla 5 *Temperatura mínima promedio mensual (°C) 10*

Tabla 6 *Humedad relativa promedio mensual (%) 11*

Tabla 7 *Velocidad del viento promedio mensual (m/s)..... 13*

Tabla 8 *Evaporación total mensual (mm) 14*

Tabla 9 *Cálculo de evapotranspiración potencial (mm/mes)..... 16*

Tabla 10 *Balance hídrico climático mensual (mm)..... 18*

Tabla 11 *Variables e indicadores del proyecto 26*

Tabla 12 *Valores de permeabilidad 42*

Tabla 13 *Clasificación de algunos materiales sedimentarios según su permeabilidad 42*

Tabla 14 *Valores estimados de la permeabilidad por varios autores (m/dia) 43*

Tabla 15 *Valores de transmisividad..... 44*

Tabla 16 *Clasificación de terrenos por la transmisividad 44*

Tabla 17 *Valores de coeficiente de almacenamiento (S)..... 46*

Tabla 18 *Valores de resistividades representativos para suelos, agua y rocas de Mooney..... 54*

Tabla 19 *Resistividad de aguas y rocas según Astier (1975) 55*

Tabla 20 *Métodos de análisis pruebas de bombeo..... 63*

Tabla 21 *Clasificación de las aguas según las normas Riverside 80*

Tabla 22 *Estándares nacionales de calidad ambiental (ECA) para aguas destinadas a consumo humano y riego de cultivos, Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM 82*

Tabla 23 *Coordenadas de ubicación pozos perforados en la zona de estudio 120*

Tabla 24 *Descripción litológica pozo PP-01 Wayu Perú 121*

Tabla 25 *Descripción litológica pozo Rosita 122*

Tabla 26 *Descripción Litológica pozo PP-01 Laguna Azul 123*

Tabla 27 *Coordenadas de ubicación de los sondajes eléctricos verticales ejecutados en la zona de estudio..... 140*

Tabla 28 *Resultados de la interpretación cuantitativa de los sondajes eléctricos verticales ejecutados en el sector Pampa Molina..... 147*

Tabla 29 *Descripción de horizontes geoeléctricos..... 154*

Tabla 30 *Tipo de material para valores de resistividad 155*

Tabla 31 *Resultados generales de planos geofísicos 196*

Tabla 32 *Distribución de las fuentes de agua según su tipo 205*

Tabla 33 *Distribución de las fuentes de agua según su estado 208*

Tabla 34 *Distribución de las fuentes de agua según su uso 210*

Tabla 35 *Distribución de las fuentes de agua según tipo de bomba 211*

Tabla 36 *Distribución de las fuentes de agua según tipo de motor 212*

Tabla 37 *Variación de los rendimientos (l/s) según el tipo de fuente de agua.. 212*

Tabla 38 *Comparación de caudales y volúmenes explotados mediante pozos, acuífero sector Pampa Molina 214*

Tabla 39 *Volumen de explotación de aguas subterráneas registrados en el 2005 y 2024, acuífero sector Pampa Molina* *215*

Tabla 40 *Pozos de pruebas de bombeo* *217*

Tabla 41 *Tiempo total de prueba de bombeo pozos zona de estudio* *219*

Tabla 42 *Intervalos de tiempo para toma de datos durante pruebas de bombeo* *220*

Tabla 43 *Metodología para cálculo de parámetros hidráulicos* *223*

Tabla 44 *Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo* *230*

Tabla 45 *Parámetros físico-químicos in situ fuentes de agua sector Pampa Molina* *232*

Tabla 46 *Clasificación de fuentes de agua según los límites máximos permisibles de conductividad para uso poblacional y riego del D.S. N° 004-2017-MINAM* . *234*

Tabla 47 *Resumen de parámetros físico-químicos de las muestras analizadas del sector Pampa Molina* *238*

Tabla 48 *Balance iónico muestras de agua analizadas sector Pampa Molina* . *240*

Tabla 49 *Tipo y familia química aguas subterráneas sector Pampa Molina* *242*

Tabla 50 *Comparación de resultados de análisis físico-químicos con los límites máximos permisibles de los ECA del D.S. N° 004-2017-MINAM* *249*

Tabla 51 *Profundidad y cota del nivel de agua subterránea pozos sector Pampa Molina* *272*

Tabla 52 *Comparación de valores de parámetros hidráulicos promedio de pozos del sector Pampa Molina – Sama con la clasificación de Custodio & Llamas (1983)* *273*

Tabla 53 *Comparación de la permeabilidad promedio de pozos del sector Pampa Molina – Sama con valores típicos de varios autores 274*

Tabla 54 *Clasificación cualitativa de la transmisividad, sector Pampa Molina . 275*

Tabla 55 *Clasificación cualitativa de la permeabilidad, sector Pampa Molina.. 278*

Tabla 56 *Parámetros que exceden los ECA 1-A1 del D.S. N° 004-2017-MINAM en las muestras de agua de la zona de estudio 288*

Tabla 57 *Clasificación de muestras de agua de acuerdo a los límites máximos permisibles de los ECA 1-A1 para consumo humano de la norma MINAM..... 289*

Tabla 58 *Tipos de agua según la potabilidad, acuífero Pampa Molina 290*

Tabla 59 *Clasificación de muestras de agua de acuerdo a los límites máximos permisibles de los ECA 3-D1 para riego de cultivos de la norma MINAM 293*

Tabla 60 *Parámetros que exceden los ECA 3-D1 del D.S. N° 004-2017-MINAM en las muestras de agua de la zona de estudio 294*

Tabla 61 *Clasificación del agua según RAS y la C.E., acuífero Pampa Molina 296*

Tabla 62 *Balance hídrico acuífero Pampa Molina – parte baja valle Sama..... 300*

Tabla 63 *Capas asignadas al modelo geológico 302*

Tabla 64 *Volúmenes de las capas asignadas al modelo geológico 306*

Tabla 65 *Unidades hidrogeológicas de la zona de estudio 313*

Tabla 66 *Red de monitoreo propuesto en el sector Pampa Molina – parte baja valle Sama..... 322*

Tabla 67 *Comparación de resultados con valores típicos de acuíferos similares 328*

Índice de figuras

Figura 1 *Ubicación de la zona de estudio 4*

Figura 2 *Ubicación de las estaciones meteorológicas 7*

Figura 3 *Variación de la precipitación promedio mensual 8*

Figura 4 *Variación de la temperatura máxima mensual..... 10*

Figura 5 *Variación de la temperatura mínima mensual 11*

Figura 6 *Variación de la humedad relativa promedio mensual 12*

Figura 7 *Variación de la velocidad del viento promedio mensual 13*

Figura 8 *Variación de la evaporación promedio mensual 14*

Figura 9 *Variación de la evapotranspiración potencial 17*

Figura 10 *Evolución temporal de áreas agrícolas, sector Pampa Molina 20*

Figura 11 *Tipos de acuífero de acuerdo con la presión atmosférica..... 40*

Figura 12 *Elementos que intervienen en la recarga de un acuífero..... 47*

Figura 13 *Disposición de electrodos de corriente (A, B) y de electrodos de potencial (M, N) 52*

Figura 14 *Dispositivo Schlumberger..... 56*

Figura 15 *Dispositivo Wenner 57*

Figura 16 *Dispositivo polo-dipolo 57*

Figura 17 *Dispositivo dipolo-dipolo 58*

Figura 18 *Metodología sondajes eléctricos verticales 60*

Figura 19 *Mediciones de resistividad aparente con aumento de distancia entre electrodos 61*

Figura 20 *Tipos de ensayos de bombeo 62*

Figura 21 *Recta de Jacob, gráfico de campo* *67*

Figura 22 *Esquema para la deducción del valor del descenso residual* dr*, en el análisis de la recuperación de niveles posterior a la parada* *68*

Figura 23 *Recta de recuperación* *71*

Figura 24 *Diagrama de Piper* *74*

Figura 25 *Clasificación química de las aguas según diagrama de Piper* *75*

Figura 26 *Representación de datos químicos en diagrama Stiff*..... *76*

Figura 27 *Diagrama de Shoeller* *77*

Figura 28 *Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego (U.S. Soild Salinity Laboratory)* *79*

Figura 29 *Flujos de agua de una cuenca* *83*

Figura 30 *Unidades geomorfológicas regionales de la zona de estudio* *92*

Figura 31 *Terraza baja aluvial en el cauce del río Sama, sector la Vituña-Pampa Molina*..... *93*

Figura 32 *Terraza marina cerca a playa Llostay* *94*

Figura 33 *Piedemonte aluvio torrencial, vertiente aluvial, terraza marina y colina y lomada en roca volcano-sedimentaria en el sector Pampa Molina*..... *96*

Figura 34 *Mantos de arena en el sector Los Arenales-Boca del Río*..... *97*

Figura 35 *Superficie de flujo piroclástico disectado en los cerros La Mina, Fuerte Los Españoles, Calvario y Punta Colorada, margen derecha del río Sama* *99*

Figura 36 *Colina y lomada en roca volcano-sedimentaria, sector Pampa Molina* *100*

Figura 37 *Columna estratigráfica regional de la zona de estudio* *102*

Figura 38 *Columna estratigráfica local de la zona de estudio 111*

Figura 39 *Escarpe de la falla Miraflores a lo largo de la zona de estudio 114*

Figura 40 *Escarpe de la falla Chombo a lo largo de la zona de estudio 116*

Figura 41 *Lineamiento Calvario a lo largo de la zona de estudio 117*

Figura 42 *Ubicación de los cortes geológicos regionales 124*

Figura 43 *Corte geológico regional A-A'..... 125*

Figura 44 *Corte geológico regional B-B'..... 126*

Figura 45 *Corte geológico regional C-C' 127*

Figura 46 *Corte geológico regional D-D' 129*

Figura 47 *Ubicación de cortes geológicos locales..... 131*

Figura 48 *Corte geológico local E-E'..... 132*

Figura 49 *Corte geológico local F-F' 133*

Figura 50 *Corte geológico local G-G' 135*

Figura 51 *Corte geológico local H-H'..... 136*

Figura 52 *Curva del SEV-33 interpretada en el software IPI2WIN 142*

Figura 53 *Ubicación de SEVs y secciones geológicas – geofísicas 144*

Figura 54 *Sección geológica-geofísica A-A'..... 157*

Figura 55 *Sección geológica-geofísica B-B'..... 159*

Figura 56 *Sección geológica-geofísica C-C'..... 162*

Figura 57 *Sección geológica-geofísica D-D'..... 164*

Figura 58 *Sección geológica-geofísica E-E'..... 166*

Figura 59 *Sección geológica-geofísica F-F' 168*

Figura 60 *Sección geológica-geofísica G-G' 170*

Figura 61 *Sección geológica-geofísica H-H'.....173*

Figura 62 *Sección geológica-geofísica I-I'.....175*

Figura 63 *Sección geológica-geofísica J-J'.....177*

Figura 64 *Sección geológica-geofísica K-K'.....179*

Figura 65 *Sección geológica-geofísica L-L'.....182*

Figura 66 *Sección geológica-geofísica M-M'.....184*

Figura 67 *Sección geológica-geofísica N-N'.....186*

Figura 68 *Sección geológica-geofísica O-O'.....188*

Figura 69 *Sección geológica-geofísica P-P'.....191*

Figura 70 *Sección geológica-geofísica Q-Q'.....193*

Figura 71 *Sección geológica-geofísica R-R'.....195*

Figura 72 *Zonas de mayor espesor de acuífero.....200*

Figura 73 *Zonas favorables con potencial hidrogeológico.....204*

Figura 74 *Distribución de las fuentes de agua según su tipo 206*

Figura 75 *Distribución porcentual de fuentes de agua según su tipo.....206*

Figura 76 *Pozo tubular PP-01 Wayu Perú, ubicado en sector Pampa Molina . 207*

Figura 77 *Cocha 01 de propiedad de la Municipalidad C.P. Boca del Río, ubicado en el cauce del río Sama, 520m al NW de Boca de Río. 207*

Figura 78 *Distribución de las fuentes de agua según su estado.....208*

Figura 79 *Distribución porcentual de fuentes de agua según su estado.....209*

Figura 80 *Pozo tajo abierto de propiedad Promotora DAVECO, en estado no utilizable ubicado en terrenos del proyecto Laguna Azul-sector playa Llostay . 209*

Figura 81 *Distribución de las fuentes de agua según su uso 210*

Figura 82 *Distribución porcentual de fuentes de agua según su uso..... 211*

Figura 83 *Aforo de caudal del pozo PP-01 Wayu Perú 213*

Figura 84 *Ubicación de pozos pruebas de bombeo 218*

Figura 85 *Curvas tipo para acuíferos confinados y libres 222*

Figura 86 *Gráfica en Excel prueba de bombeo-fase descenso pozo PP-01 Laguna Azul..... 224*

Figura 87 *Gráfica Aquifer-Test prueba de bombeo-fase descenso pozo PP-01 Laguna Azul..... 224*

Figura 88 *Gráfica en Excel prueba de bombeo-fase descenso pozo PP-01 Wayu Perú..... 225*

Figura 89 *Gráfica Aquifer-Test prueba de bombeo-fase descenso pozo PP-01 Wayu Perú..... 225*

Figura 90 *Gráfica en Excel prueba de bombeo-fase descenso pozo Rosita.... 226*

Figura 91 *Gráfica en Aquifer-Test prueba de bombeo-fase descenso pozo Rosita 226*

Figura 92 *Gráfica Excel prueba de bombeo-fase recuperación pozo Rosita ... 227*

Figura 93 *Gráfica en Aquifer-Test prueba de bombeo-fase de recuperación pozo Rosita 227*

Figura 94 *Gráfica Excel prueba de bombeo-fase descenso pozo IRHS C-2 ... 228*

Figura 95 *Gráfica en Aquifer-Test prueba de bombeo-fase descenso pozo IRHS C-2 ..... 228*

Figura 96 *Gráfica en Excel prueba de bombeo-fase recuperación pozo IRHS C-2 ..... 229*

Figura 97 *Gráfica en Aquifer-Test prueba bombeo-fase de recuperación pozo IRHS C-2* *229*

Figura 98 *Variación de conductividad eléctrica de fuentes de agua inventariadas* *234*

Figura 99 *Variación de pH de fuentes de agua subterránea inventariadas*..... *235*

Figura 100 *Ubicación pozos de muestreo de agua para análisis físico-químico en laboratorio*..... *237*

Figura 101 *Diagrama Piper acuífero Pampa Molina-parte baja valle Sama*..... *242*

Figura 102 *Diagrama de Scatter Cl+SO4 vs Na+K (según Mifflin, 1988) acuífero Pampa Molina-parte baja valle Sama* *243*

Figura 103 *Diagramas de Stiff, sector Pampa Molina* *244*

Figura 104 *Distribución espacial de diagramas de Stiff, sector Pampa Molina 246*

Figura 105 *Diagrama de Schoeller, acuífero sector Pampa Molina*..... *247*

Figura 106 *Variación de pH en fuentes de agua subterránea*..... *250*

Figura 107 *Variación de conductividad en fuentes de agua subterránea* *251*

Figura 108 *Variación de sólidos disueltos totales en fuentes de agua subterránea* *252*

Figura 109 *Variación de dureza en fuentes de agua subterránea* *253*

Figura 110 *Variación de concentración de cloruros en fuentes de agua subterránea* *254*

Figura 111 *Variación de concentración de sulfatos en fuentes de agua subterránea* *255*

Figura 112 *Variación de concentración de nitratos en fuentes de agua subterránea* *256*

Figura 113 *Variación de concentración de bicarbonatos en fuentes de agua subterránea* *256*

Figura 114 *Variación de concentración del ion calcio en fuentes de agua subterránea* *257*

Figura 115 *Variación de concentración del ion magnesio en fuentes de agua subterránea* *258*

Figura 116 *Variación de concentración del ion sodio en fuentes de agua subterránea* *259*

Figura 117 *Variación de concentración del ion potasio en fuentes de agua subterránea* *260*

Figura 118 *Corte geológico regional que evidencia la formación del acuífero Pampa Molina* *263*

Figura 119 *Sección geofísica que muestra los dos paleocauces del sector Pampa Molina* *264*

Figura 120 *Distribución de la transmisividad* *276*

Figura 121 *Distribución de la permeabilidad* *278*

Figura 122 *Isoconductividad eléctrica del agua subterránea* *281*

Figura 123 *Distribución del ion cloruro* *283*

Figura 124 *Distribución del ion sulfato* *284*

Figura 125 *Distribución del ion sodio* *285*

Figura 126 *Distribución del ion calcio* *286*

Figura 127 *Diagrama logarítmico de potabilidad de agua, acuífero Pampa Molina 291*

Figura 128 *Diagrama de Wilcox de clasificación del agua para riego, acuífero Pampa Molina..... 295*

Figura 129 *Esquema conceptual de ingresos y salidas del sistema acuífero .. 301*

Figura 130 *DEM del área de estudio utilizado para el modelo geológico 3D ... 303*

Figura 131 *Secciones geológica-geofísicas para modelo geológico 3D 304*

Figura 132 *Construcción del modelo geológico 3D 305*

Figura 133 *Capas del modelo geológico 3D en Leapfrog Geo 306*

Figura 134 *Vista del sólido de la zona no saturada en Leapfrog Geo..... 307*

Figura 135 *Vista del sólido de la zona saturada en Leapfrog Geo 308*

Figura 136 *Vista del sólido del basamento rocoso en Leapfrog Geo..... 309*

Figura 137 *Unidades hidrogeológicas del área de estudio y alrededores..... 314*

Figura 138 *Movilización vertical y horizontal del flujo subterráneo, sección geológica- geofísica J-J' 316*

Figura 139 *Movilización horizontal del flujo subterráneo, sección geológica-geofísica O-O'..... 317*

Figura 140 *Modelo conceptual en 2D..... 318*

Figura 141 *Modelo conceptual en planta del sistema acuífero Pampa Molina 319*

Figura 142 *Modelo conceptual en 3D de componentes del sistema acuífero Pampa Molina..... 319*

Figura 143 *Red de piezómetros propuestos para monitoreo de aguas subterráneas en el sector Pampa Molina..... 324*

Índice de anexos

Matriz de consistencia y de operacionalización de variables

Anexo 1. Mapas

Mapa 1. Ubicación y acceso a la zona de estudio

Mapa 2. Geomorfología regional

Mapa 3. Geomorfología local

Mapa 4. Geología regional y estructural

Mapa 5. Geología local

Mapa 6. Corte geológico regional A-A’

Mapa 7. Corte geológico regional B-B’

Mapa 8. Corte geológico regional C-C’

Mapa 9. Corte geológico regional D-D’

Mapa 10. Corte geológico regional E-E’

Mapa 11. Corte geológico local F-F’

Mapa 12. Corte geológico local G-G’

Mapa 13. Corte geológico local H-H’

Mapa 14. Ubicación de SEVs y secciones geofísicas

Mapa 15. Sección geológica-geofisica A-A’

Mapa 16. Sección geológica-geofisica B-B’

Mapa 17. Sección geológica-geofisica C-C’

Mapa 18. Sección geológica-geofisica D-D’

Mapa 19. Sección geológica-geofisica E-E’

Mapa 20. Sección geológica-geofisica F-F’

Mapa 21. Sección geológica-geofisica G-G’

Mapa 22. Sección geológica-geofisica H-H’

Mapa 23. Sección geológica-geofisica I-I’

Mapa 24. Sección geológica-geofisica J-J’

Mapa 25. Sección geológica-geofisica K-K’

Mapa 26. Sección geológica-geofisica L-L’

Mapa 27. Sección geológica-geofisica M-M’

Mapa 28. Sección geológica-geofisica N-N’

Mapa 29. Sección geológica-geofisica O-O’

Mapa 30. Sección geológica-geofisica P-P’

Mapa 31. Sección geológica-geofisica Q-Q’

Mapa 32. Sección geológica-geofisica R-R’

Mapa 33. Techo del basamento impermeable

Mapa 34. Espesor total del horizonte permeable saturado

Mapa 35. Resultados cuantitativos del horizonte saturado (resistividad verdadera)

Mapa 36. Resistencia transversal del horizonte saturado

Mapa 37. Pozos y fuentes de agua subterránea inventariadas

Mapa 38. Isoprofundidad de la napa

Mapa 39. Hidroisohipsas

Anexo 2. Gráficos de la interpretación cuantitativa de los sondajes eléctricos verticales - SEVs

Anexo 3. Registro de perfiles litológicos de pozos

Anexo 4. Cuadro de inventario de pozos y fuentes de agua

Anexo 5. Pruebas de bombeo

Anexo 6. Resultados análisis físico-químicos

Anexo 7. Panel fotográfico

Resumen

La presente tesis se centra en la evaluación hidrogeológica del acuífero sector Pampa Molina-parte baja valle Sama para el uso racional de aguas subterráneas con fines agrícolas; del cual se desconoce su capacidad de almacenamiento, calidad y evolución ante una explotación intensiva.

Se realizó la geología, geomorfología, inventario de pozos; interpretación de 72 sondajes eléctricos verticales en correlación con datos de perforaciones y procesados en el software IPI2WIN, que definieron la configuración del acuífero.

Se interpretaron 04 pruebas de bombeo en Excel y software AQUIFERTEST 2016 con el método Theis-Jacob, obteniendo los parámetros hidráulicos transmisividad y permeabilidad.

Se realizó el análisis fisicoquímico de 07 muestras de agua; se graficaron los diagramas Piper, Stiff, Schoeller, Wilcox en el software AQUACHEM 4.0 y compararon con los Estándares de Calidad para riego y uso poblacional del D.S.N°004-2017 MINAM.

Esta tesis concluye que el acuífero es de tipo libre, de regulares condiciones hidrogeológicas, constituido por depósitos aluviales con espesores de 9 a 80m; teniendo como basamento a rocas de la Formación Chocolate. Las aguas son de alta salinidad No Aptas para consumo humano; solo podrán ser utilizadas en el riego de cultivos muy tolerantes a las sales, como el olivo, quinua y pitahaya que se vienen cultivando en la zona. La reserva total es de 43,30MMC y las reservas explotables 4,33MMC; que demuestra que la explotación actual de los

pozos (1,14MMC) no estaría afectando las reservas permanentes. Se recomienda la instalación de 24 piezómetros para monitorear las fluctuaciones del nivel freático y evolución de la calidad del agua.

Palabras claves: aguas subterráneas, acuífero, sondajes eléctricos verticales, prueba de bombeo, hidrogeoquimica, disponibilidad hídrica.

Abstract

This thesis focuses on the hydrogeological evaluation of the Pampa Molina-Lower Sama Valley aquifer for the rational use of groundwater for agricultural purposes; its storage capacity, quality, and evolution under intensive exploitation are unknown.

Geology, geomorphology, well inventory were carried out; interpretation of 72 vertical electrical soundings in correlation with drilling data and processed in the IPI2WIN software, which defined the configuration of the aquifer.

Four (04) pumping tests were interpreted in Excel and AQUIFERTEST 2016 software using the Theis-Jacob method, obtaining the hydraulic parameters Transmissivity and Permeability.

The physicochemical analysis of 07 water samples was carried out; the Piper, Stiff, Schoeller, Wilcox diagrams were plotted in the AQUACHEM 4.0 software and compared with the Quality Standards for irrigation and population use of D.S.N°004-2017 MINAM.

This thesis concludes that the aquifer is unconfined, with fair hydrogeological conditions, and is composed of alluvial deposits ranging from 9 to 80 meters in thickness, based on rocks from the Chocolate Formation. The waters are highly saline and unsuitable for human consumption; they can only be used for irrigating salt-tolerant crops such as olives, quinoa, and pitahaya, which are currently cultivated in the area. The total reserve is 43,30 MMC and the exploitable reserves of 4,33 MMC, demonstrating that the current well production (1,14 MMC)

is not affecting the permanent reserves. The installation of 24 piezometers is recommended to monitor fluctuations in the water table and changes in water quality.

Keywords: groundwater, aquifer, vertical electrical soundings, pumping test, hydrogeochemistry, water availability.

Introducción

Los seres humanos están explotando en exceso las aguas de muchos grandes acuíferos, lo que es crítico para la agricultura (Glesson et al., 2012). Algunos observadores afirman que las aguas subterráneas son el recurso hídrico del mañana, sin embargo, es importante tomar precauciones ya que las aguas subterráneas no son inmunes a la contaminación ni tampoco inagotables (Gárfias et al., 2008).

En el Perú las aguas subterráneas son una fuente de suministro para uso agrícola, doméstico, industrial y pecuario, existiendo peligro de sobreexplotación en muchos de los acuíferos del país. En el valle Sama, la fuente hídrica de mayor importancia lo constituye el río Sama, cuyo caudal no satisface las demandas que exige el uso poblacional y agrícola del lugar (CORDETACNA, 1983). Por esta razón se utilizan las aguas subterráneas del acuífero Sama, generalmente con fines agrícolas; ya que existe escasez hídrica desde hace varias décadas, debido a que Tacna se ubica en la zona más árida de la costa del Perú y en la cabecera del desierto de Atacama.

El incremento de áreas de cultivo en el sector Pampa Molina-parte baja del valle Sama, aunado a la escasez de recursos hídricos superficiales, está provocando que los agricultores de la zona perforen pozos sin previa autorización de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), con el fin de satisfacer la demanda requerida por sus proyectos agrícolas. Por este motivo, es importante efectuar la evaluación hidrogeológica del sector Pampa Molina, que permita identificar las

características y condiciones hidrogeológicas del reservorio subterráneo, para conocer su comportamiento y funcionamiento ante el bombeo de pozos principalmente informales y establecer lineamientos preliminares para la explotación racional del agua subterránea con fines exclusivamente agrícolas.

La presente investigación permitirá ampliar el conocimiento hidrogeológico del sector Pampa Molina y servirá de base para que las autoridades del Estado, competentes con los recursos hídricos, elaboren a futuro estudios hidrogeológicos más detallados del acuífero Sama y de esta manera, establecer medidas de gestión sostenible de las aguas subterráneas.

Capítulo I: Aspectos generales

1.1. Ubicación y acceso a la zona de estudio

1.1.1. Ubicación

La zona de estudio políticamente se ubica en la parte sur de la costa peruana, en la provincia y región de Tacna, distrito Sama Las Yaras, sector Pampa Molina, 3 km al NorEste del C.P. Boca del Río, margen izquierda del rio Sama; a una altitud de 15 a 250 m.s.n.m (ver figura 1 y mapa 1-anexo 1).

El área donde se desarrolla la investigación tiene una extensión de 29 km^2. Geográficamente está delimitado por las coordenadas UTM WGS-84 19S siguientes:

Tabla 1

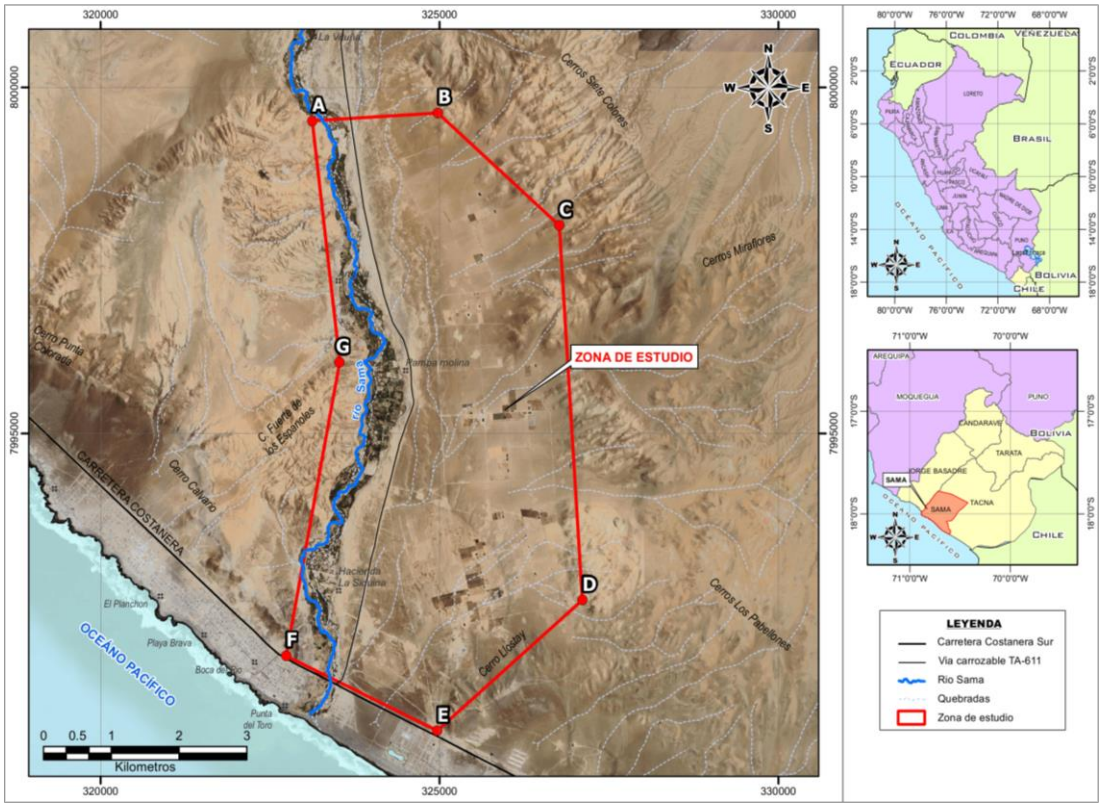
Coordenadas UTM WGS-84 de delimitación de la zona de estudio

Vértice	Coordenadas UTM WGS 84	
	Este	Norte
A	323123,18	7999513,79
B	324972,10	7999630,09
C	326766,96	7998003,21
D	327108,94	7992589,03
E	324962,44	7990701,39
F	322737,26	7991786,02
G	323524,36	7996027,49

Nota. Elaboración propia

Figura 1

Ubicación de la zona de estudio



Nota. Elaboración propia

1.1.2. Accesibilidad

La principal vía de comunicación a la zona de estudio se realiza partiendo del centro de la ciudad de Tacna por medio de la carretera Costanera Sur (Tacna-Boca del Río) a lo largo de 53 km, hasta el cruce con la vía TA-611, que conecta Sama Las Yaras con Inclán. Desde este punto, se continúa por dicha vía para acceder a los diferentes puntos de estudio del sector Pampa Molina.

1.2. Hidrografía

La zona de estudio, se ubica dentro de la cuenca hidrográfica del río Sama, que pertenece a la vertiente del Pacífico.

Según MINAG & ANA (2010) el río Sama se conoce como río Jaruma Grande en las alturas de la laguna Cotanvilque; luego, toma los nombres de río Jaruma, Huallatire, Ticalaco, Pistala y Tala hasta unirse con el río Salado, para formar el río Sama, el cual desemboca en el Océano Pacifico. Este rio discurre con un régimen torrentoso. El caudal máximo de descarga registrado fue de 115,4 m^3/s y el mínimo de 0,01 m^3/s. El volumen medio anual es de 2,27 m^3/s, equivalente a 71,89 hm^3. Las máximas descargas se presentan entre los meses de enero a marzo y disminuyen de setiembre a diciembre. En la estación La Tranca se controla la cantidad de agua que fluye a través del cauce del río Sama.

1.3. Clima

Según el INGEMMET (2021), la influencia de las aguas frías de la Corriente Peruana junto con la fisiografía determinada por la llanura costera, las estribaciones occidentales y la cordillera altoandina, es responsable de que Tacna posea un clima variado. El clima de la región es seco y varía de templado cálido a extremadamente frío en las regiones alpinas, mientras que es nuboso y templado en las zonas costeras.

De acuerdo a la clasificación climática de Warren Thornthwaite realizada por el Servicio Nacional de Metereología e Hidrología (SENAMHI) en la elaboración del mapa climático del departamento de Tacna, descrito en el informe

titulado “Peligro geológico en la región Tacna” del INGEMMET 2021, la zona de estudio se clasificaría como del tipo CLIMÁTICO E (d) B’1H3, correspondiente a un clima: árido con escasas lluvias, semicálido y húmedo.

Para describir las variables climatológicas a nivel local se ha considerado la información de los registros meteorológicos de las estaciones cercanas a la zona de estudio: Sama Grande y La Yarada, tomados de la página web del SENAMHI. La información de las estaciones involucradas se presenta en la tabla 2 y la ubicación se muestra en la figura 2.

Tabla 2

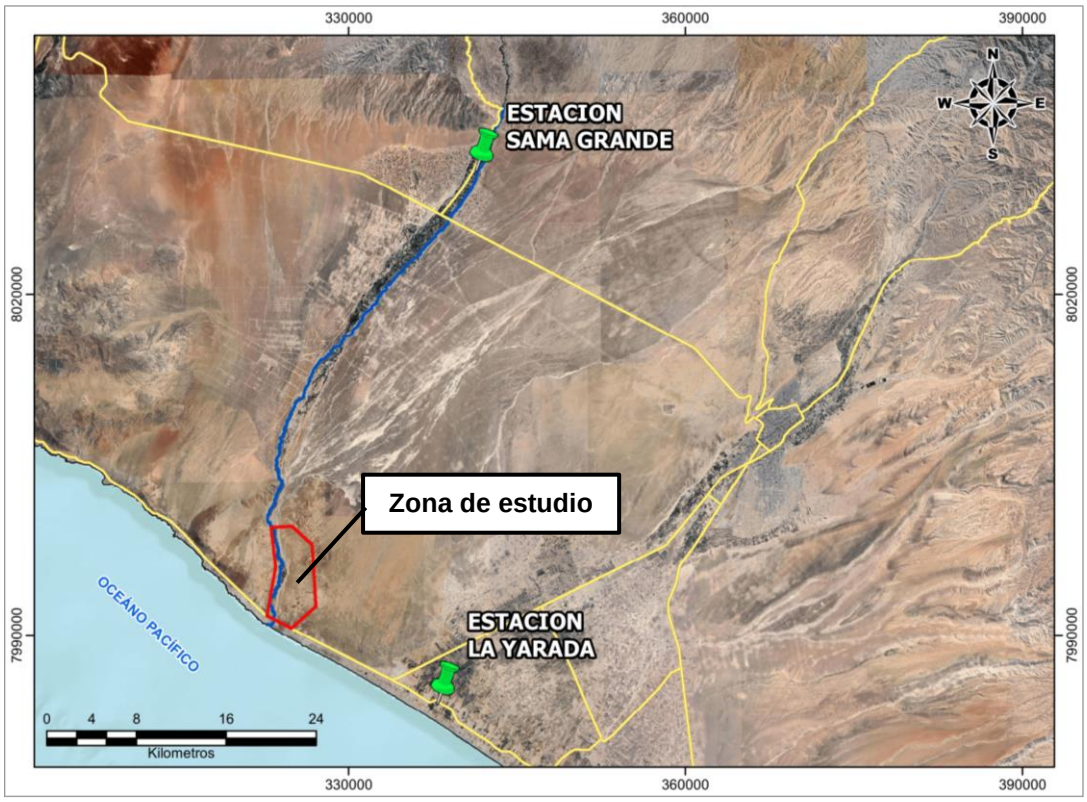
Características de las estaciones meteorológicas involucradas

Estación	**Coordenadas geográficas**		**Altitud (msnm)**	**Distancia a la zona de estudio (Km)**
	Latitud	**Longitud**		
Sama Grande	17°47’15,3’’	70°29’22,6’’	529	38
La Yarada	18°12’38,34’’	70°31’33,36’’	30	14

Nota. Tomado del SENAMHI (2025)

Figura 2

Ubicación de las estaciones meteorológicas



Nota. Elaboración propia

1.3.1. Precipitación

La zona de Pampa Molina experimenta lluvias ligeras, lloviznas y trazas de luvia, debido a que nuestra región de Tacna se encuentra en un sector de alta aridez con escasas precipitaciones (desierto costero), con predominio de vientos del sur y suroeste.

Para el análisis de la precipitación se ha considerado la información obtenida de la estación Sama Grande (periodo 1965-2024) y la estación La Yarada (periodo 1974-2024), que se resumen en la tabla 3.

Tabla 3

Precipitación promedio mensual (mm)

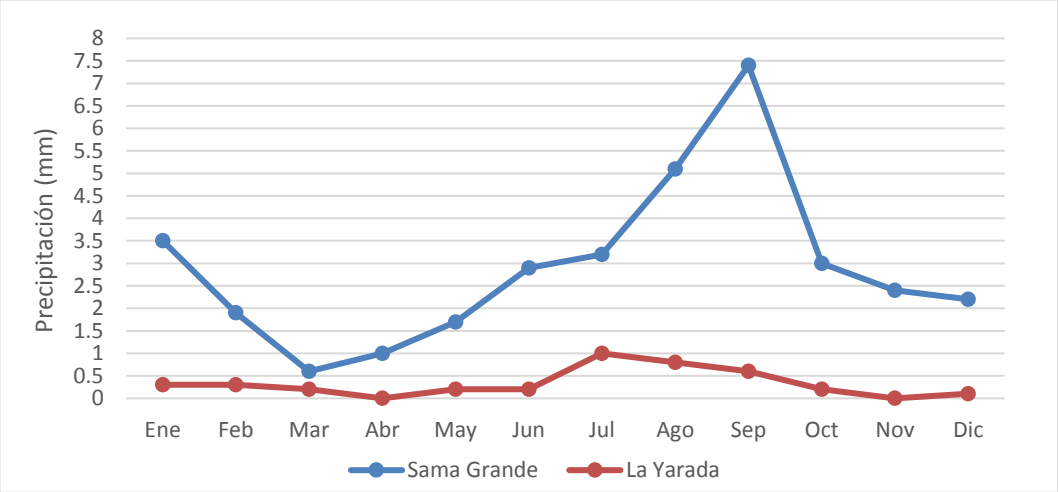
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Sama Grande	3,5	1,9	0,6	1,0	1,7	2,9	3,2	5,1	7,4	3,0	2,4	2,2
La Yarada	0,3	0,3	0,2	0,0	0,2	0,2	1,0	0,8	0,6	0,2	0,0	0,1

Nota. Tomado del SENAMHI (2025)

En la estación Sama Grande las precipitaciones más bajas se registraron en los meses de marzo y abril y las mayores precipitaciones, en los meses de agosto y setiembre. En la estación La Yarada las precipitaciones más bajas se presentaron entre los meses de marzo a junio y de octubre a diciembre, mientras que las mayores precipitaciones se registraron entre los meses de julio a setiembre (figura 3).

Figura 3

Variación de la precipitación promedio mensual



Nota. Elaboración propia

1.3.2. Temperatura

Las temperaturas máximas y mínimas se representaron por las estaciones Sama Grande y La Yarada que cuentan con información actualizada del periodo 1965-2024 y 1972-2024, respectivamente.

Las temperaturas máximas promedios en la estación Sama Grande fluctúan entre 23,2 °C (mes de julio) a 30,3 °C (mes de febrero) y en la estación La Yarada entre 19,8 °C (mes de julio) a 28 °C (mes de febrero). En la tabla 4 y figura 4, se muestra la variación de la temperatura máxima mensual de las dos estaciones.

Tabla 4

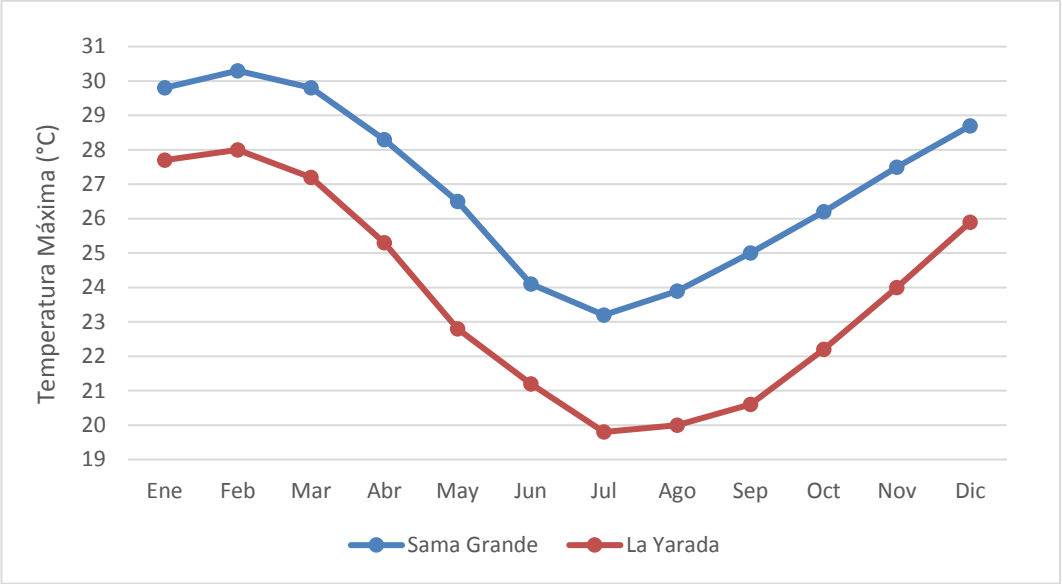
Temperatura máxima promedio mensual (°C)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Sama Grande	29,8	30,3	29,8	28,3	26,5	24,1	23,2	23,9	25,0	26,2	27,5	28,7
La Yarada	27,7	28,0	27,2	25,3	22,8	21,2	19,8	20,0	20,6	22,2	24,0	25,9

Nota. Tomado del SENAMHI (2025)

Figura 4

Variación de la temperatura máxima mensual



Nota. Elaboración propia

Las temperaturas mínimas en la estación Sama Grande fluctúan entre 7,9 °C (mes de julio) a 14,9 °C (mes de febrero) y en la estación La Yarada, entre 13 °C (mes de julio) a 18,2 °C (mes de febrero). En la tabla 5 y figura 5, se muestra la variación de la temperatura mínima mensual de las dos estaciones.

Tabla 5

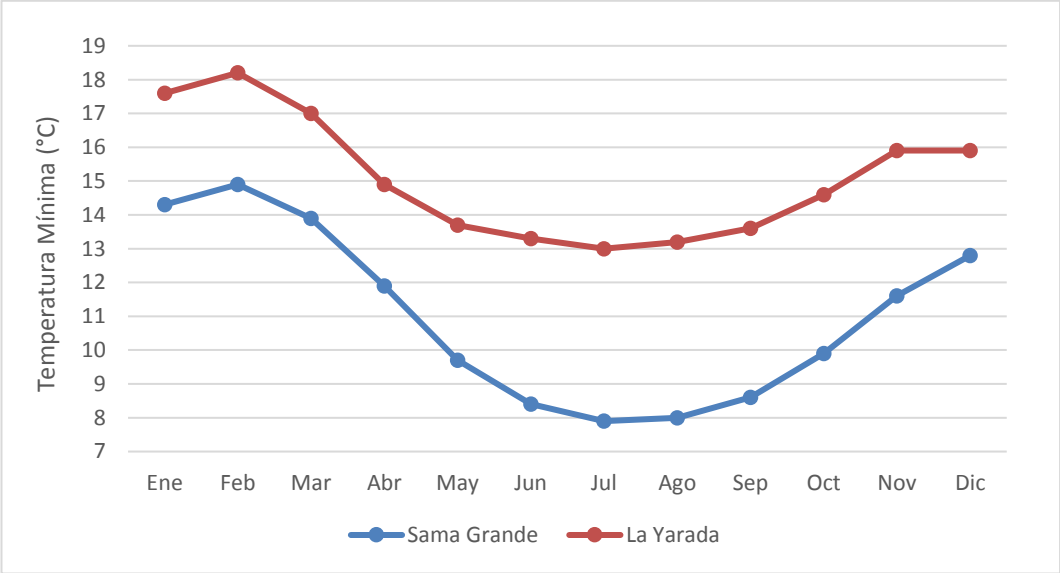
Temperatura mínima promedio mensual (°C)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Sama Grande	14,3	14,9	13,9	11,9	9,7	8,4	7,9	8,0	8,6	9,9	11,6	12,8
La Yarada	17,6	18,2	17,0	14,9	13,7	13,3	13,0	13,2	13,6	14,6	15,9	15,9

Nota. Tomado del SENAMHI (2025)

Figura 5

Variación de la temperatura mínima mensual



Nota. Elaboración propia

1.3.3. Humedad relativa

Tomando en cuenta la información de la estación Sama Grande (periodo 1964-2024) y la estación de La Yarada (periodo 1972-2024), cercanas a la zona de investigación, se analizó la humedad relativa (ver tabla 6).

Tabla 6

Humedad relativa promedio mensual (%)

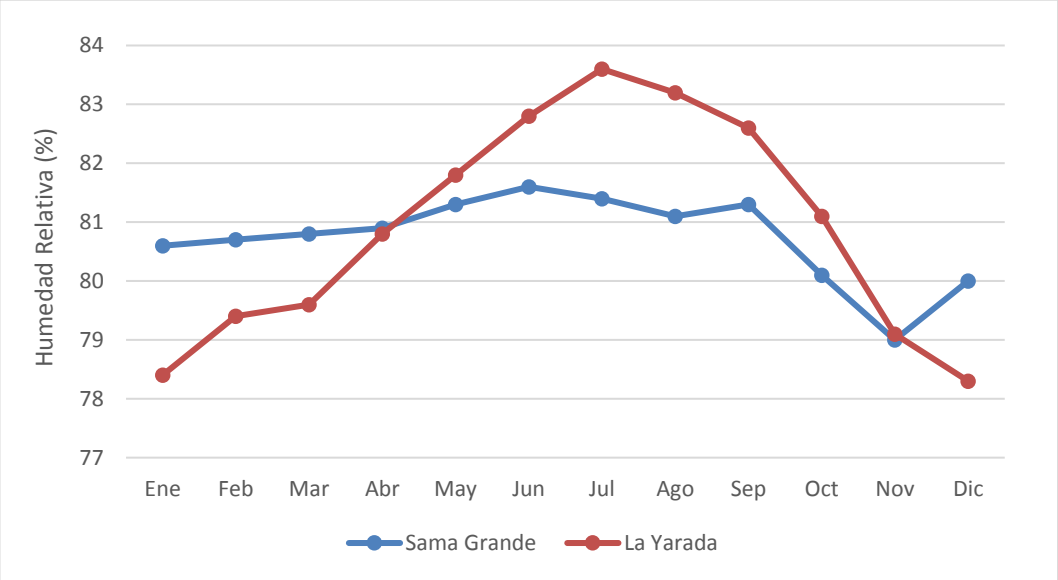
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Sama Grande	80,6	80,7	80,8	80,9	81,3	81,6	81,4	81,1	81,3	80,1	79,0	80,0
La Yarada	78,4	79,4	79,6	80,8	81,8	82,8	83,6	83,2	82,6	81,1	79,1	78,3

Nota. Tomado del SENAMHI (2025)

Los registros de humedad relativa promedio de la estación Sama Grande varían entre 79% (mes de noviembre) a 81,6% (mes de junio); mientras que en la estación La Yarada, fluctúan entre 78,3% (mes de diciembre) a 83,6% (mes de julio) (ver figura 6).

Figura 6

Variación de la humedad relativa promedio mensual



Nota. Elaboración propia

1.3.4. Velocidad del viento

La velocidad del viento en la estación Sama Grande {periodo 1964-2010) varía entre 1,6 m/s (mes de julio y noviembre) a 2 m/s (mes de febrero, marzo, abril) y en la estación La Yarada (periodo 1972-2015), entre 2,8 m/s (mes de julio) a 3,7 m/s (meses enero y diciembre) (ver tabla 7 y figura 7).

Tabla 7

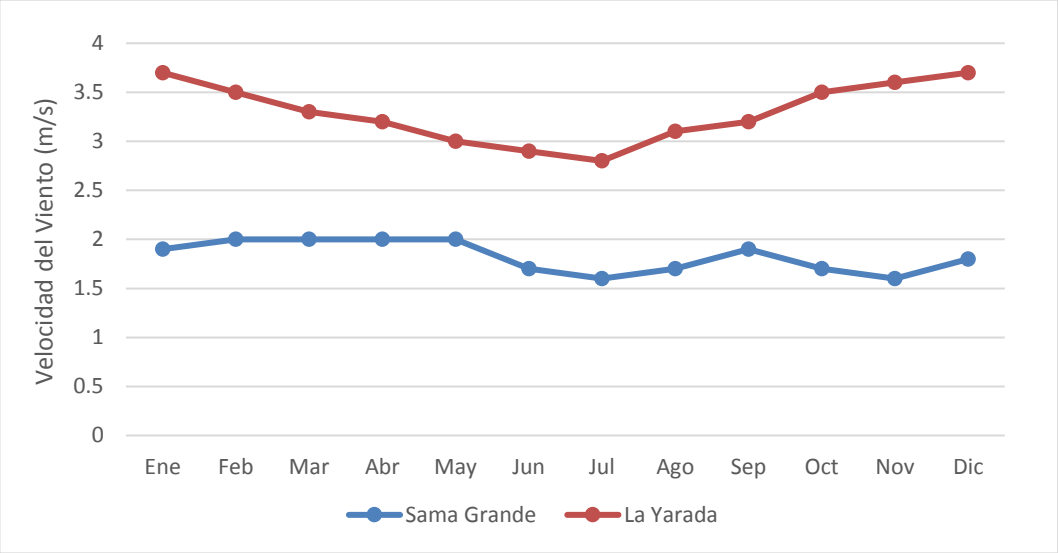
Velocidad del viento promedio mensual (m/s)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Sama Grande	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	1,7	1,6	1,7	1,9	1,7	1,6	1,8
La Yarada	3,7	3,5	3,3	3,2	3,0	2,9	2,8	3,1	3,2	3,5	3,6	3,7

Nota. Tomado del SENAMHI (2025)

Figura 7

Variación de la velocidad del viento promedio mensual



Nota. Elaboración propia

1.3.5. Evaporación

La evaporación es un factor importante en el balance hidrico de un acuifero. Para el análisis de la variación de evaporación total mensual, se ha considerado los registros de 1975-2012 de la estación Sama Grande y de 1972-1999 de la estación La Yarada (ver tabla 8).

Tabla 8

Evaporación total mensual (mm)

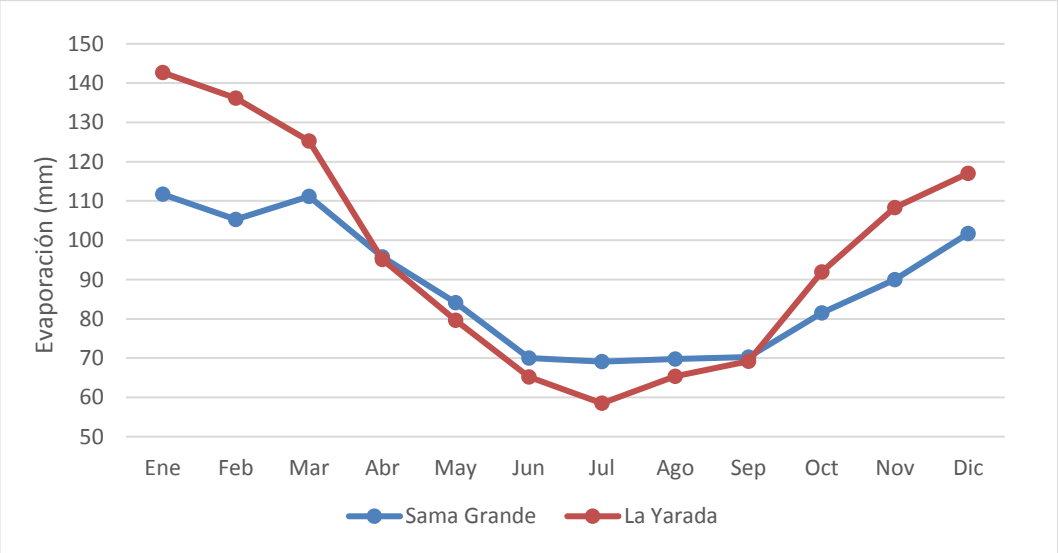
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Sama Grande	111,7	105,3	111,2	95,8	84,1	70,0	69,1	69,8	70,3	81,5	90,0	101,7
La Yarada	142,7	136,2	125,3	95,1	79,6	65,2	58,5	65,4	69,2	91,9	108,3	117,0

Nota. Tomado del SENAMHI (2025)

Según la figura 8, la evaporación total promedio mensual en la estación Sama Grande varía de 69,1 mm (mes de julio) a 111,7 mm (mes de enero) y en la estación La Yarada, de 58,5 mm (mes de julio) a 142,7 mm (mes de enero).

Figura 8

Variación de la evaporación promedio mensual



Nota. Elaboración propia

1.3.6. Evapotranspiración potencial

La Evapotranspiración Potencial o de referencia (ETP), junto a la evaporación, son de vital importancia en el balance hídrico y la disponibilidad de agua subterránea. Este parámetro se calculó mediante el método de Penman Monteith propuesto por la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) de las Naciones Unidas el año 1998, para lo cual se ha considerado la información metereológica disponible de la estación Sama Grande, como radiación solar, temperatura, humedad, velocidad del viento, que fueron reemplazados en la expresión siguiente:

$$ETP = \frac{0,408\,\Delta\,(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2\,(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0,34\,u_2)}$$

Donde:

ETP = evapotranspiración de referencia en mm/dia.

R_n = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m^2/dia)

G = flujo del calor del suelo (MJ/m^2/dia)

T = temperatura media en °C

u_2 = velocidad del viento en m/s

e_s = presión de vapor de saturación (kPa)

e_a = presión real de vapor (kPa)

e_s - e_a = déficit de presión de vapor (kPa)

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

γ = constante psicrométrica (kPa/°C)

En la tabla 9 se presenta el cálculo de la evapotranspiración potencial realizada para la zona de estudio. Los resultados obtenidos muestran valores mínimos de evapotranspiración de 69,4 mm en el mes de junio y máximos de 103,3 mm en el mes de diciembre.

Tabla 9

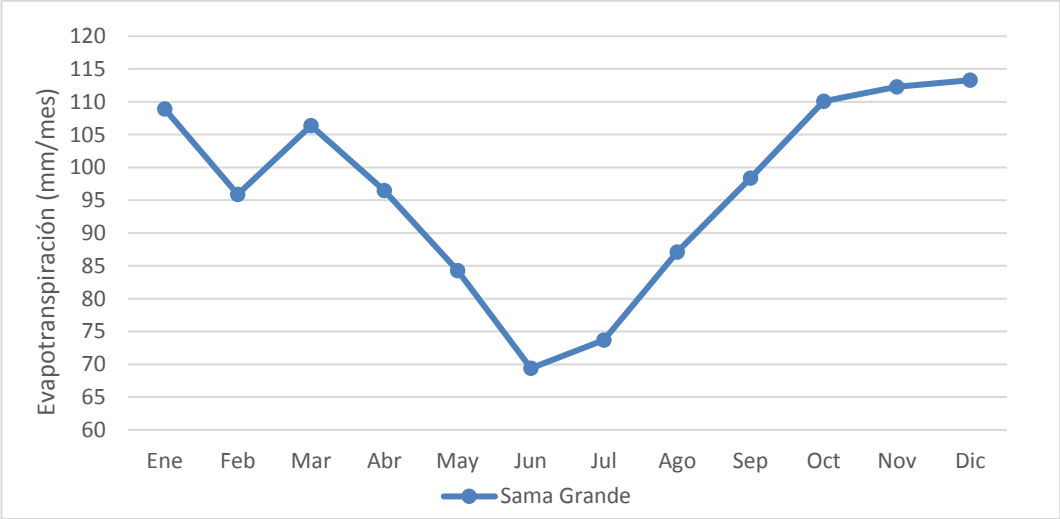
Cálculo de evapotranspiración potencial (mm/mes)

	Ene	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Dic**
u_2 (m/s)	1,90	2,00	2,00	2,00	2,00	1,70	1,60	1,70	1,90	1,70	1,60	1,80
γ(Kpa/°C)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Δ(kPa/°C)	0,16	0,17	0,16	0,15	0,13	0,12	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15
e_s (kPa)	2,91	3,01	2,89	2,62	2,33	2,05	1,95	2,02	2,14	2,31	2,52	2,71
e_a (kPa)	2,35	2,43	2,34	2,12	1,90	1,67	1,59	1,64	1,74	1,85	1,99	2,17
R_n MJ/m^2/dia	11,20	10,55	10,62	10,12	8,61	7,58	8,27	10,18	12,02	12,66	12,85	12,11
G MJ/m^2/dia	0,18	0,08	-0,11	-0,25	-0,28	-0,26	-0,10	0,06	0,12	0,18	0,21	0,17
T (°C)	22,05	22,60	21,85	20,10	18,10	16,25	15,55	15,95	15,95	16,80	18,05	19,55
ETP (mm/día)	3,51	3,43	3,43	3,22	2,72	2,31	2,38	2,81	3,28	3,55	3,74	3,66
Días mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
ETP (mm/mes)	108,9	95,9	106,4	96,5	84,3	69,4	73,7	87,1	98,4	110,1	112,3	113,3

Nota. Elaboración propia

Figura 9

Variación de la evapotranspiración potencial



Nota. Elaboración propia

1.3.7. Balance hídrico climático

El balance hídrico climático brinda información de la disponibilidad o déficit de agua una vez ocurrido el ciclo de agua a nivel superficial, considerando la ocurrencia de las precipitaciones y su posterior pérdida debido a la evaporación o evapotranspiración en el medio, considerando incluso el agua retenida y disponible en el medio no saturado, como reserva útil de agua que está susceptible a ser evaporada o consumida por las plantas.

Para realizar el balance hídrico climático de la zona de estudio se utilizó los cálculos de equilibrio realizados por Thorntwaite y J.R. Mather (1955) que se basan en la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP).

Tabla 10

Balance hídrico climático mensual (mm)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	22,6	23,1	22,1	20,1	18,2	17,2	16,4	16,6	17,1	18,4	19,9	20,9
i	9,85	10,15	9,49	8,22	7,10	6,52	6,04	6,15	6,43	7,19	8,13	8,72
ETP(mm)	108,9	95,9	106,4	96,5	84,3	69,4	73,7	87,1	98,4	110,1	112,3	113,3
k (mm)	1,09	1,06	1,02	0,98	0,94	0,93	0,93	0,96	1,00	1,04	1,08	1,10
ETP cor. (mm)	118,7	101,6	118,5	94,85	79,24	64,54	68,54	83,62	98,40	114,5	121,3	124,6
P (mm)	0,30	0,30	0,20	0,00	0,20	0,20	1,00	0,80	0,60	0,20	0,00	0,10
∆reserva (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Reserva (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ETPefec. (mm)	0,30	0,30	0,20	0,00	0,20	0,20	1,00	0,80	0,60	0,20	0,00	0,10
Déficit (mm)	118,4	101,4	108,3	94,8	79,0	64,3	67,5	82,8	97,8	114,3	121,3	124,5
Exced. (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Et (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Nota. T=temperatura, i=índice térmico mensual, ETP=evapotranspiración potencial, k=factor de corrección, ETP cor.=evapotranspiración potencial corregida, P=precipitación, ∆ reserva=variación de las reservas de la humedad del suelo, Et=escorrentía total. Elaboración propia

La tabla 10 muestra que no existe excedente hídrico en el área de estudio y, por el contrario se tiene un déficit, debido a que la precipitación es casi inexistente y la evapotranspiración alta.

1.4. Vegetación

El olivo es uno de los principales cultivos que se producen en el valle de Tacna, cuyas tierras son consideradas un oasis en medio de terrenos accidentados (INGEMMET, 2021). Según el DRAT (2023) en el distrito de Sama se viene cosechando de manera permanente alfalfa, granado y olivo y de manera transitoria, ají, cebolla, haba grano verde, maíz amilaceo y choclo, papa, quinua, sandía y zapallo, de los cuales los cultivos que han tenido mayor producción anual fueron la alfalfa, maíz chala, zapallo, olivo y cebolla. En el sector Pampa Molina los agricultores vienen cosechando principalmente olivo, quinua y pitahaya orgánica, que son irrigados por las aguas subterráneas del acuífero local.

1.5. Planteamiento del problema

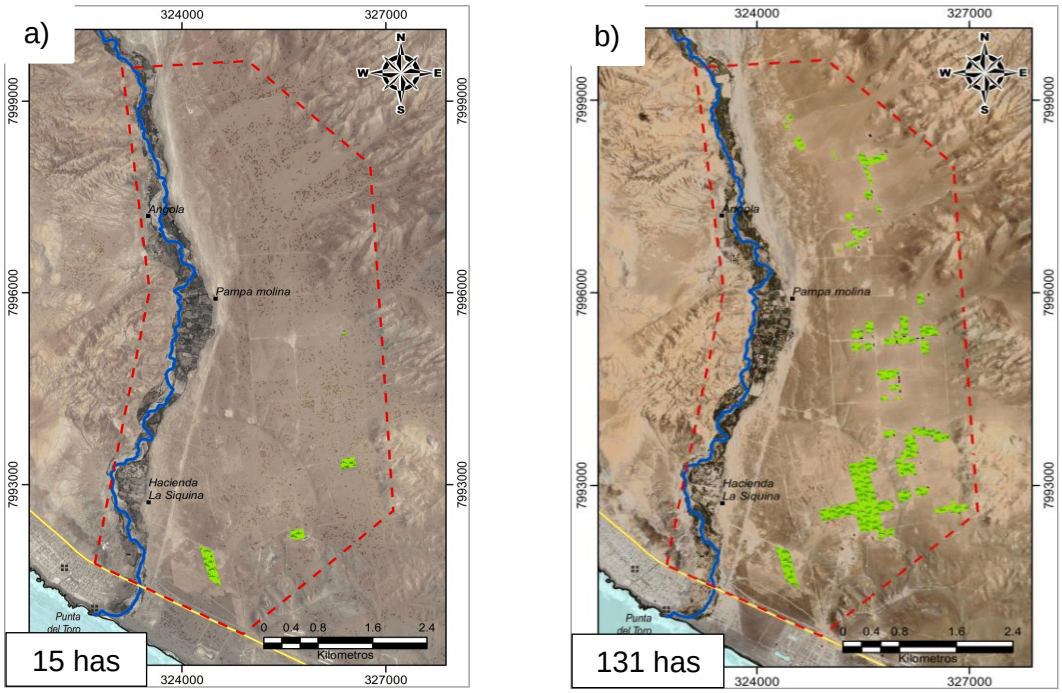
El departamento de Tacna, que forma parte de la cabecera del desierto de Atacama, se encuentra ubicado en una de las zonas más áridas y secas de la costa peruana, es por ello que desde hace varias décadas atrás en esta región ha existido problemas de escasez con respecto al recurso hídrico, lo cual ha dado lugar a que se utilicen las aguas subterráneas de las cuencas existentes en nuestra región, principalmente para uso doméstico y agrícola.

En el distrito de Sama Las Yaras se vienen utilizando las aguas subterráneas del acuífero local a través de pozos artesanales y tubulares de poca y/o mediana profundidad, por lo general con fines agricolas, como complemento al recurso hídrico superficial que es escaso, porque el río Sama presenta agua solo durante la temporada de lluvias en la parte alta de la cuenca (enero-marzo).

En los últimos años el sector Pampa Molina ha experimentado un crecimiento significativo de las áreas de cultivo, pasando de 15 ha en 2016 a 131 ha en 2023 (figura 10); lo que ha provocado el incremento de la perforación de pozos por parte de los agricultores para satisfacer la demanda de sus proyectos. Actualmente existen 24 fuentes de agua subterránea, de los cuales solo 01 cuenta con licencia de la ANA, 02 están en proceso de regularización y 21 son ilegales. El volumen total que se extrae del acuífero local es de 1,14 MMC (36,10 l/s), donde más del 60% proviene de pozos que operan informalmente. Esta situación es preocupante, ya que se desconoce la capacidad de almacenamiento del acuífero, la calidad de agua y comportamiento ante una explotación intensiva.

Figura 10

Evolución temporal de áreas agrícolas, sector Pampa Molina



Nota. Evolución del área irrigada durante (a) 2016 y (b) 2023. Elaboración propia

1.6. Formulación del problema

1.6.1. Problema general

¿Cómo determinar las características y condiciones hidrogeológicas del acuífero del sector Pampa Molina – parte baja del valle Sama, que definan su comportamiento y funcionamiento ante el bombeo de pozos, principalmente informales y de esta manera, establecer lineamientos para la explotación racional del agua subterránea con fines agrícolas?

1.6.2. Problemas específicos

- ¿Cómo está configurado el acuífero del sector Pampa Molina (geometría, litología y límites)?
- ¿Cuáles son los parámetros hidráulicos del acuífero: transmisividad (T), permeabilidad (K) y coeficiente de almacenamiento (S)?
- ¿Qué calidad de agua subterránea presenta el sector Pampa Molina?
- ¿Cuál es el origen de las aguas subterráneas y las fuentes de recarga al acuífero del sector Pampa Molina?
- ¿Cuánto es la disponibilidad hídrica subterránea del sector Pampa Molina?

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Determinar las características y condiciones hidrogeológicas del acuífero del sector Pampa Molina - parte baja del valle Sama, que definan su

comportamiento y funcionamiento ante el bombeo de pozos principalmente informales y de esta manera, establecer lineamientos para la explotación racional del agua subterránea con fines agrícolas.

1.7.2. Objetivos específicos

- Determinar la configuración del acuífero del sector Pampa Molina (geometría, litología y límites) mediante ensayos de sondajes eléctricos verticales, en correlación con la geología del subsuelo y litología de pozos existentes.
- Definir los parámetros hidráulicos del acuífero: transmisividad (T), permeabilidad (K) y coeficiente de almacenamiento (S), mediante la interpretación de pruebas de bombeo existentes, en las que ha participado la tesista.
- Determinar la calidad del agua subterránea que presenta el sector Pampa Molina, en base a análisis fisico químicos y de acuerdo a los Estándares de Calidad de Agua (ECA) para riego y uso poblacional de las normativas peruanas vigentes.
- Identificar el origen de las aguas subterráneas y las fuentes de recarga al acuífero del sector Pampa Molina.
- Establecer cuánto es la disponibilidad hídrica subterránea del sector Pampa Molina.

1.8. Hipótesis

1.8.1. Hipótesis general

La evaluación hidrogeológica integral (mapeo geológico-geomorfológico, inventario de fuentes de agua, logueo de pozos existentes, ensayos de bombeo y análisis físico-químico) permite determinar las características y condiciones hidrogeológicas del acuífero del sector Pampa Molina – parte baja del valle Sama, que definen su comportamiento y funcionamiento ante el bombeo de pozos principalmente informales y de esta manera, establecer lineamientos para la explotación racional del agua subterránea con fines agrícolas.

1.8.2. Hipótesis especificas

- El acuífero del sector Pampa Molina es un acuífero libre de espesores variables, constituido litológicamente por materiales de origen fluvio-aluvial del Cuaternario reciente, teniendo como límite en su base a rocas impermeables del Jurásico (Formación Chocolate).
- El acuífero presenta regulares condiciones hidrogeológicas con valores de parámetros hidráulicos: Transmisividad (T) entre 100 a 500 m^2/día y Permeabilidad (K) entre 1 a 10 m/día.
- La calidad de agua subterránea que presenta el sector Pampa Molina es apta para el riego de cultivos tolerantes a las sales.
- Las aguas subterráneas del sector Pampa Molina tienen su origen en la infiltración del agua de lluvia en las partes altas de la cuenca Sama, que se movilizan a través del propio río Sama. Las fuentes de recarga

al acuífero local están dadas por las aguas que se infiltran a través del lecho del rio Sama e infiltración de los excedentes de agua utilizados en el riego de cultivos de ambas márgenes del cauce del rio.

- En el sector Pampa Molina existe una disponibilidad hídrica subterránea de 5 MMC aproximadamente que puede ser aprovechada de manera adecuada para el riego de cultivos.

1.9. Variables e indicadores

1.9.1. Variables independientes

Evaluación hidrogeológica del acuífero del sector Pampa Molina – parte baja del valle Sama.

a) Indicadores

- Litología, espesor saturado y límites laterales del acuífero
- Parámetros hidráulicos: Transmisividad (T), Permeabilidad (K) y Coeficiente de almacenamiento (S)
- Parámetros físicos-químicos de las aguas subterráneas
- Profundidad del nivel freático
- Dirección de flujo del agua subterránea
- Fuentes de recarga
- Extracción de pozos

1.9.2. Variables dependientes

Explotación de aguas subterráneas

b) Indicadores

- Caudal y volumen de explotación de pozos
- Reservas almacenadas
- Conductividad, pH, RAS (relación de adsorción de sodio)
- Clasificación del agua
- Balance hídrico

1.9.3. Operacionalización de variables e indicadores

Las variables independientes y dependientes son analizadas cualitativamente como cuantitativamente mediante la interpretación de ensayos de campo y laboratorio, que permiten lograr el objetivo de esta investigación y determinar la influencia de los distintos factores estudiados.

En la tabla 11 se exponen las variables e indicadores del proyecto y en la sección de ANEXOS se adjunta la matriz de operacionalización de las variables, con una descripción más detallada.

Tabla 11

Variables e indicadores del proyecto

	Variables	Dimensiones	Indicadores
Variable Independiente	Evaluación hidrogeológica del acuífero del sector Pampa Molina – parte baja del valle Sama	Configuración del acuífero	- Litología - Espesor saturado - Límites
		Propiedades hidráulicas	- Transmisividad (T) - Permeabilidad (K) - Coeficiente de almacenamiento (S)
		Calidad del agua subterránea	- Parámetros físico-químicos de las aguas
		Dinámica del agua subterránea	- Profundidad del nivel freático - Dirección de flujo del agua subterránea
		Recarga y descarga al acuífero	- Fuentes de recarga - Extracción de pozos
Variable Dependiente	Explotación de aguas subterráneas	Disponibilidad hídrica subterránea	- Caudal y volumen de explotación de pozos - Reservas almacenadas
		Aptitud del agua para riego	- Conductividad, pH, RAS - Clasificación del agua
		Sostenibilidad de la explotación	- Balance hídrico

Nota. Elaboración propia

1.10. Justificación de la investigación

En la actualidad, los agricultores del sector Pampa Molina - parte baja del valle Sama utilizan las aguas subterráneas para satisfacer la demanda de sus proyectos agrícolas; sin embargo no se cuenta con información hidrogeológica actualizada de la zona, que expliquen el comportamiento y funcionamiento del acuífero en las condiciones actuales de bombeo; por lo que es necesario elaborar una evaluación hidrogeológica para caracterizar el acuífero de este sector y establecer lineamientos técnicos para la explotación racional del agua subterránea. De esta manera se evitará problemas hidrogeológicos como lo que se acontecen en el acuífero de La Yarada.

Según Ingeoexpert (2022) mediante los estudios hidrogeológicos se consigue mejorar la gestión del agua, evitar la contaminación y sobreexplotación de acuíferos e incrementar los recursos hídricos disponibles.

La presente investigación permite ampliar el conocimiento hidrogeológico del sector Pampa Molina – parte baja del valle Sama y aportará información importante para la elaboración de futuros estudios hidrogeológicos.

También, contribuye en la solución a la problemática hídrica del sector Pampa Molina y ayuda a prevenir la contaminación y sobreexplotación del acuífero.

Desde el punto de vista social, esta investigación ayudará a los agricultores de la zona atender las demandas hídricas de sus proyectos, haciendo uso del recurso subterráneo de manera adecuada y racional.

Tiene una utilidad metodológica, porque aporta información importante para que otros profesionales profundicen el tema de investigación y las autoridades del Estado competentes con los recursos hídricos, elaboren estudios más detallados para establecer medidas de gestión sostenible de las aguas subterráneas.

1.11. Alcances y limitaciones de la investigación

La presente investigación se centra en la evaluación hidrogeológica del acuífero del sector Pampa Molina, a partir del análisis de la geología, interpretaciones geofísicas, propiedades hidráulicas y calidad de agua. Al no existir estudios recientes de la zona, siendo el último referente el “Estudio hidrogeológico del Valle de Sama” realizado por el INRENA el 2006; es que esta investigación tiene como alcance actualizar y ampliar el conocimiento hidrogeológico de la zona, cuyos resultados permitirán establecer criterios técnicos para la explotación racional de las aguas subterráneas y servirán de base para la ejecución de futuros estudios a mayor detalle del acuífero.

El estudio se limita a un sector específico del valle Sama, por lo que los resultados obtenidos no deben ser generalizados a otras áreas del valle, sin previa evaluación. Asimismo, los datos considerados en la investigación son del 2014 al 2024, por lo que algunos factores como el cambio climático y disponibilidad hídrica pueden cambiar con el tiempo. A pesar de estas restricciones, los resultados obtenidos son representativos para los objetivos del estudio.

Capítulo II: Marco teórico

2.1. Antecedentes de la investigación

Hasta el año 2022, en el valle de Sama, instituciones del estado han realizado diversos estudios relacionados con las aguas superficiales y subterráneas, que incluyen trabajos geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos y geofísicos; siendo los más importantes los siguientes:

- ANA (2022). Estudio hidrogeológico del sistema acuifero Caplina.
- ANA (2010). Evaluación de recursos hidricos cuenca de los ríos Locumba y Sama.
- INRENA (2006). Estudio hidrogeológico del valle Sama.
- INADE-PET (2004). Estudio de calidad de agua cuenca Sama. “Estudio de pre-factibilidad represamiento río Sama Yarascay”
- INRENA (2004). Estudio integral de los recursos hídricos en la cuenca del río Sama.
- PET (2001). Diagnóstico de gestión de la oferta de agua cuencas: Caplina, Sama, Locumba y Maure-Uchusuma.
- INADE (2001). Evaluación hidrológica cuenca río Sama.
- CORDETACNA (1985). Instalación de agua potable Vila – Vila. Estudio complementario de pre-factibilidad.
- CORDETACNA (1984). Investigación geofisica por SEV para determinar intrusión marina en La Yarada antigua y áreas favorables para explotación aguas subterráneas curso inferior valle de Sama.

- CORDETACNA (1983). Estudio geofísico por SEV para la prospección de aguas subterráneas en el valle de Sama – Tacna.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (1978). Evaluación de los problemas de salinidad y drenaje. Valles de Tacna (Caplina), Sama, Locumba, Osmore, Tambo, Siguas y Vitor.

Localmente, no existen estudios hidrogeológicos a detalle ejecutados en el sector de Pampa Molina; solo un estudio integral del valle Sama, pero que desde el año 2006 no ha sido actualizado. Para la presente tesis se ha revisado algunos informes realizados por instituciones del estado y adicionalmente consultado algunos trabajos de privados ejecutados en otras zonas del Valle Sama, relacionados con el tema de investigación; los cuales se exponen a continuación:

- ANA (2022) en el “ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL SISTEMA ACUÍFERO CAPLINA”, incluyó dentro de su investigación a la cuenca Sama ejecutándose la actualización del inventario de fuentes de agua, evaluación hidroquímica, hidrogeoquímica e isotópica. Se registró 106 fuentes de agua subterránea: 07 manantiales, 04 filtraciones, 94 pozos y 01 piezómetro, de los cuales 41 pozos son utilizados principalmente con fines agrícolas, siendo el volumen de explotación anual de 96,45 MMC. En la parte media y baja de la cuenca (Zona V y VI) se analizaron 35 muestras de agua subterránea, que concluyeron que son del tipo Na-Cl y Ca-SO4. Adicionalmente, se realizó el análisis de isótopos estables de hidrógeno (Deuterio) y Oxígeno (18O) a 16 muestras, a partir de lo cual se concluyó que no existe aporte de la

cuenca Sama a la cuenca Caplina, a excepción de los manantiales FM-02 y FM-17 ubicados en la parte alta, cerca a la divisoria de agua con la cuenca Caplina.

- Yampasi (2019) en su Tesis “APLICACIÓN DEL MÉTODO DE SONDAJE ELÉCTRICO VERTICAL PARA LA UBICACIÓN DE POZOS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LOS CENTROS POBLADOS DE BUENA VISTA Y MIRAFLORES EN EL DISTRITO DE SAMA, PROVINCIA Y REGIÓN DE TACNA” realizó 21 SEVs utilizando el arreglo simétrico Schlumberguer. Los valores de resistividad obtenidos estarían relacionados a materiales de regular a buena permeabilidad de gravilla, arena, limo, arcilla y flujos de barro del Cuaternario reciente y probablemente de la Formación Moquegua inferior. Se determinó zonas favorables a la explotación de aguas subterráneas relacionadas con los SEVs 02, 05, 15, 16 y 19. Para ser utilizada con fines poblacionales deberá ser previamente tratada y para fines agrícolas, se podrá utilizar solo en cultivos tolerantes a las sales.
- Quispe, Malpartida & Franco (2019) en su Artículo “EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO DE LA POBLACIÓN DEL DISTRITO DE SAMA Y ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO”, estudiaron la calidad de agua que consume la población de los anexos de Buena Vista y Miraflores del distrito de Sama Las Yaras. El trabajo muestra los problemas de salud que causa el arsénico en la población, la dosificación promedio

teórica que ingiere una persona, la utilización de aluminio reciclado para obtener sulfato de aluminio como coagulante y precipitador del arsénico y la remoción obtenida por este componente. También proponen un plan de acción para mejorar la calidad de agua que consume la población de Sama.

- Dueñas & Moreno (2018) en su artículo "EVALUACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y DE CALIDAD DE AGUAS DE LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RIO SAMA-TACNA, PARA IDENTIFICAR FUENTES DE CONSUMO HUMANO", presenta los resultados de la caracterización hdrogeológica e hidrogeoquímica realizada en el ámbito de las subcuencas Alto Sama y Salado, que permitieron identificar 11 manantiales con condiciones aptas para consumo humano, de los cuales 05 son considerados como prioridad 1: Umajalsu 2, Yaretapampa 2, Chulluncayani 2, Yaretapampa 1 y Caparaja 3. Asi mismo, para recargar el acuífero potencial Barroso y aumentar la disponibilidad hidrica de esta unidad hidrogeológica, se propuso realizar zanjas de infiltración y amunas en la zona de estudio.
- Chambilla (2014) en su Tesis "HIDROGEOLOGÍA DEL ACUÍFERO LAYAGACHE-SAMA INTERRUMPIDA POR LA EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL MIO-PLIOCENO", identificó y caracterizó los elementos geoestructurales e hidrogeológicos del acuífero del sector Pampa Layagache, determinando que es del tipo confinado con espesor de 40m, a una profundidad promedio de 200m; está

compuesto por materiales permeables saturados con agua de buena calidad, emplazados en los conglomerados denominados Los Molles. La reserva total del acuífero es de 290,29 MMC, que puede ser aprovechada para consumo humano de los centros poblados de Sama Las Yaras e Inclán. El caudal máximo de explotación recomendado es de 3 a 5 l/s.

- Franco et al. (2012) en su artículo “ACTIVIDAD HIDROGEOLÓGICA DEL SUR DEL PERÚ, UNA EVALUACIÓN SITUACIONAL DE LAS CUENCAS DE SAMA Y LOCUMBA”, realizaron el análisis físico-químico de 09 muestras de agua de la cuenca Sama y 07 de la cuenca Locumba, con la finalidad de tener un acercamiento a la problemática de la contaminación hidrogeológica de estas cuencas; llegando a la conclusión de que la actividad hidrotermal en la cordillera de los Andes es la responsable de que ambas cuencas presenten altas concentraciones de arsénico y boro. Dependiendo de la estación del año, la concentración de contaminantes varía, es así que durante las épocas de lluvia, disminuye. Ciertos elementos contaminantes, como el arsénico, son controlados por la propia naturaleza a través de procesos como la floculación con hierro natural o la dilución con fuentes de agua de alta calidad, por ejemplo se ha producido una mejora del 50% en la calidad del agua en la cuenca Sama.
- INRENA (2006) en su trabajo “ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL VALLE SAMA”, realizó la evaluación del estado de los recursos

hídricos almacenados en el acuífero del valle Sama, concluyendo que es de origen aluvial y de edad cuaternaria. Además, las aguas podrán ser utilizadas en el riego de cultivos tolerantes a las sales; para uso poblacional, deben ser tratadas (clorificación) antes de ser consumidas, porque mayormente son de calidad mediocre a mala. La reserva total de agua almacenada en el acuífero es de 68,16 MMC, existiendo la posiibilidad de perforar adicionalmente 10 pozos, de 40m a 65m de profundidad. También, se propuso redes de control piezométrica e hidrogeoquímica, de 25 pozos cada una, con las cuales se realizaría el seguimiento cuantitativo y cualitativo del acuífero.

- INADE & PET (2004) en el “ESTUDIO DE CALIDAD DE AGUA CUENCA SAMA. ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD REPRESAMIENTO RIO SAMA YARASCAY” realizaron el monitoreo del río Sama y afluentes principales, medición de calidad in situ y análisis físico – químicos completos en laboratorio; determinando que la contaminación del río Sama se debe a las descargas de las fuentes hidrotermales presentes en la cuenca, con elevadas concentraciones de boro, arsénico y hierro. Según la simulación efectuada, las aguas del río Sama con proyecto están enmarcadas dentro de los límites máximos permisibles para riego de vegetales y bebida de animales; siendo indispensable la construcción de una presa para mejorar la calidad del recurso hídrico y la ampliación de la frontera agrícola.

- CORDETACNA (1985) en el estudio “INSTALACIÓN DE AGUA POTABLE VILA VILA”, investigaron dos posibles alternativas para la captación de agua potable: sector curso inferior del valle Sama desde la línea del mar hasta el cerro Moreno y el sector de La Yarada antigua, para lo cual se ejecutaron 31 SEVs y 48 SEVs más algunos SEVs paramétricos en los pozos de producción respectivamente y, adicionalmente se realizó el análisis físico químico de 18 muestras de agua (06 de Sama y 12 de La Yarada) para determinar su calidad; concluyendo que La Yarada antigua es la que presentaría mejores condiciones para la explotación subterránea, en cuanto a cantidad, calidad y oportunidad del recurso hídrico, descartándose preliminarmente la ubicación del sector del curso inferior del valle de Sama, al presentar un alto grado de salinidad, pero que debe ser tomado en cuenta para fines agropecuarios.
- CORDETACNA (1984) en el informe “INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA POR SEV PARA DETERMINAR INTRUSIÓN MARINA EN LA YARADA ANTIGUA Y ÁREAS FAVORABLES PARA EXPLOTACIÓN AGUAS SUBTERRÁNEAS CURSO INFERIOR VALLE DE SAMA”, presenta los resultados obtenidos de la exploración realizada a lo largo de 15 km., desde la línea de mar hacia la quebrada Las Brujas; concluyendo que las aguas cerca de las quebradas son de mejor calidad y las aguas del valle tienen determinado grado de salinidad. Se identificaron como zonas favorables las que coinciden con los abanicos

de las quebradas afluyentes al valle, aguas arriba de La Vituña, donde recomienda programar pozos de 60 m de profundidad máxima.

- CORDETACNA (1983) en el “ESTUDIO GEOFÍSICO POR S.E.V. PARA LA PROSPECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL VALLE DE SAMA - TACNA”, investigó el subsuelo del área comprendida desde la caida de Berlín hasta Buena Vista, mediante la ejecución de 30 sondajes eléctricos verticales y 03 sondajes parámetricos en los tres pozos tubulares ubicados en el valle bajo; logrando determinar la litología del reservorio acuífero e identificar que toda la zona investigada presenta condiciones geofísicas favorables para la perforación de pozos, recomendándose solo cinco zonas de mayor interés para realizar las perforaciones que contempla el plan de emergencia en Sama.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Aguas subterráneas

De acuerdo a la definición dada por Ordoñez (2011), las aguas subterráneas son aquellas que existen bajo la superficie terrestre y que puede ser recolectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje o la que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales. Desempeña un papel importante en la naturaleza, contribuyendo al flujo de ríos, manantiales, lagos, marismas y estuarios y es un solvente activo, sirviendo

como medio en el transporte de contaminantes o en el control de la intrusión de agua salina, siendo crucial para los procesos geológicos (Younger, 2007).

Desde la antigüedad se han aprovechado las aguas de subsuelo para abastecer a las poblaciones y en el riego de cultivos. En los últimos años el aumento del uso de las aguas subterráneas principalmente para el riego ha sido notorio, especialmente en las regiones áridas y semiáridas. En algunos casos la explotación intensa de los acuíferos ha producido descensos importantes de los niveles de agua, descensos de los caudales de ríos y manantiales, ha afectado a humedales y ecosistemas o ha producido degradación de la calidad del agua o intrusión marina en acuíferos costeros (Sahuquillo, 2009).

La explotación de las aguas subterráneas puede conducir casi siempre a un aumento de los recursos hidráulicos disponibles en un cuenca, pero a su vez, puede afectar sensiblemente al caudal del río y perjudicar, sino se tiene una organización legal y administrativa que permita realizar una explotación planificada y controlada (Custodio & Llamas, 1983, p. 277).

El valle de Sama, debido a su ubicación en una zona árida, carece del recurso de agua superficial necesario para satisfacer las demandas hídricas; su disponibilidad está sujeta a la recarga del río Sama en épocas de lluvias en su cuenca húmeda. En esta situación, es que desde hace varios años se han venido explotando las aguas subterráneas, con fines domésticos y/o agrícolas.

Actualmente, en el sector Pampa Molina las aguas subterráneas desempeñan un rol importante en la agricultura, debido al incremento de las áreas

de cultivo en los últimos años, que ha ocasionado el aumento de la extracción de este recurso a través de pozos artesanales, por lo general informales; evidenciando la necesidad de implementar políticas para su uso racional y de esta manera asegurar su disponibilidad a largo plazo.

2.2.2. Acuífero

2.2.2.1. Definición de acuífero

Según Custodio y Llamas (1983) se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica, que permitiendo la circulación de agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades. Por su parte Valdivieso (s.f.) lo describe como una estructura geológica compuesta por una o más capas de rocas, con capacidad de retener y liberar agua. Posee una determinada permeabilidad y porosidad, que definen sus propiedades hidráulicas, es decir, el tipo de roca del suelo determina el movimiento del agua.

2.2.2.2. Clasificación de acuíferos

a) Clasificación desde el punto de vista hidrogeológico

- **Acuíferos,** son rocas que almacenan y trasmiten agua en cantidades significativas (Martínez et al., 2006). Ejemplos: arenas, gravas. También granito u otra roca con fracturación importante (Sánchez, s.f.).
- **Acuitardos,** rocas que almacenan agua y la transmiten lentamente (Martínez et al., 2006). Ejemplos: arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con alteración y/o fracturación moderada (Sánchez, s.f.).

- **Acuicludos,** rocas con una capacidad de almacenamiento apreciable pero con capacidad de transmisión nula (Martínez et al., 2006). Ejemplos: limos, arcillas (Sánchez, s.f.).
- **Acuifugos,** rocas que ni almacenan ni transmiten agua (Martínez et al., 2006). Ejemplo: granito o esquisto inalterados y no facturados (Sánchez, s.f.).

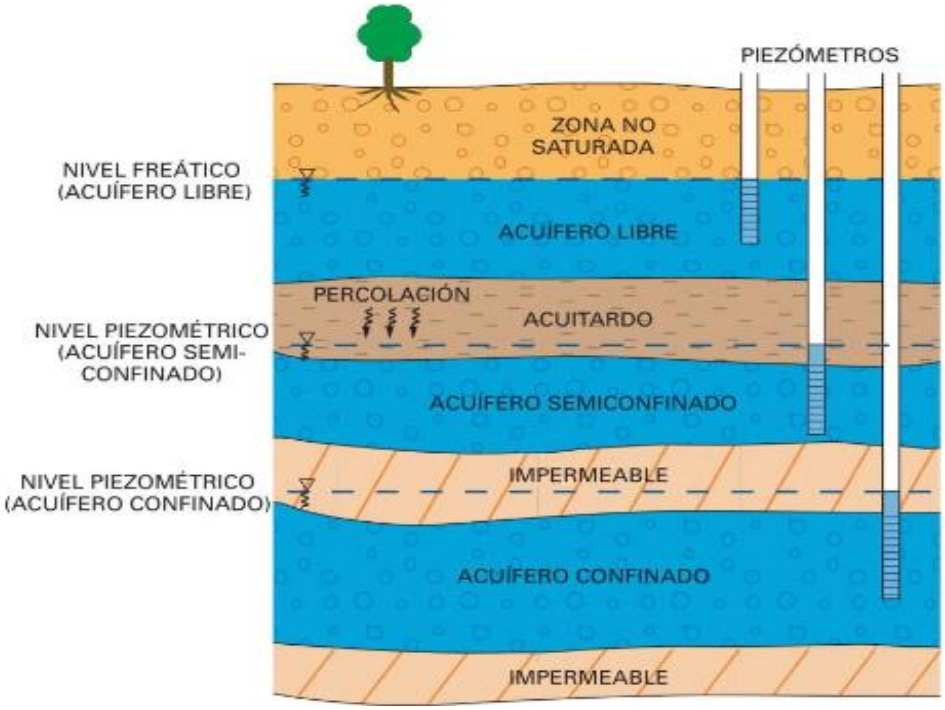
b) Clasificación según la presión del agua contenida

- **Acuífero libre,** se caracterizan por tener una superficie libre de agua en contacto directo con el aire, es decir, que está a presión atmosférica. El nivel del agua en los pozos de estos acuíferos coincide con el límite superior de la zona saturada (Garcia & Fernández, 2008).
- **Acuífero confinado o cautivo,** son acuíferos en los que el agua se encuentra a una presión mayor que la atmosférica. El agua en estos acuíferos rellena todos los poros de la formación geológica. Para su identificación en campo, cuando se perfora un pozo, el nivel del agua asciende por encima del techo del acuífero. Es decir, el nivel piezométrico se encuentra siempre por encima del techo de la formación geológica que almacena el agua (Garcia & Fernández, 2008)
- **Acuífero semiconfinado,** se caracteriza por el agua que se encuentra a una presión superior a la atmosférica, y el nivel piezométrico también se sitúa por encima del techo del acuífero (Garcia & Fernández, 2008). Se pueden considerar un caso particular de los acuíferos cautivos, en

los que el muro, techo o ambos no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua (Ordoñez, 2011).

Figura 11

Tipos de acuífero de acuerdo con la presión atmosférica



Nota. Tomado de Martínez et al. (2006)

De acuerdo al INRENA (2006), el acuífero del valle Sama es del tipo libre, constituido por depósitos aluviales y fluviales. Por su parte CORDETACNA (1985) indica que el acuífero del curso inferior del valle Sama, está constituido por materiales permeables de grava, gravilla, arenas con lentes de limo y arcillas, los que han sido acarreados y depositados en el curso del río Sama.

2.2.2.3. Parámetros hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos permiten conocer y cuantificar cómo es el movimiento del agua en un acuífero, de acuerdo a la ecuación general del flujo de aguas subterráneas. Los más útiles y empleados, son: porosidad, permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento (Garcia & Fernández, 2008). Estos parámetros permiten definir el funcionamiento o respuesta del acuífero a determinadas acciones exteriores (Custodio & Llamas, 1983).

Según Custodio & Cabrera (2013) para obtener los parámetros hidráulicos de los acuíferos se puede recurrir a ensayos en muestras, análisis de oscilaciones piezométricas, etc.; pero lo más común es recurrir a ensayos en perforaciones y en especial a ensayos de bombeo.

a) Porosidad

Custodio & Llamas (1983) indica que la porosidad de un material es la relación entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y su volumen total. Si se considera un volumen de una muestra de roca o suelo se distingue: volumen de la parte sólida (V_s), volumen de huecos (V_v) y volumen total ($Vt = V_v + V_s$). En este supuesto la porosidad sería:

$$\mathrm{m} = \frac{V_v}{V_t}$$

La porosidad eficaz (m_e) es el volumen de agua contenido en un roca, liberada por la acción de la gravedad (Ve), es decir:

$$\mathrm{m} = \frac{V_e}{V_t}\ x\ 100$$

Representa una porción pequeña de la porosidad total y es importante porque las reservas de un acuífero están condicionadas por esta porosidad.

b) Permeabilidad o conductividad hidráulica

Según Villanueva & Iglesias (1984) la permeabilidad se define como el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero, bajo la influencia de un gradiente hidráulico unitario, a temperatura de campo. Se suele expresar en m/día.

Tabla 12

Valores de permeabilidad

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

Nota. Tomado de Villanueva & Iglesias (1984)

Tabla 13

Clasificación de algunos materiales sedimentarios según su permeabilidad

K (m/día)	10^4	10^3	10^2	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
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		Impermeable		

Nota. Tomado de Custodio & Llamas (1983)

Tabla 14

Valores estimados de la permeabilidad por varios autores (m/dia)

		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25-2500	100-10^{5}	100-10^{6}	10-1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1-500	0,01-1000	1-1000	1-100	1-100
	Arena media	0,1-50	0,01-1000	1-1000	1-100	
	Arena fina	0,02-20	0,01-1000	1-1000	0,01-1	0,01-1
	Arena arcillosa				0,001-0,1	0,01-1
	Silt, loess	10^{-4}-2	10^{-4}-1	10^{-4}-1	0,001-0,1	10^{-4}-1
	Arcilla	10^{-6}-4x10^{-4}	10^{-7}-10^{-3}		10^{-6}-4x10^{-3}	10^{-6}-10^{-3}
	Arcilla marina inalt.	10^{-7}-2x10^{-4}		10^{-11}-10^{-7}		
Rocas sedimentarias	Calizas carstificadas	0,1-2000	0,05-0,5	0,1-1000		0,1-10^{-7}
	Calizas, dolomías	10^{-4}-0,5	0,001-0,5	10^{-4}-1		10^{-4}-1
	Areniscas	3x10^{-5}-0,5	10^{-5}-1	10^{-5}-1		
	Argilitas (siltstone)	10^{-6}-0,001				
	Pizarra sedimentaria (shale) intactas	10^{-8}-2x10^{-4}	10^{-8}-10^{-4}	10^{-4}-10^{-8}		10^{-4}-10^{-8}
	Pizarras sed.(shale) fracturadas/alteradas		10^{-4}-1			
Rocas cristalinas	Basalto sin fracturar		10^{-6}-10^{-3}			10^{-6}-10^{-3}
	Basalto fracturado/ vesicular cuaternario		10-1000			0,1-10^{6}
	Escorias basálticas		0,001-1000			
	Basalto permeable	0,03-2000		0,02-1000		
	Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	10^{-9}-10^{-5}	10^{-9}-10^{-5}	10^{-9}-10^{-5}		10^{-9}-10^{-5}
	Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	0,001-25	10^{-5}-1	0,0005-20		10^{-5}-1
	Granito alterado	0,3-5				
	Gabro alterado	0,05-0,3				

Nota. Tomado de INGEMMET (2021)

c) Transmisividad

Villanueva & Iglesias (1984) define a la transmisividad como el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Es representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua. Se obtiene de ensayos de bombeo en pozos y lo más común es que se mida en m^2/día, m^2/hora o en m^2/segundo.

Tabla 15

Valores de transmisividad

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

Nota. Tomado de Villanueva & Iglesias (1984)

Tabla 16

Clasificación de terrenos por la transmisividad

T (m^2/día)		1	10	10^2	10^3
Calificación	Impermeable	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Clasificación del acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de materiales	Arcilla compacta Pizarra Granito	Limo arenoso Limo Arcilla limosa	Arena fina Arena limosa Caliza poco fracturada. Basaltos	Arena limpia Grava, arena Arena fina Caliza fracturada	Grava limpia Dolomías, calizas muy fracturadas

Nota. Tomado de Custodio & Llamas (1983)

La permeabilidad y transmisividad se relacionan por la expresión:

$T = K * e$

Donde: e = es el espesor del acuífero considerado (en metros).

K = permeabilidad (m/día).

La permeabilidad es una medida muy característica de la textura del acuífero; pero no representa como la transmisividad las posibilidades de ceder agua. Un acuífero muy permeable, pero de poco espesor, puede ser poco transmisivo y como consecuencia, los pozos que en el mismo se construyan, no serán tan caudalosos (Villanueva & Iglesias, 1984).

d) Coeficiente de almacenamiento

Según Custodio & Llamas (1983) el coeficiente de almacenamiento (S) se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad, y altura igual a la del acuífero saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o de la carga hidráulica.

En acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento coincide con la porosidad eficaz y se puede representar en porcentaje (Garcia & Fernández, 2008). Los valores de coeficiente de almacenamiento varía de 0,05 a 0,30 en condiciones libres y de 10^{-3} a 10^{-5} en condiciones artesianas (Custodio & Llamas, 1983).

Tabla 17

Valores de coeficiente de almacenamiento (S)

Tipos de material permeable	Forma del funcionamiento del acuífero	Valores de S
Kárstico:		
Caliza y dolomías jurásica	Libre	2×10^{-2}
	Semiconfinado	5×10^{-4}
	Confinado	5×10^{-5}
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2} – 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} – 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} – 5 \times 10^{-5}$
Poroso intergranular:		
Gravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2} – 15 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
Kársticos y porosos:		
Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2} – 18 \times 10^{-2}$

Nota. Tomado de Villanueva & Iglesias (1984)

2.2.2.4. Recarga y descarga natural de acuíferos

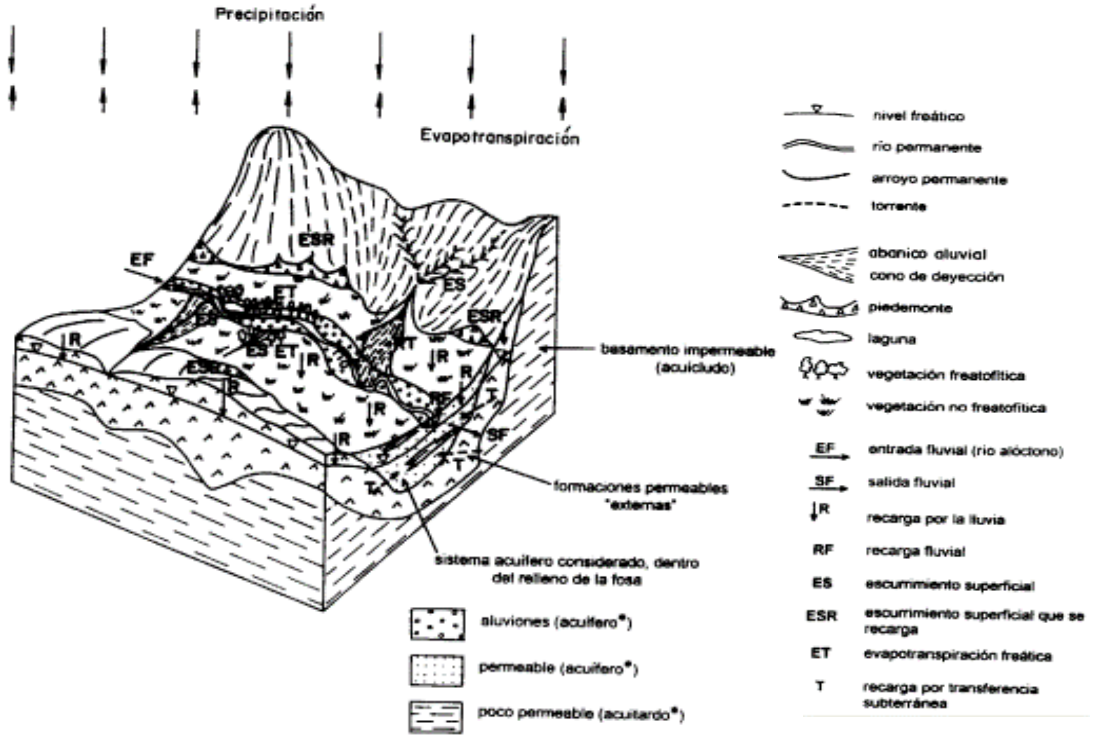
a) Recarga natural

Según Custodio & Llamas (1983), es la cantidad de agua que se filtra en un embalse subterráneo como resultado de las precipitaciones e infiltración de un curso de agua. La recarga proviene de diversas fuentes; de acuerdo a Custodio (1998) tenemos la infiltración de la lluvia (que suele ser la más importante), las

aguas superficiales (en climas poco lluviosos) y/o la transferencia de agua desde otro acuífero o acuitardo (Ver figura 12).

Figura 12

Elementos que intervienen en la recarga de un acuífero



Nota. Tomado de Custodio (1998)

La ANA (2009) distingue dos tipos de recarga natural:

- Recarga directa (local o difusa), definida como el agua que se une a la reserva de agua de subsuelo mediante la filtración vertical directa de la precipitación a través de la zona no saturada a partir de los excesos de humedad del suelo y la evapotranspiración.

- Recarga indirecta (localizada o preferencial), es el resultado de la escorrentía superficial y la escorrentía de depresiones topográficas como lagunas y zonas estancadas que se filtran en el nivel freático.

Pero otros autores clasifican a la recarga en:

- Recarga vertical, como resultado de la infiltración de la lluvia y por retorno de riego agrícola (recarga artificial).
- Recarga horizontal, debida a entradas subterráneas de otros acuíferos.

Con respecto al acuífero del valle Sama, la principal fuente de recarga son las aguas que se infiltran en la parte alta de la cuenca (zona húmeda), así como también las que se infiltran a través del lecho del río, de los canales de riego no revestidos y de las áreas de cultivo bajo riego (INRENA, 2006).

b) Descarga natural

Es definida como la cantidad de agua que sale de un depósito subterráneo a través de manantiales terrestres, subfluviales o submarinos, así como, por evapotranspiración en un periodo de tiempo, si la zona saturada queda próxima a la superficie en áreas significativas. Es equivalente a la escorrentía subterránea cuando los manantiales submarinos o subfluviales y la descarga por evapotranspiración son inexistentes o muy pequeños (Custodio & Llamas, 1983).

La descarga en el valle Sama está representada por la explotación del recurso hídrico subterráneo, que al año 2005 fue de 52005,40 m^3 (0.05 hm^3) a través de pozos y cochas, en su totalidad, del distrito de Sama Las Yaras (INRENA, 2006).

2.2.3. Evaluación hidrogeológica

Una evaluación hidrogeológica es un conjunto de estudios y análisis destinados a estimar la capacidad de los acuíferos para proporcionar recursos hídricos subterráneos en cantidad y calidad suficientes, bajo criterios de sostenibilidad, considerando las características hidrogeológicas del medio y las necesidades de uso (Custodio & Llamas, 1983).

De acuerdo a Custodio & Cabrera (2013) estos estudios se realizan con la finalidad de:

- Establecer el modelo conceptual de funcionamiento de los sistemas acuíferos para entender su funcionamiento.
- Cuantificar el flujo y el transporte del agua subterránea por los sistemas acuíferos.
- Establecer las relaciones con otras partes del ciclo hidrológico: aguas superficiales, mar, otros acuíferos y la biósfera, y también con los procesos geodinámicos internos y externos en los que intervienen las aguas subterráneas, incluyendo la génesis de minerales.
- Utilizar el agua subterránea como un recurso clave.
- Establecer su valor económico y social.
- Proporcionar métodos y parámetros que permitan evaluar y cuantificar los efectos de las actividades del hombre (efectos antrópicos) sobre los sistemas acuíferos y sobre los otros sistemas con los que están en relación.

En los estudios hidrogeológicos, se define el rendimiento, calidad y caudal óptimo para la captación de agua o las condiciones, limitaciones y concentraciones máximas de posibles vertidos que puedan dañar las cuencas subterráneas. También, se determinan las direcciones de flujo subterráneo para asegurar la sustentabilidad del acuífero, tanto en rendimiento como en calidad (Ingeoexpert, 2022).

En el valle de Sama se presentan problemas de disponibilidad del recurso hídrico y en la calidad de las aguas subterráneas. Ante esta situación la Administración Técnica de Distrito de Riego Sama, bajo el asesoramiento de la Intendencia de Recursos Hídricos del INRENA en el 2006 ha ejecutado el "ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL VALLE SAMA" enfocándose principalmente en la prospección geofísica, logrando investigar 41,536.5 has, cuyos resultados permitieron ampliar el conocimiento hidrogeológico del valle de Sama y las pampas aledañas.

2.2.3.1. Prospección geofísica

Debido a que un estudio hidrogeológico con evidencias geológicas superficiales no basta, para una mejor comprensión de las propiedades acuíferas, es necesario la ejecución de una investigación geofísica, orientada a localizar y/o proporcionar información de las áreas más favorables para la captación de las aguas subterráneas (CORDETACNA, 1985).

Los métodos geofísicos tienen la finalidad de identificar diferencia en las características físicas específica de un terreno y del agua, tanto en profundidad como en superficie, tales son las propiedades eléctricas (resistividad/conductividad) y sónicas, naturales e inducidas, así como, las propiedades gravimétricas y magnéticas naturales (Custodio & Cabrera, 2013).

De acuerdo a Kearey et al. (2002), los sondeos eléctricos verticales (SEV) son uno de los métodos geofísicos más conocidos y utilizados en la exploración de agua subterránea, principalmente en el estudio de interfaces horizontales o casi horizontales.

2.2.3.1.1. Método de resistividad

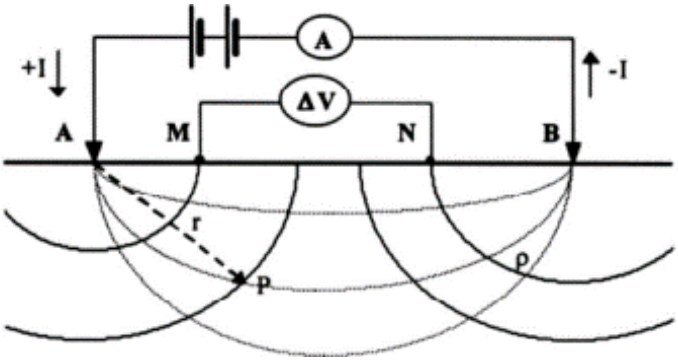
Los principios en la prospección geoeléctrica son aplicados a la hidrología desde hace varios años atrás para definir la geometría y características de un reservorio subterráneo (CORDETACNA, 1985).

La Sociedad Estadounidense para pruebas y materiales (American Society for Testing and Materials – ASTM INTERNATIONAL), en la guía Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Site Characterization (ASTM D6431-18), indica que el método de resistividad en corriente continua se utiliza para cartografiar características geológicas como litología, estructura, fracturas y estratigrafía; características hidrogeológicas como la profundidad al nivel del agua, la profundidad al acuitardo, la salinidad del agua subterránea y para delinear los contaminantes del agua subterránea.

La medición de la resistividad eléctrica requiere que cuatro electrodos se coloquen en contacto con los materiales de la superficie (figura 13). La geometría y la separación del arreglo de electrodos se seleccionan acorde al estudio y a la profundidad requerida de la caracterización del sitio. En un estudio de resistividad eléctrica, una corriente continua o alterna de muy baja frecuencia se pasa al suelo por un par de electrodos de corriente A y B y la caída de potencial se mide con un par de electrodos de potencial M y N, como se muestra en la figura 13. La resistencia se deriva entonces como la relación entre el voltaje medido entre los electrodos de potencial y la corriente aplicada medida. La resistividad aparente de los materiales del subsuelo se deriva como la resistencia multiplicada por un factor geométrico que está determinado por la geometría y el espaciamiento de la matriz de electrodos (ASTM D6431, 2018).

Figura 13

Disposición de electrodos de corriente (A, B) y de electrodos de potencial (M, N)



Nota. Se muestra la inyección de corriente I entre los electrodos AB y se mide el potencial ΔV entre el par de MN. Tomado de Orellana (1982)

La medida de resistividad aparente calculada representa una resistividad promedio global del volumen de tierra determinada por la geometría de la matriz y la resistividad del material del subsuelo. Esta resistividad aparente es diferente de la resistividad verdadera a menos que los materiales del subsuelo sean eléctricamente uniformes. Los valores de resistividad representativos de las capas se interpretan a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos de una serie de mediciones realizadas con espaciado de electrodos variable. El aumento del espaciado de electrodos puede permitir la distinción entre capas que varían en propiedades eléctricas con la profundidad (ASTM D6431, 2018).

2.2.3.1.2. Resistividad de los suelos y rocas

Según CORDETACNA (1985) un elemento fundamental de las medidas de resistividad es el agua contenida en los poros de los suelos y de las rocas. Los horizontes están diferenciados por el contenido y la mineralización del agua.

Por su parte INRENA (2006) indica textualmente lo siguiente: “las rocas presentan resistividades eléctricas que varían en un amplio rango, dependiendo de diversos factores, como la litología, el grado de conservación, humedad y principalmente el grado de mineralización del agua contenida en los poros y fracturas. Las rocas de una misma génesis presentan valores de resistividad que varían dentro de ciertos rangos típicos, o que permite caracterizarlas. En depósitos no consolidados, la resistividad aumenta al incrementarse la granulometría predominante. En todos los casos, las rocas que contienen agua mineralizada disminuyen su resistividad”.

La tabla 18 muestra algunos valores típicos de resistividad para suelos, aguas y rocas según Mooney y la tabla 19, valores típicos de resistividad para agua y rocas.

Tabla 18

Valores de resistividades representativos para suelos, agua y rocas de Mooney

Tipo de suelo	Resistividad
Resistividad en suelo regional	**Ω-m**
Regiones húmedas	50 - 200
Regiones secas	100 - 500
Regiones áridas	200 - 1000 (algunas veces tan bajo que llega a 50 debido a la salinidad del suelo)
Tipos de agua	**Ω-m**
Agua Subterránea	1 - 100
Agua de lluvia	30 - 1000
Agua de mar	Del orden de 0.2
Hielo	105 -108
Tipos de materiales terrestres	**Ω-m**
Ígneas y metamórficas	100 - 10 000
Sedimentos consolidados	10 -100
Sedimentos inconsolidados	1 - 100

Nota. Tomado de ASTM D6431 (2018)

Tabla 19

Resistividad de aguas y rocas según Astier (1975)

Tipo de agua y roca	Resistividad (Ohm-m)
Agua de mar	0,2
Agua de acuíferos aluviales	10 - 30
Agua de manantiales	50 - 100
Arenas y gravas secas	1000 - 10000
Arenas y gravas con agua dulce	50 - 500
Arenas y gravas con agua salada	0,5 - 5
Arcillas	2 - 20
Margas	20 -100
Calizas	300 - 10000
Areniscas arcillosas	50 - 300
Areniscas cuarcíticas	300 - 10000
Cineritas, tobas volcánicas	20 - 100
Lavas	300 - 10000
Esquistos grafitosos	0,5 - 5
Esquistos arcillosos o alterados	100 - 300
Esquistos sanos	300 - 3000
Gneis, granito alterados	100 - 1000
Gneis, granito sano	1000 - 10000

Nota. Tomado de INRENA (2006)

Los materiales con una porosidad efectiva baja o que carecen de fluidos no conductores de poros, tienen una resistividad relativamente alta (> 1000Ωm), estos materiales incluyen calizas masivas, la mayoría de las rocas ígneas no fracturadas, materiales insaturados no consolidados y hielo. Los materiales que tienen alta porosidad con poros fluidos conductores o que consisten en o contienen arcillas generalmente tienen baja resistividad, estos incluyen suelo

arcilloso y roca erosionada. Los materiales cuya agua intersticial tiene baja salinidad tienen una resistividad moderadamente alta (ASTM D6431, 2018) .

2.2.3.1.3. Arreglo de electrodos

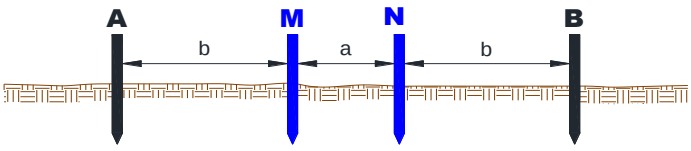
Según la ASTM D6431 (2018), los electrodos son dispuestos en una matriz colineal de geometrías fijas. Se han desarrollado varios arreglos de electrodos para diversas aplicaciones. Para ingeniería, medio ambiente y estudios de aguas subterráneas, Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo son los más utilizados.

a) Dispositivo Schlumberger

Se disponen simétricamente los electrodos AMNB dispuestos en línea, donde la distancia MN es mucho menor que la distancia de los inyectores AB. Generalmente AB > 5 MN (Yampasi, 2019).

Figura 14

Dispositivo Schlumberger



Nota. Tomado de Yampasi (2019)

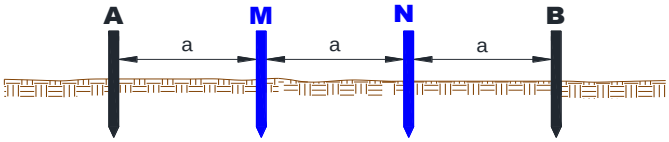
El factor geométrico del dispositivo en este caso es: $\boldsymbol{K = \pi \frac{b(b+a)}{a}}$

b) Dispositivo Wenner

Los dispositivos se sitúan equidistantes sobre una línea en el orden AMNB (Yampasi, 2019).

Figura 15

Dispositivo Wenner



Nota. Tomado de Yampasi (2019)

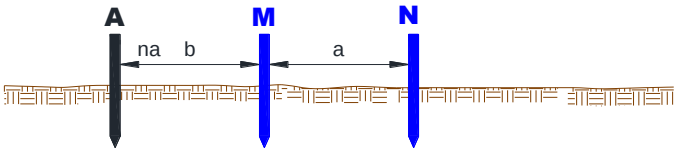
El factor geométrico del dispositivo en este caso es: $\boldsymbol{K = 2\pi a}$

c) Dispositivo Polo-Dipolo

El electrodo B se lleva a una distancia muy lejana de los otros tres (en teoria, al infinito) (Yampasi, 2019).

Figura 16

Dispositivo polo-dipolo



Nota. Tomado de Yampasi (2019)

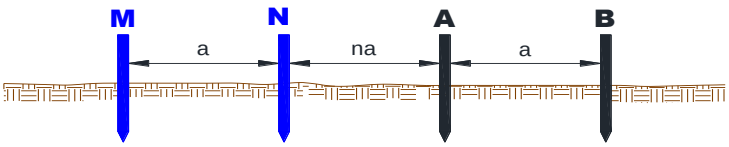
El factor geométrico del dispositivo en este caso es: $\boldsymbol{K = 2\pi n\,(n+1)a}$

d) Dispositivo Dipolo-Dipolo

Los electrodos se disponen en el orden ABMN formando un doble dipolo (Yampasi, 2019).

Figura 17

Dispositivo dipolo-dipolo



Nota. Tomado de Yampasi (2019)

El factor geométrico del dispositivo en este caso es: $\boldsymbol{K = \pi n\,(n+1)(n+2)a}$

2.2.3.1.4. Sondajes eléctricos verticales

Orellana (1972) define como sondeo eléctrico a una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción. Cuando el dispositivo empleado es simétrico o asimétrico con un electrodo en el "infinito" y durante la medición permanecen fijos el azimut del dispositivo y el centro del segmento MN, suele denominarse Sondeo Eléctrico Vertical. Por su parte Gasulla (1999) señala que la finalidad del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) es averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie. Se usa ampliamente en estudios geotécnicos para determinar el espesor y también en hidrogeología para definir zonas horizontales de estratos porosos (Kearey et al., 2002).

En el Sondaje Eléctrico Vertical (SEV) se introduce corriente continua al terreno mediante un par de electrodos llamados de corriente A y B, y se mide la diferencia de potencial producido por el campo eléctrico así formado, entre otro par de electrodos, llamados electrodos de recepción o de potencial M y N

(INRENA, 2006). De esta forma, la resistividad aparente (ρ_a) en cada medición se calcula mediante la ecuación definida por Orellana (1982):

$$\boldsymbol{\rho_a = K\frac{\Delta V}{I}}$$

Donde:

ρ_a:Resistividad aparente del medio, en Ohm-m

K: Constante geométrica que depende de la separación de los electrodos

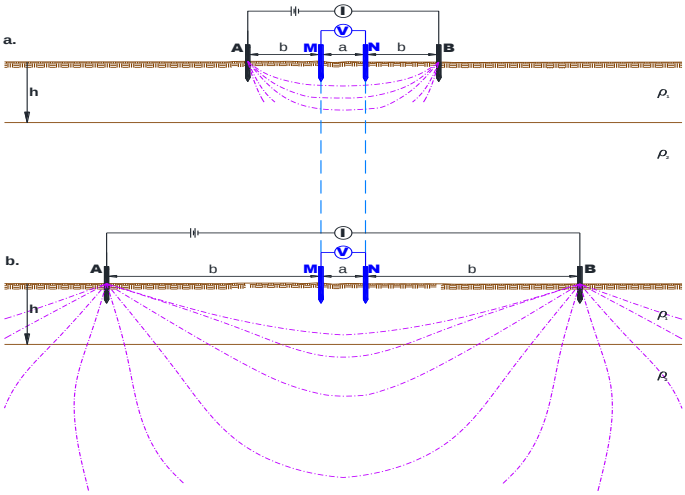
ΔV: Diferencia de potencial en mV medida en los electrodos M-N

I: Intensidad de corriente en mA medida en los electrodos A-B

A medida que los electrodos A y B se separan, la corriente va penetrando en las capas más profundas (ver Figura 18). Según Gasulla (1999) la profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectores A y B. Si la distancia entre los electrodos A y B aumenta, la corriente circula a mayor profundidad, pero su densidad disminuye (ver figura 18). Sin embargo, no es posible fijar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el SEV, ya que la densidad de corriente disminuye de modo suave y gradual, sin anularse nunca.

Figura 18

Metodología sondajes eléctricos verticales



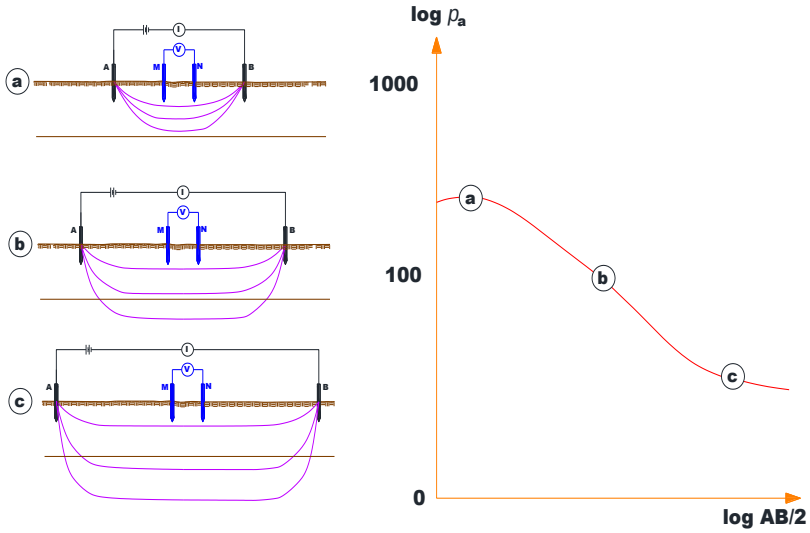
Nota. (a) A menor distancia de los electrodos A y B la profundidad es menor. (b) A mayor distancia de los electrodos A y B la profundidad es mayor. Tomado de Yampasi (2019)

Existen diferentes dispositivos de electrodos, entre ellos el más usado es el de Schlumberger, en donde los electrodos de medición o corriente M y N permanecen fijos y solamente se aumenta la distancia entre ellos cuando la señal medida es muy baja (INRENA, 2006). En este dispositivo se debe cumplir que la distancia sea mayor o igual a 5 veces el M-N. Esta operación se hace para una serie de separaciones de los electrodos de corriente. En coordenadas bilogarítmicas se dibuja las semi-distancias entre electrodos de corriente versus las resistividades aparentes, obteniéndose una curva denominada “Curva de Resistividades Aparentes-CRA” (ver figura 19). Su interpretación consiste en determinar las resistividades verdaderas de las capas y sus correspondientes

espesores; pudiéndose hacer mediante el uso de curvas teóricas o usando programas de cómputo especiales (INRENA, 2006).

Figura 19

Mediciones de resistividad aparente con aumento de distancia entre electrodos



Nota. Tomado de Kirsch & Ernstson (2006)

La correlación de SEVs contiguos, permite elaborar perfiles geoeléctricos que muestran las variaciones de las propiedades del subsuelo en forma lateral, con especificaciones de resistividades y espesores de cada capa identificada (García & Castro, 2018).

2.2.3.2. Pruebas de bombeo

Una prueba de bombeo se realiza para determinar los parámetros hidráulicos de un acuífero y consiste en bombear agua en una captación controlando simultáneamente el caudal extraído y la evolución temporal del nivel de agua en la propia captación y en otras cercanas tanto en la etapa de bombeo

como en la etapa de recuperación, posterior al bombeo. El principio de una prueba de bombeo, es que se bombea un pozo y se mide el efecto que este bombeo tiene en el nivel potenciométrico del acuífero (Coarita, 2017).

2.2.3.2.1. Tipos de ensayos

Las pruebas de bombeo pueden clasificarse en pruebas a caudal constante o a caudal variable (ver Figura 20).

Figura 20

Tipos de ensayos de bombeo

- Tipos de ensayos de bombeo
  - A caudal constante
    - Régimen permanente
    - Régimen variable
      - Prueba en bombeo
      - Prueba en recuperación
  - A caudal variable
    - Bombeo a caudal crítico
    - Bombeos escalonados

Nota. Tomado de Villanueva & Iglesias (1984)

Se denomina régimen permanente a aquel en el cual los niveles no varían con el tiempo, mientras que en el régimen variable si se produce esta variación (Villanueva & Iglesias, 1984).

2.2.3.2.2. Métodos de interpretación pruebas de bombeo

Los resultados obtenidos suelen ser analizados empleando el método de Hanttush (1964) para pozos que capten acuíferos semiconfinados, mientras que para el caso de captaciones en acuíferos confinados se emplean los métodos clásicos de Theis (1935) y Jacob (1967). En los acuíferos libres, suele asumirse

que el espesor saturado de la unidad no cambia y bajo esta condición también puede ser empleado el método de Theis y Jacob.

Tabla 20

Métodos de análisis pruebas de bombeo

Tipo acuífero	Tipo de ensayo		Método de análisis
Confinado	Régimen permanente		Fórmula de Thiem
	Régimen variable	Descenso	Fórmula de Theis Aproximación logarítmica de Jacob
		Recuperación	Fórmula recuperación de Theis
Semiconfinado	Régimen permanente		Fórmula de De Glee o de Jacob-Hantush
	Régimen variable	Descenso	Fórmula e Hantush
		Recuperación	Estudio de ascensos teóricos (1)
Libre	Régimen permanente		Fórmula de Thiem (2) corrección de Jacob Fórmula de Dupuit (3)
	Régimen variable	Descenso	Fórmula de Theis (4) Aproxim. logarítmica de Jacob (4) Corrección Dupuit (3) Fórmula de Boulton Fórmula de Neuman
		Recuperación	Fórmula recuperación de Theis (2)

Nota. (1) Si el bombeo es lo suficientemente largo como para que los niveles se estabilicen, los teóricos coinciden con los medidos. (2) Si los descensos son pequeños en comparación con el espesor del acuífero. (3) Admitiendo la aproximación de Dupuit – Forchheimer. (4) Si los descensos son pequeños en comparación con el espesor saturado del acuífero, instantáneo y proporcional al descenso producido. Tomado de Expósito (2015).

2.2.3.2.3. Interpretación pruebas de bombeo acuíferos libres

Un acuífero libre puede asimilarse a un acuífero confinado siempre y cuando la superficie libre del agua se mantenga aproximadamente horizontal, o sea que el descenso producido por el bombeo sea muy pequeño (hasta un 10%) en comparación con el espesor saturado inicial (H) del acuífero. Esto es así ya que durante los primeros momentos del bombeo siempre se está en régimen no permanente. Si esta condición se cumple, está claro que se pueden aplicar las formulaciones de Theis y Jacob que gobiernan el régimen no permanente. Si se supera ese valor de descenso respecto al espesor saturado, en las condiciones de régimen no permanente, se aplica la corrección de Jacob. En el caso de que un acuífero libre presente descensos mayores al 10% respecto al espesor saturado cuando se somete a bombeo, indica que no se puede asimilar a un acuífero confinado (Schulz & García, 2018).

La metodología utilizada para el cálculo de los parámetros hidráulicos de las pruebas de bombeo ejecutadas en la zona de estudio, será el método de Theis-Jacob.

a) Método de Jacob

Según Villanueva & Iglesias (1984) el método de Jacob es una particularización del método de Theis, cuando las circunstancias del ensayo reúnen determinadas condiciones.

La función de pozo W(u) puede desarrollarse en serie, según:

$$W\,(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \cdots$$

Jacob consideró que si la variable auxiliar u < 0.03 puede despreciarse todos los términos del desarrollo frente a los dos primeros, quedando:

$$W\,(u) = -0.5772 - \ln u$$

En rigor, a efectos prácticos, suele usarse la simplificación de Jacob, cuando la u < 0.1. La fórmula de Theis quedará reducida a:

$$d = \frac{Q}{4\pi T}\,(-0.5772 - \ln u)$$

Operando y sustituyendo u por su valor:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$d = \frac{Q}{4\pi T}\,\ln \frac{0.562 \text{ x } 4Tt}{r^2 S}$$

$$d = \frac{Q}{4\pi T}\,\ln \frac{2.25 \text{ x } Tt}{r^2 S}$$

Si se efectúa la división 1/4π y se multiplica por 2.3, para pasar del logaritmo neperiano a logaritmo decimal, se obtiene:

$$\mathrm{d} = 0.183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}}\ \lg\frac{2.25\ \mathrm{x\ Tt}}{\mathrm{r}^2\mathrm{S}}$$

Que es la expresión de Jacob, donde:

d = descenso en un punto situado a la distancia r del pozo de bombeo.

Q = caudal de bombeo constante.

T = transmisividad del acuífero.

S = coeficiente de almacenamiento del acuífero.

t = tiempo transcurrido desde que se inició el bombeo.

Por este método no se requiere ni el uso de las tablas ni el de las curvas patrón transparentes.

Para interpretar los valores tomados, se hace:

$$\frac{\mathrm{r}^2\mathrm{S\ t}}{2.25\ \mathrm{T}} = t_0$$

de esta manera, en la expresión de Jacob se obtiene:

$$\mathrm{d} = 0.183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}}\ \lg\frac{\mathrm{t}}{t_o}$$

$$\mathrm{d} = 0.183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}}\ \lg \mathrm{t}\ -\ 0.183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}}\ \lg t_0$$

Expresión en la que si se toma “d” como funcion y “lg/t” como variable, es una recta y=mx+n, donde “m” estaría expresada por:

$$m = 0.183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}}$$

Y que además, cortaría al eje de abcisas en un punto dado por:

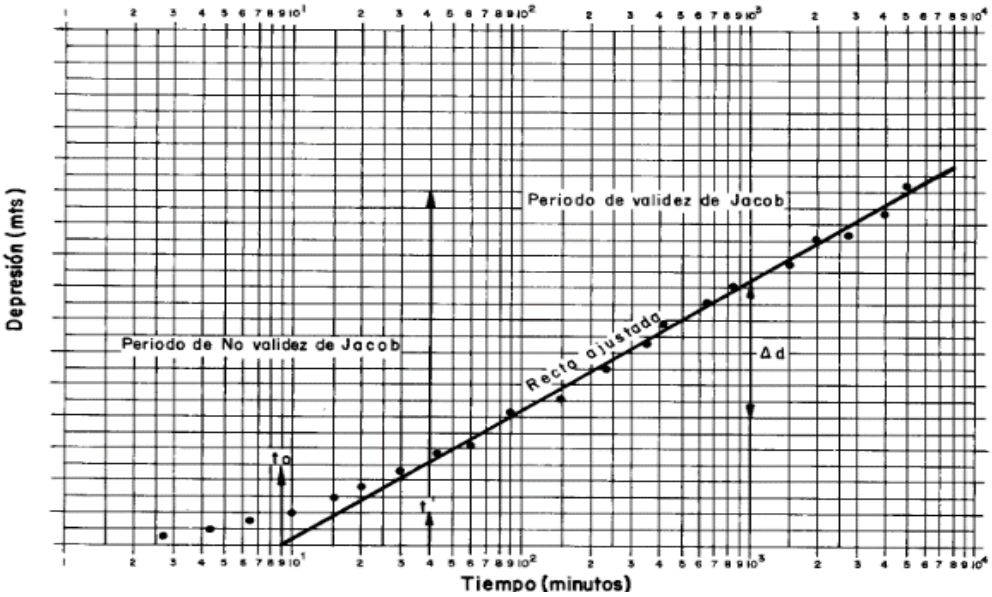
$$0 = 0.183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}}\,\lg \mathrm{t} \;-\; 0.183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}}\,\lg t_0$$

$$\mathrm{t} = t_0$$

Para introducir valores de “t” en lugar de “lg t” se hace uso de un papel semilogaritmico, representando la recta de Jacob, después debe ajustarse una recta a los puntos obtenidos, como se muestra en la figura 21.

Figura 21

Recta de Jacob, gráfico de campo



Nota. Tomado de Villanueva & Iglesias (1984)

Para hallar la transmisividad “T” a partir de esta recta, hay que calcular su pendiente, que coincide con la caída por ciclo Δs y así: $\mathrm{m} = \Delta s = 0.183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}}$ de donde:

$$\mathrm{T} = 0.183\frac{\mathrm{Q}}{\Delta s}$$

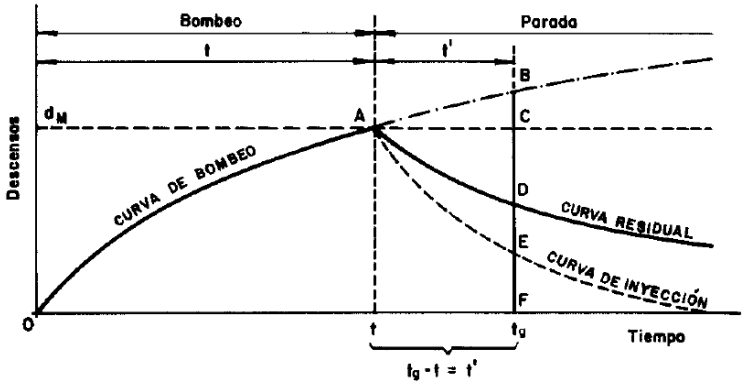
b) Método de recuperación de Theis

Los métodos de recuperación consisten en efectuar las interpretaciones del ensayo en base a los datos que se obtienen una vez que el pozo detiene su extracción de agua. A partir de la parada, los niveles empiezan a subir, hasta recuperar total o parcialmente el nivel inicial (Villanueva & Iglesias, 1984).

Para analizar la evolución de los niveles después de la parada de la bomba en el pozo hay que empezar por simular matemáticamente esta parada. La deducción matemática se resuelve con la ayuda de la figura 22.

Figura 22

Esquema para la deducción del valor del descenso residual d_r, en el análisis de la recuperación de niveles posterior a la parada



Nota. Tomado de Villanueva & Iglesias (1984)

Para ello puede procederse, razonando, que el efecto de parar un pozo que lleva bombeando un tiempo “t” a caudal constante “Q” es el mismo que simular que el pozo no se para y que a partir del instante “t” se le inyecta un caudal constante “Q”.

El descenso que se observa en el pozo o “descenso residual” es la diferencia entre el descenso producido por el bombeo desde que se inició el mismo y el ascenso producido por la inyección desde el momento de la parada.

El pozo está sometido a un bombeo con caudal “Q” que teóricamente no se interrumpe, y la curva de descensos producidos es OAB.

Cuando ha transcurrido un tiempo “t” y el descenso producido es “dM”, se para el pozo, o lo que es lo mismo se simula una inyección de caudal “Q”. La curva de ascensos teóricos vendrá dada por AE, obtenida llevando dichos ascensos teóricos a partir de la horizontal de “dM” y en el sentido negativo del eje de ordenadas.

La curva residual, que en rigor es la observada en campo, será la representada por AD diferencia de las dos anteriores.

En un tiempo genérico “t_g” desde que se inició el bombeo, el pozo llevará parado un tiempo t' = t_g - t. En este momento, el descenso “d_B” será:

$$d_B = \mathrm{FB} = 0{,}183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}} \times \log\frac{2{,}25\ \mathrm{T}(\mathrm{t}+\mathrm{t}')}{\mathrm{r}^2\mathrm{S}}$$

siendo:

Q = caudal de bombeo constante.

T = transmisividad.

r = radio del pozo.

S = coeficiente de almacenamiento.

t = tiempo que duró el bombeo real.

t '= tiempo que ha transcurrido desde que se paró el bombeo.

El ascenso “d_I”, producido por la inyección a caudal “Q”, que se simula a partir del tiempo “t”, que es cuando se interrumpe el bombeo, viene dada por:

$$d_I = \mathrm{CE} = 0{,}183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}} \times \log\frac{2{,}25\ \mathrm{Tt}'}{\mathrm{r}^2\mathrm{S}}$$

El descenso residual d_R que es el que se observa en el pozo, es la diferencia entre el nivel estático anterior a iniciar el bombeo y el nivel que se mide realmente en el tiempo t_g=t+t’. Vendrá dado por:

$$d_R = \mathrm{FD} = \mathrm{FB} - \mathrm{CE}$$

Y, por tanto:

$$d_R = d_B - d_I$$

$$d_R = 0{,}183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}} \times \log\frac{2{,}25\ \mathrm{T}(\mathrm{t}+\mathrm{t}')}{\mathrm{r}^2\mathrm{S}} - 0{,}183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}} \times \log\frac{2{,}25\ \mathrm{Tt}'}{\mathrm{r}^2\mathrm{S}}$$

De donde:

$$d_R = 0{,}183\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{T}} \times \log\frac{t+t'}{\mathrm{t}'}$$

Expresión en la que si se toma d_R como función, y log(t+t’)/t’ como variable, representa una recta de la forma:

$$y = mx$$

$$y = d_R$$

$$\mathrm{x} = \log\frac{t+t'}{\mathrm{t}'}$$

$$\mathrm{m} = 0{,}183\frac{Q}{T} \quad \ldots(1)$$

Esta recta pasa por el origen de coordenadas y queda como la figura 23.

La transmisividad “T”, que es el parámetro que puede obtenerse en el análisis de la recuperación, se saca directamente de la pendiente de la recta “m” haciendo uso de la relación (1).

$$\mathrm{T} = 0{,}183\frac{Q}{m}$$

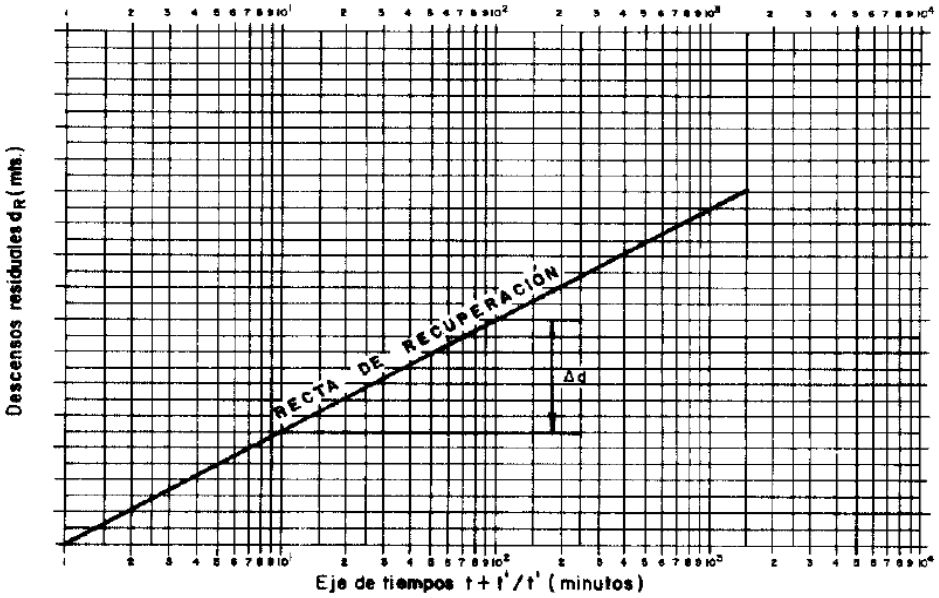
Como se sabe m = Δs, siendo Δs la caída por ciclo logarítmico y por tanto:

$$\mathrm{T} = 0{,}183\frac{Q}{\Delta s} \quad \ldots(2)$$

El caudal de bombeo “Q” debe expresarse en m^3/día para obtener la transmisividad “T” en m^2/día.

Figura 23

Recta de recuperación



Nota. Tomado de Villanueva & Iglesias (1984)

2.2.3.3. Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica estudia la composición química del agua, principalmente de los iones y compuestos mayoritarios y minoritarios disueltos, con diferentes objetivos (Custodio & Cabrera, 2013):

- Explicar las características químicas del agua tanto en el medio líquido como en sus relaciones con el medio sólido y el medio gaseoso. Comprende las relaciones roca–agua.
- Relacionar las características químicas con los modelos conceptuales de flujo y transporte en los sistemas acuíferos y ayudar a mejorarlos y contrastarlos.
- Mejorar el conocimiento de los parámetros hidráulicos y de transporte.
- Conocer cómo afectan las acciones antrópicas a la composición del agua.
- Conocer la génesis de minerales en relación con el agua

2.2.3.3.1. Diagramas de clasificación

Se puede trabajar mediante mapas de un componente, una relación o un valor calculado, o dibujar en el mapa varios componentes con ayuda de diagramas, como el de Stiff modificado. Para comparar los componentes mayoritarios de los análisis químicos de un mismo punto se pueden emplear gráficos de columnas verticales logarítmicas, en un cierto orden y solo para los iones importantes, como los de Schoeller–Berkaloff. Son muy útiles para ver la coherencia analítica y la posible evolución, que después se puede comprobar con

hidrogramas químicos, además de apreciar relaciones iónicas importantes. Los diagramas que reducen un análisis a un punto, con valores porcentuales, permiten comparar muchos puntos y conjuntos de análisis, pero se pierde la información sobre el contenido iónico total, y los resultados finales pueden tener poco interés interpretativo, salvo que estén bien diseñados. Tales son los diagramas triangulares de Piper o los de Durov (Custodio & Cabrera, 2013).

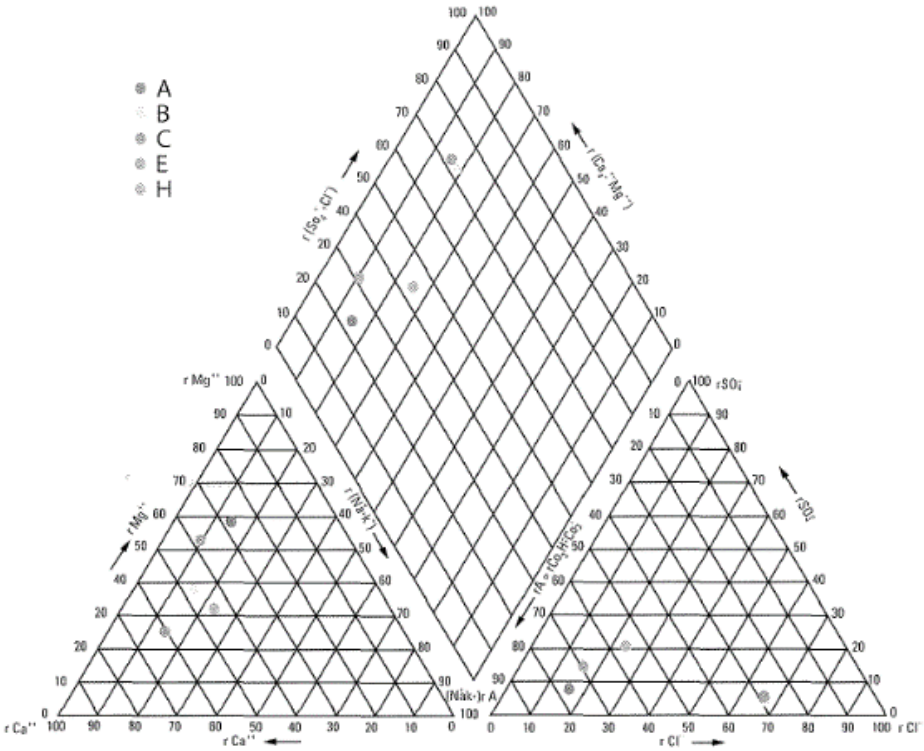
a) Diagramas de Piper

Permiten ilustrar la evolución hidroquímica de las aguas y establecer en forma directa el tipo de agua en relación a las facies hidroquímicas (Coarita, 2017).

En los diagramas triangulares de Piper cada uno de los vértices de un triángulo equilátero representa el 100 % de la concentración en meq/l de un determinado elemento y el 0 % del elemento situado en el vértice siguiente según el sentido de las agujas del reloj. Los valores del % de la concentración de cada elemento se representan trazando desde el punto del lado del triángulo que representa el % a representar, una recta paralela al lado opuesto al vértice correspondiente al 100 % del elemento que se considera. Solo es posible representar tres iones (aniones o cationes) de cada análisis, pero es posible representar muchos análisis en el mismo gráfico (Martínez et al., 2006).

Figura 24

Diagrama de Piper

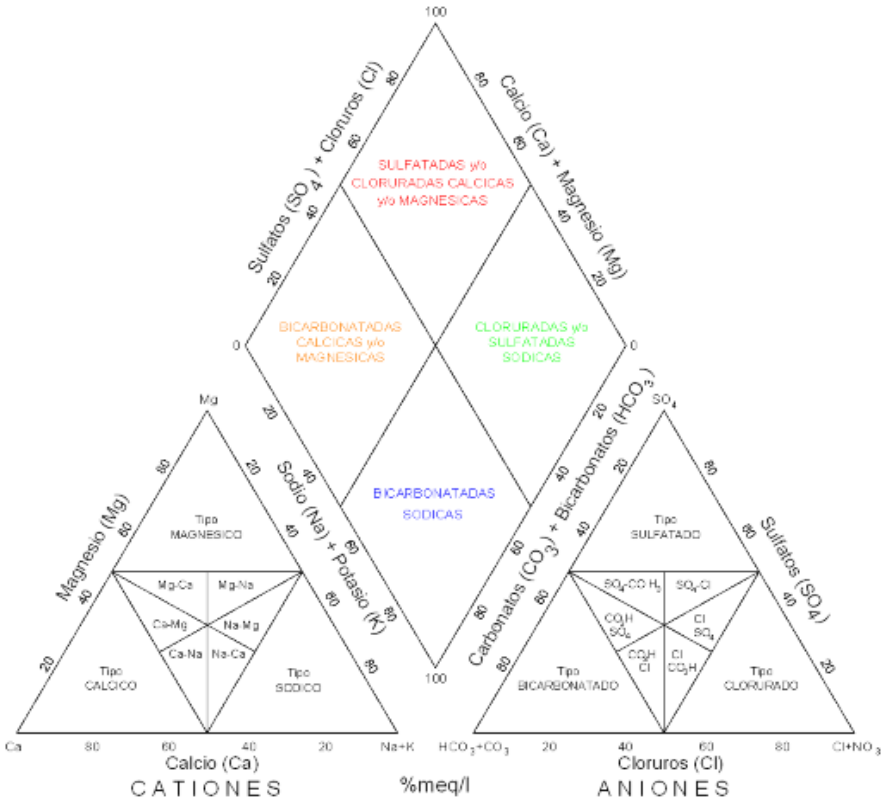


Nota. Tomado de Martínez et al. (2006)

Es posible utilizar un diagrama triangular para representar aniones y otro distinto para representar los cationes. Ambos están relacionados con un diagrama central en forma ele rombo en el que queda definido un tercer punto que representa a aniones y cationes del mismo análisis. En este tipo de diagramas los puntos que quedan agrupados definen familias de aguas de características químicas semejantes en cuanto al contenido iónico (Martínez et al., 2006).

Figura 25

Clasificación química de las aguas según diagrama de Piper



Nota. Tomado de Schulz & García (2018)

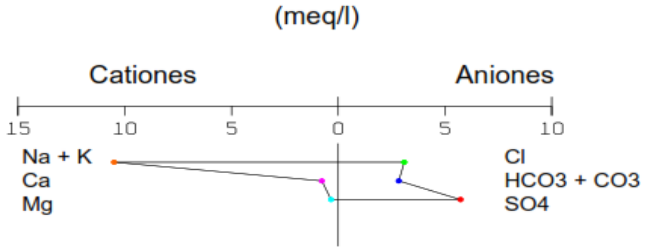
b) Diagramas de Stiff

Constan de una serie de rectas paralelas equidistantes entre si cortadas por una perpendicular. Esta perpendicular constituye el origen de las medidas sobre las semirrectas en que han quedado divididas las paralelas. De la vertical a la derecha se representan los aniones (meq/l) y análogamente los cationes en las semirrectas de la parte izquierda de la vertical (Martínez et al., 2006). De arriba abajo se disponen Na^{+}+K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}; Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}, esta disposición parece ser más apta para las aguas subterráneas (Coarita, 2017).

Consiste en tomar sobre semirectas convergentes o paralelas segmentos proporcionales a cada ion y unir los extremos dando así un polígono. Sobre cada semirecta se toma un solo ion o bien un catión y un anión simultáneamente. La forma de la figura resultante permite determinar las proporciones de los iones mayoritarios representados. Son muy ventajosos cuando se pretende comparar distintos tipos de agua y para representaciones en mapas (Schulz & García, 2018).

Figura 26

Representación de datos químicos en diagrama Stiff



Nota. Tomado de Schulz & García (2018)

c) Diagrama de Schoeller-Barkalof

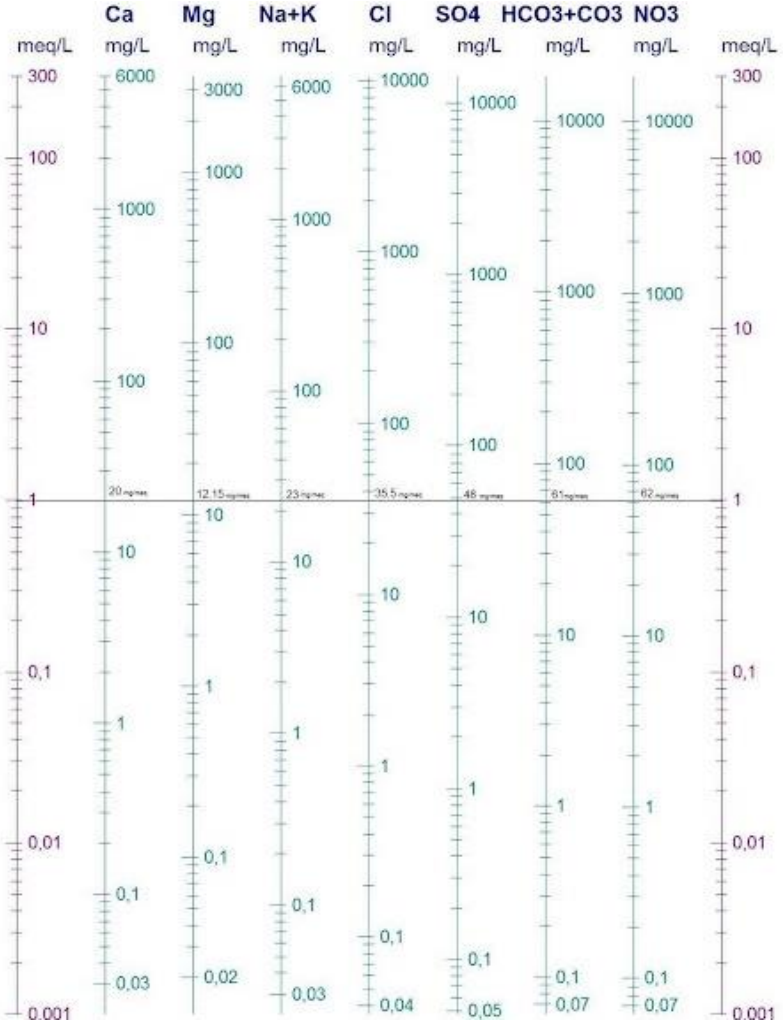
Permite clasificar los diferentes tipos de agua. Es muy útil para estudiar la evolución temporal de aguas subterráneas en un mismo punto (Agua y SIG, 2011).

En el diagrama de Schoeller, se lleva a intervalos regulares sobre ejes divididos según una escala logarítmica, el contenido en mg/l de los principales iones contenidos en el agua. Paralela a las ordenadas, existe en ambos extremos otros ejes logarítmicos, que permiten de inmediato transformar los mg/l de cada elemento representado, en meq/l, también expresa su concentración en forma de compuestos en mg/l, tal como se indicaban antiguamente en los análisis químicos.

Los ejes en meq/l también pueden ser utilizados para representar el contenido mineral total del agua. Los puntos que se logran mediante la representación de cada ión, son unidos por una recta, obteniéndose una línea quebrada que será característica para el análisis graficado. La representación de varios análisis permite hacer comparaciones de los distintos tipos de agua (INRENA, 2006).

Figura 27

Diagrama de Shoeller



Nota. Tomado de Agua y SIG (2011)

d) Diagrama de Wilcox

Los diagramas de Wilcox y Riverside son muy utilizados para determinar la calidad de agua para riego de cultivos de acuerdo al peligro de salinización del suelo.

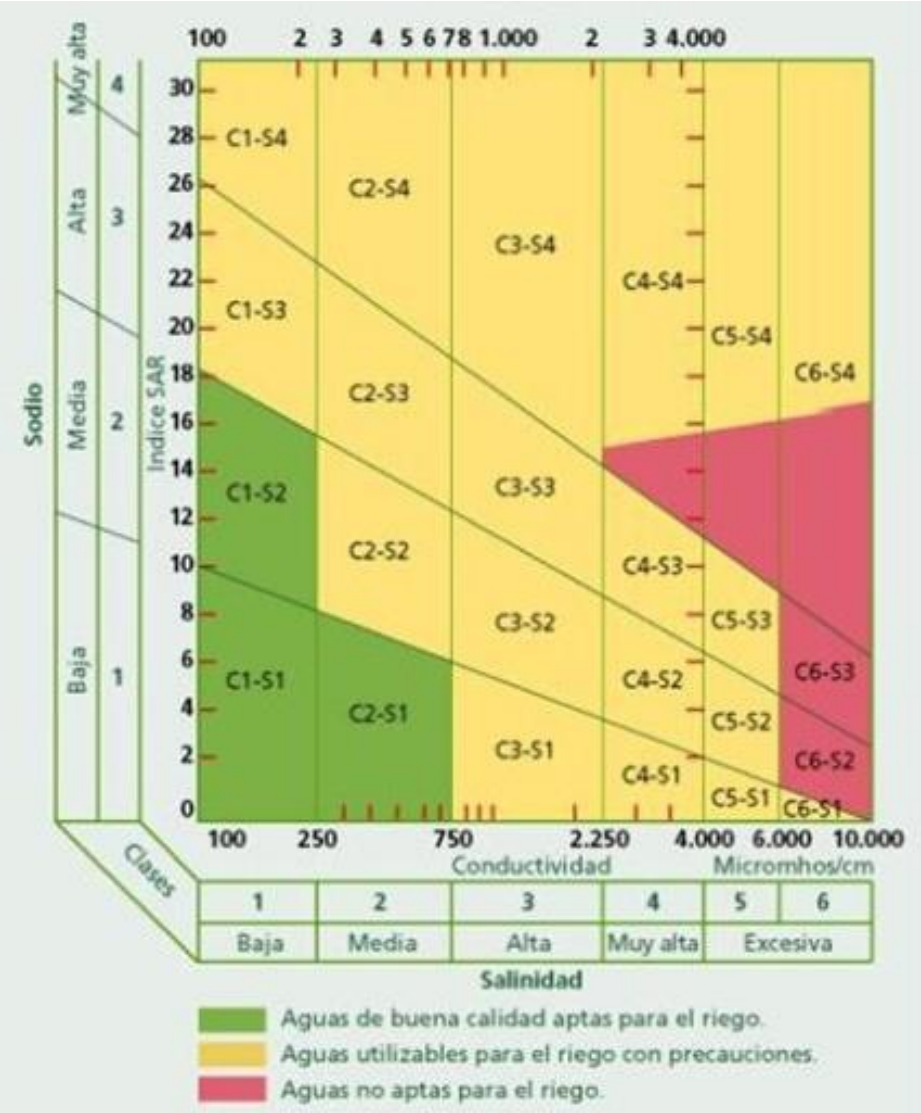
Según Schulz & García (2018), este diagrama tiene en cuenta a la concentración total de sales solubles expresada mediante la conductividad eléctrica (en uS/cm a 25°C) y la concentración relativa de sodio con respecto al calcio y magnesio (en meq/l), denominada índice RAS.

$$\mathrm{RAS} = \frac{r\ (Na)}{\sqrt{\frac{r(Ca+Mg)}{2}}}$$

La interpretación del diagrama de Wilcox indica la peligrosidad de la salinización y la peligrosidad de sodicidad, factores que afectan directamente a los suelos y vegetales. En el diagrama quedan definidas 16 categorías del agua establecidas al combinar las distintas clases de características de conductividad y peligro de alcalinización del suelo (figura 28 y tabla 21).

Figura 28

Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego (U.S. Soild Salinity Laboratory)



Nota. Tomado de Schulz & García (2018)

Tabla 21

Clasificación de las aguas según las normas Riverside

Tipos	Calidad y normas de uso
C_1	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas solo en suelos de muy baja permeabilidad.
C_2	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
C_3	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C_4	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Solo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C_5	Agua de salinidad excesiva, que solo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones apuntadas anteriormente.
C_6	Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.
S_1	Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
S_2	Agua con contenido medio en sodio, y, por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiable del suelo, corrigiendo en caso necesario.
S_3	Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.

S_4	Agua con contenido muy alto de sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando todas las precauciones apuntadas.

Nota. Tomado de Coarita (2017)

2.2.3.3.2. Normativa peruana para consumo humano y riego de cultivos

El Gobierno Peruano mediante Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM actualizó los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua. Los resultados obtenidos del análisis físico-químico de la presente investigación, fueron comparados con los límites máximos permisibles de la norma en referencia: ECA 1-A para consumo humano y ECA 3-D1 riego de cultivos. En la tabla 22 se presentan los límites máximos permisibles de los principales parámetros físico-químicos y de los iones mayoritarios.

Tabla 22

Estándares nacionales de calidad ambiental (ECA) para aguas destinadas a consumo humano y riego de cultivos, Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM

Parámetro	Unidad de medida	Categoría 1-Subcategoria A			Categoría 3
		Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable			Riego de vegetales y bebidas de animales
		A1	A2	A3	D1
		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas tratamiento avanzado	Agua para riego de cultivos
pH	UND	6.5 – 8.5	5.5 – 9	5.5 – 9	6.5 – 8.5
Conductividad	uS/cm	1500	1600	**	2500
TDS	mg/l	1000	1000	1500	**
Dureza	mg/l	500	**	**	**
Calcio	mg/	**	**	**	**
Magnesio	mg/l	**	**	**	**
Sodio	mg/l	**	**	**	**
Potasio	mg/l	**	**	**	**
Cloruros	mg/l	250	250	250	500
Sulfatos	mg/l	250	500	**	1000
Nitratos	mg/l	50	50	50	**
Bicarbonatos	mg/l	**	**	**	518

Nota. ** El parámetro no aplica para esta subcategoría. Elaboración propia con datos de las Normas Legales de El Peruano (2017)

2.2.3.4. Balance hídrico subterráneo

De acuerdo a Custodio (1998) el balance hídrico se determina a partir del principio de conservación de masa a un área específica con volumen conocido, establecido por condiciones de contorno. La diferencia entre el caudal total de entrada y el caudal de salida debe ser igual al cambio en el almacenamiento de agua durante un periodo de tiempo especificado.

$$ENTRADAS - SALIDAS = \Delta\ ALMACENAMIENTO$$

Para realizar un balance hídrico se debe medir los flujos de entrada, salida y almacenamiento (Custodio, 1998). La Figura 29 representa esquemáticamente los principales flujos de agua que se producen en una cuenca (Vélez, 2011):

ESD = escorrentía superficial directa,

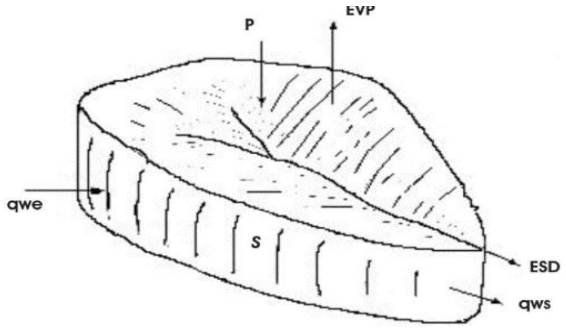
EVP = evapotranspiración real,

qwe = flujo subterráneo que entra

qws = flujo subterráneo que sale

Figura 29

Flujos de agua de una cuenca



Nota. Tomado de Vélez (2011)

Capítulo III: Metodología

3.1. Tipo de investigación

Por la finalidad de la tesis, el tipo de investigación es aplicada con un enfoque mixto (análisis cuantitativo y cualitativo), porque incluye medición de datos numéricos con calificaciones e interpretaciones cualitativas. Esto permitirá no solo ampliar el conocimiento del acuifero del sector Pampa Molina respecto a sus características, comportamiento y funcionamiento hidrogeológico, sino tambien proporcionará una base técnica para la explotación racional y sostenible de las aguas subterráneas con fines agrícolas.

3.2. Nivel de investigación

El nivel de la investigación es descriptivo y explicativo, porque no solo se limita a describir las características hidrogeológicas del acuífero de Pampa Molina, sino también busca explicar la relación entre sus parámetros físicos, la dinámica de recarga-descarga y la viabilidad de su explotación sostenible.

3.3. Diseño de investigación

El tipo de diseño metodológico es no experimental y transeccional, porque se basa en la recolección de información de campo y gabinete en un periodo de tiempo definido, sin manipular variables de estudio, sino observándolas en su contexto natural.

3.4. Población y muestra

La población considerada en el trabajo de investigación está definida por el sector de la parte baja del valle Sama, distrito Sama Las Yaras - Tacna.

La muestra está representada por el sector Pampa Molina del distrito Sama Las Yaras – Tacna.

3.5. Etapas de la investigación

La investigación se ejecutó en tres etapas:

3.5.1. Etapa preliminar

En esta etapa se recopiló y revisó toda la información existente de trabajos y/o estudios anteriores por entidades públicas como el Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET), Autoridad Nacional del Agua (ANA) y/o privados, como los ejecutados por el Ing. Walther Pacheco Avila, Ing. Alejandro Mita y principalmente por la empresa Edgar Manuel Acosta Pinto Ingenieros S.A.C., relacionados con el tema de la investigación (hidrología, hidrogeología, geología, prospección geofísica) y otra información relevante para el estudio.

La información recopilada fue analizada y seleccionada y sirvieron como base de datos al presente trabajo de investigación.

3.5.2. Trabajos de campo

- Reconocimiento de las principales unidades geológicas y geomorfológicas locales, tomando como referencia el mapeo geológico regional realizado por el INGEMMET y la ANA.

- Métodos geofísicos aplicados a la prospección de acuíferos. Se ejecutaron un total de 72 sondajes eléctricos verticales, con dispositivo simétrico Schlumberger.
- Inventario de fuentes de agua. Registro de datos técnicos en pozos de aguas subterráneas, como profundidad del nivel de agua, conductividad, pH, entre otros, que sirvieron para actualizar y complementar el inventario de Fuentes de Agua de la ANA.
- Ejecución de pruebas de bombeo a caudal constante (fase descenso y recuperación), para determinar los parámetros hidraúlicos del acuífero.
- Toma de muestras de agua de pozos del sector evaluado, para medición de parámetros físico-químicos in situ: conductividad eléctrica (C.E.) y pH y para análisis físico-químico en laboratorio.

3.5.3. Etapa de gabinete

- Análisis físico-químicos en laboratorio de muestras de agua subterránea. Se analizaron los parámetros de conductividad y pH, sólidos disueltos totales, dureza y los elementos iónicos mayoritarios del agua (cationes: calcio, magnesio, sodio y potasio; aniones: cloruros, sulfatos, nitratos y bicarbonatos).
- Revisión y validación de la información obtenida en campo, digitalización, procesamiento e interpretación de datos hidrogeológicos; así como la integración con la información recopilada en la etapa preliminar, la cual fue analizada y reinterpretada por la tesista.

Para el procesamiento e interpretación de la información recopilada y obtenida en campo, se utilizaron formatos patrones y programas especializados, que se describen a continuación:

- La información de los SEVs obtenida en campo y recopilada de estudios anteriores efectuados, ha sido interpretada cuantitativamente mediante la comparación iterativa con curvas patrón de sondeos eléctricos verticales sobre terrenos estratificados elaborados por Ernesto Orellana y Harold M. Mooney y procesados en el software especializado IPI2WIN, de origen ruso.
- Se realizó la actualización del inventario de pozos y fuentes de agua subterránea siguiendo el modelo de cuadro de inventario establecido por la ANA en el Reglamento de procedimientos administrativos para el otorgamiento de derechos de uso de agua y autorizaciones de ejecución de obras en fuentes naturales de agua (Resolución Jefatural N° 007-2015-ANA).
- Para el procesamiento y análisis de los datos de pruebas de bombeo, primero se ha digitalizado la información obtenida en campo en una hoja Excel patrón, obteniendo los gráficos de descenso y recuperación de cada prueba, con los cuales se calcularon los parámetros hidraúlicos del acuífero (transmisividad y permeabilidad), empleando en la interpretación la fórmula de Theis-Jacob. Luego, se corroboraron estos resultados en el software AQUIFER-TEST 2016.1.

- Los resultados de los análisis físico-químicos de agua de pozos de la zona de estudio efectuados en laboratorio, fueron interpretados con los diagramas hidroquímicos: Piper, Stiff, Schoeller y diagrama de salinidad (Wilcox) mediante el software AQUACHEM 4.0; en el cual estos diagramas de interpretación vienen incorporados. Adicionalmente se empleó el diagrama de Scatter según Mifflin (1988) y el diagrama de potabilidad.

Con la información obtenida, se elaboraron los mapas e ilustraciones correspondientes, que se anexan al presente informe.

Esta etapa concluye con la elaboración del informe, donde se detallan los resultados obtenidos y las conclusiones a las que se ha llegado con la investigación.

Capítulo IV: Características geológicas y geomorfológicas del área de estudio

En toda investigación hidrogeológica es importante tener conocimiento de la estructura geológica de la zona; es decir la naturaleza de los materiales existentes y la distribución de los mismos tanto permeables como impermeables, fallas, afloramientos del zócalo y otros; debido a que estas condicionan el funcionamiento del acuífero y el desplazamiento de las aguas en el subsuelo (INRENA, 2006).

4.1. Geomorfología regional

En el área evaluada se han identificado cuatro unidades geomorfológicas regionales: faja litoral, cadena costanera, terraza aluvial y pampa costanera (ver figura 30 y mapa 2 – anexo 1), que son el resultado de diferentes procesos tectónicos que han dado lugar a la actual configuración de la parte baja del valle Sama; en algunos casos favorecen la circulación y en otros condicionan la descarga con los cambios de litología y pendiente. Estas unidades geomorfológicas se describen a continuación:

4.1.1. Faja litoral

Es una geoforma angosta y de terreno bajo que se extiende desde la línea de playa hasta el pie de la cadena costanera. Según la ANA (2022) su ancho varía desde pocos metros en el extremo NW en el Morro Sama hasta un máximo de 5 km a la altura de los cerros de La Yarada. Comprende las actuales playas y antiguos niveles costeros (terrazas marinas), conformados por arenas eólicas,

arenas y conglomerados de origen marino y pequeños niveles de evaporitas (INGEMMET, 2012).

En el área de estudio se presenta en las playas del litoral: Llostay, Punta del Toro, Boca del Río, Playita Brava, El Planchón y Vila Vila.

Esta unidad geomorfológica se clasificaría como una buena zona para el almacenamiento del agua subterránea.

4.1.2. Cadena costanera

También conocida como cordillera de la Costa; es una zona montañosa y accidentada que modela el litoral de la región Tacna. En ambas márgenes del río Sama los cerros circundantes alcanzan alturas de 200 a 370 m.s.n.m., que van perdiendo elevación en dirección al valle Caplina, donde se ausenta, para luego aparecer nuevamente en el Morro de Arica (Chile). De acuerdo al INGEMMET (2012) en el corte perpendicular a la línea de costa y límite con la quebrada del río Caplina, presenta un ancho de 5 km y por el sector Sama, 20 km.

La vertiente oeste de la cordillera de la Costa hacia el sector de Sama está caracterizada por presentar farallones muy pronunciados, conformando a lo largo de la línea de costa una serie de acantilados que van perdiendo gradualmente su elevación hasta interrumpirse en la quebrada del río Sama (INGEMMET, 2012). En esta unidad afloran rocas del macizo de Arequipa y rocas intrusivas del Cretáceo Inferior. Además, se observan terrazas marinas cuaternarias, que son evidencias del levantamiento andino reciente (INGEMMET, 2021)

En el área evaluada está comprendida por los cerros Siete Colores, Miraflores, Los Pabellones, Punta Morena, La Yarada, Llostay, Fuerte de Los Españoles, La Mina y Moreno;

Esta unidad geomorfológica se comporta como una barrera condicionante de la circulación de las aguas subterráneas.

4.1.3. Terraza aluvial

Son porciones de terreno que se encuentran dispuestas a los costados de la llanura de inundación o del lecho principal de un río, a mayor altura; representan niveles antiguos de sedimentación fluvial, los cuales han sido disectados por las corrientes, como consecuencia de la profundización del valle. Están constituidos por material detrítico más o menos gradado (INGEMMET, 2021) y son empleadas como áreas de cultivo temporales (CORDETACNA, 1985).

En el área de estudio está representada por los terrenos de ambas márgenes del río Sama (lecho principal).

Esta unidad geomorfológica se comportaría como una zona ideal para almacenar y transmitir grandes volúmenes de agua subterránea.

4.1.4. Pampa costanera

Se extiende entre la cadena costanera y el pie de los contrafuertes de los Andes; es un terreno llano entre 200 a 1000 m.s.n.m., con ancho de 30 a 50 km e inclinación hacia el Sur y SW (INGEMMET, 1963). El relieve es ondulado producto de la incisión de pequeñas e importantes quebradas sobre terrenos del

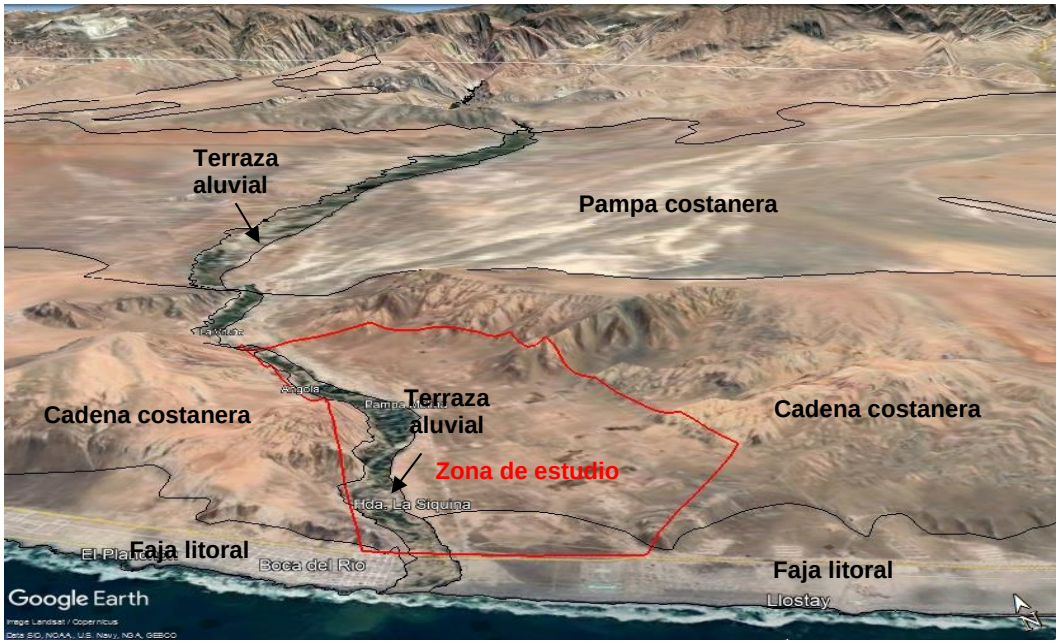
Mioceno y depósitos detríticos del Plioceno Cuaternario. La pendiente regional varía entre 0,5 a 1% (INGEMMET, 2012).

En el área evaluada está representada por las pampas Los Gredales y Pie de Candela, al Norte y NW de la zona de estudio.

Esta unidad geomorfológica alberga acuíferos que pueden ser fuentes de agua para actividades como la agricultura.

Figura 30

Unidades geomorfológicas regionales de la zona de estudio



Nota. Imagen de Google Earth. Elaboración propia

4.2. Geomorfología local

Localmente se han identificado nueve (09) sub-unidades geomorfológicas relacionadas con la zona de estudio (ver mapa 3 – anexo 1), que se describen a continuación:

4.2.1. Terraza baja aluvial (Tb-al)

Son terrenos planos y de ancho variable que se encuentran ubicados en el curso inferior del valle Sama y está relacionado directamente con el cauce donde discurre el río, siendo su presencia más notoria en épocas de lluvias.

Esta unidad constituye la geoforma más importante para la alimentación del acuífero en la zona de estudio.

Figura 31

Terraza baja aluvial en el cauce del río Sama, sector la Vituña-Pampa Molina

Nota. Tomado de EMAP Ingenieros SAC

4.2.2. Terraza marina (T-m)

Es una geoforma paralela a la línea de la costa, con anchos variables. Su formación constituye sedimentos retrabajados por el vaivén de las olas. Usualmente están cubiertos por depósitos marinos.

Esta unidad localmente constituye el paisaje del litoral costero del valle Sama, que se puede observar a lo largo de la carretera Costanera, en las playas Llostay, Boca del Rio, Playita Brava, El Planchón y Tomo Beach.

Esta unidad geomorfológica se clasificaría como una zona favorable para el almacenamiento y flujo del agua subterránea.

Figura 32

Terraza marina cerca a playa Llostay

Nota. Foto propia

4.2.3. Piedemonte aluvio torrencial (P-at)

Es una planicie ligeramente inclinada, ubicada al pie de estribaciones andinas o sistemas montañosos; formada por la acumulación de sedimentos provenientes de las corrientes de agua estacionales y quebradas, como flujos de detritos.

Esta unidad geomorfológica alberga acuíferos que pueden ser fuentes de agua para actividades como la agricultura.

En el área evaluada esta unidad se encuentra emplazada en el sector Pampa Molina, constituyendo el acuífero de la zona de estudio. También, se presentan en las bases de las quebradas ubicadas en los cerros Calvario, La Mina, Fuerte Los Españoles (margen derecha del río Sama).

4.2.4. Vertiente aluvial (V-al)

Es una superficie inclinada de suave a fuerte pendiente, que se presenta en los flancos de las quebradas o valles; está cubierta de material aluvial acarreado por corrientes de agua superficial, de gravas en matriz limo arenosa, que se caracterizan por ser muy porosos y tener una distribución caótica.

Localmente, se presenta en las pampas de la parte baja del sector Pampa Molina, así como en las laderas de los cerros de La Yarada y Llostay (margen izquierda del río Sama) y laderas de los cerros de Boca de Río y Fuerte Los Españoles (margen derecha del río Sama).

Esta unidad geomorfológica alberga acuíferos que pueden ser fuentes de agua para actividades como la agricultura.

Figura 33

Piedemonte aluvio torrencial, vertiente aluvial, terraza marina y colina y lomada en roca volcano-sedimentaria en el sector Pampa Molina

Nota. Foto propia

4.2.5. Mantos de arena (M-a)

Constituido por la acumulación de arenas eólicas a manera de mantos, que están cubriendo terrenos planos a ondulados de la planicie costera y en algunos casos, se presentan en las laderas o vertientes de montañas, colinas o lomadas; siendo su localización preferencial, las aledañas al litoral.

Localmente, se encuentran cubriendo depósitos marinos y aluviales, así como rocas de la Formación Chocolate, expuestas en las laderas de los cerros costeros.

Desde el punto de vista hidrogeológico, los materiales de esta unidad geomorfológica son permeables, pero al estar en superficie, solo sirven de medios para la infiltración de las aguas superficiales a niveles más profundos.

Figura 34

Mantos de arena en el sector Los Arenales-Boca del Río

Nota. Foto propia

4.2.6. Superficie de flujo piroclástico (Sfp)

Es una superficie relativamente plana con pendientes suaves, que suelen presentar texturas irregulares (cárcavas) producto de la erosión; formada por materiales volcánicos calientes (gas, ceniza y fragmentos de roca) que se han depositado rápidamente ladera debajo de un volcán.

Localmente esta unidad está conformada por material piroclástico de la Formación Huaylillas de composición dacítica y riolítica, con acumulación de

importantes espesores de tobas y flujos piroclásticos, que se exponen en los cerros Miraflores y Pabellones.

Esta unidad geomorfológica se comportaría como estructura condicionante de almacenamiento de aguas subterráneas.

4.2.7. Superficie de flujo piroclástico disectado (Sfp-d)

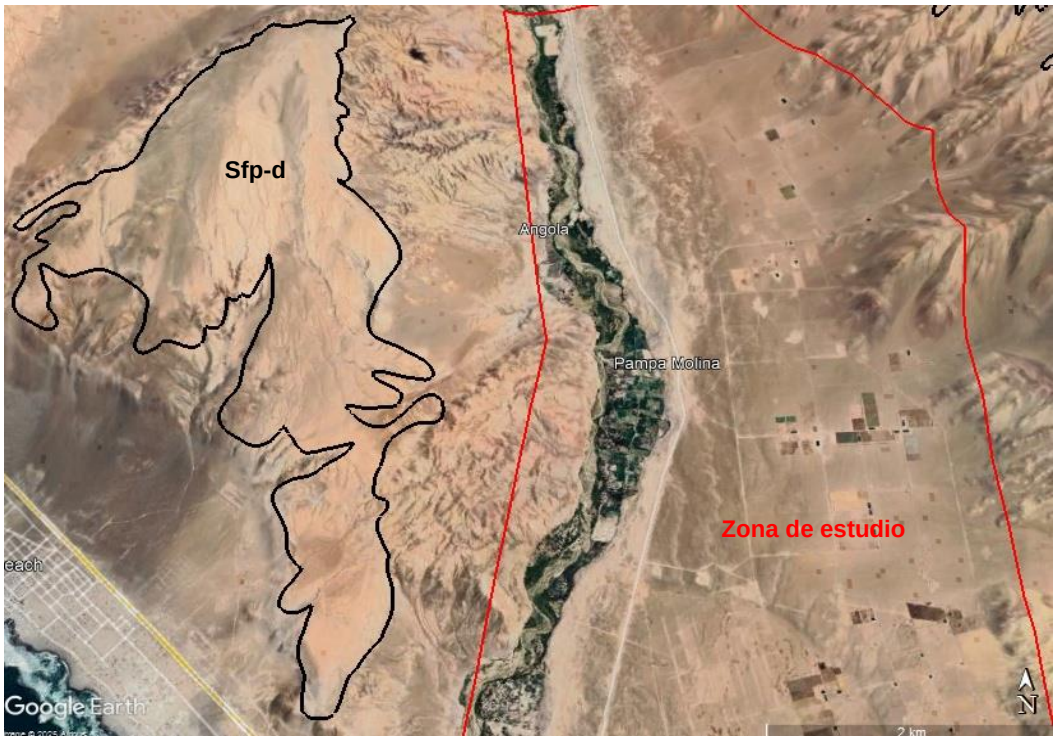
Tiene el mismo origen que la superficie de flujos piroclásticos, con la diferencia que presentan múltiples cárcavas, debido a un alto grado de erosión.

Esta geoforma se manifiesta en parte de los cerros La Mina, Fuerte Los Españoles, Calvario y Punta Colorada, de la margen derecha del río Sama (figura 35), presentando materiales piroclásticos de la Formación Huaylillas. También se ha observado exposiciones de esta unidad en el cerro Siete Colores.

Desde el punto de vista hidrogeológico, esta unidad geomorfológica se comportaría como estructura condicionante de almacenamiento de aguas subterráneas.

Figura 35

Superficie de flujo piroclástico disectado en los cerros La Mina, Fuerte Los Españoles, Calvario y Punta Colorada, margen derecha del río Sama



Nota. Imagen de Google Earth. Elaboración propia

4.2.8. Colina y lomada en roca volcano-sedimentaria (RCL-rvs)

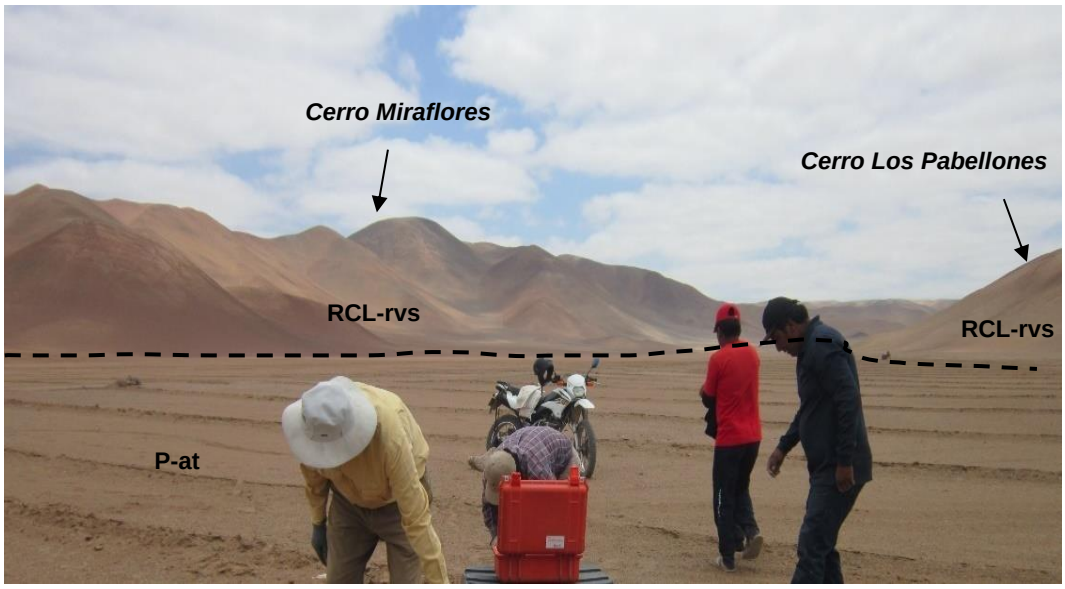
Presenta relieve abrupto, con laderas entre moderada y fuerte pendiente, ligeramente con surcos.

Localmente está representada por los cerros Punta Colorada, La Mina, Fuerte de los Españoles, Calvario, Llostay, Los Pabellones, Miraflores y Siete Colores, donde se presentan rocas de origen volcánico y sedimentaria de la Formación Chocolate, Socosani y/o Puente-Cachios.

Esta unidad geomorfológica se comportaría como estructura condicionante de almacenamiento de aguas subterráneas.

Figura 36

Colina y lomada en roca volcano-sedimentaria, sector Pampa Molina



Nota. Se observa afloramientos de roca volcano-sedimentaria de la Formación Chocolate en los cerros Siete Colores y Los Pabellones. Tomado de EMAP SAC

4.2.9. Colina y lomada en roca sedimentaria (RCL-rs)

Geoforma de moderada pendiente, constituida por afloramientos de rocas sedimentarias de la Formación Chocolate, Socosani y Puente-Cachios, que están dispuestas en los cerros Los Pabellones, Miraflores y Siete Colores.

Esta unidad geomorfológica se comportaría como una estructura condicionante de almacenamiento de las aguas subterráneas.

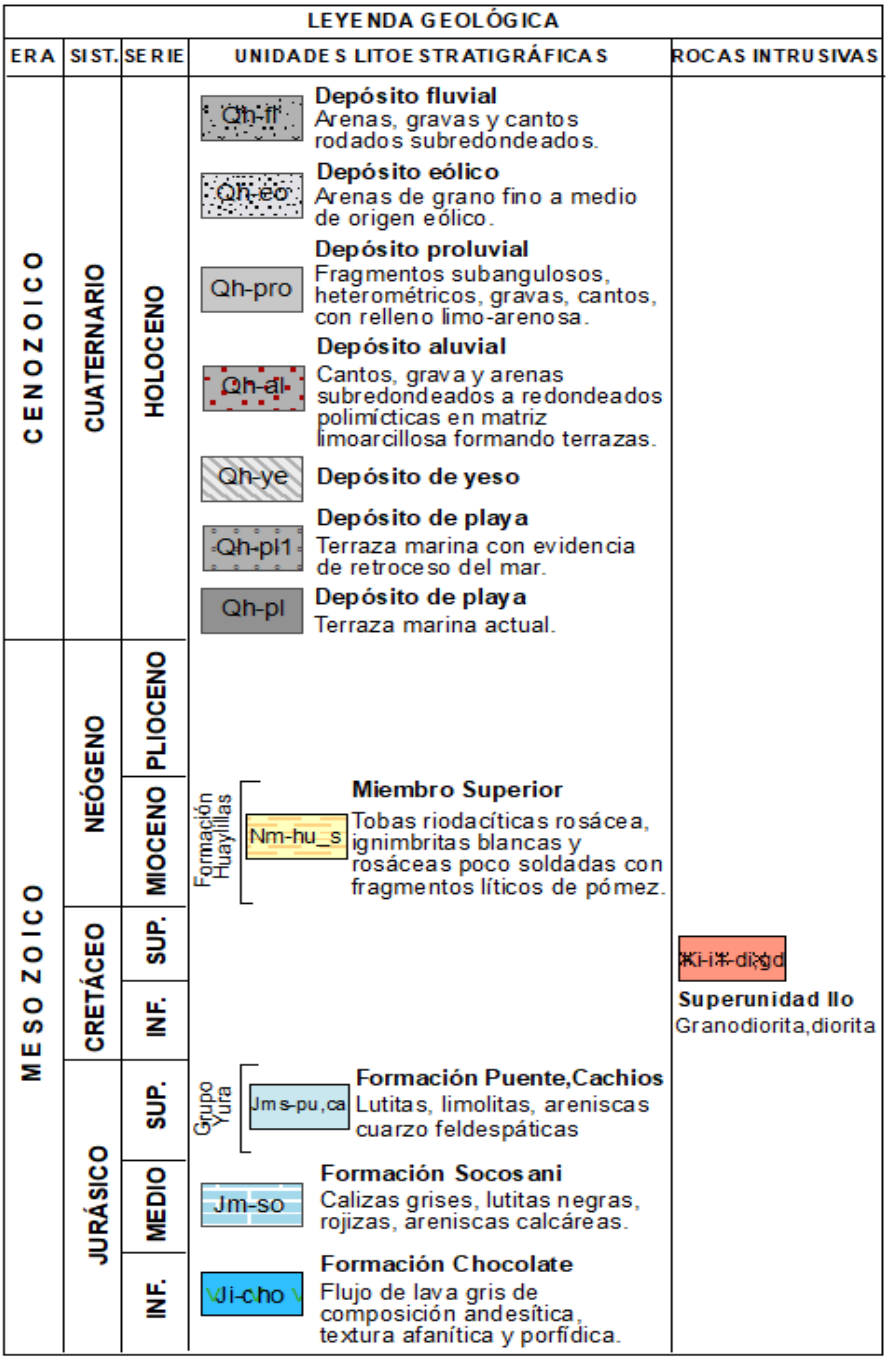
4.3. Geología regional

El reconocimiento de la secuencia estratigráfica regional del área de estudio, se realizó en base al mapa geológico del cuadrángulo La Yarada (37-u), escala 1/50,000 del INGEMMET (2010). Adicionalmente, también se consideró la información recopilada del Mapeo Geológico efectuado por la ANA el 2022; que para los trabajos de campo utilizaron de base este cuadrángulo.

Regionalmente en el área de estudio se han identificado afloramientos de rocas volcánicas, sedimentarias e intrusivas de edades del Jurásico, Cretácico y Neógeno, cubiertas por depósitos Cuaternarios (ver figura 37 y mapa 4 - anexo 1).

Figura 37

Columna estratigráfica regional de la zona de estudio



Nota. Tomado del INGEMMET (2010) y ANA (2022).

La descripción de las unidades estratigráficas presentes en el área evaluada, se describe a continuación, desde la más antigua a la más reciente:

4.3.1. Mesozoico/Jurásico inferior

4.3.1.1. Formación Chocolate (Ji-cho)

La Formación Chocolate constituye las rocas más antiguas que afloran en la zona y forma parte de la Cadena Costanera. Jenks (1948) la denomina como una serie de derrames traquíticos y andesíticos con algunas intercalaciones de lutitas, areniscas y arrecifes coralígenos, expuesta en las vecindades de Arequipa (INGEMMET, 1963).

En el Morro Sama se observa en la base, una serie de derrames gris oscuros, en bancos gruesos, con intercalaciones de brechas marrones y andesitas porfiríticas o afaníticas en la parte superior (INRENA, 2006). Esta formación también aflora en los cerros Calvario y Fuerte de Los Españoles, presentando una secuencia de derrames y piroclásticos andesíticos. Por similitud litológica, la Formación Chocolate de estas zonas pueden correlacionarse con la Formación Chocolate de Arequipa y por tanto son de edad Jurásica Inferior.

En algunos sectores de la parte baja del valle Sama se observa el levantamiento de esta formación, producto de la intrusión de la Superunidad Ilo a la Cordillera de la Costa. Además, se observan ocasionales diques riodácticos y andesíticos que cortan a secuencias de la Formación Chocolate.

Se encuentra discordante debajo de la Formación Socosani y suprayace a depósitos más antiguos de posible edad Triásica a Jurásica Inferior de origen volcánico y/o intrusivo.

4.3.2. Mesozoico/Jurásico medio-superior

4.3.2.1. Formación Socosani (Jm-so)

Jenks (1948) y Benavides (1962) citado en INGEMMET (2012), refieren que esta formación está compuesta principalmente por calizas y aflora ampliamente en el Cerro Yanacoto, Yura – Arequipa. En la región de Tacna, Wilson & García (1962) la definieron como Formación San Francisco, refiriéndose a una secuencia sedimentaria localizada al noreste de Pachía, en la desembocadura de la quebrada Palca - Pampa San Francisco. Otros autores la relacionan con la Formación Guaneros.

Al noreste del poblado de Boca del Río, en los cerros Siete Colores y Miraflores, precisamente en la margen izquierda del río Sama, se presentan afloramientos de la Formación Socosani restringidos a un delgado apilamiento sedimentario. Litológicamente, están constituidos por limolitas calcáreas y calizas, de espesores variables, entre 5 a 10m en promedio. También se observa que las intercalaciones de los niveles calcáreos se van haciendo cada vez más delgadas, conforme los paquetes de lutitas se hacen cada vez más potentes (INGEMMET, 2012). Esta unidad geológica yace en discordancia sobre la Formación Chocolate y suprayace al Grupo Yura.

Localmente, la Formación Socosani se presenta en los cerros Chombo, Siete Colores y La Mina, con baja densidad de fracturas, influenciada por un control bajo de fallamientos y lineamientos locales. Por acción de las fallas inversas Miraflores y Chombo, aportan sedimentos para el relleno de los actuales depósitos de terraza que constituyen las pampas Siquina y Molina.

4.3.3. Mesozoico/Jurásico superior

4.3.3.1. Grupo Yura - Formación Puente-Cachíos (Jms-pu,ca)

Según el INGEMMET (2012), en Tacna se consideraba ausente a la Formación Cachíos hasta que Monge & Cervantes (2000) reportaron un incremento en la distribución de lutitas en los afloramientos de la quebrada Quilla, considerando estos estratos como pertenecientes a esta formación. Es así que, en los cuadrángulos de Pachía (36-v) y Palca (36-x), Acosta et. al. (2011) estudiaron a la Formación Puente en la quebrada Chachacumane, describiendo que las sucesiones de areniscas cuarzosas y lutitas que yacen sobre la Formación Socosani, se encuentran fuertemente afectada por las fallas inversas del Sistema de Fallas Incapuquio, lo que causa difilcultades en la correcta designación del tipo de contacto entre la Formación Socosani y la Formación Puente.

El único afloramiento de la Formación Puente-Cachíos en los cuadrángulos de La Yarada (37-u), Tacna (37-v) y Huaylillas (37-x) se halla en las partes altas del cerro Siete Colores y cerro Miraflores en la margen izquierda del río Sama ubicado al noreste del poblado de Boca del Río. Litológicamente, está compuesto por una sucesión repetitiva de limolitas y lutitas algo calcáreas de color negro con

laminaciones paralelas, intercaladas con delgados niveles de arcosas de grano fino con abundante matriz limolítica. Estos afloramientos están afectados por numerosos diques dioríticos y dacíticos (INGEMMET, 2012).

Localmente, en los cerros Chombo, Siete Colores y La Mina yace discordante a la Formación Socosani y en el Cerro Moreno, a la Formación Chocolate.

4.3.4. Neógeno/Mioceno inferior-medio

4.3.4.1. Formación Huaylillas (Nm-hu_s)

La Formación Huaylillas aflora en gran parte de la región tacneña, cubriendo a la cordillera de la Costa, planicies costaneras y la cordillera Occidental. Wilson y Garcia (1962) citado en INGEMMET (2012), refiere a esta formación como una gran superficie piroclástica y la divide en tres miembros, con poca diferencia litológica, por tratarse en todos lo casos de tufos de composición dacítica y riolítica, con leves diferencias en el color, textura y mineralogía.

Estratigráficamente estos depósitos se encuentran encima de las formaciones geológicas más antiguas que afloran en la zona (Formación Chocolate) y por debajo de los depósitos cuaternarios.

En el área evaluada se muestran afloramientos de la Formación Huaylillas en las cumbres de los cerros Miraflores, Canicora y Munipata.

4.3.5. Cuaternario/Holoceno

4.3.5.1. Depósito aluvial (Qh-al)

Son los depósitos más ampliamente distribuidos en el cuadrángulo de La Yarada y Tacna. En el valle Sama están constituidos por gravas semiconsolidadas con intercalaciones lenticulares de arena gruesa, arcilla y tufos redepositados, de estratificación más o menos horizontal. El material de estos depósitos ha sido transportado por aguas corrientes desde las partes altas de los flancos andinos y depositados en forma de abanicos aluviales de piedemonte, en la superficie de la depresión costanera, cuyo grosor de estos aluviales varía desde pocos centímetros hasta un máximo de 60m, comprobados en los cortes de las numerosas quebradas y también en el registro de las perforaciones por agua subterránea en las pampas cerca a las Yaras – Sama (INRENA, 2006).

Los depósitos aluviales son principalmente utilizados con fines agrícolas y constituyen potenciales acuíferos en el delta del río Sama. Se encuentran ampliamente distribuidos en las pampas Los Gredales, Platanillo y Pie de Candela. También, se presentan en el subsuelo del sector Pampa Molina.

4.3.5.2. Depósito fluvial (Qh-fl)

De acuerdo a lo indicado por el INGEMMET (2021) esta clase de depósitos constituyen los materiales del cauce o lecho de los ríos y quebradas tributarias, terrazas bajas inundables y llanura de inundación. Generalmente por encontrarse en constante dinámica, son depósitos inconsolidados hasta sueltos y su permeabilidad es muy alta.

En el valle Sama las acumulaciones más importantes de este tipo se hallan a lo largo del río Sama. Consiste de gravas con lentes de arenas y capas de arcillas que son aprovechados como terrenos de cultivo (INRENA, 2006).

4.3.5.3. Depósito eólico (Qh-eo)

Conformado por arenas sueltas transportadas por el viento y depositadas en forma de montículos, lenguas y mantos delgados (INRENA, 2006) sobre extensas planicies como mantos de arena de unos pocos metros de espesor o como dunas aisladas cerca al litoral.

En la Playa Llostay, Boca del Río, El Planchón, Playa Jardín y Vila Vila estos depósitos se presentan como mantos de arena. Tambien, según el INGEMMET (2021), entre los cerros Cajones, Canicora y La Mina, se encuentran cubriendo áreas importantes en la cima de estos cerros y formando planicies que adquieren una dirección NE-SO paralelos a los vientos procedentes del mar.

4.3.5.4. Depósito de playa (Qh-pl, Qh-pl1)

En la región de Tacna su afloramiento se encuentra a lo largo de la zona litoral y también como costas emergentes, que fueron antiguos fondos marinos, que se encuentran actualmente por encima del nivel del mar. Se expone como una franja playera, la cual se hace más amplia a partir de la localidad El Chasqui, donde alcanza un ancho de 2 km en el sector Llostay, para luego reducir su ancho nuevamente cerca de la localidad La Yesera (INGEMMET, 2021).

Consiste de conglomerados gruesos, lentes de arena fina y arena gruesa con abundante restos de conchas y venillas de yeso; su grosor varía de 5 a 30m (INRENA, 2006).

En el área evaluada estos depósitos se presentan a lo largo de la línea de costa, margen izquierda del río Sama, sector Llostay, conformando terrazas marinas, constituidas por materiales sueltos de arenas y limos con costras de sal, restos de conchuelas y biogénicos.

También, se observan antiguos depósitos aluviales que habrían sido alcanzados por el mar y retrabajados por la acción dinámica de las olas, conformados mayormente por conglomerados con clastos de roca volcánica, con conchillas y evidencias de actividad biótica marina, en superficie.

4.3.5.5. Depósito de yeso (Qh-ye)

Se presenta en forma de manto de material evaporítico en el cerro Punta Colorada, margen derecha del rio Sama. Según INGEMMET (2021) este depósito tiene una potencia variable entre 1,5m a 2,5m, con intercalaciones de arcillas y lentes de arena, superficialmente cubierto por arenas y grava. Yace discordante a la Formación Chocolate y la Formación Socosani.

4.3.6. Rocas intrusivas

Corresponden a cuerpos subvolcánicos de intrusiones tempranas y a cuerpos plutónicos que constituyen el Batolito de la Costa; así como algunas intrusiones subvolcánicas menores de emplazamiento posterior.

En los cuadrángulos de La Yarada y Tacna no existen mayores afloramientos de roca ígnea intrusiva, la cual se halla intensamente expuesta en los cuadrángulos de Locumba e Ilo (INGEMMET, 1963). De acuerdo al mapa geológico del INGEMMET se presenta un pequeño apófisis de roca intrusiva tipo diorita de la Superunidad Ilo (Ki-i1-di), a la altura de la playa Llostay, entre la terraza marina y el cerro Llostay, que se encuentra cortando a la Formación Chocolate. Al noroeste de la zona, se presenta un importante afloramiento de granodioritas de la Superunidad Ilo del Cretáceo inferior (Ki-i1-gd), en los cerros de la Tranquilla, Torillo Muerto y del Callejón, adyacentes a las Pampas Pie de Candela, que se encuentra cortando a rocas de la Formación Chocolate.

4.4. Geología local

La zona de la parte baja del valle Sama - Pampa Molina se encuentra cubierta por depósitos cuaternarios, expuestos en las pampas y terrazas.

A partir de los trabajos de campo, interpretación de secciones geológicas y la información de pozos existentes, se observa una secuencia de material aluvial comprendida principalmente por canto rodado, grava, arena y limo de diversos espesores; que sobreyacen a las rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Chocolate. En la zona cercana al litoral se observa depósitos marinos constituidos por arena, limo y conchuelas (ver mapa 5 – anexo 1).

La figura 38 muestra la columna estratigráfica local donde se aprecian las unidades geológicas locales que conforman el área de estudio.

Figura 38

Columna estratigráfica local de la zona de estudio

LEYENDA GEOLÓGICA			
ERA	SIST.	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qh-fl — **Depósito fluvial** Canto rodado, grava, arena, limo y arcilla transportados y depositados en el cauce del rio.
			Qh-al — **Depósito aluvial** Canto rodado, grava, arena, limo y arcilla.
			Qh-pl — **Depósito de playa** Arena y limo con costras de sal y restos de conchuelas.
MESOZOICO	JURÁSICO	INFERIOR	Ji-cho — **Formación Chocolate** Flujo andesíticos con secuencias de lutitas y areniscas.

Nota. Elaboración propia

4.4.1. Formación Chocolate (Ji-cho)

La Formación Chocolate aflora en los cerros Siete Colores, Miraflores, Los Pabellones, Llostay, Fuerte Los Españoles, La Mina, Moreno y a lo largo de la línea del litoral, margen derecha del rio Sama: playa Boca del Río, playita Brava, El Planchón, Tomoyo Beach y Vila Vila; yaciendo en discordancia sobre las formaciones más antiguas. Litológicamente, consiste de flujos andesíticos con secuencias de lutitas y areniscas; en el cerro Moreno se presentan netamente rocas volcánicas (flujos andesíticos). También, se observan algunos diques de composición variable entre basaltos y riolitas en las faldas del cerro Siete Colores.

Desde el punto de vista hidrogeológico la Formación Chocolate conformaría el basamento rocoso impermeable del acuífero de la zona de estudio; a pesar de presentar fracturas como producto de las fallas geológicas Miraflores y Chombo, las cuales han sido rellenadas por mineralización.

Las perforaciones ejecutadas en el sector Pampa Molina-parte baja del valle Sama, han detectado que esta formación geológica se encontraría a partir de los 62m (pozo Rosita) a 100m de profundidad (pozo PP-01 Wayu Perú).

4.4.2. Depósitos cuaternarios

4.4.2.1. Depósito fluvial (Qh-fl)

En la zona de estudio estos depósitos se encuentran rellenando el cauce del río Sama. Litológicamente consisten en cantos rodados y gravas subredondeadas con intercalaciones de arenas, limos y arcillas.

Desde el punto de vista hidrogeológico, los depósitos fluviales constituyen un acuífero potencialmente favorable a la prospección de aguas subterráneas.

4.4.2.2. Depósito aluvial (Qh-al)

Se encuentran ampliamente distribuidos en las pampas y terrazas fluviales del sector Pampa Molina, adyacentes al cauce del río Sama. Litológicamente están compuestos de cantos rodados, gravas y arenas subredondeadas a redondeadas, mezclados de forma caótica, en matriz limo-arenosa.

Desde el punto de vista hidrogeológico, los depósitos aluviales constituyen un acuífero potencialmente favorable a la prospección de aguas subterráneas, por

presentar buenas propiedades de porosidad y permeabilidad que favorecen el almacenamiento y flujo de las aguas subterráneas.

4.4.2.3. Depósito de playa (Qh-pl)

Localmente, se presenta a lo largo de la línea de costa, margen izquierda del río Sama, sector Llostay, conformando terrazas marinas, que están constituidas por materiales sueltos de arenas y limos con costras de sal, restos de conchuelas y biogénicos.

Estos depósitos no tienen mayor incidencia en la hidrogeología, debido a su carácter marginal y por constituir una franja muy angosta distribuida a lo largo del litoral y que está relacionada a escarpas litorales emergidas.

4.5. Geología estructural regional

Regionalmente, en el ámbito de la zona de estudio existe un sistema de fallas con dirección promedio NO-SE conocido como sistema de fallas Islay-Ilo, conformado por la Falla Chombo y Miraflores y un sistema que tiene una orientación NE-SO, representado por los Lineamientos Punta Morena, Sama, Calvario y Pabellones-Molles, que representan los rasgos estructurales más importantes y notorios en la Cordillera de la Costa (ver mapa 4 - anexo 1).

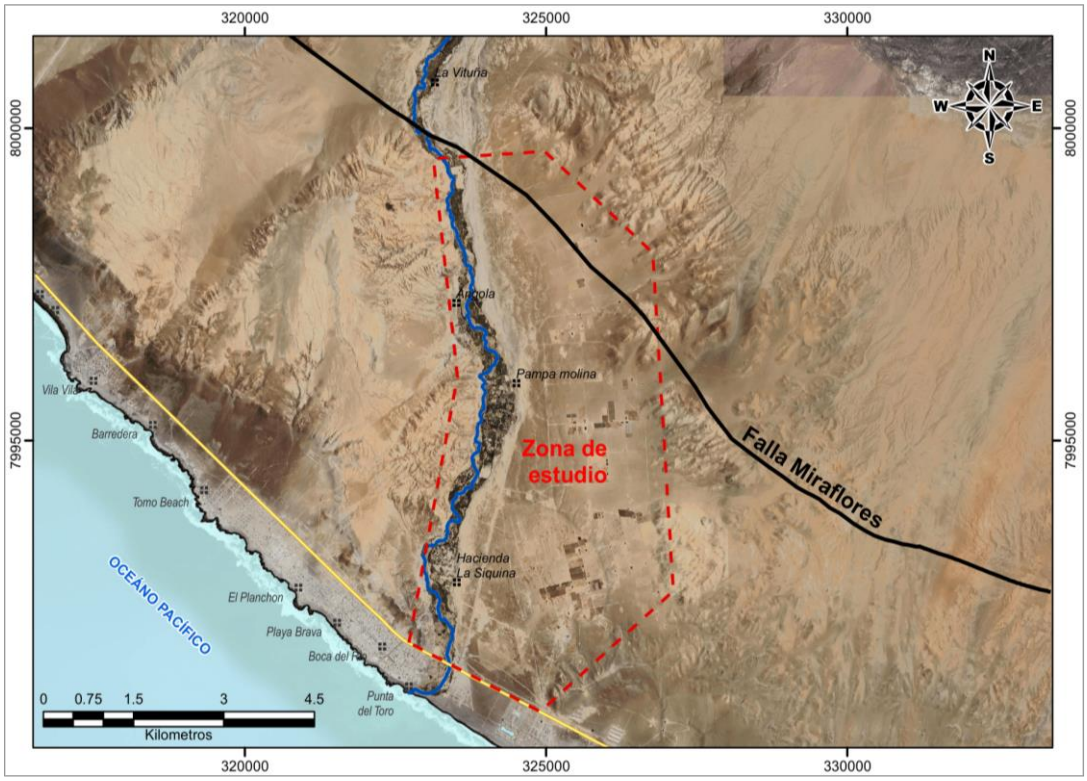
4.5.1. Falla Miraflores

Es una de las fallas más importantes de nuestra región de Tacna. Se extiende con dirección NO-SE pasando por los cerros Moreno, La Mina, Siete

Colores, Miraflores, Los Pabellones y La Yarada (figura 39), afectando a los afloramientos de edad jurásica en la cordillera de la costa.

Figura 39

Escarpe de la falla Miraflores a lo largo de la zona de estudio



Nota. Elaboración propia

Según el INGEMMET (2012), se trata de una importante falla inversa o de sobreescurrimiento cuyas medidas de buzamiento en el sector de morro Sama alcanzan a medir hasta los 45º hacia el noreste. Por el sector de quebrada del río Sama y cerro Miraflores esta falla adquiere buzamientos entre 30º y 20º hacia el noreste, apreciándose un mayor desplazamiento evidenciado por el cabalgamiento de la Formación Chocolate sobre las formaciones geológicas

Socosani y Puente-Cachios. En los afloramientos observados en las rocas volcánicas del litoral se puede apreciar numerosas fallas menores que hacen repetir secuencias de rocas volcánicas y sedimentarias, siendo, por lo general, el nivel de despegue las delgadas secuencias sedimentarias; estas fallas a la vez se comportan como el conducto para el emplazamiento de rocas intrusivas.

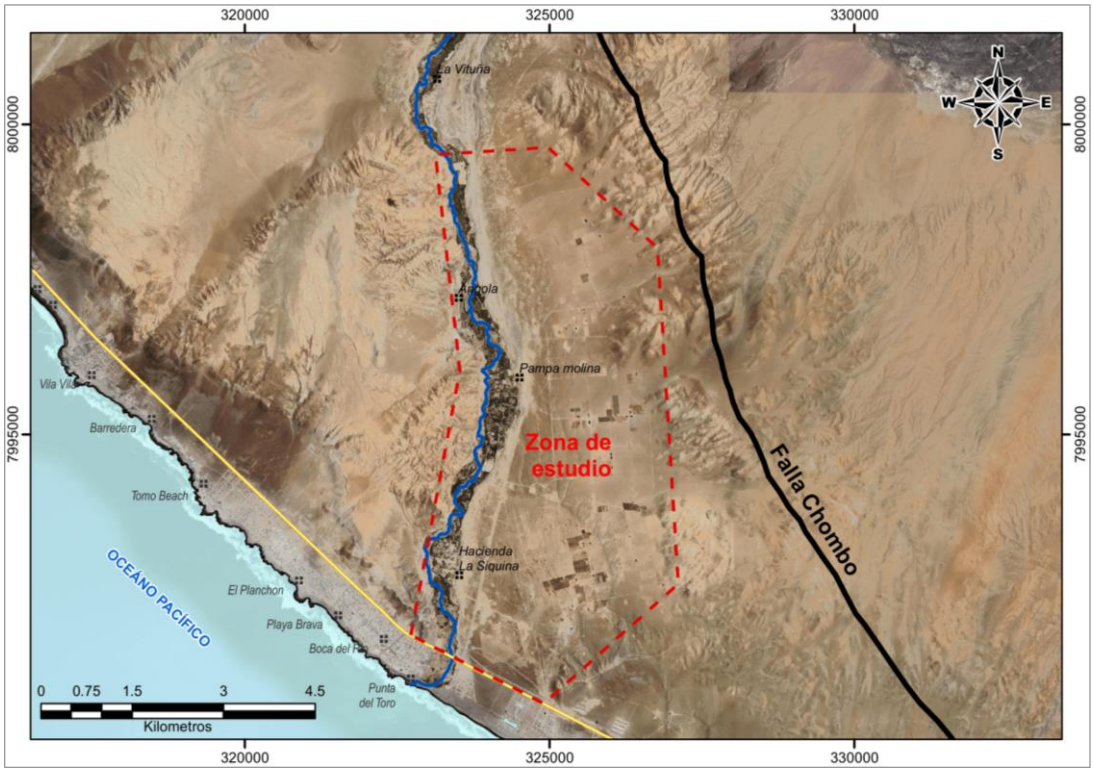
4.5.2. Falla Chombo

Se extiende en la margen izquierda del río Sama con dirección NO-SE. Esta falla o cabalgamiento de aparente carácter local se divisa en los cerros Siete Colores y Miraflores (Figura 40).

Según el INGEMMET (2012) es de tipo inversa, con buzamientos entre 30º y 20º hacia el NE, de aparente movimiento dextral. Tiene escaso desplazamiento vertical, puesto que, pone en contacto distintas secuencias de rocas pertenecientes a las formaciones Puente-Cachios. Entre los cerros Siete Colores y Miraflores se observa dos situaciones distintas: La primera interpretación correspondería a que esta falla corta a la falla Miraflores convirtiéndose por ende en una falla posterior y la segunda interpretación y la más aceptable corresponde a que la falla Chombo viene a formar parte de la falla Miraflores; por ende, esta falla representaría esfuerzos secundarios tipo R1 de la principal falla Miraflores.

Figura 40

Escarpe de la falla Chombo a lo largo de la zona de estudio



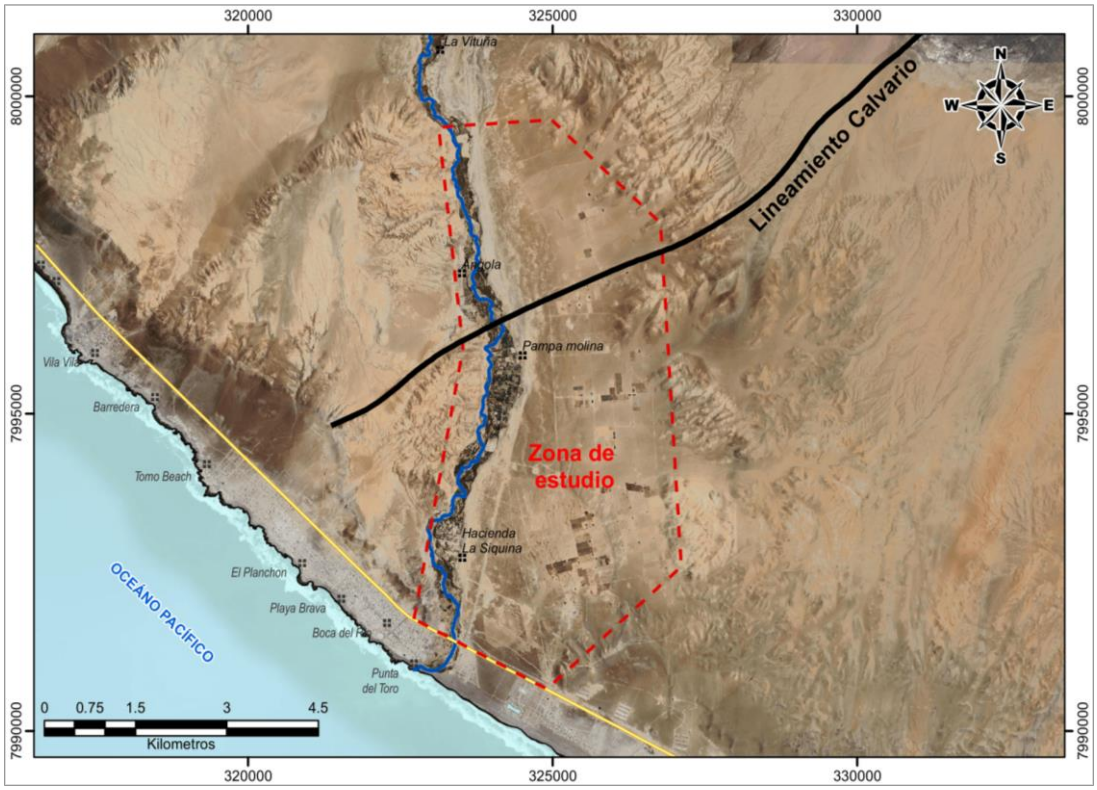
Nota. Elaboración propia.

4.5.3. Lineamiento Calvario

Este lineamiento tiene aproximadamente una dirección NE-SO y se le puede seguir desde la costa por el sector de Tomoyo al sureste de Vila Vila, atravesando por la ladera noroeste del cerro Fuerte Los Españoles, continuando su traza por el cerro Siete Colores con dirección hacia Alto de la Alianza donde su traza se vuelve menos notoria (INGEMMET, 2012). Ver figura 41.

Figura 41

Lineamiento Calvario a lo largo de la zona de estudio



Nota. Elaboración propia.

Geomorfológicamente, por el cerro Fuerte Los Españoles se observa a este lineamiento formando una quebrada donde los depósitos de materiales del bloque sureste están más elevados en relación al bloque noroeste, donde se desarrolla una zona amplia con depósitos de debris flow y abanicos aluviales (INGEMMET, 2012).

4.5.4. Lineamiento Los Pabellones – Magollo

Se extiende desde el límite de faja de litoral hacia la quebrada Magollo con dirección NE-SO. Este lineamiento en el cerro Pabellones se encuentra en rocas

volcánicas de la Formación Chocolate, extendiéndose hacia el NE y limitando la superficie Huaylillas y la planicie costera, antes de ingresar a la superficie Huaylillas propiamente dicha en el cerro Magollo (ANA, 2022).

4.5.5. Lineamiento Sama

El lineamiento Sama tiene una dirección NE-SO y una longitud de 80 km aprox. Se extiende desde el litoral, atravesando poblados como Curibaya, Candarave, Cairani e Ilabaya, intersectando con el sistema de fallas Incapuquio.

4.5.6. Lineamiento Punta Morena

Tiene una dirección NE-SO y está pasando por la ladera del cerro La Mina, continuando su traza por el cerro Chombo con dirección hacia la pampa Los Gredales. Este lineamiento intercepta en la ladera oeste del cerro La Mina, con el lineamiento Sama.

4.5.7. Diques

Las rocas intrusivas de la Superunidad Ilo afloran formando cuerpos elongados y diques, los cuales los hallamos entre los cerros Chombo, Siete Colores, Canicora y el Morro de Sama, incluyendo a diques ubicados en el litoral desde Boca del Río hasta el puerto de Ilo. Están compuestos de diorita con textura granular a porfirítica asociados al Lineamiento Sama de dirección ~40° N, la Falla Miraflores ~130° N y la Falla Chombo ~145° N. En el sector del cerro Siete Colores, estos diques cortan basaltos y andesitas, secuencias calcáreas, areniscas cuarzofeldespáticas intercaladas con delgados niveles de lutitas y limolitas de la Formación Chocolate, Socosani y Grupo Yura (INGEMMET, 2012).

4.6. Geología estructural local

Localmente, las principales estructuras geológicas identificadas en la zona de estudio son las fallas Miraflores y Chombo, así como, los lineamientos Calvario y Sama (ver mapa 5 – anexo 1), que de acuerdo a la ANA (2022) vienen afectando a la Formación Chocolate y a Plutones menores de la Superunidad Ilo, con los valores de intensidad y densidad bajos lo que permite catalogar esta estructura y su zona de daño, como poco favorable para la posible infiltración y circulación de flujo subterráneo de agua. Adicionalmente, se han mapeado algunas fallas inferidas en base a la interpretación geofísica. Estas estructuras son las que rigen la profundidad del basamento impermeable del acuífero.

4.7. Geología del subsuelo

Para la interpretación de la geología del subsuelo del sector Pampa Molina, se han elaborado un total de ocho (08) cortes geológicos: 04 regionales y 04 locales, en base a la información geológica de superficie, interpretación de sondajes électricos verticales y la litología de algunos pozos perforados en la zona.

4.7.1. Litología de pozos perforados en la zona

En la zona de estudio se cuenta con el perfil litológico de 03 pozos perforados: PP-01 proyecto Wayu Peru, pozo Rosita y PP-01 Laguna Azul. En la tabla 23 se presenta su ubicación y principales características técnicas.

Tabla 23

Coordenadas de ubicación pozos perforados en la zona de estudio

Pozos	Coordenadas UTM WGS 84		Prof. pozo (m)	Prof. N.E. (m)
	Este	Norte		
PP-01 Wayu Perú	324990	7993845	100	32,10
S/N-7 Rosita	325630	7992583	62	27,77
PP-01 Laguna Azul	324488	7990847	22	8,10

Nota. Elaboración propia

A continuación, se describe brevemente la litología de los pozos. La información a detalle se presenta en el anexo 3 del presente estudio.

4.7.1.1. Pozo PP-01 Wayu Perú

El pozo tubular PP-01 del proyecto Wayu Perú fue perforado por el método a percusión; tiene una profundidad de 100m y ha atravesado, desde la superficie, depósitos cuaternarios recientes. La litología encontrada se resume en la tabla 24.

Tabla 24

Descripción litológica pozo PP-01 Wayu Perú

Profundidad (m)	Litología
0 – 13	Arena, grava, canto rodado y limo, en estado seco. Regular a buena permeabilidad.
13 – 31	Arena y limo, en estado seco. Regular a baja permeabilidad.
31 – 46	Arena gruesa con grava redondeada, en matriz limosa. Regular permeabilidad
46 – 54	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limo-arcillosa. Baja a muy baja permeabilidad.
54 – 62	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.
62 – 80	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limo-arcillosa. Baja permeabilidad.
80 – 84	Arena con grava redondeada y canto rodado en matriz limo-arcillosa. Regular permeabilidad.
84 – 95	Grava redondeada con arena y canto rodado en matriz limo-arcillosa. Regular permeabilidad.
95 – 100	Canto rodado y grava redondeada en matriz limo-arcillosa. Regular permeabilidad.

Nota. Tomado de EMAP Ingenieros SAC

4.7.1.2. Pozo Rosita

El pozo Rosita fue perforado hasta los 62m de profundidad y ha atravesado depósitos cuaternarios recientes. En la tabla 25 se describe de manera resumida la litología encontrada:

Tabla 25

Descripción litológica pozo Rosita

Profundidad (m)	Litología
0 – 5	Arenas eólicas de color beige graduadas con limos, en estado suelto.
5 – 15	Intercalación de arenas finas en matriz limosas de color beige con lentes de arcilla de tono marrón compactos. Media a baja permeabilidad.
15 – 25	Intercalación de limos y arcillas compactas de color marrón de baja permeabilidad.
25 – 40	Arenas con presencia de gránulos y guijarros en una matriz arenosa fina, con presencia de lentes de arcillas y limos en forma aislada. Buena permeabilidad.
40 – 45	Arenas residuales bien clasificadas de regular permeabilidad graduados con limos de buena permeabilidad.
45 – 50	Arenas mal graduadas con guijas de buena permeabilidad y buena clasificación.
50 – 62	Arenas residuales de regular a baja permeabilidad graduados con fragmentos sub-angulosos de roca volcánica.

Nota. Tomado de Edwin Condori

4.7.1.3. Pozo PP-01 Laguna Azul

Se encuentra ubicado en la parte baja del sector evaluado, cerca al litoral, playa Llostay, margen izquierda de la carretera costanera. Tiene una profundidad de 22m. La litología del pozo corresponde a materiales del Cuaternario reciente, depósitos de playa, que se describen en la tabla 26.

Tabla 26

Descripción Litológica pozo PP-01 Laguna Azul

Profundidad (m)	Litología
0 – 3	Arena suelta con conchuela, en estado seco. Buena permeabilidad.
3 – 8	Arena con conchuela algo compacta, en estado seco. Buena permeabilidad.
8 – 13	Arena suelta y conchuela, en estado saturado. Buena permeabilidad.
13 – 17	Arena, gravilla y limo compactado, en estado saturado. Regular permeabilidad.
17 – 19	Arena y limo saturados. Regular permeabilidad.
19 – 22	Arena con grava saturada. Buena permeabilidad.

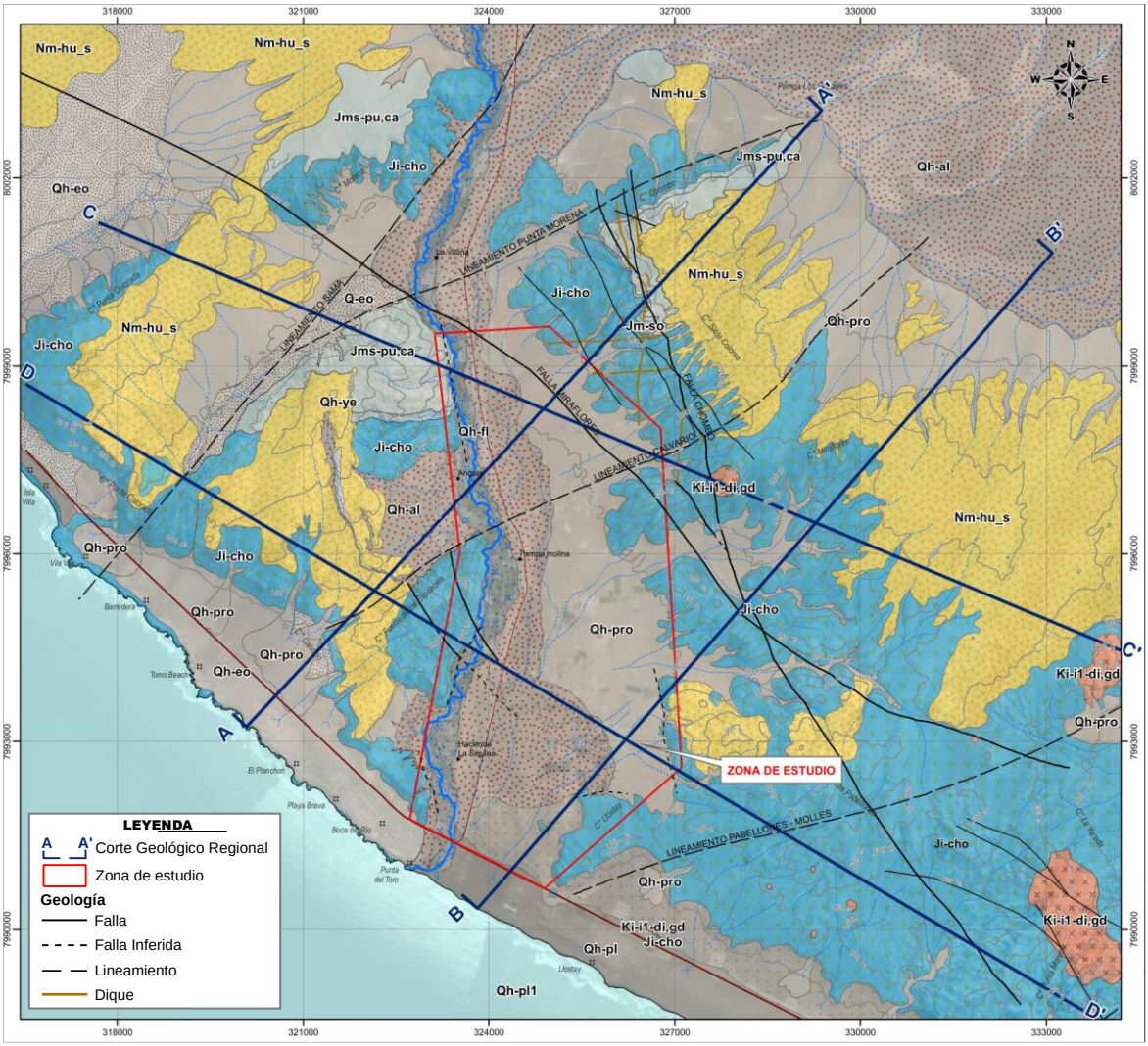
Nota. Tomado de EMAP Ingenieros SAC

4.7.2. Descripción de cortes geológicos regionales

Se han construido cuatro cortes geológicos A-A’, B-B’, C-C’ y D-D’ (figura 42), que detallan la extensión regional de las formaciones y estructuras geológicas, en comparación a la zona de estudio.

Figura 42

Ubicación de los cortes geológicos regionales



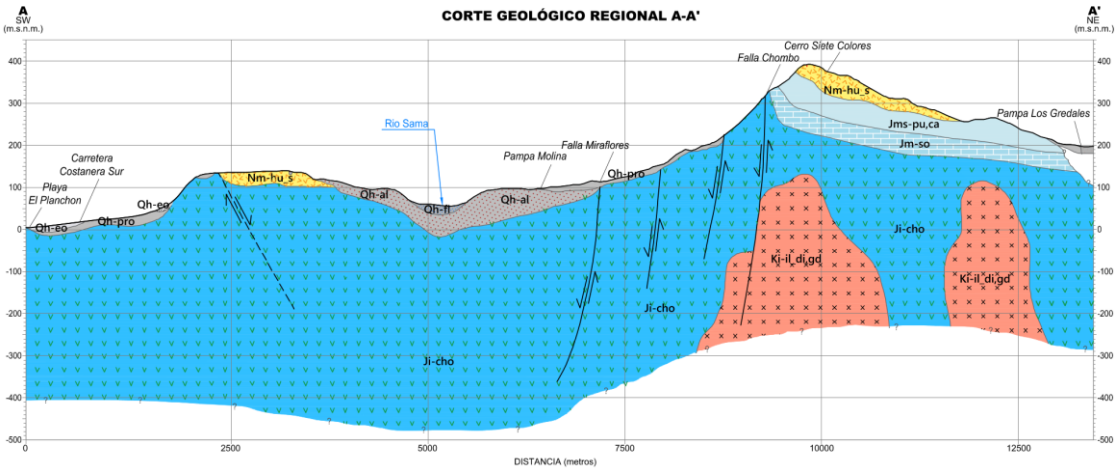
Nota. Elaboración propia

4.7.2.1. Corte geológico regional A-A’

Tiene una orientación SW - NE; se extiende desde la playa El Planchón hasta el sector pampa Los Gredales, en 13,40 km de longitud (ver figura 43 y mapa 6 - anexo 1).

Figura 43

Corte geológico regional A-A'



Nota. Elaboración propia

En su trayecto corta depósitos cuaternarios de materiales eólicos (Qh-eo), proluviales (Qh-pro), aluviales (Qh-al) y fluviales (Qh-fl), asi como, afloramientos rocosos de la Formación Huaylillas (Nm-hu_s), Formación Puente, Cachios (Jms-pu,ca) y Formación Chocolate (Ji-cho).

A la altura del sector Pampa Molina (progresiva km 7+300) la sección intersecta la falla Miraflores y a la altura del Cerro Siete Colores (progresiva km 9+300), la falla Chombo; afectando la secuencia estratigráfica anteriormente descrita.

A partir de la progresiva km 8+800 al km 12+800, afloran en superficie netamente rocas volcánicas de la Formación Huaylillas (Nm-hu_s), Formación Puente, Cachios (Jms-pu,ca) y Formación Chocolate (Ji-cho) y de la progresiva km 12+800 al km 13+400; la sección corta depósitos no consolidados de tipo aluvial/proluvial de la Pampa Los Gredales.

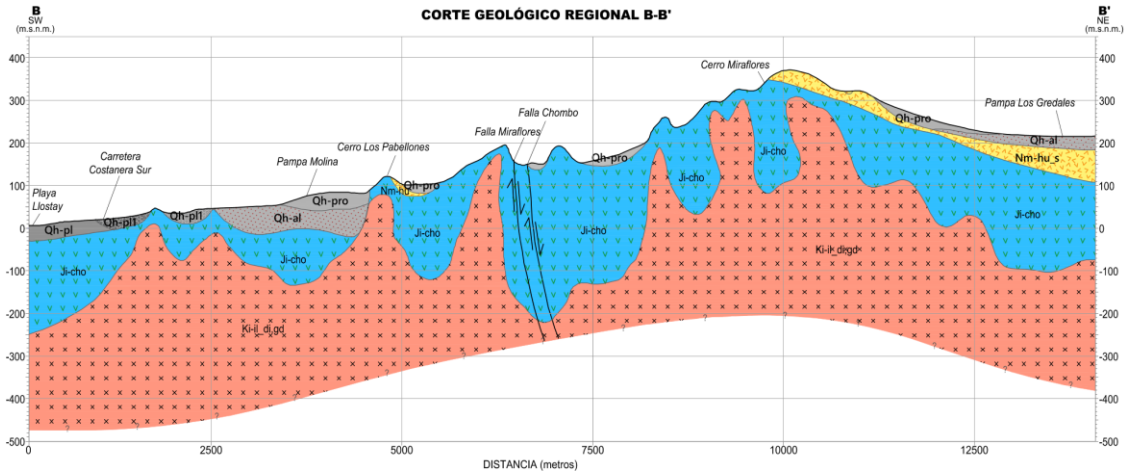
Las rocas identificadas en el corte geológico se comportan como una barrera hidraúlica natural que limitan la circulación del agua subterránea.

4.7.2.2. Corte geológico regional B-B’

Tiene una orientación SW - NE y se extiende desde playa Llostay hasta la pampa Los Gredales, en 14 km de longitud (ver figura 44 y mapa 7 - anexo 1).

Figura 44

Corte geológico regional B-B’



Nota. Elaboración propia

En su ruta atraviesa depósitos de playa (Qh-pl, Qh-pl1) y unidades no consolidadas del tipo aluvial (Qh-al) y proluvial (Qh-pro); así mismo, corta afloramientos rocosos de la Formación Huaylillas (Nm-hu_s) y Formación Chocolate (Ji-cho).

A la altura de la progresiva km 6+400, el corte geológico intersecta la falla Miraflores y en la progresiva km 6+600, la falla Chombo, las cuales se

encontrarían afectando a las rocas volcano-sedimentarias de la Formación Chocolate.

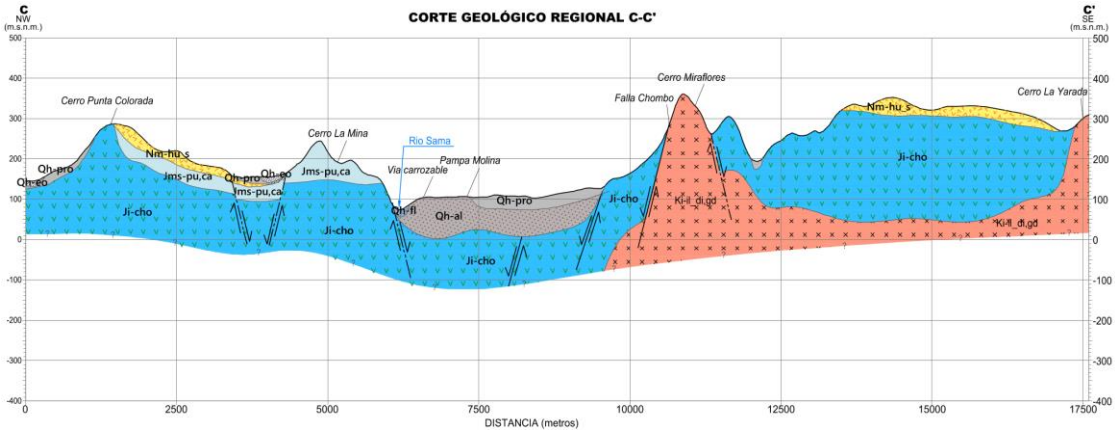
A partir de la progresiva km 9+900 al km 11+000, afloran en superficie rocas volcánicas de la Formación Huaylillas (Nm-hu_s) y de la progresiva km 11+000 al km 14+000, la sección corta depósitos no consolidados de tipo aluvial/proluvial del valle de la quebrada Chero; subyaciendo a estos depósitos, se presentan rocas volcánicas de la Formación Huaylillas (Nm-hu_s).

4.7.2.3. Corte geológico regional C-C’

Tiene una orientación NW - SE; se extiende desde el cerro Punta Colorada hasta el cerro La Yarada, en 17,50 km de longitud (ver figura 45 y mapa 8 - anexo 1).

Figura 45

Corte geológico regional C-C’



Nota. Elaboración propia

En su trayecto la línea del corte geológico atraviesa una serie de unidades litoestratigráficas cuyas edades van desde el Jurásico inferior hasta el Holoceno.

Estas unidades están representadas por las formaciones: Huaylillas (Nm-hu_s), Puente, Cachios (Jms-pu,ca), Chocolate (Ji-cho) y depósitos cuaternarios de tipo eólico (Qh-eo), proluvial (Qh-pro), aluvial (Qh-al) y fluvial (Qh-fl), que se encuentran rellenando el fondo de las quebradas, río Sama y/o cubriendo parcialmente las laderas de los cerros.

De la progresiva km 8+120 al km 11+820, la sección corta depósitos no consolidados de tipo fluvial, aluvial y proluvial de la Pampa Molina (zona de estudio); subyaciendo a estos depósitos, se presentan rocas de la Formación Chocolate (Ji-cho).

A partir de esta progresiva km 11+820 al km 17+500 afloran en superficie rocas volcánicas de la Formación Huaylillas (Nm-hu_s) y rocas volcano-sedimentarias de la Formación Chocolate (Ji-cho).

Entre las progresivas km 10+640 al km 11+270 y del km 17+370 al km 17+500 aflora un cuerpo intrusivo diorita/granodiorita, perteneciente al Batolito de la Costa/Super Unidad Ilo (Ki-il_di,gd), que estaría intruyendo a la Formación Chocolate (Ji-cho).

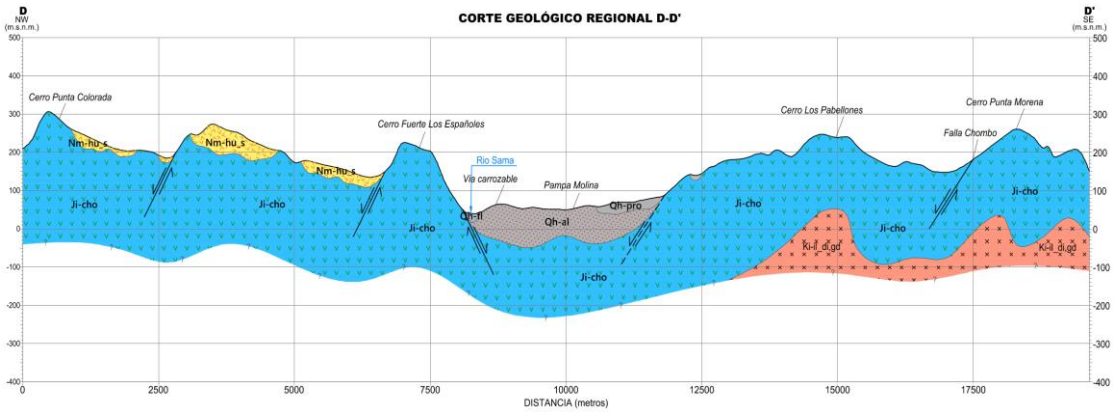
Una serie de fallas estarían afectando la secuencia litoestratigráfica que se expone a lo largo del corte geológico, entre las más importantes la falla Miraflores (progresiva km 8+220) y la falla Chombo (progresiva km 10+620).

4.7.2.4. Corte geológico regional D-D’

Tiene una orientación NW - SE; se extiende desde el cerro Punta Colorada hasta el cerro Punta Morena, en 19,66 km de longitud (ver figura 46 y mapa 9 - anexo 1).

Figura 46

Corte geológico regional D-D’



Nota. Elaboración propia

En su trayecto corta afloramientos rocosos de las Formaciones Huaylillas (Nm-hu_s) y Chocolate (Ji-cho), así como, depósitos cuaternarios de materiales proluviales (Qh-pro), aluviales (Qh-al) y fluviales (Qh-fl).

A partir de la progresiva km 0+000 al km 8+120 afloran en superficie rocas volcánicas de la Formación Huaylillas (Nm-hu_s) y rocas volcano-sedimentarias de la Formación Chocolate (Ji-cho).

De la progresiva km 8+120 al km 11+820, la sección corta depósitos no consolidados de tipo fluvial, aluvial y proluvial de la Pampa Molina (zona de estudio).

A partir de esta progesiva km 11+820, afloran en superficie netamente rocas volcano-sedimentarias de la Formación Chocolate (Ji-cho), que se comportan como una barrera hidraúlica natural que limitan la circulación del agua subterránea

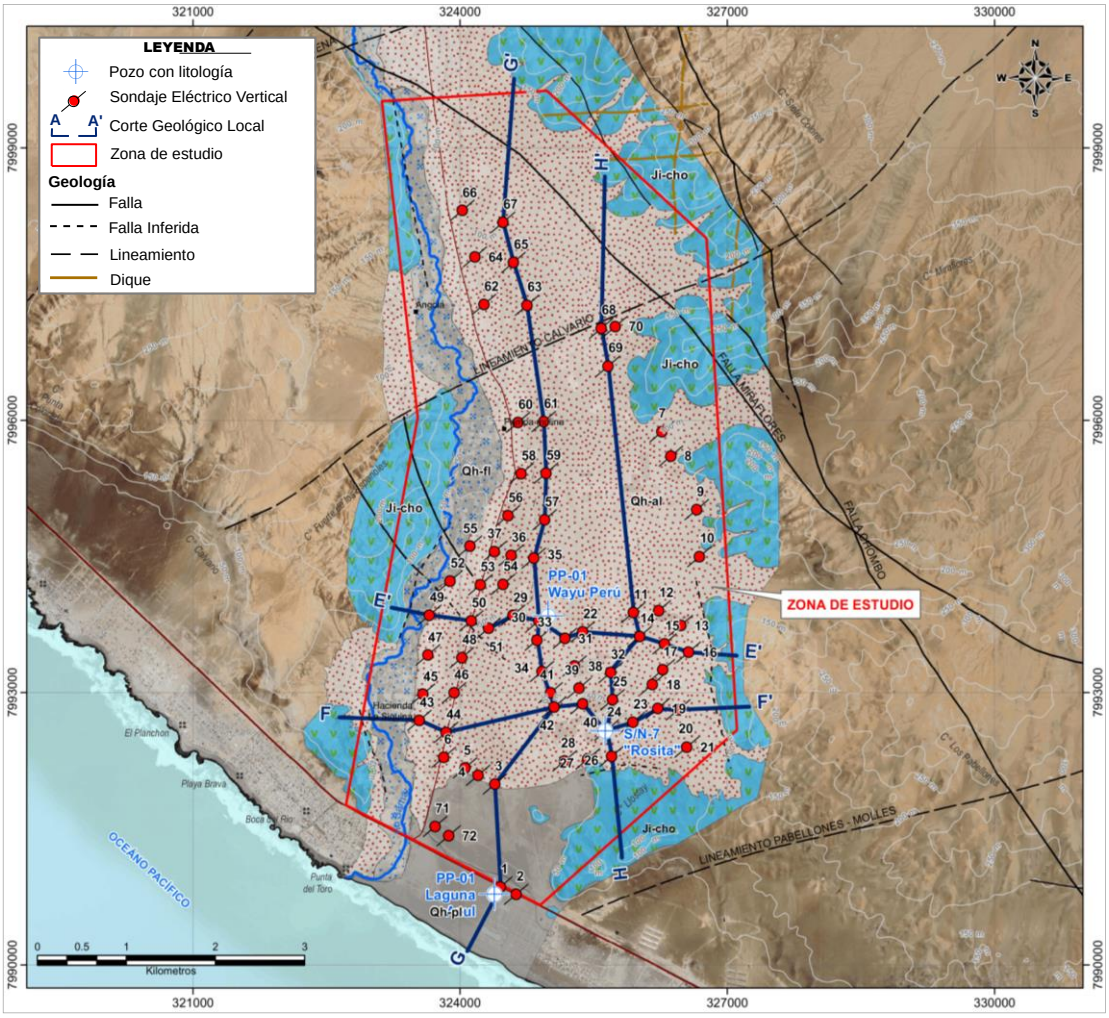
A la altura de la progresiva km 17+800, la sección intersecta la Falla Chombo, que se encontraría afectando a las rocas volcano-sedimentarias de la Formación Chocolate. Tambien, en la progresiva km 8+110 se intersecta una falla normal que forma parte del sistema de fallas que han conformado el reservorio subterráneo del sector Pampa Molina (zona de estudio).

4.7.3. Descripción de cortes geológicos locales

Para la interpretación de la geología del subsuelo del sector Pampa Molina, se han construido cuatro cortes geológicos locales E-E', F-F', G-G' y H-H' (ver figura 47), que se describen a continuación:

Figura 47

Ubicación de cortes geológicos locales



Nota. Elaboración propia

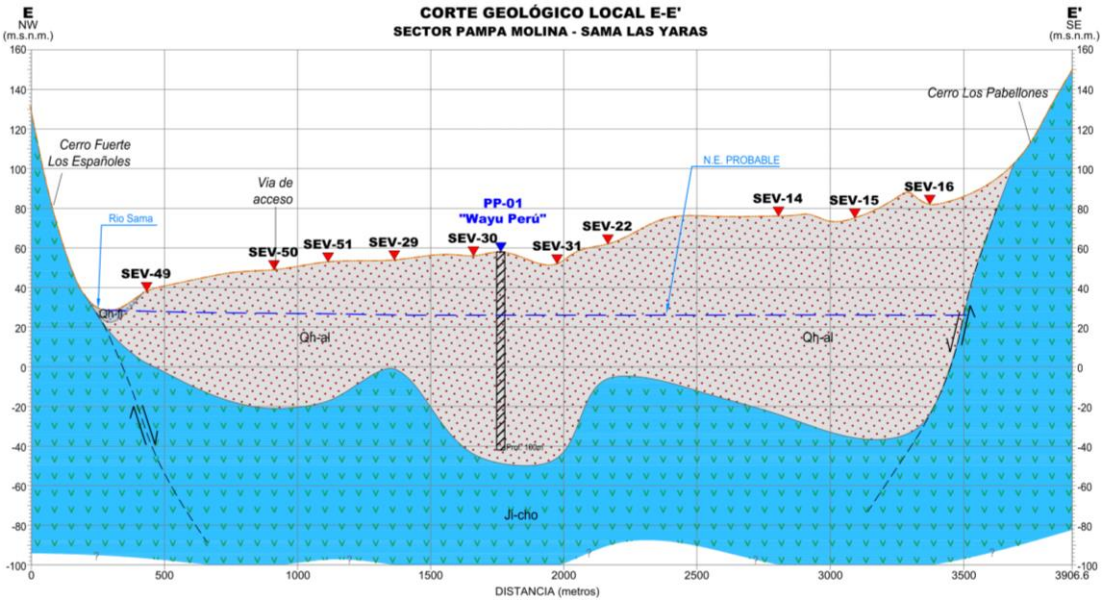
4.7.3.1. Corte geológico local E-E'

Este corte geológico fue elaborado con información procedente del mapeo geológico de superficie, litología del pozo PP-01 Wayu Perú y resultados de la interpretación de los SEVs 49, 50, 51, 29, 30, 31, 22, 14, 15 y 16.

Tiene una orientación NW – SE, perpendicular a la dirección de flujo del rio Sama; se extiende desde el cerro Fuerte Los Españoles hasta el cerro Los Pabellones, en 3907m de longitud (ver figura 48 y mapa 10 – anexo 1).

Figura 48

Corte geológico local E-E'



Nota. Elaboración propia

En superficie atraviesa depósitos inconsolidados del Cuaternario reciente: aluviales (Qh-al) y fluviales (Qh-fl); debajo de las cuales subyace la secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Chocolate (Ji-cho). En los cerros Fuerte Los Españoles y Los Pabellones se presentan afloramientos rocosos de la Formación Chocolate.

El pozo PP-01 Wayu Perú alcanzó la profundidad de 100m, hasta llegar al basamento impermeable de la Formación Chocolate.

De acuerdo a los sondajes eléctricos verticales, se estima que la potencia de los depósitos aluviales estaría en el orden de los 36m a 111m, debajo del cual se encontraría el basamento rocoso impermeable.

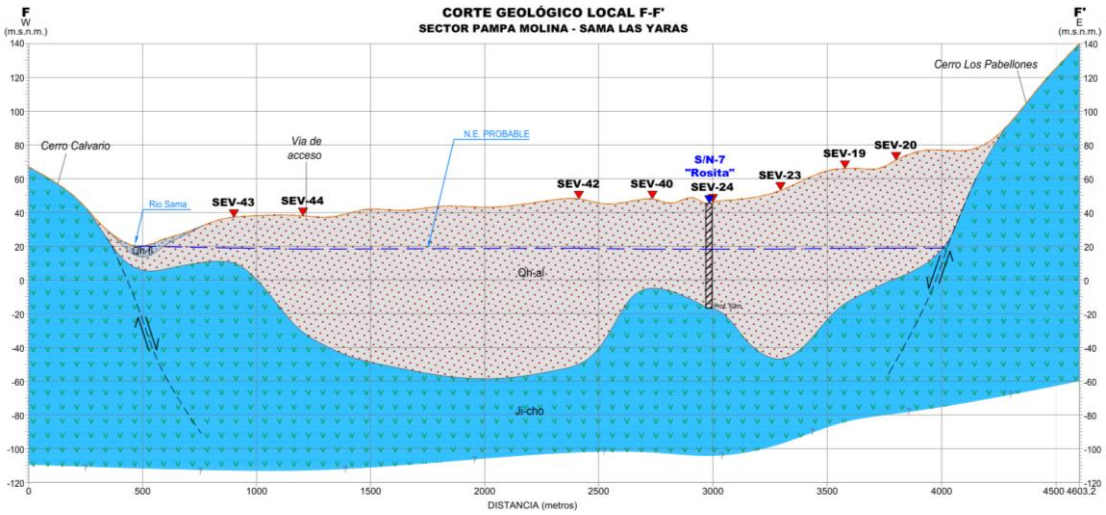
4.7.3.2. Corte geológico local F-F’

Este corte geológico fue elaborado con información procedente del mapeo geológico de superficie, litología del pozo Rosita y resultados de la interpretación de los SEVs 43, 44, 42, 40, 24, 23, 19 y 20.

Tiene una orientación W – E, perpendicular a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro Calvario hasta el cerro Los Pabellones, en 4603m de longitud (ver figura 49 y mapa 11 – anexo 1).

Figura 49

Corte geológico local F-F’



Nota. Elaboración propia

En superficie corta depósitos inconsolidados del Cuaternario reciente: aluviales (Qh-al) y fluviales (Qh-fl); debajo de las cuales subyace la secuencia de

rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Chocolate (Ji-cho). En los cerros Calvario y Los Pabellones se presentan afloramientos rocosos de la Formación Chocolate.

El pozo S/N-7 Rosita alcanzó la profundidad de 62m, hasta llegar al basamento impermeable de la Formación Chocolate.

De acuerdo a los sondajes eléctricos verticales, se estima que la potencia de los depósitos aluviales estaría en el orden de los 27m a 100m, debajo del cual se encontraría el basamento rocoso impermeable.

4.7.3.3. Corte geológico local G-G'

Este corte geológico fue elaborado con información procedente del mapeo geológico de superficie, litología de los pozos PP-01 Laguna Azul y PP-01 Wayu Perú e interpretación de los SEVs 1, 3, 42, 34, 33, 30, 35, 57, 59, 61, 63, 65 y 67.

Tiene una orientación S - N paralela a la dirección del rio Sama; se extiende desde el mar hasta el cerro Siete Colores, en 9807m de longitud (ver figura 50 y mapa 12 – anexo 1).

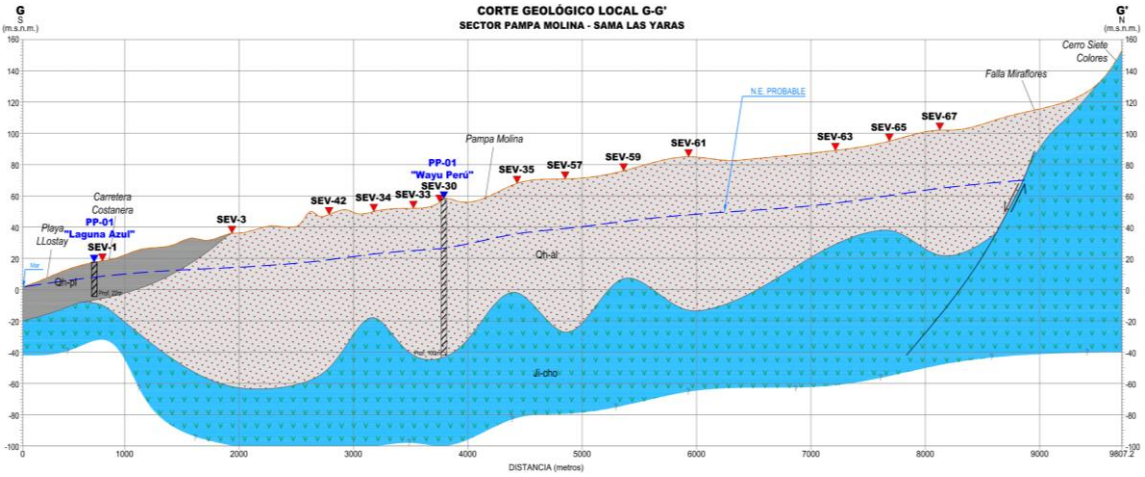
En superficie corta depósitos de playa (Qh-pl) y unidades no consolidadas del tipo aluvial (Qh-al); debajo de las cuales subyace la secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Chocolate (Ji-cho).

En el sector de playa Llostay el pozo PP-01 del proyecto Laguna Azul alcanzó la profundidad de 22m, atravesando depósitos de playa (Qh-pl, Qh-pl1) y en el sector Pampa Molina, el pozo PP-01 Wayu Perú alcanzó una profundidad de

62m, atravesando depósitos aluviales (Qh-al), hasta llegar al basamento impermeable de la Formación Chocolate.

Figura 50

Corte geológico local G-G'



Nota. Elaboración propia

De acuerdo a los sondajes eléctricos verticales, se estima que la potencia de los depósitos aluviales estaría en el orden de los 57m a 100m y de los depósitos de playa, de 28m, debajo de los cuales se encontraría el basamento rocoso impermeable.

A la altura de la progresiva km 8+900, el corte geológico intersecta la falla Miraflores, que estaría afectando a las rocas de la Formación Chocolate.

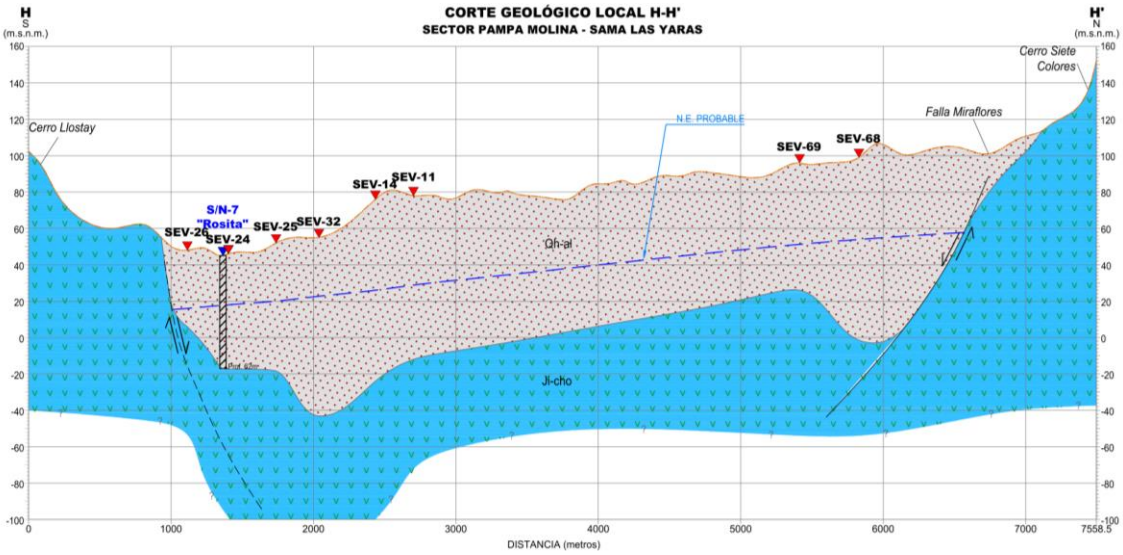
4.7.3.4. Corte geológico local H-H'

Este corte geológico fue elaborado con información procedente del mapeo geológico de superficie, litología del pozo Rosita y resultados de la interpretación de los SEVs 26, 24, 25, 32, 14, 11, 69 y 68.

Tiene una orientación S – N, paralela a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro Llostay hasta el cerro Siete Colores, en 7758m de longitud (ver figura 51 y mapa 13 – anexo 1).

Figura 51

Corte geológico local H-H'



Nota. Elaboración propia

En superficie corta depósitos aluviales (Qh-al); debajo de los cuales subyace la secuencia de rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Chocolate (Ji-cho). En los cerros Llostay y Siete Colores se presentan afloramientos rocosos de la Formación Chocolate.

El pozo S/N-7 Rosita alcanzó la profundidad de 62m, hasta llegar al basamento impermeable de la Formación Chocolate.

De acuerdo a los sondajes eléctricos verticales, se estima que la potencia de los depósitos aluviales estaría en el orden de los 42m a 100m, debajo de los cuales se encontraría el basamento rocoso impermeable.

A la altura de la progresiva km 6+700, el corte geológico intersecta la falla Miraflores, que estaría afectando a las rocas de la Formación Chocolate.

Capítulo V: Prospección geofísica

5.1. Método geofísico

El método geofísico empleado para la presente investigación fue el de Resistividad Eléctrica, en su variante de sondajes eléctricos verticales (SEVs), con dispositivo simétrico Schlumberger. Esta metodología es muy utilizada por instituciones del estado como la ANA (ex INRENA) y PET, para determinar los distintos estratos geoeléctricas del subsuelo en dirección vertical y definir la geometría del acuífero.

5.2. Equipo utilizado

Se utilizó un georesistivímetro marca WargPower, de fabricación estadounidense, con un alcance de investigación de 500m de profundidad, con las siguientes especificaciones técnicas:

- Pantalla digital
- Circuito de medición que anula los eventuales potenciales espontáneos naturales (corrientes parásitas).
- Constituido por un transmisor y receptor.
- Fuente de alimentación, mediante baterías en serie con un máximo de salida de 500 voltios.
- Efectúa medidas del potencial (ΔV) de diferentes rangos de 0.2 a 1000 Voltios, en corriente continua; y medidas diferentes de intensidad (I) desde 02 amperios a 10 amperios, en corriente continua.
- Swich de salida de 6 rangos diferentes hasta un máximo de 500 voltios.

Accesorios:

- 02 Carretes de cables de 500 m cada uno para A - B.
- 01 Carretes con cable de diferentes tamaños para M y N.
- 08 Electrodos de acero inoxidable.
- 02 Combas de 08 lb y 01 Wincha de 50m.
- 01 Maletín de herramientas.

5.3. Adquisición de datos de campo

En el área de estudio se han realizado un total de 72 Sondajes Eléctricos verticales (SEVs), los cuales se ejecutaron en diferentes campañas, entre el año 2014 al 2024 por privados, como el Ing. Walther Pacheco, Ing. Alejandro Mita y principalmente por la empresa Edgar Manuel Acosta Pinto Ingenieros SAC, contando en la mayoría de ellas con la participación de la tesista. En la tabla 27 se presenta la ubicación en coordenadas UTM WGS 84 de los SEVs.

El AB/2 empleado fue de 1m, 3m, 5m, 7m y 10m hasta 50m, 100m, 150m, 200m y 300m, con un MN de 1m, 1.5m, 15m y 50m; con esta disposición de electrodos se logró investigar hasta los 50m, 100m, 150m, 200m y 300m de profundidad.

Tabla 27

Coordenadas de ubicación de los sondajes eléctricos verticales ejecutados en la zona de estudio

SEV	Coordenadas UTM WGS 84		Cota Terreno m.s.n.m.	SEV	Coordenadas UTM WGS 84		Cota Terreno m.s.n.m.
	Este	Norte			Este	Norte	
SEV-1	324457	7990862	23	SEV-28	325175	7992245	40
SEV-2	324632	7990781	23	SEV-29	324596	7993850	54
SEV-3	324393	7991993	36	SEV-30	324888	7993794	56
SEV-4	324207	7992092	34	SEV-31	325180	7993601	52
SEV-5	324061	7992171	34	SEV-32	325694	7993222	55
SEV-6	323820	7’992287	33	SEV-33	324867	7993580	52
SEV-7	326268	7995875	88	SEV-34	324923	7993232	50
SEV-8	326369	7995607	95	SEV-35	324834	7994486	68
SEV-9	326659	7995017	93	SEV-36	324580	7994515	68
SEV-10	326691	7994500	96	SEV-37	324390	7994556	69
SEV-11	325950	7993884	79	SEV-38	325287	7993292	47
SEV-12	326233	7993901	83	SEV-39	325337	7993054	50
SEV-13	326481	7993741	77	SEV-40	325381	7992877	48
SEV-14	326020	7993621	76	SEV-41	325020	7993001	51
SEV-15	326298	7993539	75	SEV-42	325059	7992843	48
SEV-16	326571	7993446	82	SEV-43	323546	7992697	37
SEV-17	326278	7993252	75	SEV-44	323847	7992563	38
SEV-18	326164	7993094	70	SEV-45	323586	7992984	36
SEV-19	326223	7992824	66	SEV-46	323935	7993001	40
SEV-20	326450	7992812	71	SEV-47	323639	7993414	42
SEV-21	326546	7992400	76	SEV-48	324023	7993384	45
SEV-22	325381	7993669	62	SEV-49	323658	7993856	38
SEV-23	325943	7992672	53	SEV-50	324132	7993791	49
SEV-24	325649	7992588	45	SEV-51	324326	7993710	53
SEV-25	325714	7992922	52	SEV-52	323890	7994230	44
SEV-26	325707	7992300	48	SEV-53	324230	7994190	64
SEV-27	325434	7992266	46	SEV-54	324486	7994194	66

SEV	Coordenadas UTM WGS 84		Cota Terreno m.s.n.m.
	Este	Norte	
SEV-55	324116	7994613	49
SEV-56	324542	7994949	70
SEV-57	324951	7994906	71
SEV-58	324692	7995414	74
SEV-59	324969	7995417	76
SEV-60	324654	7995977	79
SEV-61	324942	7995986	85
SEV-62	324272	7997278	91
SEV-63	324755	7997269	89
SEV-64	324171	7997801	97
SEV-65	324603	7997740	95
SEV-66	324026	7998311	100
SEV-67	324483	7998182	102
SEV-68	325588	7997015	99
SEV-69	325665	7996599	96
SEV-70	325742	7997035	104
SEV-71	323723	7991525	24
SEV-72	323876	7991427	26

Nota. Elaboración propia

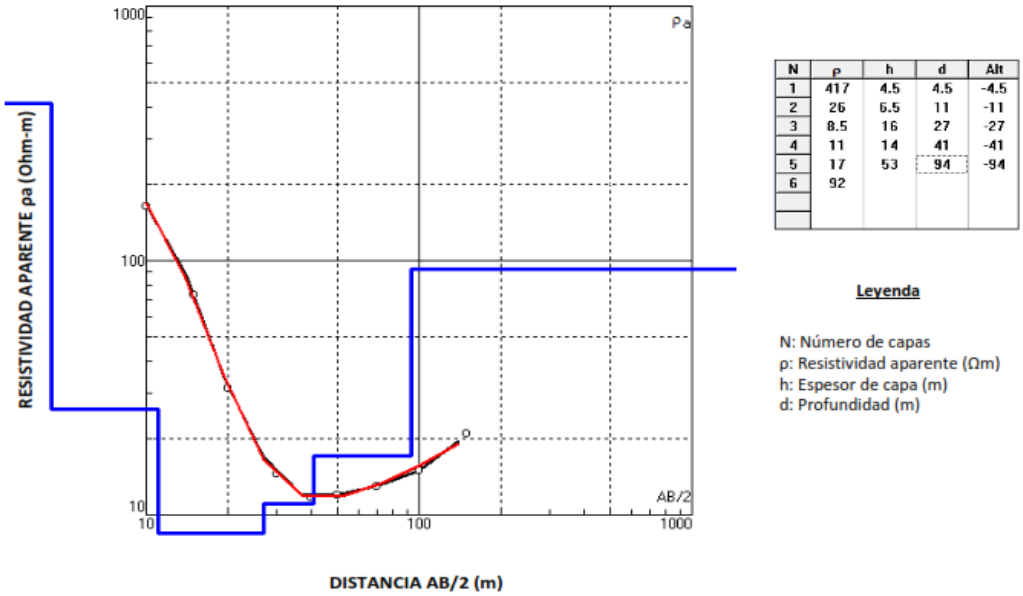
5.4. Procesamiento e interpretación de datos de campo

La información obtenida en campo ha sido interpretada cuantitativamente mediante la comparación iterativa con curvas patrón de SEVs sobre terrenos estratificados elaborados por Orellana y Money y procesada en el software especializado en resistividad eléctrica IPI2WIN de origen Ruso, con el criterio hidrogeológico y conocimiento de la geología de la zona. En el anexo 2 se adjuntan los gráficos de la interpretación cuantitativa de los SEVs.

En la figura 52 se observa a la izquierda en color negro la curva de resistividad aparente que se obtiene en campo y en color rojo la curva ajustada en el software IPI2WIN (curva de resistividad verdadera). Cada componente horizontal de la curva, representa a las capas geoeléctricos y los componentes verticales indican un cambio de capa por su variación en la resistividad del material que lo conforma. A la derecha se observa la tabla de resistividades y espesores de cada una de las capas geoeléctricas interpretadas. La última capa solo tiene valor de resistividad, su espesor es considerado indeterminado debido a la profundidad de investigación y a que no se detectó una capa inferior distinta porque la corriente no llegó más abajo. Por lo tanto, el software asume que esta última resistividad medida se extiende al infinito.

Figura 52

Curva del SEV-33 interpretada en el software IPI2WIN



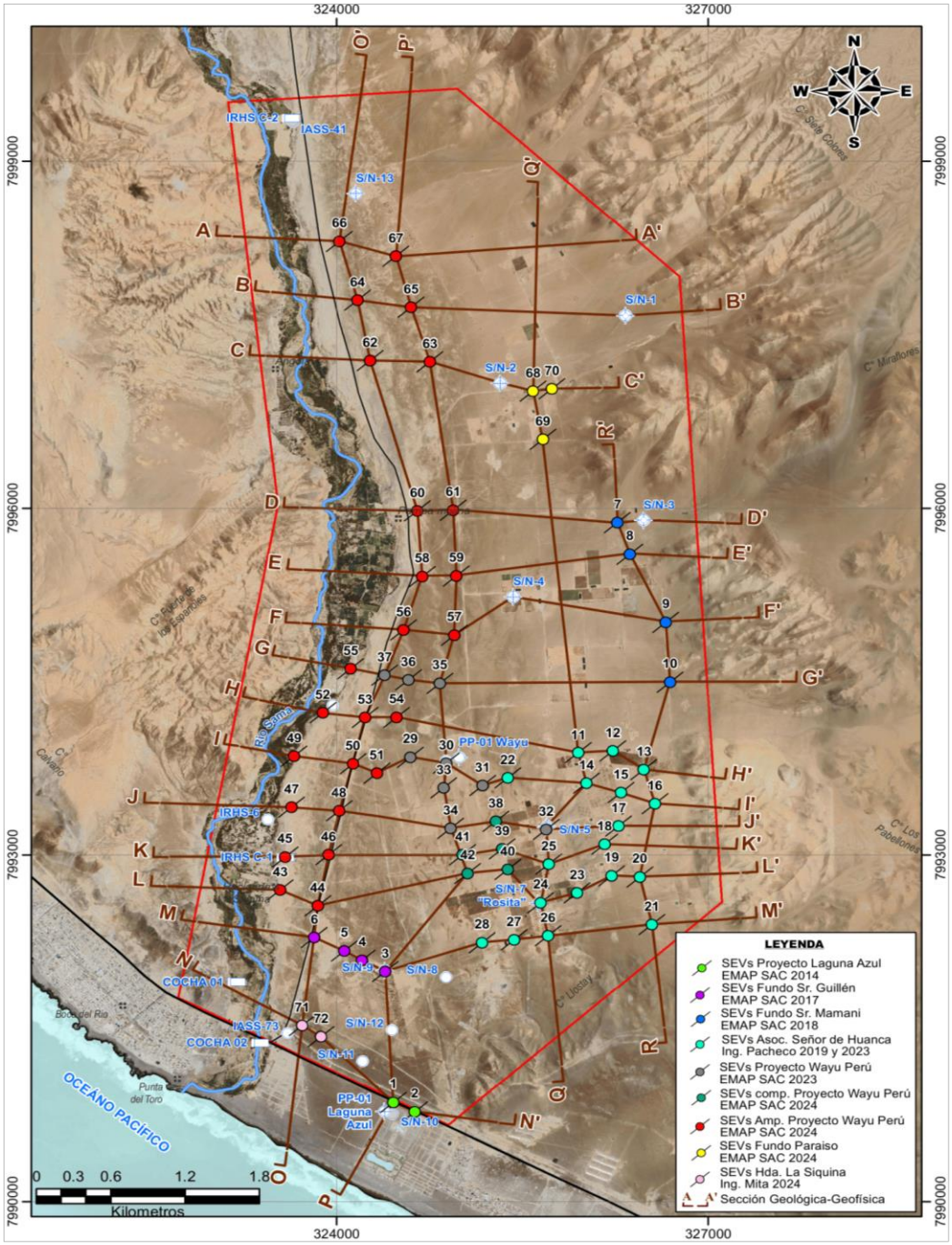
Nota. Se observa inversión de la curva valores de campo. Elaboración propia

Con los resultados obtenidos se construyeron dieciocho (18) secciones geológicas-geofísicas longitudinales y transversales a la dirección de flujo del río Sama (ver figura 53 y mapa 14 – anexo 1); según el detalle siguiente:

- Sección A - A': SEVs 66 y 67
- Sección B - B': SEVs 64 y 65
- Sección C - C': SEVs 62, 63, 68, 70
- Sección D - D': SEVs 60, 61 y 7
- Sección E - E': SEVs 58, 59 y 8
- Sección F - F': SEVs 56, 57 y 9
- Sección G - G': SEVs 55, 37, 36, 35 y 10
- Sección H - H': SEVs 52, 53, 54, 11, 12 y 13
- Sección I - I': SEVs 49, 50, 51, 29, 30, 31, 22, 14, 15 y 16
- Sección J - J': SEVs 47, 48, 34, 38, 32 y 17
- Sección K - K': SEVs 45, 46, 41, 39, 25 y 18
- Sección L - L': SEVs 43, 44, 42, 40, 24, 23, 19 y 20
- Sección M - M: SEVs 6, 5, 4, 3, 28, 27, 26 y 21
- Sección N - N': SEVs 71, 72, 1 y 2
- Sección O-O': SEVs 71, 6, 44, 46, 48, 50, 53, 37, 56, 58, 60, 62, 64, 66
- Sección P - P': SEVs 1, 3, 42, 34, 33, 30, 35, 57, 59, 61, 63, 65 y 67
- Sección Q - Q': SEVs 26, 24, 25, 32, 14, 11, 69 y 68
- Sección R - R': SEVs 21, 20, 16, 13, 10, 9, 8 y 7

Figura 53

Ubicación de SEVs y secciones geológicas – geofísicas



Nota. Elaboración propia

5.5. Correlación de sondajes eléctricos verticales y perfiles litológicos de pozos

Para validar los datos geofísicos obtenidos de la interpretación de Sondajes Eléctricos Verticales (método indirecto) y definir los horizontes del reservorio subterráneo de la zona de estudio; se correlacionó la litología de 03 pozos existentes (método directo): PP-01 Laguna Azul, PP-01 Proyecto Wayu Peru y S/N-7 Rosita con los valores georesistivos de los sondajes paramétricos SEV-1, SEV-33 y SEV-24, respectivamente.

Criterios de correlación

- Se compararon las curvas de resistividad con los perfiles litológicos de los pozos, delimitando los principales cambios litológicos en base al valor de resistividad obtenido.
- El cambio en la morfología de la curva de resistividad fue un indicativo del contacto entre una capa y otra.
- Se relacionaron los valores de resistividad con un tipo de material, por ejemplo arcilla/limo = 1-10 ohm-m.
- Se agruparon valores similares de resistividad asumiendo que pertenecen a una misma capa litoestratigráfica, tomando en consideración la geologia local.
- El cambio brusco de una resistividad baja a una resistividad alta indicó el contacto entre sedimentos finos y gruesos con el material de roca.

Coincidencias

- El nivel freático medido en los pozos coincidieron con el descenso de la resistividad, lo cual indicaba el cambio de la zona no saturada a la zona saturada.
- Solo en el pozo PP-01 Wayu Perú y S/N-7 Rosita se alcanzó al basamento rocoso, cuyas profundidades coincidieron con el aumento de la resistividad registrada en los SEVs.

Discrepancias

- Los SEVs han integrado varias capas de poco espesor en una sola, mientras que en los pozos podemos ver capas a mayor detalle.
- Los SEVs nos da información puntual en 1D (vertical), pero las resistividades pueden diferir lateralmente.
- Las resistividades bajas obtenidas pueden indicar material fino como arcilla y/o limo, pero a su vez material de arena saturada con agua salobre o salina, lo que puede generar una falsa interpretación, más aún que solo se cuentan con 03 perfiles litológicos que están ubicados en la parte media y baja de la zona de estudio, quedando sin información litológica la parte alta; motivo por el cual es indispensable contar con información adicional de pozos cercanos y considerar la geología de la zona.

5.6. Resultados obtenidos

Los resultados de la interpretación cuantitativa de los SEVs en términos de resistividad verdadera y espesor de los diferentes horizontes geoeléctricos identificados, se muestran en la tabla 28.

Tabla 28

Resultados de la interpretación cuantitativa de los sondajes eléctricos verticales ejecutados en el sector Pampa Molina

SEVs		Horizontes geoeléctricos			
		H1	H2	H3	H4
SEV-1	ρ (Ohm-m)	9627-1213	232	54	617
	E (m)	1,7-2,3	5	19	?
	Σ (m)	1,7-4	9	28	?
SEV-2	ρ (Ohm-m)	460-619-325	69	60	995
	E (m)	1-2-2	5	13	?
	Σ (m)	1-3-5	10	23	?
SEV-3	ρ (Ohm-m)	9,3-3,8	27	20-15	40
	E (m)	1,5-6,5	14	28-48	?
	Σ (m)	1,5-8	22	50-98	?
SEV-4	ρ (Ohm-m)	26	9	14-10	68
	E (m)	5	15	17-13	?
	Σ (m)	5	20	37-50	?
SEV-5	ρ (Ohm-m)	6,5	15	12	44
	E (m)	5	14	20	?
	Σ (m)	5	19	39	?
SEV-6	ρ (Ohm-m)	15	18	11	45
	E (m)	6	12	27	?
	Σ (m)	6	18	45	?
SEV-7	ρ (Ohm-m)	1370-158-26	7	11	50
	E (m)	5-10-13	24	22	?
	Σ (m)	5-15-28	52	74	?

SEVs		Horizontes geoeléctricos			
		H1	H2	H3	H4
SEV-8	ρ (Ohm-m)	829-193	11-6	8	49
	E (m)	6-11	11-23	24	?
	Σ (m)	6-17	28-51	75	?
SEV-9	ρ (Ohm-m)	583-168	15-11	13	30
	E (m)	6-10	15-22	47	?
	Σ (m)	6-16	31-53	100	?
SEV-10	ρ (Ohm-m)	876-177-39	14	11	45
	E (m)	12-9-18	21	40	?
	Σ (m)	12-21-39	60	100	?
SEV-11	ρ (Ohm-m)	1790-128-23	10	13	73
	E (m)	6-8-15	20	41	?
	Σ (m)	6-14-29	49	90	?
SEV-12	ρ (Ohm-m)	798-204-27	10	12	57
	E (m)	8-8-14	24	46	?
	Σ (m)	8-16-30	54	100	?
SEV-13	ρ (Ohm-m)	334-205-116	55	21	100
	E (m)	7-8-13	20	62	?
	Σ (m)	7-15-28	48	110	?
SEV-14	ρ (Ohm-m)	899-184-30	10	14	51
	E (m)	9-7-14	20	50	?
	Σ (m)	9-16-30	50	100	?
SEV-15	ρ (Ohm-m)	1060-780-133	20	11	120
	E (m)	10-5-12	22	62	?
	Σ (m)	10-15-27	49	111	?
SEV-16	ρ (Ohm-m)	630-240-52	13	10	75
	E (m)	9-11-12	24	55	?
	Σ (m)	9-20-32	56	111	?
SEV-17	ρ (Ohm-m)	249-66-34	18	15-18	29
	E (m)	8-5-12	27	34-44	?
	Σ (m)	8-13-25	52	86-130	?
SEV-18	ρ (Ohm-m)	521-45-25	17	11-15	52
	E (m)	3,5-6,5-10	30	47-33	?
	Σ (m)	3,5-10-20	50	97-130	?

SEVs		Horizontes geoeléctricos				
		H1	H2	H3		H4
SEV-19	ρ (Ohm-m)	1370-39-22	14-10	12		37
	E (m)	2,6-5,4-6	6-27	33		?
	Σ (m)	2,6-8-14	20-47	80		?
SEV-20	ρ (Ohm-m)	352-118-44	6	10		104
	E (m)	6-4-10	32	18		?
	Σ (m)	6-10-20	52	70		?
SEV-21	ρ (Ohm-m)	1130-203-37	13	17		63
	E (m)	11-3-10	36	45		?
	Σ (m)	11-14-24	60	105		?
SEV-22	ρ (Ohm-m)	579-103	48	30-15		130
	E (m)	4,3-11,7	20	14-18		?
	Σ (m)	4,3-16	36	50-68		?
SEV-23	ρ (Ohm-m)	340-109-55	19	11-17		76
	E (m)	5-8-7	15	35-30		?
	Σ (m)	5-13-20	35	70-100		?
SEV-24	ρ (Ohm-m)	353-94	52	31		120
	E (m)	5-10	13	35		?
	Σ (m)	5-15	28	63		?
SEV-25	ρ (Ohm-m)	265-81	16	22		90
	E (m)	6-9	17	38		?
	Σ (m)	6-15	32	70		?
SEV-26	ρ (Ohm-m)	1280-38	6,5-3		5	51
	E (m)	4,5-3,5	11-13		10	?
	Σ (m)	4,5-8	19-32		42	?
SEV-27	ρ (Ohm-m)	91-13	2,4-4			60
	E (m)	2,5-2,5	7-7			?
	Σ (m)	2,5-5	12-19			?
SEV-28	ρ (Ohm-m)	2490-37	23-40	15		51
	E (m)	1,7-2,3	9-12	55		?
	Σ (m)	1,7-4	13-25	80		?
SEV-29	ρ (Ohm-m)	1420-86	19-7	10		50
	E (m)	3,8-3,2	7-14	27		?
	Σ (m)	3,8-7	14-28	55		?

SEVs		Horizontes geoeléctricos			
		H1	H2	H3	H4
SEV-30	ρ (Ohm-m)	77-46	19	17-24	118
	E (m)	10-3	17	45-25	?
	Σ (m)	10-13	30	75-100	?
SEV-31	ρ (Ohm-m)	147-93	22	12-21	140
	E (m)	9-5	12	43-29	?
	Σ (m)	9-14	26	69-98	?
SEV-32	ρ (Ohm-m)	242-64	32	17-26	130
	E (m)	7-7	18	36-30	?
	Σ (m)	7-14	32	68-98	?
SEV-33	ρ (Ohm-m)	417-26	8.5	11-17	92
	E (m)	4,5-6,5	16	14-53	?
	Σ (m)	4,5-11	27	41-94	?
SEV-34	ρ (Ohm-m)	65-16	11	12-14	50
	E (m)	4,5-5,5	17	15-26	?
	Σ (m)	4,5-10	27	42-68	?
SEV-35	ρ (Ohm-m)	1070-64	20-14	17	60
	E (m)	4,5-3,5	12-12	38	?
	Σ (m)	4,5-8	20-32	70	?
SEV-36	ρ (Ohm-m)	54-13	11-13	11	50
	E (m)	3-5	11-12	39	?
	Σ (m)	3-8	19-31	70	?
SEV-37	ρ (Ohm-m)	30-24	14	12-16	100
	E (m)	7-8	17	18-33	?
	Σ (m)	7-15	32	50-83	?
SEV-38	ρ (Ohm-m)	37	7-4,2	5,6	43
	E (m)	7	7-10	31	?
	Σ (m)	7	14-24	55	?
SEV-39	ρ (Ohm-m)	566-192	11	5	73
	E (m)	6-6	17	22	?
	Σ (m)	6-12	29	51	?
SEV-40	ρ (Ohm-m)	1185-66	10-3.5	4	110
	E (m)	5-6	8-11	23	?
	Σ (m)	5-11	19-30	53	?

SEVs		Horizontes geoeléctricos				
		H1	H2	H3		H4
SEV-41	ρ (Ohm-m)	156-17	4,5		6,8	36
	E (m)	5-6	19		19	?
	Σ (m)	5-11	30		49	?
SEV-42	ρ (Ohm-m)	11-19	24	21-13		43
	E (m)	6-8	15	19-50		?
	Σ (m)	6-14	29	48-98		?
SEV-43	ρ (Ohm-m)	4	1.7		2,8	100
	E (m)	4	14		9	?
	Σ (m)	4	18		27	?
SEV-44	ρ (Ohm-m)	6	17	13-17-15		105
	E (m)	5	15	8-17-24		?
	Σ (m)	5	20	28-45-69		?
SEV-45	ρ (Ohm-m)		2,4-5,3		4,6	43
	E (m)		6-8		14	?
	Σ (m)		6-14		28	?
SEV-46	ρ (Ohm-m)	4	14	12	7	25
	E (m)	4,4	14,6	31	20	?
	Σ (m)	4,4	19	50	70	?
SEV-47	ρ (Ohm-m)	138-35	12-11	15	7	43
	E (m)	2-1	7-6	10	24	?
	Σ (m)	2-3	10-16	26	50	?
SEV-48	ρ (Ohm-m)	250	16-12	14-11	2.8	54
	E (m)	2,8	10.2-7	20-29	31	?
	Σ (m)	2,8	13-20	40-69	100	?
SEV-49	ρ (Ohm-m)		28-17-9		6,5-9,3	44
	E (m)		1,5-2,5-6		10-16	?
	Σ (m)		1,5-4-10		20-36	?
SEV-50	ρ (Ohm-m)	79	5,3-4	11	8	44
	E (m)	3	11-8	18	30	?
	Σ (m)	3	14-22	40	70	?
SEV-51	ρ (Ohm-m)	17	4,7-5,5	11	7,3	45
	E (m)	4	11-11	22	22	?
	Σ (m)	4	15-26	48	70	?

SEVs		Horizontes geoeléctricos				
		H1	H2		H3	H4
SEV-52	ρ (Ohm-m)		41-16		7-9	44
	E (m)		4,5-6,5		20-23	?
	Σ (m)		4,5-11		31-54	?
SEV-53	ρ (Ohm-m)	4,7-5,3	10		8,3-5,5	25
	E (m)	7-6	18		19-40	?
	Σ (m)	7-13	31		50-90	?
SEV-54	ρ (Ohm-m)	126-14-8	2,7		2,4	92
	E (m)	3-6-5	20		16	?
	Σ (m)	3-9-14	34		50	?
SEV-55	ρ (Ohm-m)		50-42-11		5,5-9	92
	E (m)		2,5-2,5-6		9-9	?
	Σ (m)		2,5-5-11		20-29	?
SEV-56	ρ (Ohm-m)	109-16	4.3		6.2	115
	E (m)	3-4	23		19	?
	Σ (m)	3-7	30		49	?
SEV-57	ρ (Ohm-m)	31	14-12	11	4	46
	E (m)	6	12-14	36	30	?
	Σ (m)	6	18-32	68	98	?
SEV-58	ρ (Ohm-m)	34-21	14-2,2		1,3	85
	E (m)	10-3	6-11		39	?
	Σ (m)	10-13	19-30		69	?
SEV-59	ρ (Ohm-m)	22-17	22	18	5	103
	E (m)	5-8	19	11	26	?
	Σ (m)	5-13	32	43	69	?
SEV-60	ρ (Ohm-m)	137-17	11		6-8,5	83
	E (m)	4-11	15		40-30	?
	Σ (m)	4-15	30		70-100	?
SEV-61	ρ (Ohm-m)	69-25	13		8-4,5	105
	E (m)	5-14	18		13-48	?
	Σ (m)	5-19	37		50-98	?
SEV-62	ρ (Ohm-m)	25-8,3	11	8	12	51
	E (m)	3-17	15	14	28	?
	Σ (m)	3-20	35	49	77	?

SEVs		Horizontes geoeléctricos				
		H1	H2	H3		H4
SEV-63	ρ (Ohm-m)	47-15	7		9	43
	E (m)	4,5-10,5	19		26	?
	Σ (m)	4,5-15	34		60	?
SEV-64	ρ (Ohm-m)	27-17	12-10	15		74
	E (m)	6,5-7,5	12-10	34		?
	Σ (m)	6,5-14	26-36	70		?
SEV-65	ρ (Ohm-m)	50-20	5		7	53
	E (m)	5,7-8,3	21		22	?
	Σ (m)	5,7-14	35		57	?
SEV-66	ρ (Ohm-m)	15-10	7	16-12		50
	E (m)	6-8	21	35-28		?
	Σ (m)	6-14	35	70-98		?
SEV-67	ρ (Ohm-m)	28-22-18	8	11		57
	E (m)	9-5-5	18	43		?
	Σ (m)	9-14-19	37	80		?
SEV-68	ρ (Ohm-m)	188-15-11	7,8	10		29
	E (m)	5,5-4,5-10	25	55		?
	Σ (m)	5,5-10-20	45	100		?
SEV-69	ρ (Ohm-m)	1116-720-130	11	12		215
	E (m)	7,5-4,5-7	26	25		?
	Σ (m)	7,5-12-19	45	70		?
SEV-70	ρ (Ohm-m)	1528-142-19	10-14	15		38
	E (m)	5-4-11	16-14	22		?
	Σ (m)	5-9-20	36-50	72		?
SEV-71	ρ (Ohm-m)	5900-7507-1593	22	11	6	85
	E (m)	0,5-1,6-2,9	8	7	19	?
	Σ (m)	0,5-2,1-5	13	20	39	?
SEV-72	ρ (Ohm-m)	6400-8366-2193	31	10	4	50
	E (m)	0,7-1,9-2,4	9	10	13	?
	Σ (m)	0,7-2,6-5	14	24	37	?

Nota. Elaboración propia

Leyenda: SEV = Sondaje Eléctrico Vertical

ρ = Resistividad de horizontes geoeléctricos en Ohm-m.

E = Espesor en m.

Como se puede observar se han identificado cuatro (04) horizontes geoeléctricos para la zona de estudio; esto se realizó en base al conocimiento de la geología local y la información de los logueos de pozos perforados en la zona de estudio, que permitieon agrupar valores similares de resistividad en un mismo horizonte. Cada horizonte geoeléctrico está definido por valores de resistividad verdadera (Ohm-m) y un espesor (m).

Tabla 29

Descripción de horizontes geoeléctricos

Horizonte	Resistividad (Ohm-m)	Descripción
Horizonte I- No saturado superficial	3,8 a 9627	Grava, canto rodado, bolonería, arena, limo y/o estrato salino en estado seco – Buena, regular y baja permeabilidad.
Horizonte II-No saturado subsuperficial	1,7 a 232	Grava, arena, limo, arcilla y/o estrato salino en estado seco – Regular, baja y muy baja permeabilidad
Horizonte III-Acuífero	10 a 60	ACUÍFERO PERMEABLE. Arena, grava, canto rodado y limo saturados – Regular a baja permeabilidad
	1,3 a 9,3	ACUÍFERO SEMIPERMEABLE. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino saturados – Baja a muy baja permeabilidad
Horizonte IV-Basamento rocoso	25 a 995	Rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Chocolate - Impermeable

Nota. Elaboración propia

En la zona de estudio, los valores más bajos de resistividad representan a material de limos, arcillas, pero también representan a arenas y gravilla saturadas con agua de alta salinidad (salobres) y estratos salinos. Las resistividades medias, representan a gravas y arenas principalmente y las resistividades altas a material grueso tipo canto rodado, bolonería y material de roca (ver tabla 30).

Tabla 30

Tipo de material para valores de resistividad

Capa	Resistividad (Ohm-m)	Material
Resistividad baja	<20	- Limos, arcillas - Arenas y gravas saturadas con agua de alta salinidad - Estratos salinos
Resistividad media	20 a 100	- Gravas y arenas
Resistividad alta	>100	- Canto rodado, bolonería - Roca

Nota. Elaboración propia

Los SEVs muestran capas conductivas (resistividades bajas) y capas resistivas (resistividades medias-altas), debido a la heterogeneidad del subsuelo, contenido de humedad, salinidad del agua y porosidad.

- Las capas más conductivas están representadas por materiales de limos, arcillas, estratos salinos y/o arenas y gravas saturadas con agua de alta salinidad (salobre).
- Las capas más resistivas están representadas por materiales de gravas y arenas, canto rodado, bolonería y roca.

5.7. Secciones geológica-geofísicas

Para visualizar la secuencia y continuidad de los diferentes estratos del subsuelo que pueden constituir el reservorio acuífero de la zona de estudio, se ha construido 18 secciones geológica-geofísicas que se describen a continuación:

5.7.1. Sección geológica-geofísica A-A'

Orientada en sentido W – E, perpendicular a la dirección de flujo del rio Sama; se extiende desde el cerro La Mina hasta el cerro Siete Colores, en 3117m de longitud y está compuesta por los SEVs 66 y 67 (ver figura 54 y mapa 15 - anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades bajas de 10 Ohm-m a 18 Ohm-m y medias de 22 Ohm-m a 28 Ohm-m, que identifican a materiales de regular permeabilidad de grava, arena y limo del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesores de 14m a 19m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 7 Ohm-m a 8 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado seco; con espesores de 18m a 21m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato permeable,** presenta resistividades bajas de 11 Ohm-m a 16 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad

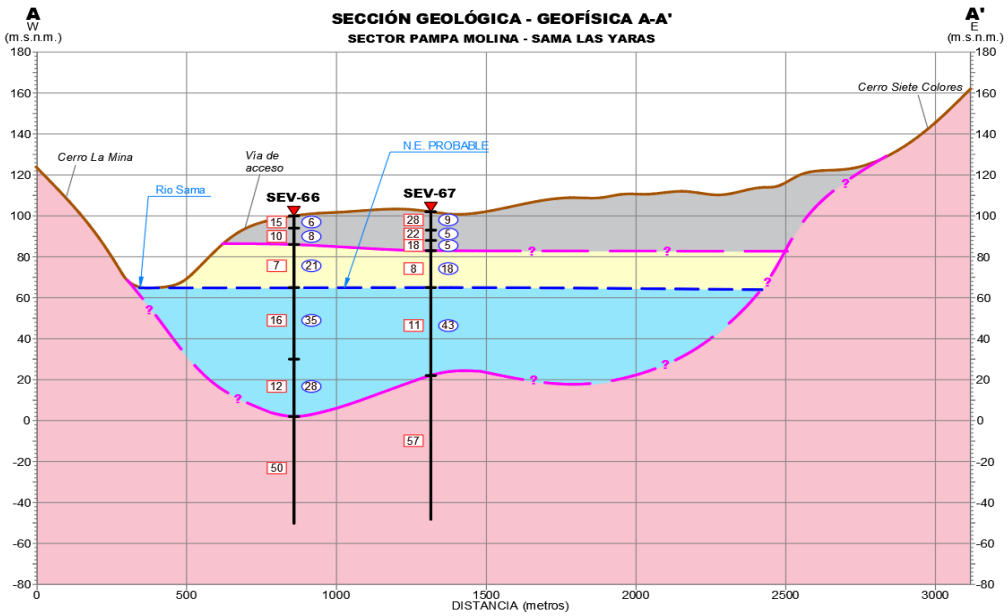
de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 43m a 63m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 50 Ohm-m a 57 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 54

Sección geológica-geofísica A-A'



Nota. Elaboración propia

5.7.2. Sección geológica-geofísica B-B'

Orientada en sentido W – E, perpendicular a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro La Mina hasta el cerro Miraflores, en 3483m de longitud y está compuesta por los SEVs 64 y 65 y el pozo S/N-1 (ver figura 55 y mapa 16 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades bajas de 17 Ohm-m y medias de 20 Ohm-m a 50 Ohm-m, que identifican a materiales de regular permeabilidad de grava, arena y limo del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesor de 14m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 5 Ohm-m y bajas de 10 Ohm-m a 12 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja a baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEV-65), en estado seco; con espesores de 21m a 22m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato semipermeable,** presente en el SEV-65 con resistividad muy baja de 7 Ohm-m, que identifica a materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesor de 22m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.

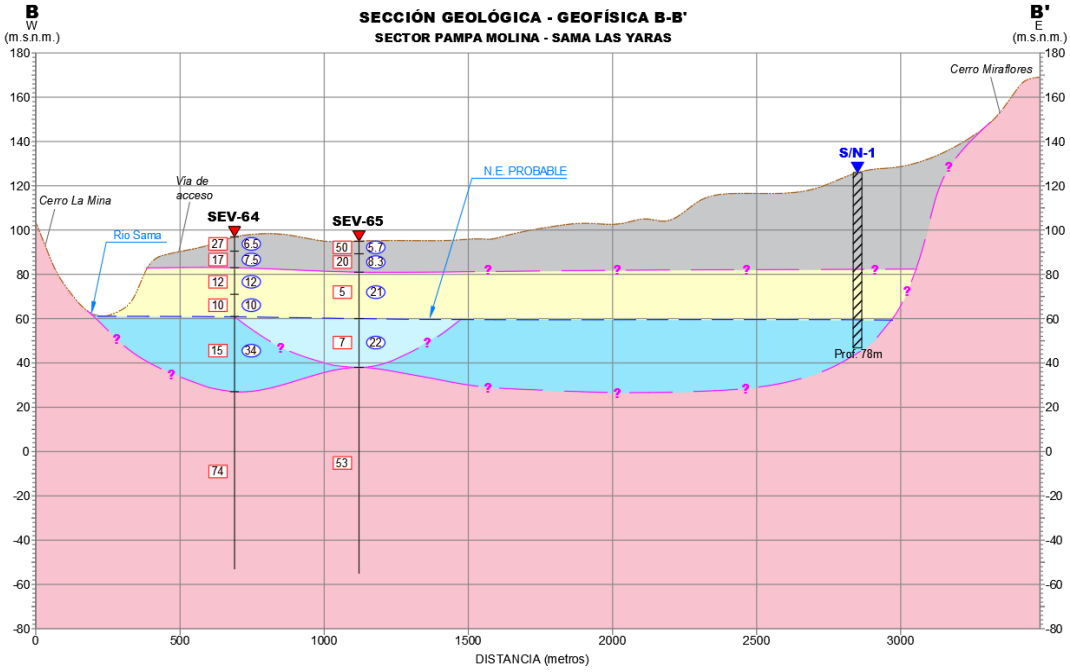
- **Estrato permeable,** presente en el SEV-64 con resistividad baja de 15 Ohm-m, que identifica a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesor de 34m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 53 Ohm-m a 74 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 55

Sección geológica-geofísica B-B'



Nota. Elaboración propia

5.7.3. Sección geológica-geofísica C-C'

Orientada en sentido W – E, perpendicular a la dirección de flujo del rio Sama; se extiende desde el cerro La Mina hasta el cerro Miraflores, en 2691m de longitud y está compuesta por los SEVs 62, 63, 68, 70 y el pozo S/N-2 (ver figura 56 y mapa 17 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades muy bajas de 8,3 Ohm-m, bajas de 11 Ohm-m a 19 Ohm-m, medias de 25 Ohm-m a 47 Ohm-m, altas de 142 Ohm-m a 188 Ohm-m y muy altas de 1528 Ohm-m, que identifican a materiales de baja, regular y buena permeabilidad de grava, canto rodado, bolonería, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEV-62), en estado seco; con espesores de 15m a 20m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 7 Ohm-m a 7,8 Ohm-m y bajas de 10 Ohm-m a 14 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja a baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 63 y 68), en estado seco; con espesores de 15m a 30m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato semipermeable,** presente en los SEVs 62 y 63 con resistividades muy bajas de 8 Ohm-m a 9 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo y arcilla

del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesores de 14m a 26m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.

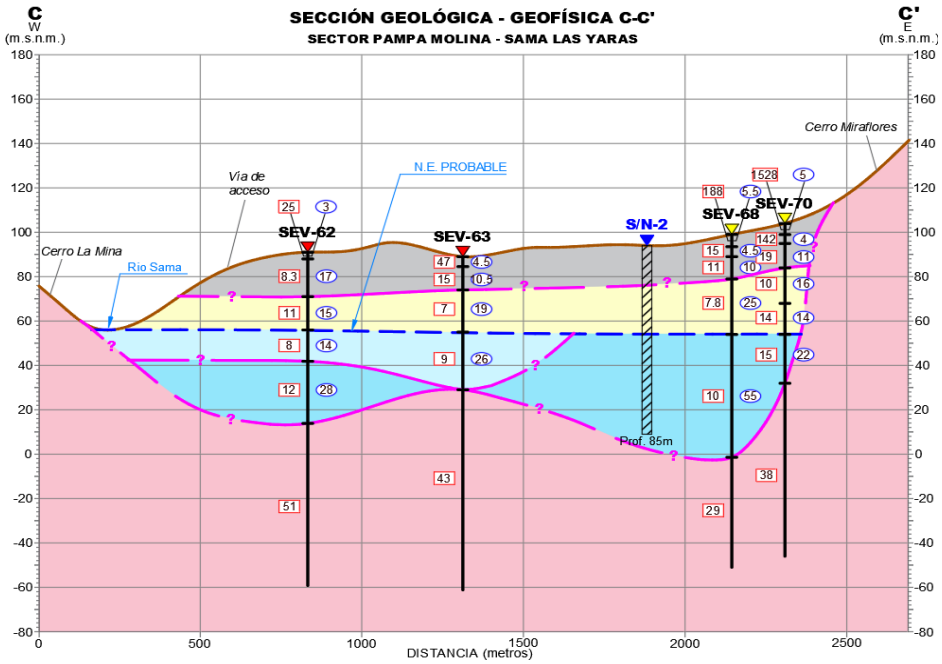
- **Estrato permeable,** presente en los SEVs 62, 68 y 70 con resistividades bajas de 10 Ohm-m a 15 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 22m a 55m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 29 Ohm-m a 51 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 56

Sección geológica-geofísica C-C'



Nota. Elaboración propia

5.7.4. Sección Geológica-Geofísica D-D'

Orientada en sentido W – E, perpendicular a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro Fuerte Los Españoles hasta el cerro Miraflores, en 3409m de longitud y está compuesta por los SEVs 60, 61, 7 y el pozo S/N-3 (ver figura 57 y mapa 18 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades bajas de 17 Ohm-m, medias de 25 Ohm-m a 69 Ohm-m, altas de 137 Ohm-m a 158 Ohm-m y muy altas de 1370 Ohm-m, que identifican a materiales de regular y buena permeabilidad de grava, canto rodado,

bolonería, arena y limo del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesores de 15m a 28m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 7 Ohm-m y bajas de 11 Ohm-m a 13 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja a baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEV-7), en estado seco; con espesores de 15m a 24m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato semipermeable,** presente en los SEVs 60 y 61 con resistividades muy bajas de 4,5 Ohm-m a 8,5 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesores de 61m a 70m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.
- **Estrato permeable,** presente en el SEV-7, con resistividad baja de 11 Ohm-m, que identifica a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesor de 22m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

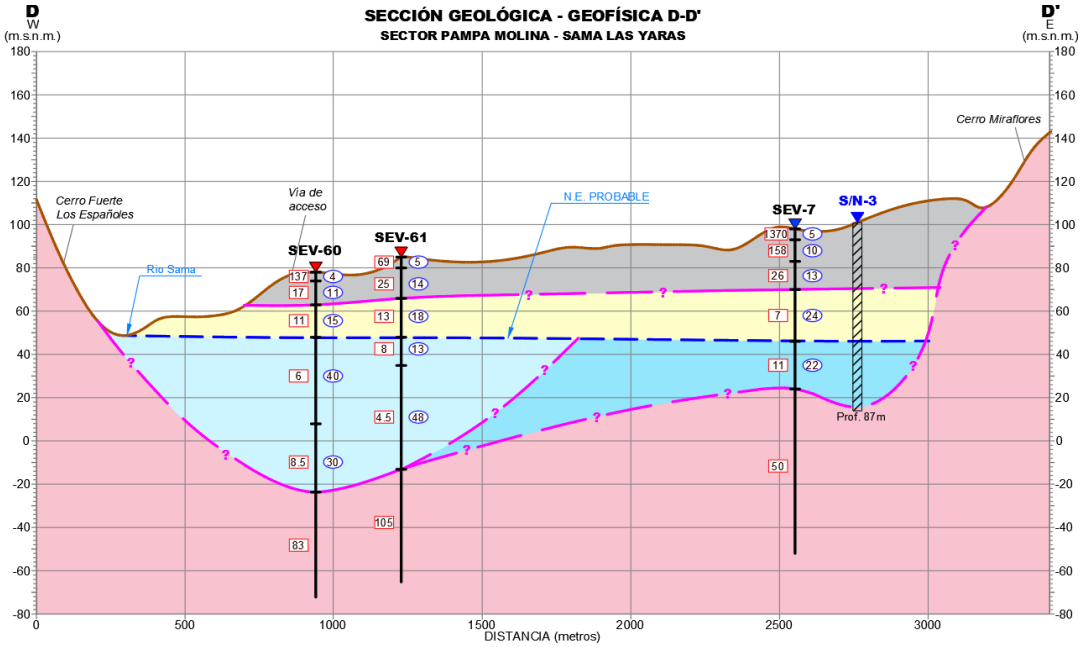
Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 50 Ohm-m a 83 Ohm-m y altas de 105 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o

sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 57

Sección geológica-geofísica D-D'



Nota. Elaboración propia

5.7.5. Sección geológica-geofísica E-E'

Orientada en sentido W – E, perpendicular a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro Fuerte Los Españoles hasta el cerro Miraflores, en 3273m de longitud y está compuesta por los SEVs 58, 59 y 8 (ver figura 58 y mapa 19 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades bajas de 17 Ohm-m, medias de 21 Ohm-m a 34 Ohm-m y altas de 193 Ohm-m a 829 Ohm-m, que identifican a materiales de regular y buena permeabilidad de grava, canto rodado, arena y limo del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesores de 13m a 17m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 2,2 Ohm-m a 6 Ohm-m, bajas de 11 Ohm-m a 14 Ohm-m y medias de 22 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja, baja y regular permeabilidad de grava, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 58 y 8), en estado seco; con espesores de 17m a 34m.

Horizonte III - Acuífero

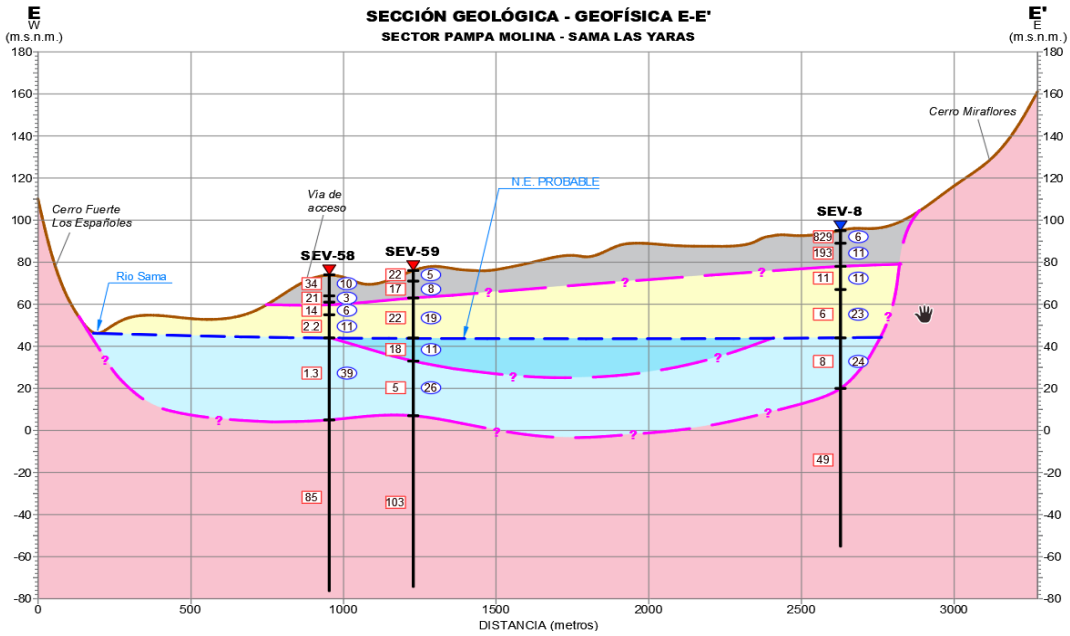
- **Estrato semipermeable,** presenta resistividades muy bajas de 1,3 Ohm-m a 8 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesores de 24m a 39m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.
- **Estrato permeable,** presente en el SEV-59, con resistividad baja de 18 Ohm-m, que identifica a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesor de 11m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 49 Ohm-m a 85 Ohm-m y altas de 103 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 58

Sección geológica-geofísica E-E'



Nota. Elaboración propia

5.7.6. Sección geológica-geofísica F-F'

Orientada en sentido W – E, perpendicular a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro Fuerte Los Españoles hasta el cerro Miraflores, en 3543m de longitud y está compuesta por los SEVs 56, 57, 9 y el pozo S/N-4

“Asoc. Divino Niño” (ver figura 59 y mapa 20 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades bajas de 16 Ohm-m, medias de 31 Ohm-m y altas de 109 Ohm-m a 583 Ohm-m, que identifican a materiales de regular y buena permeabilidad de grava, canto rodado, arena y limo del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesores de 6m a 16m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 4,3 Ohm-m y bajas de 11 Ohm-m a 15 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja a baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEV-56), en estado seco; con espesores de 23m a 37m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato semipermeable,** presente en los SEVs 56 y 57, con resistividades muy bajas de 4 Ohm-m a 6,2 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesores de 19m a 30m.
- **Estrato permeable,** presente en los SEVs 57 y 9, con resistividades bajas de 11 Ohm-m a 13 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario

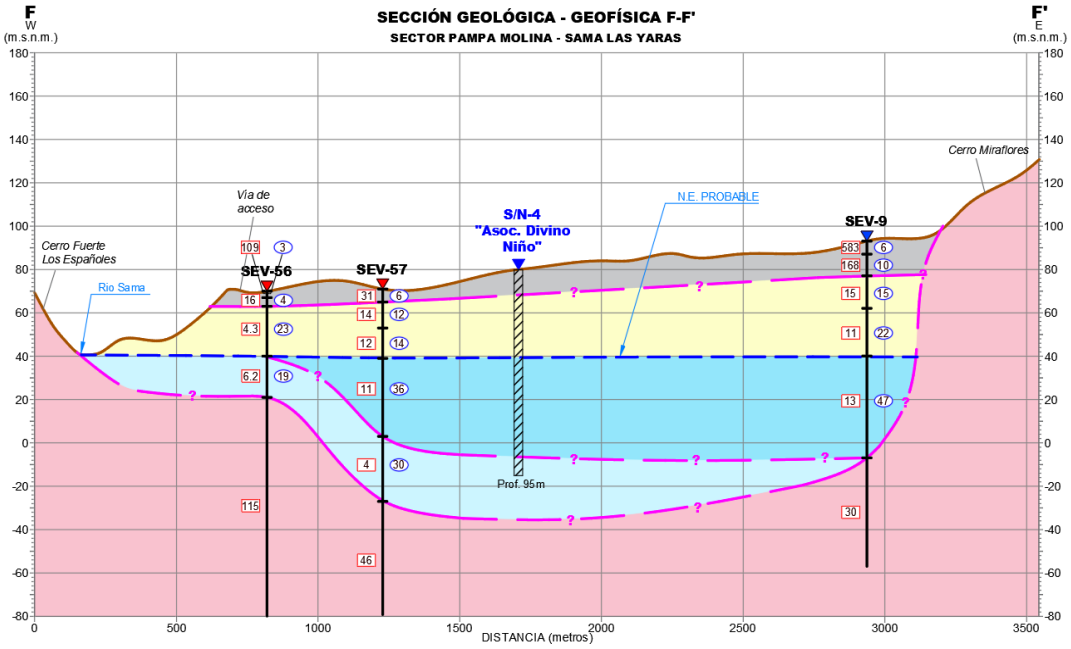
reciente, en estado saturado; con espesores de 36m a 47m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 30 Ohm-m a 46 Ohm-m y altas de 115 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 59

Sección geológica-geofísica F-F'



Nota. Elaboración propia

5.7.7. Sección geológica-geofísica G-G'

Orientada en sentido W – E, perpendicular a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro Fuerte Los Españoles hasta el cerro Miraflores,

en 3957m de longitud y está compuesta por los SEVs 55, 37, 36, 35 y 10 (ver figura 60 y mapa 21 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades bajas de 13 Ohm-m, medias de 24 Ohm-m a 64 Ohm-m, altas de 177 Ohm-m a 876 Ohm-m y muy altas de 1070 Ohm-m, que identifican a materiales de regular y buena permeabilidad de grava, canto rodado, boloneria, arena y limo del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesores de 8m a 39m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades bajas de 11 Ohm-m a 14 Ohm-m y medias de 20 Ohm-m a 50 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de grava, arena y limo del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesores de 11m a 24m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato semipermeable,** presente en el SEV-55 con resistividades muy bajas de 5,5 Ohm-m a 9 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesor de 18m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.

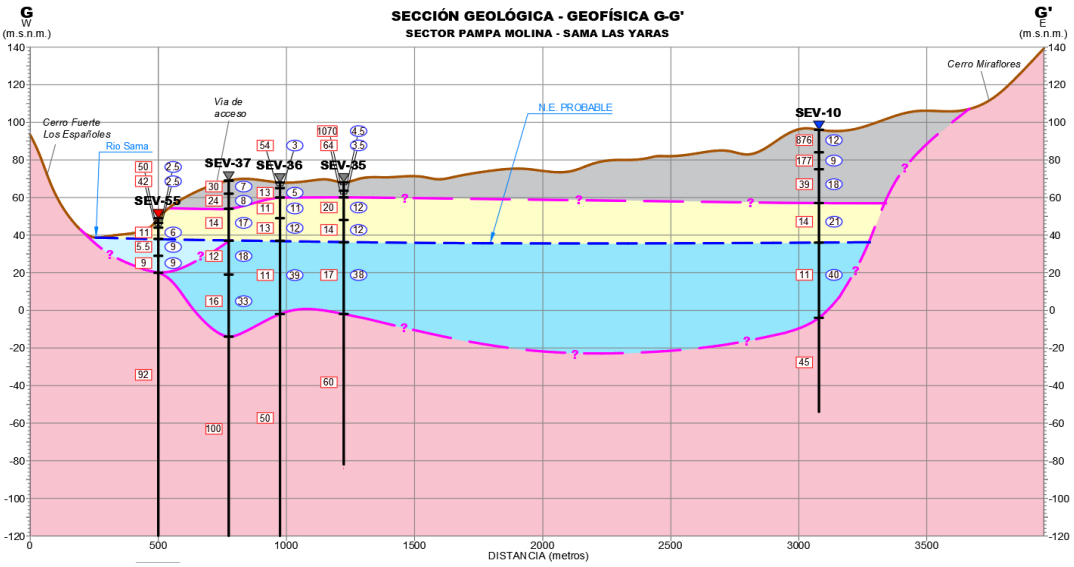
- **Estrato permeable,** presente en los SEVs 37, 36, 35 y 10 con resistividades bajas de 11 Ohm-m a 17 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 38m a 51m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 45 Ohm-m a 92 Ohm-m y altas de 100 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 60

Sección geológica-geofísica G-G'



Nota. Elaboración propia

5.7.8. Sección geológica-geofísica H-H'

Orientada en sentido NW – SE, perpendicular a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro Fuerte Los Españoles hasta el cerro Los Pabellones, en 3683m de longitud y está compuesta por los SEVs 52, 53, 54, 11, 12, 13 y el pozo IRHS-7 (ver figura 61 y mapa 22 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades muy bajas de 5,3 Ohm-m a 8 Ohm-m, bajas de 14 Ohm-m, medias de 23 Ohm-m a 27 Ohm-m, altas de 116 Ohm-m a 798 Ohm-m y muy altas de 1790 Ohm-m, que identifican a materiales de baja, regular y buena permeabilidad de grava, canto rodado, bolonería, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 53 y 54), en estado seco; con espesores de 13m a 30m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 2,7 Ohm-m, bajas de 10 Ohm-m a 16 Ohm-m y medias de 41 Ohm-m a 55 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja, baja y regular permeabilidad de grava, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEV-54), en estado seco; con espesores de 11m a 24m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato semipermeable,** presente en los SEVs 52, 53 y 54 con resistividades muy bajas de 2,4 Ohm-m a 9 Ohm-m, que identifican a

materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesores de 16m a 59m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.

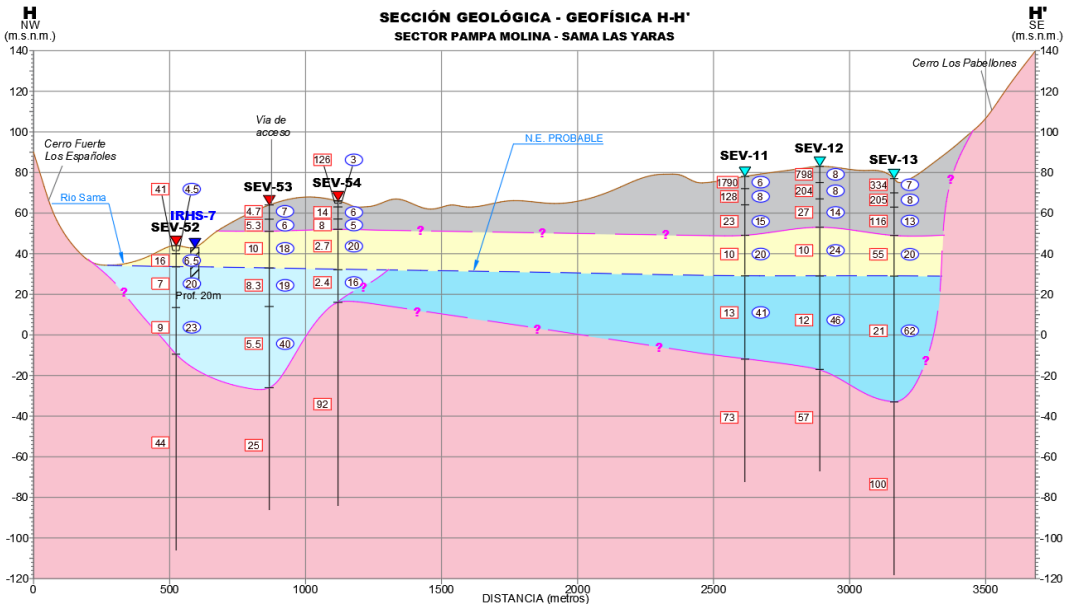
- **Estrato permeable,** presente en los SEVs 11, 12 y 13 con resistividades bajas de 12 Ohm-m a 13 Ohm-m y medias de 21 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 41m a 62m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 25 Ohm-m a 92 Ohm-m y altas de 100 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 61

Sección geológica-geofísica H-H'



Nota. Elaboración propia

5.7.9. Sección geológica-geofísica I-I'

Orientada en sentido NW – SE, perpendicular a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro Fuerte Los Españoles hasta el cerro Los Pabellones, en 3907m de longitud y está compuesta por los SEVs 49, 50, 51, 29, 30, 31, 22, 14, 15, 16 y los pozos TA-01 y PP-01 de propiedad de Wayu Perú (ver figura 62 y mapa 23 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades bajas de 17 Ohm-m, medias de 30 Ohm-m a 93 Ohm-m, altas de 103 Ohm-m a 899 Ohm-m y muy altas de 1060 Ohm-m a 1420 Ohm-m, que identifican a materiales de regular y buena permeabilidad de

grava, canto rodado, bolonería, arena y limo del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesores de 3m a 32m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 4 Ohm-m a 9 Ohm-m, bajas de 10 Ohm-m a 19 Ohm-m y medias de 20 Ohm-m a 48 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja, baja y regular permeabilidad de grava, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 49, 50 y 51), en estado seco; con espesores de 10m a 24m.

Horizonte III - Acuífero

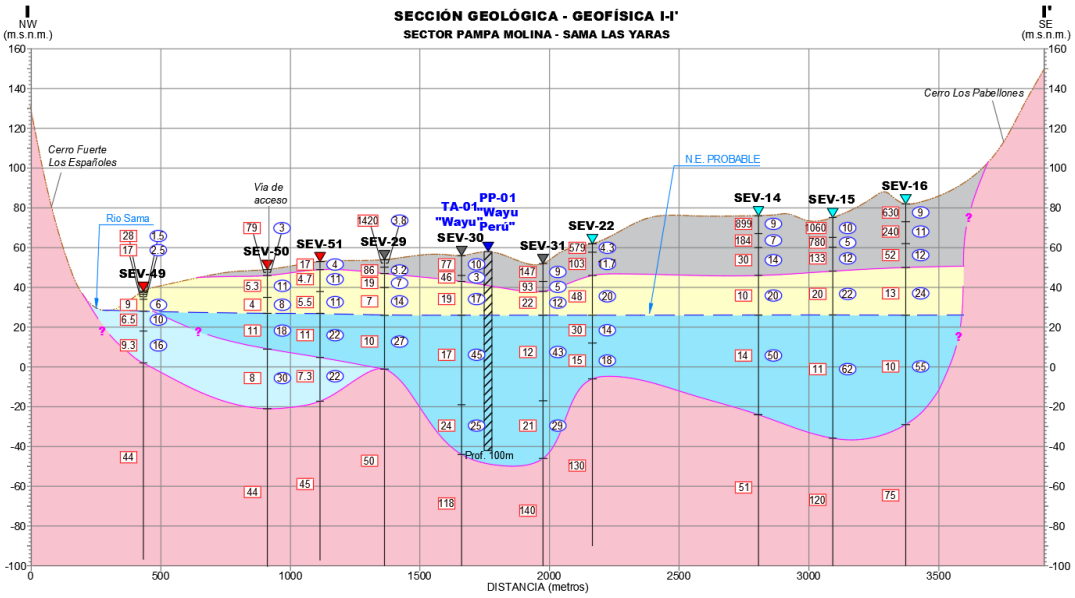
- **Estrato semipermeable,** presente en los SEVs-49, 50 y 51 con resistividades muy bajas de 6,5 Ohm-m a 9,3 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesores de 22m a 30m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.
- **Estrato permeable,** presente en los SEVs 50, 51, 29, 30, 31, 22, 14, 15 y 16 con resistividades bajas de 10 Ohm-m a 17 Ohm-m y medias de 21 Ohm-m a 30 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 18m a 72m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 44 Ohm-m a 75 Ohm-m y altas de 118 Ohm-m a 140 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 62

Sección geológica-geofísica I-I'



Nota. Elaboración propia

5.7.10. Sección geológica-geofísica J-J'

Orientada en sentido W – E, perpendicular a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro Calvario hasta el cerro Los Pabellones, en 4522m de longitud y está compuesta por los SEVs 47, 48, 34, 38, 32, 17 y los pozos IRHS-6 y S/N-6 “Asoc. Señor de Huanca” (ver figura 63 y mapa 24 –

anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades bajas de 16 Ohm-m, medias de 34 Ohm-m a 66 Ohm-m y altas de 138 Ohm-m a 250 Ohm-m, que identifican a materiales de regular y buena permeabilidad de grava, canto rodado, arena y limo del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesores de 3m a 25m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 4,2 Ohm-m a 7 Ohm-m, bajas de 11 Ohm-m a 18 Ohm-m y medias de 32 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja, baja y regular permeabilidad de grava, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEV-38), en estado seco; con espesores de 13m a 27m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato semipermeable,** presente en los SEVs 47, 48 y 38 con resistividades muy bajas de 2,8 Ohm-m a 7 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesores de 24m a 31m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.
- **Estrato permeable,** presente solo en los SEVs 47, 48, 34, 32 y 17 con resistividades bajas de 11 Ohm-m a 18 Ohm-m y medias de

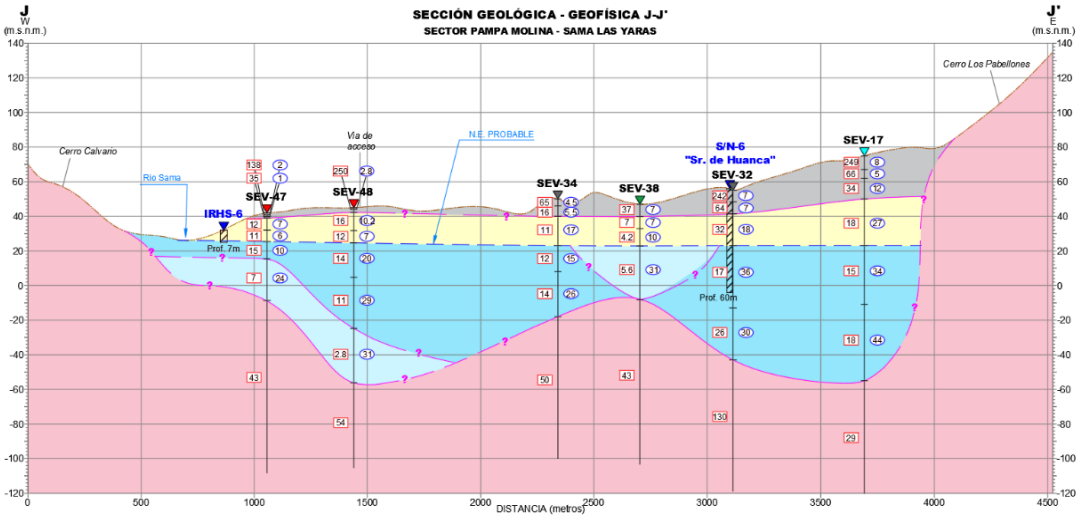
26 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 10m a 78m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 29 Ohm-m a 54 Ohm-m y altas de 130 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 63

Sección geológica-geofísica J-J'



Nota. Elaboración propia

5.7.11. Sección geológica-geofísica K-K'

Orientada en sentido W – E, perpendicular a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro Calvario hasta el cerro Los Pabellones, en

4424m de longitud y está compuesta por los SEVs 45, 46, 41, 39, 25 y 18 (ver figura 64 y mapa 25 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades muy bajas de 4 Ohm-m, bajas de 17 Ohm-m, medias de 25 Ohm-m a 81 Ohm-m y altas de 156 Ohm-m a 566 Ohm-m m, que identifican a materiales de baja, regular y buena permeabilidad de grava, canto rodado, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEV-46), en estado seco; con espesores de 4m a 20m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 2,4 Ohm-m a 5,3 Ohm-m y bajas de 11 Ohm-m a 17 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja a baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 45 y 41), en estado seco; con espesores de 14m a 30m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato semipermeable,** presente en los SEVs 45, 46, 41 y 39, con resistividades muy bajas de 4,6 Ohm-m a 7 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesores de 14m a 22m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.

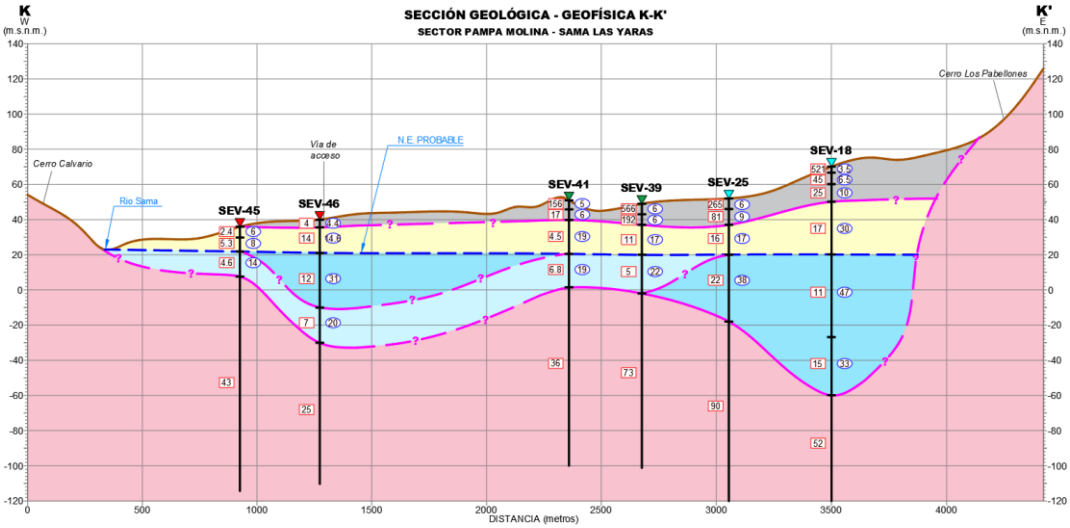
- **Estrato permeable,** presente en los SEVs 46, 25 y 18, con resistividades bajas de 11 Ohm-m a 15 Ohm-m y medias de 22 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 31m a 80m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 25 Ohm-m a 90 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 64

Sección geológica-geofísica K-K'



Nota. Elaboración propia

5.7.12. Sección geológica-geofísica L-L'

Orientada en sentido W – E, perpendicular a la dirección de flujo del rio Sama; se extiende desde el cerro Calvario hasta el cerro Los Pabellones, en 4603m de longitud y está compuesta por los SEVs 43, 44, 42, 40, 24, 23, 19, 20 y el pozo S/N-7 "Rosita" (ver figura 65 y mapa 26 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades muy bajas de 4 Ohm-m a 6 Ohm-m, bajas de 11 Ohm-m a 19 Ohm-m, medias de 22 Ohm-m a 94 Ohm-m, altas de 109 Ohm-m a 353 Ohm-m y muy altas de 1185 Ohm-m a 1370 Ohm-m, que identifican a materiales de baja, regular y buena permeabilidad de grava, canto rodado, bolonería, arena, limo, arcilla, del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 43 y 44), en estado seco; con espesores de 4m a 20m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 1,7 Ohm-m a 6 Ohm-m, bajas de 10 Ohm-m a 19 Ohm-m y medias de 24 Ohm-m a 52 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja, baja y regular permeabilidad de grava, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 43 y 40), en estado seco; con espesores de 14m a 33m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato semipermeable,** presente en los SEVs 43 y 40, con resistividades muy bajas de 2,8 Ohm-m a 4 Ohm-m, que identifican a

materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla, del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesores de 9m a 23m.

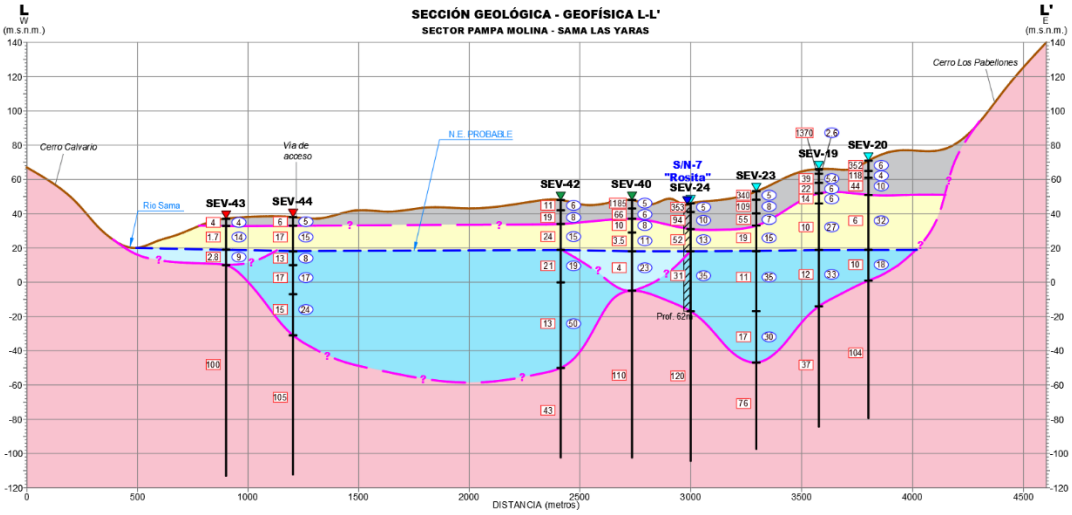
- **Estrato permeable,** presente en los SEVs 44, 42, 24, 23, 19 y 20, con resistividades bajas de 10 Ohm-m a 17 Ohm-m y medias de 21 Ohm-m a 31 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 18m a 69m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 37 Ohm-m a 76 Ohm-m y altas de 100 Ohm-m a 120 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 65

Sección geológica-geofísica L-L'



Nota. Elaboración propia

5.7.13. Sección geológica-geofísica M-M'

Orientada en sentido W – E, perpendicular a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro Calvario hasta el cerro Los Pabellones, en 4364m de longitud y está compuesta por los SEVs 6, 5, 4, 3, 28, 27, 26, 21 y el pozo S/N-9 "Sr. Guillén" (ver figura 66 y mapa 27 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades muy bajas de 3,8 Ohm-m a 9,3 Ohm-m, bajas de 13 Ohm-m a 15 Ohm-m, medias de 26 Ohm-m a 91 Ohm-m, altas de 203 Ohm-m y muy altas de 1130 Ohm-m a 2490 Ohm-m, que identifican a materiales de baja, regular y buena permeabilidad de grava, canto rodado, bolonería, arena, limo,

arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 5 y 3), en estado seco; con espesores de 4m a 24m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 2,4 Ohm-m a 9 Ohm-m, bajas de 13 Ohm-m a 18 Ohm-m y medias de 23 Ohm-m a 40 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja, baja y regular permeabilidad de grava, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 4, 27 y 26), en estado seco; con espesores de 12m a 36m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato semipermeable,** presente en el SEV-26, con resistividad muy baja de 5 Ohm-m, que identifica a materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo y arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesor de 10m.
- **Estrato permeable,** presente en los SEVs 6, 5, 4, 3, 28 y 21, con resistividades bajas de 10 Ohm-m a 17 Ohm-m y medias de 20 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 20m a 76m. En el SEV-27, el acuífero se encuentra ausente.

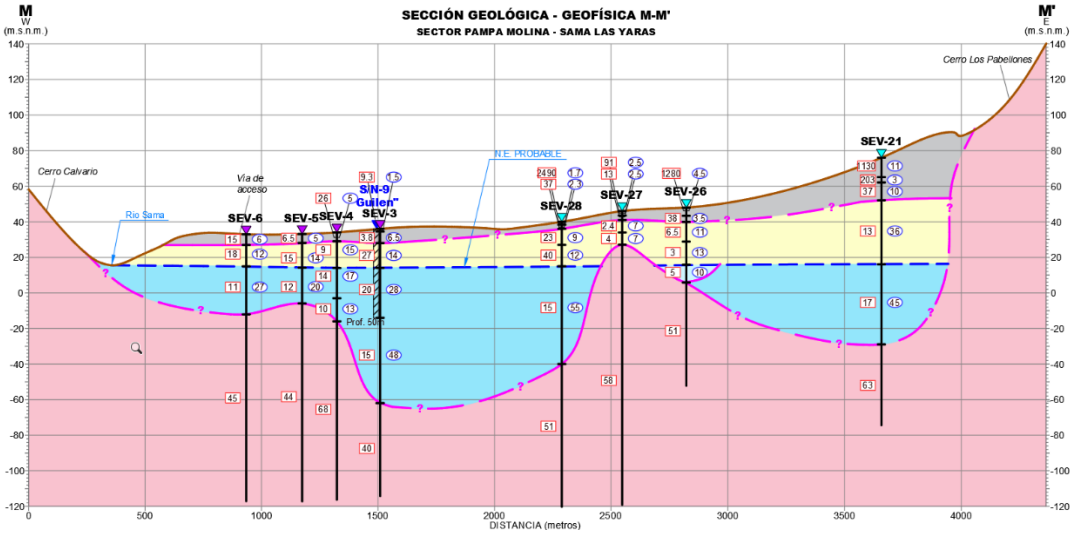
Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 40 Ohm-m a 68 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente

de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 66

Sección geológica-geofísica M-M'



Nota. Elaboración propia

5.7.14. Sección geológica-geofísica N-N'

Orientada en sentido NW – SE, perpendicular a la dirección de flujo del rio Sama; se extiende desde el cerro Calvario hasta el cerro Llostay, en 2642m de longitud y está compuesta por los SEVs 71, 72, 1, 2 y el Pozo S/N-11 (ver figura 67 y mapa 28 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades altas de 325 Ohm-m a 619 Ohm-m y muy altas de 1213 Ohm-m a 9627 Ohm-m, que identifican a materiales de buena permeabilidad

de conchuela, conglomerado, grava y arena del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesores de 4m a 5m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades medias de 22 Ohm-m a 69 Ohm-m y altas de 232 Ohm-m, que identifican a materiales de regular a buena permeabilidad conchuela, conglomerado, grava, arena y limo del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesores de 5m a 9m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato permeable,** presenta resistividades bajas de 10 Ohm-m a 11 Ohm-m y medias de 54 Ohm-m a 60 Ohm-m, que identifican a materiales de regular a buena permeabilidad de conchuela, arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado suelto y saturado; con espesores de 7m a 19m. Este estrato constituiría el acuífero explotable.
- **Estrato semipermeable,** presente en los SEVs 71 y 72 con resistividades muy bajas de 4 Ohm-m a 6 Ohm-m, que identifican a materiales de regular a baja permeabilidad de conchuela, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado suelto y saturado; con espesores de 13m a 19m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.

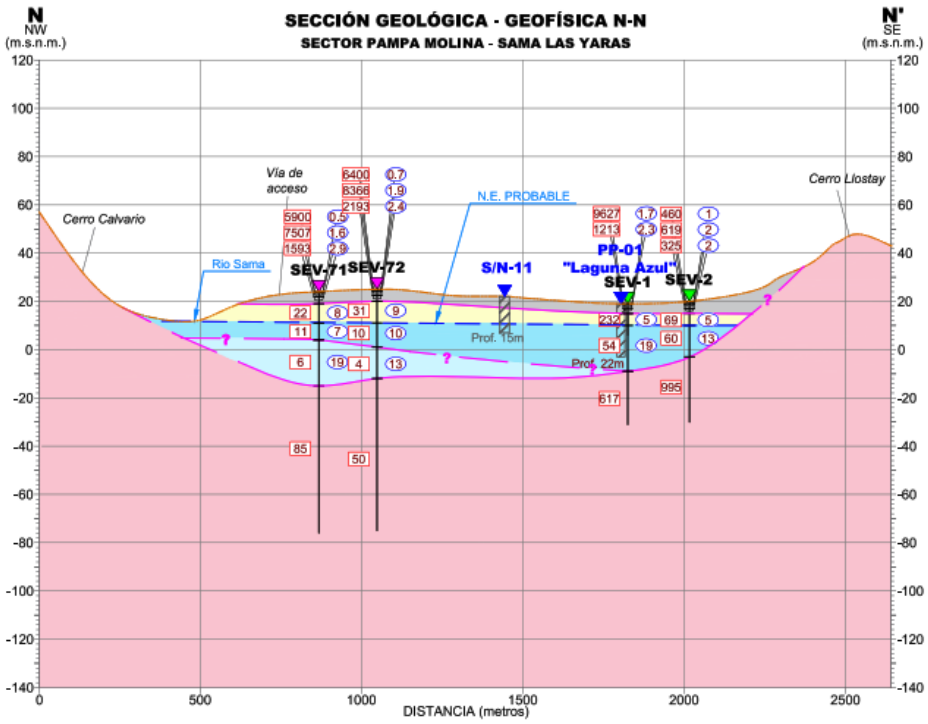
Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 50 Ohm-m a 85 Ohm-m y altas de 617 Ohm-m a 995 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas

volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 67

Sección geológica-geofísica N-N'



Nota. Elaboración propia

5.7.15. Sección geológica-geofísica O-O'

Orientada en sentido S – N, paralela a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el mar hasta el sector Agua Dulce - La Vituña, en 9345m de longitud y está compuesta por los SEVs 71, 6, 44, 46, 48, 50, 53, 37, 56, 58, 60, 62, 64, 66 y el pozo S/N-13 (ver figura 68 y mapa 29 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades muy bajas de 4 Ohm-m a 8,3 Ohm-m, bajas de 10 Ohm-m a 17 Ohm-m, medias de 21 Ohm-m a 79 Ohm-m, altas de 109 Ohm-m a 250 Ohm-m y muy altas de 1593 Ohm-m a 7507 Ohm-m, que identifican a materiales de baja, regular y buena permeabilidad de conchuela, conglomerado (SEV-71), grava, canto rodado, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 44, 46, 53 y 62), en estado seco; con espesores de 2,8m a 20m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 2,2 Ohm-m a 7 Ohm-m, bajas de 10 Ohm-m a 18 Ohm-m y medias de 22 Ohm-m, que identifican a materiales de regular, baja y muy permeabilidad de conchuela, conglomerado, grava, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 50, 56, 58 y 66), en estado seco; con espesores de 8m a 23m.

Horizonte III - Acuífero

- **Estrato semipermeable,** presente en los SEVs 71, 46, 48, 50, 53, 56, 58, 60 y 62, con resistividades muy bajas de 1,3 Ohm-m a 8,5 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a muy baja permeabilidad de conchuela (SEV-71), arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesores de 14m a 70m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.

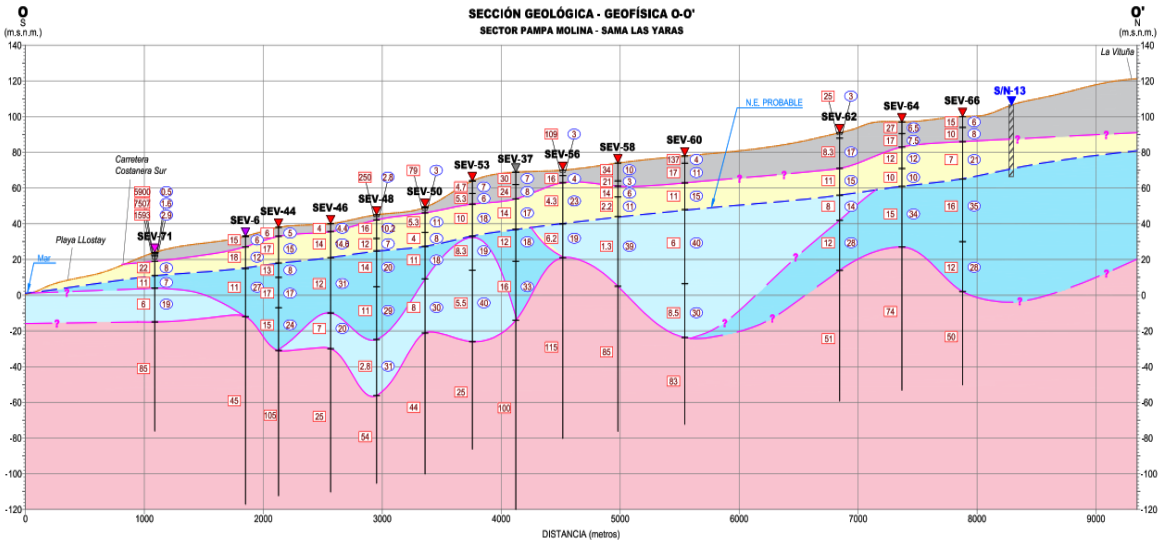
- **Estrato permeable,** presente en los SEVs 71, 6, 44, 46, 48, 50, 37, 62, 64 y 66, con resistividades bajas de 11 Ohm-m a 17 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de conchuela (SEV-71), arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 7m a 63m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 25 Ohm-m a 85 Ohm-m y altas de 100 Ohm-m a 115 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 68

Sección geológica-geofísica O-O'



Nota. Elaboración propia

5.7.16. Sección geológica-geofísica P-P'

Orientada en sentido S – N, paralela a la dirección de flujo del rio Sama; se extiende desde el mar hasta el cerro Siete Colores, en 9608m de longitud y está compuesta por los SEVs 1, 3, 42, 34, 33, 30, 35, 57, 59, 61, 63, 65, 67 y los pozos PP-01 de Laguna Azul, S/N-12, S/N-9 "Sr. Guillén" y PP-01 del Proyecto Wayu Perú (ver figura 69 y mapa 30 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades muy bajas de 3,8 Ohm-m a 9,3 Ohm-m, bajas de 11 Ohm-m a 19 Ohm-m, medias de 20 Ohm-m a 77 Ohm-m, altas de 232 Ohm-m a 417 Ohm-m y muy altas de 1070 Ohm-m a 9627 Ohm-m, que identifican a materiales de baja, regular y buena permeabilidad de conchuela, conglomerado (SEV-1), grava, canto rodado, bolonería, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEV-3), en estado seco; con espesores de 4m a 19m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 5 Ohm-m a 8,5 Ohm-m, bajas de 11 Ohm-m a 19 Ohm-m, medias de 20 Ohm-m a 27 Ohm-m y altas de 232 Ohm-m, que identifican a materiales de regular, baja y muy permeabilidad de conchuela, conglomerado (SEV-1), grava, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 33, 63, 65 y 67), en estado seco; con espesores de 5m a 26m.

Horizonte III - Acuífero

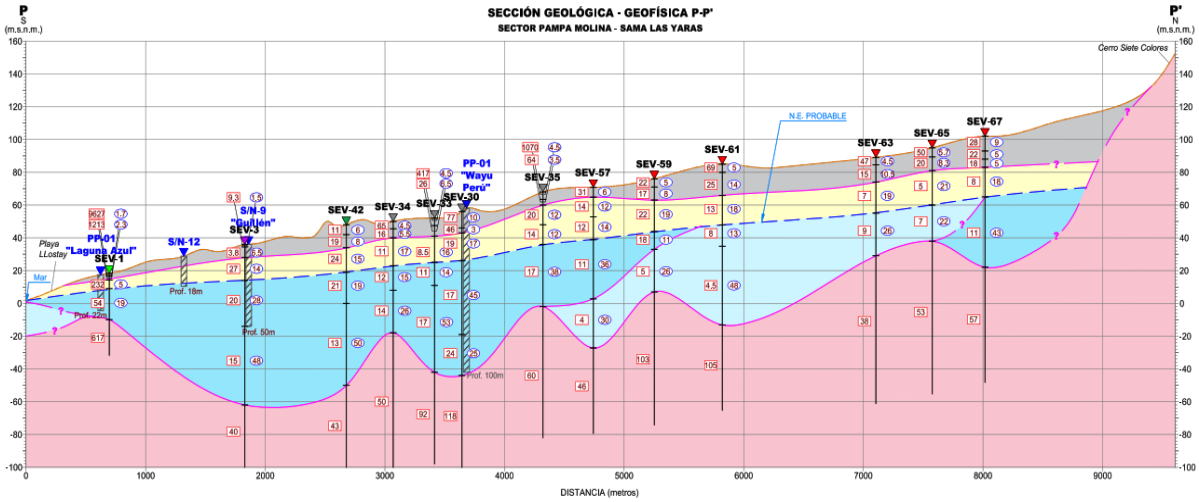
- **Estrato semipermeable,** presente en los SEVs 57, 59, 61, 63 y 65, con resistividades muy bajas de 4 Ohm-m a 9 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a muy baja permeabilidad de conchuela (SEV-1), arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesores de 22m a 61m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.
- **Estrato permeable,** presente en los SEVs 1, 3, 42, 34, 33, 30, 35, 57, 59 y 67, con resistividades bajas de 11 Ohm-m a 18 Ohm-m y medias de 20 Ohm-m a 54 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de conchuela (SEV-1), arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 11m a 76m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 38 Ohm-m a 92 Ohm-m y altas de 103 Ohm-m a 617 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 69

Sección geológica-geofísica P-P'



Nota. Elaboración propia

5.7.17. Sección geológica-geofísica Q-Q'

Orientada en sentido S – N, paralela a la dirección de flujo del rio Sama; se extiende desde el cerro Llostay hasta el cerro Siete Colores, en 7497m de longitud y está compuesta por los SEVs 26, 24, 25, 32, 14, 11, 69 y 68 (ver figura 70 y mapa 31 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades bajas de 11 Ohm-m a 15 Ohm-m, medias de 23 Ohm-m a 94 Ohm-m, altas de 128 Ohm-m a 899 Ohm-m y muy altas de 1116 Ohm-m a 1790 Ohm-m, que identifican a materiales de regular y buena permeabilidad de grava, canto rodado, bolonería, arena y limo del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesores de 8m a 30m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 3 Ohm-m a 7,8 Ohm-m, bajas de 10 Ohm-m a 16 Ohm-m y medias de 32 Ohm-m a 52 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja, baja y regular permeabilidad de grava, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 26 y 68), en estado seco; con espesores de 13m a 26m.

Horizonte III - Acuífero

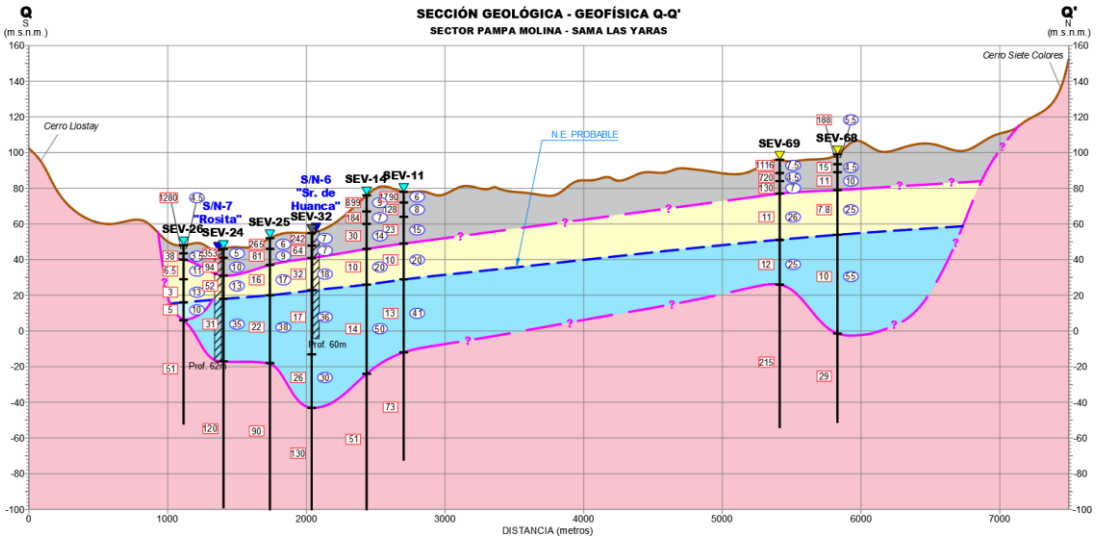
- **Estrato semipermeable,** presente en el SEV-26, con resistividad muy baja de 5 Ohm-m, que identifica a materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesor de 10m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.
- **Estrato permeable,** presente en los SEVs 24, 25, 32, 14, 11, 69 y 68, con resistividades bajas de 10 Ohm-m a 17 Ohm-m y medias de 22 Ohm-m a 31 Ohm-m que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 25m a 66m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 29 Ohm-m a 90 Ohm-m y altas de 120 Ohm-m a 215 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 70

Sección geológica-geofísica Q-Q'



Nota. Elaboración propia

5.7.18. Sección geológica-geofísica R-R'

Orientada en sentido S – N, paralela a la dirección de flujo del río Sama; se extiende desde el cerro Llostay hasta el cerro Miraflores, en 4904m de longitud y está compuesta por los SEVs 21, 20, 16, 13, 10, 9, 8 y 7 (ver figura 71 y mapa 32 – anexo 1); donde se han diferenciado cuatro horizontes geoeléctricos detallados a continuación:

Horizonte I - No saturado superficial

Presenta resistividades medias de 26 Ohm-m a 52 Ohm-m, altas de 116 Ohm-m a 876 Ohm-m y muy altas de 1130 Ohm-m a 1370 Ohm-m, que identifican a materiales de regular y buena permeabilidad de grava, canto rodado, bolonería, arena y limo del Cuaternario reciente, en estado seco; con espesores de 16m a 39m.

Horizonte II - No saturado sub-superficial

Presenta resistividades muy bajas de 6 Ohm-m a 7 Ohm-m, bajas de 11 Ohm-m a 15 Ohm-m y medias de 55 Ohm-m, que identifican a materiales de muy baja, baja y regular permeabilidad de grava, arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino (SEVs 20, 8 y 7), en estado seco; con espesores de 20m a 37m.

Horizonte III - Acuífero

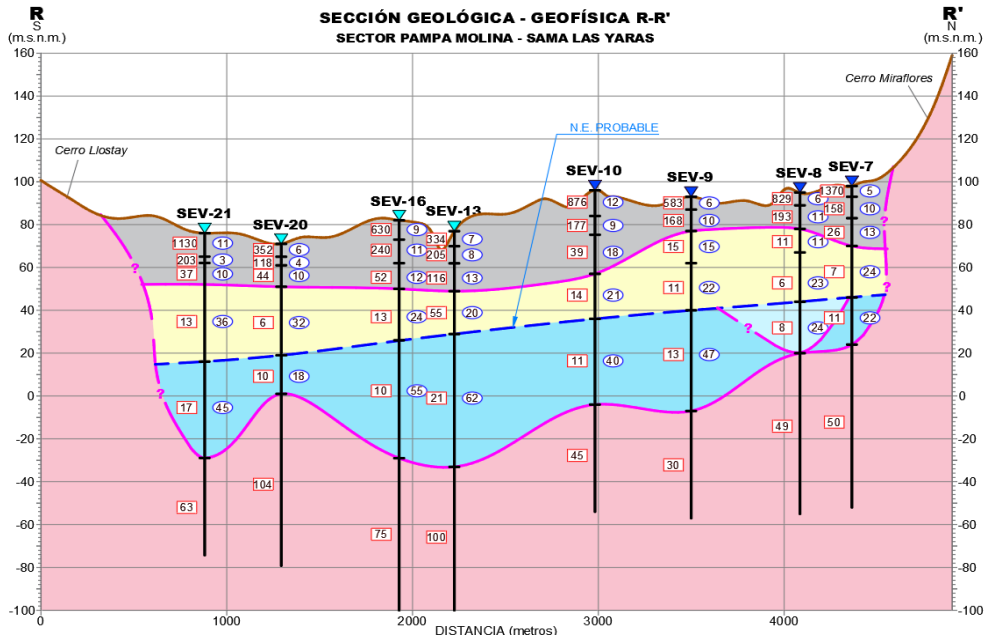
- **Estrato semipermeable,** presente en el SEV-8, con resistividad muy baja de 8 Ohm-m, que identifica a materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla del Cuaternario reciente y/o estrato salino, en estado saturado; con espesor de 24m. Este estrato constituiría el acuífero de bajas condiciones hidrogeológicas.
- **Estrato permeable,** presente en los SEVs 21, 20, 16, 13, 10, 9 y 7, con resistividades bajas de 10 Ohm-m a 17 Ohm-m y medias de 21 Ohm-m, que identifican a materiales de baja a regular permeabilidad de arena, grava y limo del Cuaternario reciente, en estado saturado; con espesores de 18m a 62m. Este estrato constituiría el acuífero explotable de la zona de estudio.

Horizonte IV - Basamento impermeable

Presenta resistividades medias de 30 Ohm-m a 75 Ohm-m y altas de 100 Ohm-m a 104 Ohm-m, que identifican a materiales impermeables de rocas volcánicas y/o sedimentarias probablemente de la Formación Chocolate. Este horizonte tiene espesor indeterminado y constituiría el basamento del acuífero.

Figura 71

Sección geológica-geofísica R-R'



Nota. Elaboración propia

5.8. Planos geofísicos

Con los resultados de la interpretación de los 72 sondajes eléctricos verticales ejecutados en el sector Pampa Molina; se han confeccionado cuatro (04) planos geofísicos, que sintetizan las principales características del acuífero (ver tabla 31); según el detalle siguiente:

- Isóbatas, relacionada con el techo del basamento impermeable.
- Isópacos, relacionada con el espesor total del horizonte saturado.
- Isoresistividades, relacionada con los resultados cuantitativos del horizonte saturado (resistividad verdadera).
- Resistencia transversal del horizonte saturado.

Tabla 31

Resultados generales de planos geofísicos

SEVs	Techo basamento impermeable (m)	Espesor acuífero (m)	Resistividad acuífero (Ohm-m)	Resistencia transversal acuífero (Ohm-m^2)
SEV-1	28	19	54	1026
SEV-2	23	13	60	780
SEV-3	98	76	16,84	1280
SEV-4	50	30	12,27	368
SEV-5	39	20	12	240
SEV-6	45	27	11	297
SEV-7	74	22	11	242
SEV-8	75	24	8	192
SEV-9	100	47	13	611
SEV-10	100	40	11	440
SEV-11	90	41	13	533
SEV-12	100	46	12	552
SEV-13	110	62	21	1302
SEV-14	100	50	14	700
SEV-15	111	62	11	682
SEV-16	111	55	10	550
SEV-17	130	78	16,69	1302
SEV-18	130	80	12,65	1012
SEV-19	80	33	12	396
SEV-20	70	18	10	180
SEV-21	105	45	17	765
SEV-22	68	32	21,56	690
SEV-23	100	65	13,77	895
SEV-24	63	35	31	1085
SEV-25	70	38	22	836
SEV-26	42	10	5	50
SEV-27	80	55	15	825
SEV-28	55	27	10	270
SEV-29	100	70	19,50	1365
SEV-30	98	72	15,63	1125

SEVs	Techo basamento impermeable (m)	Espesor acuífero (m)	Resistividad acuífero (Ohm-m)	Resistencia transversal acuífero (Ohm-m^2)
SEV-31	98	66	21,09	1392
SEV-32	94	67	15,75	1055
SEV-33	68	41	13,27	544
SEV-34	70	38	17	646
SEV-35	70	39	11	429
SEV-36	83	51	14,59	744
SEV-37	55	31	5.6	174
SEV-38	51	22	5	110
SEV-39	53	23	4	92
SEV-40	49	19	6,80	129
SEV-41	98	69	15,20	1049
SEV-42	27	9	2,80	25
SEV-43	69	49	15,37	753
SEV-44	28	14	4,60	64
SEV-45	70	51	10,04	512
SEV-46	50	34	9,35	318
SEV-47	100	80	8,57	686
SEV-48	36	26	8,22	214
SEV-49	70	48	9,13	438
SEV-50	70	44	9,15	403
SEV-51	52	43	8,07	347
SEV-52	90	59	6,40	378
SEV-53	50	16	2,40	38
SEV-54	68	32	21,56	690
SEV-55	29	18	7,25	131
SEV-56	49	19	6,20	118
SEV-57	98	66	7,82	516
SEV-58	69	39	1,30	51
SEV-59	69	37	8,86	328
SEV-60	100	70	7,07	495
SEV-61	98	61	5,25	320
SEV-62	77	42	10,67	448
SEV-63	60	26	9	234

SEVs	Techo basamento impermeable (m)	Espesor acuífero (m)	Resistividad acuífero (Ohm-m)	Resistencia transversal acuífero (Ohm-m^2)
SEV-64	70	34	15	510
SEV-65	57	22	7	154
SEV-66	98	63	14,22	896
SEV-67	80	43	11	473
SEV-68	100	55	10	550
SEV-69	70	25	12	300
SEV-70	72	22	15	330
SEV-71	39	26	7,35	191
SEV-72	37	23	6,61	152

Nota. Elaboración propia

5.8.1. Techo basamento impermeable

Este plano muestra las variaciones de la morfología de la profundidad del techo del substrato impermeable en relación con la potencia del relleno sedimentario de materiales permeables y semipermeables del Cuaternario reciente, desde el nivel del suelo.

Las isocurvas del mapa 33 – anexo 1 muestran que la zona de mayor profundidad del techo del basamento impermeable del acuífero está representada por el área de color marrón y rosado de 75m a 130m, relacionado con la ubicación de los SEVs 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 28, 30, 31, 32, 33, 37, 42, 48, 53, 57, 60, 61, 62, 66, 67 y 68.

La zona de color verde caracteriza a la zona de menor profundidad, de 19m a 50m, representada por los SEVs 1, 2, 4, 5, 6, 26, 27, 41, 43, 45, 47, 49, 54, 55, 56, 71 y 72.

La variación de la profundidad del techo basamento impermeable del acuífero estaría relacionada al emplazamiento de las rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Chocolate.

5.8.2. Espesor total del horizonte saturado

Este plano muestra curvas de igual espesor del horizonte permeable saturado que permite conocer la morfología o forma como se encuentra distribuido el acuífero, espesores que se comportan como un medio favorable para la circulación de las aguas subterráneas, cumpliendo la función de recolección, transporte y almacenamiento del recurso hídrico.

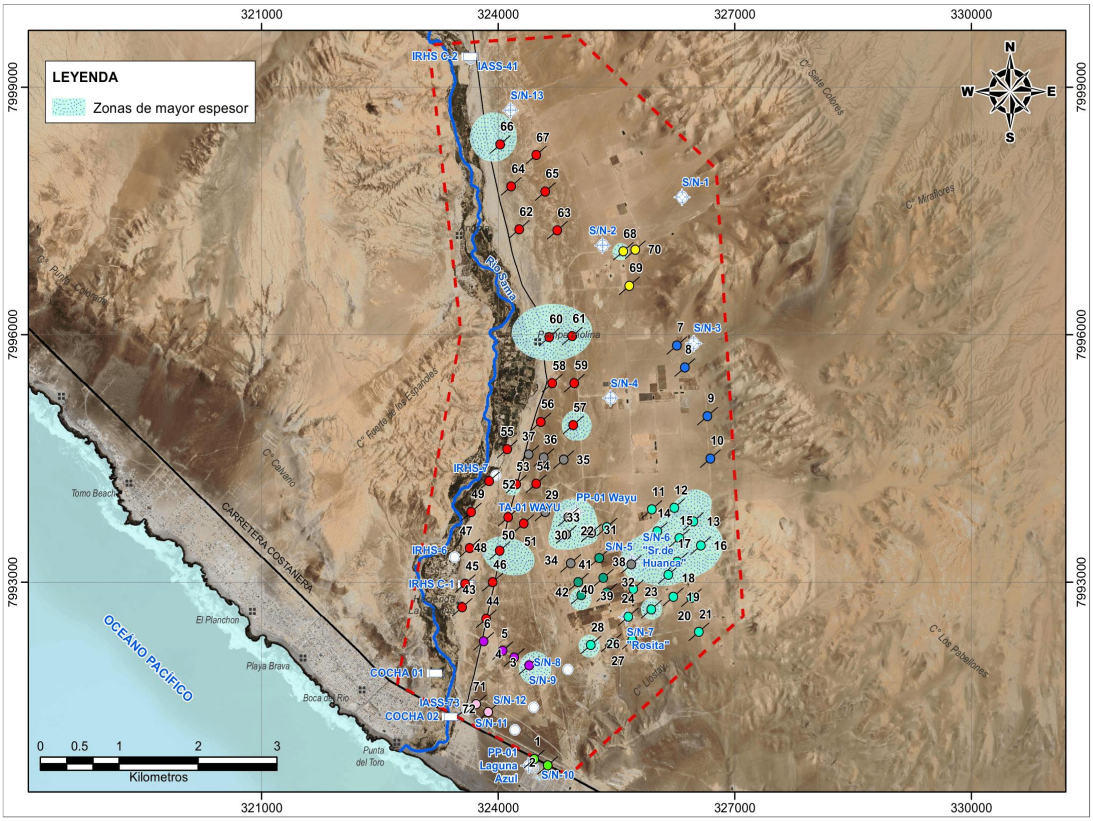
Las isocurvas del mapa 34 – anexo 1 muestran que el mayor espesor promedio del acuífero está representado por el área de color azul a azul oscuro de 51m a 80m, relacionado con la ubicación de los SEVs 3, 13, 15, 16, 17, 18, 23, 28, 30, 31, 32, 33, 37, 42, 46, 48, 53, 57, 60, 61, 66 y 68. En la figura 72 se resalta las zonas de mayor espesor de acuífero (achuradas de color celeste).

La zona de color celeste caracteriza a la zona de menor espesor, de 9m a 33m, representada por los SEVs 1, 2, 4, 5, 6, 7,, 8, 19, 20, 22, 26, 29, 38, 39, 40, 41, 43, 45, 49, 54, 55, 56, 63, 65, 69, 70, 71 y 72.

La variación del espesor del acuífero en la zona de estudio estaría relacionada al emplazamiento de las rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Chocolate.

Figura 72

Zonas de mayor espesor de acuífero



Nota. Elaboración propia

5.8.3. Resultados cuantitativos del horizonte saturado (resistividad verdadera)

La determinación de la resistividad verdadera es de gran importancia, porque relaciona la permeabilidad con la transmisividad. Los valores son mayores en zonas donde los materiales tienen mayor transmisividad (canto rodado, grava y arena); disminuyendo a medida que se hace menor la transmisividad (limo, arcilla y/o estratos salinos).

El mapa 35 – anexo 1 muestra valores de resistividad promedio que están en el orden de 1 Ohm-m a 60 Ohm-m; indicativo de que el acuífero de la zona de estudio posee muy baja, baja y regular permeabilidad y consecuentemente muy baja, baja y regular transmisividad.

Los valores más importantes están representados por las isocurvas de 20 Ohm-m a 60 Ohm-m (área de color azul a azul oscuro), comprendido por los SEVs 1, 2, 13, 22, 24, 25 y 32, que caracterizan materiales de regular permeabilidad de grava, arena y limo, en estado saturado. En el caso de los SEVs 1 y 2, identificarían a materiales de regular y buena permeabilidad de conchuelas, gravas, arenas y limos en estado suelto, compactados y saturados.

Las isocurvas de 10 Ohm-m a 20 Ohm-m (área de color azul clarol), comprendido por los SEVs 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 42, 44, 46, 62, 64, 66, 67, 68, 69 y 70, caracterizan a materiales de regular a baja permeabilidad de gravilla, arena y limo saturados.

Las isocurvas de 1 Ohm-m a 10 Ohm-m (área de color celeste), comprendida por los SEVs 8, 26, 38, 39, 40, 41, 43, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 65, 71 y 72; caracterizan a materiales de baja permeabilidad de gravilla, arena, limo, arcilla y/o estrato salino saturados. En los SEVs 71 y 72 identificarían a materiales de conchuelas, conglomerados, gravas, arenas y limos saturados con agua salobre o salado.

5.8.4. Resistencia transversal del horizonte permeable saturado

Este parámetro de Dark-Zarrouk (T), puede asociarse con la transmisividad "T" del acuífero (T = k · e), donde "k" es la conductividad hidráulica y "e" el espesor del acuífero. De esta manera, como parte del análisis que se hace de la información geoeléctrica, los mapas de resistencia transversal resultan una herramienta muy útil para la selección del área más favorable para la explotación del agua subterránea, porque representan zonas con estratos de resistividades aceptables, relacionadas con materiales permeables y que poseen buenos espesores de acuífero.

El mapa 36 – anexo 1 muestra que los valores más importantes estarían representados por las isocurvas de 775 Ohm-m^2 a 1395 Ohm-m^2 (área de color celeste a morado), comprendida por los SEVs 1, 2, 3, 13, 17, 18, 23, 24, 25, 28, 30, 31, 32, 33, 42 y 66, que ofrecerían las mejores condiciones hidrogeológicas para la prospección de aguas subterráneas.

El área de color amarillo con valores de 400 Ohm-m^2 a 775 Ohm-m^2 estaría asociado a condiciones hidrogeológicas regulamente favorables para la explotación del agua subterránea, relacionado con la ubicación de los SEVs 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 21, 22, 34, 35, 36, 37, 44, 46, 48, 50, 51, 57, 60, 62, 64, 67, 68.

La zona que no ofrecería características hidrogeológicas favorables es la de color rojo representada por las isocurvas de 25 Ohm-m^2 a 400 Ohm-m^2, comprendida por los SEVs 4, 5, 6, 7, 8, 19, 20, 26, 29, 38, 39, 40, 41, 43, 45, 47, 49, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 61, 63, 65, 69, 70, 71 y 72, que identificarían

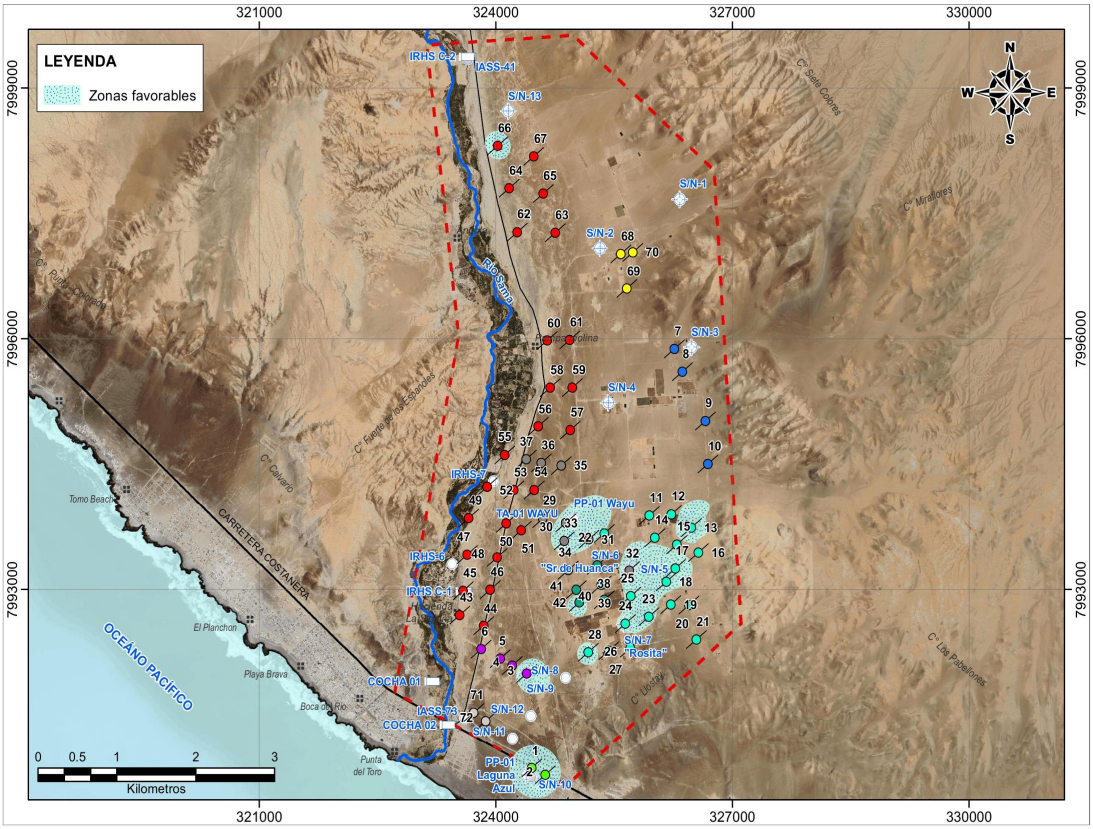
materiales finos de muy baja a escasa transmisividad y/o con presencia de estratos salinos y menor espesor de acuífero.

5.9. Ubicación de zonas favorables

En base a los resultados de resistencia transversal, que relaciona el espesor del horizonte saturado con la resistividad de los materiales, se ha identificado que las zonas con las condiciones geofísicas más favorables para el aprovechamiento de aguas subterráneas e que infieren un potencial hidrogeológico, son las relacionadas con los SEVs 1, 2, 3, 13, 17, 18, 23, 24, 25, 28, 30, 31, 32, 33, 42 y 66 (ver figura 73).

Figura 73

Zonas favorables con potencial hidrogeológico



Nota. Elaboración propia

Capítulo VI: Inventario de fuentes de agua subterránea

Con la finalidad de determinar la cantidad de pozos y cuantificar la masa de agua explotada del acuífero; se realizó el inventario de fuentes de agua del sector Pampa Molina y alrededores, tomando como referencia la información técnica registrada por el INRENA el 2006, así como del Proyecto Especial Tacna el 2012 y la ANA el 2022, que fueron complementadas con la data de campo obtenida el año 2024 por la empresa Edgar Manuel Acosta Pinto Ingenieros SAC, en la cual la tesista ha participado activamente; lográndose inventariar un total de 24 fuentes de agua, desde Playa Llostay hasta el sector La Vituña (ver mapa 37 – anexo 1 y cuadro de caracteristicas técnicas de fuentes de agua - anexo 4.1)

6.1. Tipo de fuentes de agua inventariadas

Se ha registrado 04 pozos tubulares de mediana profundidad (17%), 07 pozos mixtos (29%), 09 pozos tajo abierto (437%) y 04 Cochas (17%).

Tabla 32

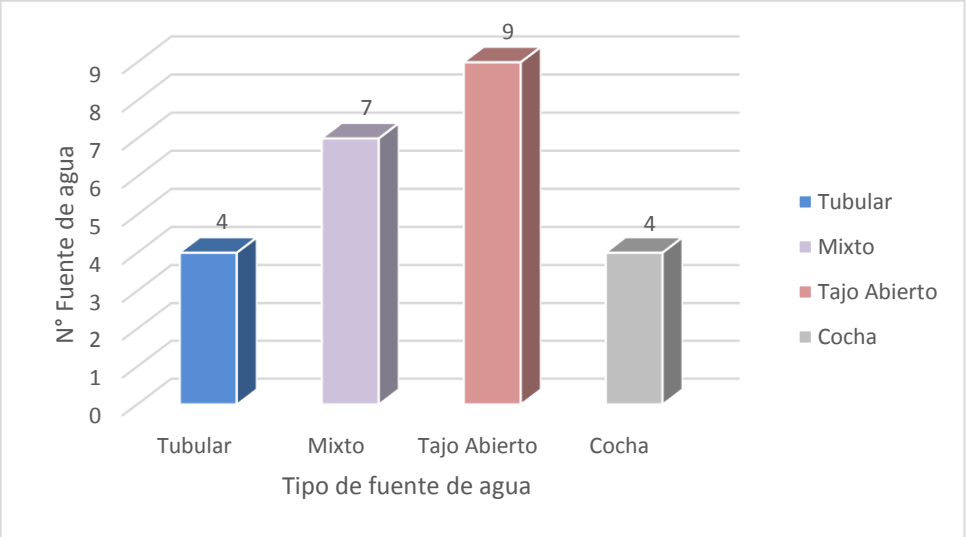
Distribución de las fuentes de agua según su tipo

Descripción	Tipo de las fuentes de Agua				
	Tubular	Mixto	Tajo abierto	Cocha	Total
N° de fuentes de agua	4	7	9	4	24
%	17	29	37	17	100

Nota. Elaboración propia

Figura 74

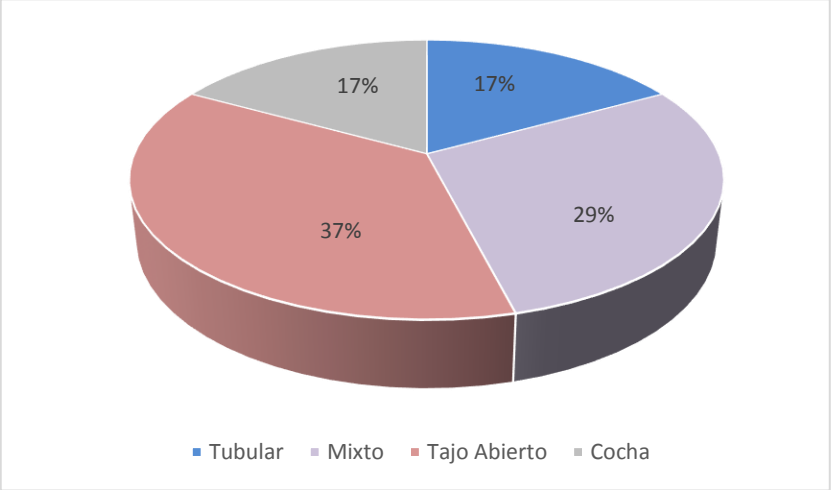
Distribución de las fuentes de agua según su tipo



Nota. Elaboración propia

Figura 75

Distribución porcentual de fuentes de agua según su tipo



Nota. Elaboración propia

Figura 76

Pozo tubular PP-01 Wayu Perú, ubicado en sector Pampa Molina

Nota. Tomado de EMAP Ingenieros SAC

Figura 77

Cocha 01 de propiedad de la Municipalidad C.P. Boca del Río, ubicado en el cauce del río Sama, 520m al NW de Boca de Río.

Nota. Tomado de EMAP Ingenieros SAC

6.2. Estado de las fuentes de agua inventariadas

En el área de estudio se ha registrado 09 fuentes de agua actualmente utilizadas (38%); 13 en estado utilizable (54%) y 02 pozos no utilizables (8%). Ver tabla 33, figura 78 y figura 79.

Tabla 33

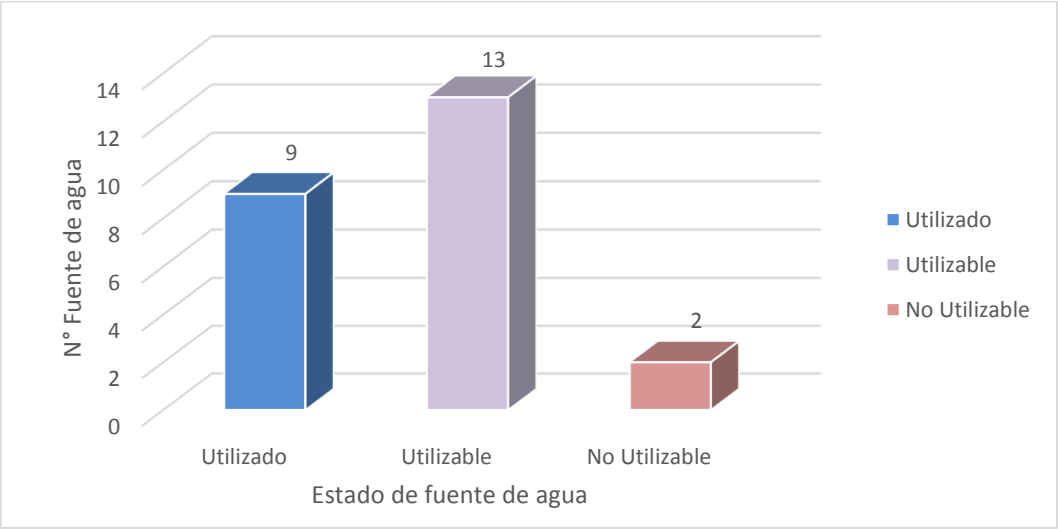
Distribución de las fuentes de agua según su estado

Descripción	Estado de las fuentes de agua			
	Utilizado	Utilizable	No Utilizable	Total
N° de fuentes de agua	9	13	2	24
%	38	54	8	100

Nota. Elaboración propia

Figura 78

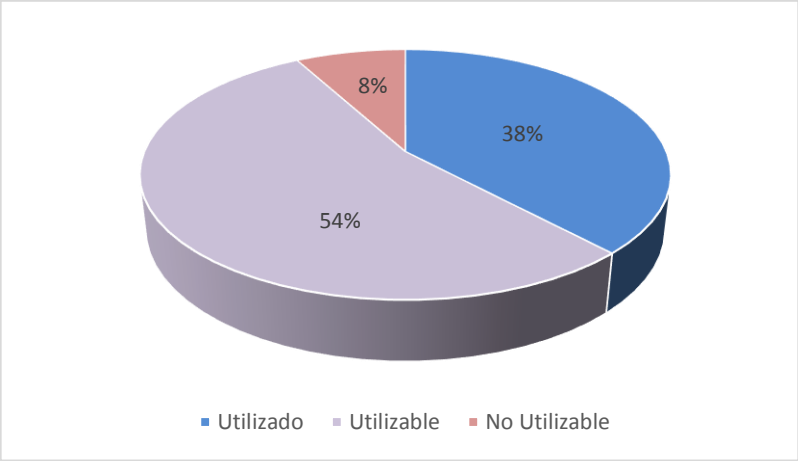
Distribución de las fuentes de agua según su estado



Nota. Elaboración propia

Figura 79

Distribución porcentual de fuentes de agua según su estado



Nota. Elaboración propia

Figura 80

Pozo tajo abierto de propiedad Promotora DAVECO, en estado no utilizable ubicado en terrenos del proyecto Laguna Azul-sector playa Llostay

Nota. Tomado de EMAP Ingenieros SAC

6.3. Uso de las fuentes inventariadas

En la zona de estudio se ha inventariado 14 fuentes de agua utilizadas con fines agrícolas (58%), 01 con fines de otros usos (4%) y 09 no cuentan registro de uso (38%). Ver tabla 34, figura 81 y figura 82.

Tabla 34

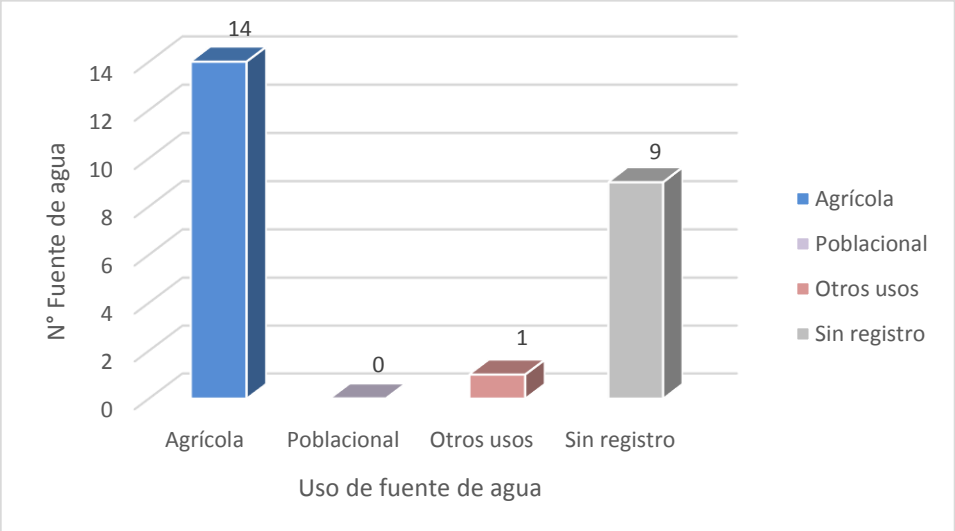
Distribución de las fuentes de agua según su uso

Descripción	Tipo de las fuentes de agua				
	Agrícola	Poblacional	Otros usos	Sin registro	Total
N° de fuentes de agua	14	0	1	9	24
%	58	0	4	38	100

Nota. Elaboración propia

Figura 81

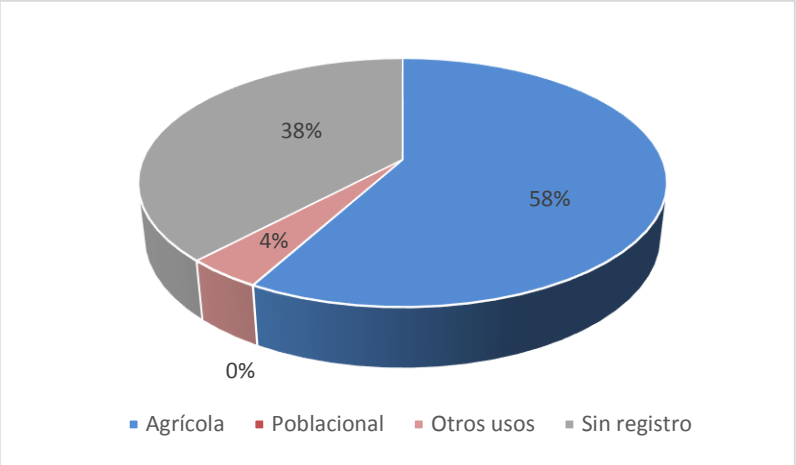
Distribución de las fuentes de agua según su uso



Nota. Elaboración propia

Figura 82

Distribución porcentual de fuentes de agua según su uso



Nota. Elaboración propia

6.4. Equipo de bombeo

Se ha registrado 12 pozos con equipo de bombeo, de los cuales 05 se encuentran equipados con bombas Turbina Vertical (42%), 04 con bombas sumergibles (33%) y 03 con bombas centrifugas de succión (25%). Ver tabla 35.

Tabla 35

Distribución de las fuentes de agua según tipo de bomba

Descripción	Tipo de bomba			
	Turbina vertical	Sumergible	Centrifuga de succión	Total
N° de fuentes de agua	5	4	3	12
%	42	33	25	100

Nota. Elaboración propia

Respecto al tipo de motor, 01 pozo se encuentra accionado a un motor eléctrico (8%), 09 presentan motores diesel (75%) y 02 pozos están accionados por motores gasolineros (17%). Ver tabla 36.

Tabla 36

Distribución de las fuentes de agua según tipo de motor

Descripción	Tipo de motor			
	Eléctrico	**Diesel**	**Gasolina**	**Total**
N° de fuentes de agua	1	9	2	12
%	8	75	17	100

Nota. Elaboración propia

6.5. Rendimiento de las fuentes de agua inventariadas

El máximo rendimiento registrado en los pozos tubulares es de 30.41 l/s y el mínimo de 20 l/s; en los pozos mixtos se tiene un rendimiento máximo de 8 l/s y mínimo de 2 l/s y en las cochas se registró un rendimiento de 4 l/s (ver tabla 37)

Tabla 37

Variación de los rendimientos (l/s) según el tipo de fuente de agua

Descripción	Tubular		Mixto		Tajo abierto		Cocha	
	Min	**Máx**	**Min**	**Máx**	**Min**	**Máx**	**Min**	**Máx**
Código	PP-01 Laguna Azul	S/N-7 Rosita	S/N-13	S/N-9 Guillén	-	-	IRHS C-2	-
Caudal (l/s)	20	30,41	2	8	-	-	4	-

Nota. Elaboración propia

Figura 83

Aforo de caudal del pozo PP-01 Wayu Perú

Nota. Tomado de EMAP Ingenieros SAC

6.6. Explotación del acuífero

Hasta Mayo del 2024 se ha registrado un volumen de explotación total del acuífero Pampa Molina, de 1138408,20 m^3 (1,14 MMC/año), equivalente a un caudal constante de 36,10 l/s, que resulta de 06 fuentes de agua en actual operación: Cocha IRHS C-2 y los pozos S/N-6 “Señor de Huanca”, S/N-7 “Rosita”, S/N-9 “Guillen”, S/N-13 y PP-01 “Laguna Azul”; pero existen otros 03 pozos operativos, de los cuales se desconoce el caudal y volumen de explotación (ver tabla 38).

Tabla 38

Comparación de caudales y volúmenes explotados mediante pozos, acuífero sector Pampa Molina

Fuentes de agua	Propietario	Tipo	Caudal (l/s)	Volumen (m^3/año)
IRHS C-2	Sr. Apaza	Cocha	4	4147,20
S/N-2 (*)	Privado	Mixto	-	-
S/N-4 (*)	Asoc. Divino Niño	Mixto	-	-
S/N-6	Asoc. Señor de Huanca	Tubular	30	394200,00
S/N-7	Rosita	Tubular	30,41	399587,40
S/N-9	Sr. Guillen	Mixto	8	105120,00
PP-01	Promotora DAVECO	Tubular	20	223905,60
S/N-14	Privado	Mixto	2	2073,60
IRHS C-1 (*)	Sr. Jose Huanca	Cocha	-	-
	Total			**1138408,20**

Nota. (*) Sin registro de caudal y volumen de explotación. Elaboración propia.

El incremento de pozos a través de los años en la zona del sector Pampa Molina, ha traído como consecuencia el aumento del volumen de explotación del acuífero: en el año 2005 se registró un total de 04 pozos perforados, de los cuales 03 de ellos se encontraban en estado utilizado, dando un volumen de 0,02 MMC/año (0,63 l/s) y en el año 2024 se inventarió un total de 24 fuentes de agua subterránea, de las cuales 09 se encontraban utilizadas, dando un volumen de explotación de 1,14 MMC/año (36.10 l/s). Ver tabla 39.

Tabla 39

Volumen de explotación de aguas subterráneas registrados en el 2005 y 2024, acuífero sector Pampa Molina

Total pozos	Pozos utilizados	Volumen explotado (MMC/año)	Volumen explotado (l/s)	Año
4	3	0,02	0,63	2005
24	9	1,14 (*)	36,10 (*)	2024

Nota. (*) Volumen explotado de solo 06 pozos en actual operación; existen otros 03 pozos operativos, de los cuales se desconoce el caudal y/o volumen.

Elaboración propia.

6.7. Situación legal de las fuentes de agua

En base a la información revisada en el Portal Web del Observatorio de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y al trabajo de campo, se ha identificado solo 01 pozo con licencia de derecho de uso de agua otorgada por la ANA, el “PP-01 Laguna Azul” de propiedad de la empresa PROMOTORA DAVECO. Por otro lado, de acuerdo a lo indicado por los propietarios de los pozos S/N-7 Rosita y PP-01 Wayu Perú, éstos se encuentran en trámite de regularización de licencia. Las otras 21 fuentes de agua inventariadas no contarían con licencia de derecho de uso de agua.

Capítulo VII: Hidrodinámica subterránea

En todo estudio hidrogeológico, los resultados de la hidraúlica subterránea permiten determinar las características físicas y el funcionamiento del acuífero. Por otro lado, dentro de la hidráulica subterránea uno de sus componentes es la hidrodinámica; la cual estudia el funcionamiento del acuífero y el movimiento del agua en un medio poroso, es decir cuantificar la capacidad de almacenar y transmitir agua (INRENA, 2006); siendo necesario para ello definir las características hidraúlicas del mismo.

En este sentido, para determinar los parámetros hidraúlicos del acuífero transmisividad “T”, permeabilidad “K” y coeficiente de almacenamiento “S” del sector Pampa Molina – parte baja del valle Sama, se ha empleado la técnica de evaluación mediante pruebas de bombeo a caudal constante. Según Coarita (2017) este ensayo es de procedimiento simple recomendado en pozos donde las condiciones hidrodinámicas ya están establecidas por la explotación diaria de los pozos con un régimen de explotación máximo de 18 horas a caudal constante; el proceimiento consiste en medir el nivel estático o inicial, antes de accionar la bomba del pozo y durante el bombeo medir los niveles de descenso en periodos de tiempo pre establecidos, buscando que el nivel dinámico encuentre finalmente una estabilización bajo las condiciones reales de trabajo, simultáneamente con los pozos vecinos.

7.1. Pruebas de bombeo

Los parámetros hidráulicos del acuífero Pampa Molina han sido obtenidos de la interpretación de las pruebas de bombeo (descenso y recuperación) de 04 pozos de la zona (ver figura 84), ejecutadas por la empresa Edgar Manuel Acosta Pinto Ingenieros S.A.C. entre los años 2017-2023, contando con la participación de la tesista. Para su ejecución se siguió el procedimiento que se describe a continuación:

- Medición de los niveles estáticos antes de cada prueba de bombeo.
- Inicio de la prueba a caudal constante y medición de la variación del nivel dinámico con pozómetro graduado al milimetro (sonda eléctrica).
- Registro del caudal de salida por el método volumétrico con cilindro aforador de 103 Litros y midiéndose el tiempo de llenado.

En la tabla 40 se presenta la información técnica de los pozos donde se ejecutaron las pruebas de bombeo (ubicación, nivel estático inicial y caudal).

Tabla 40

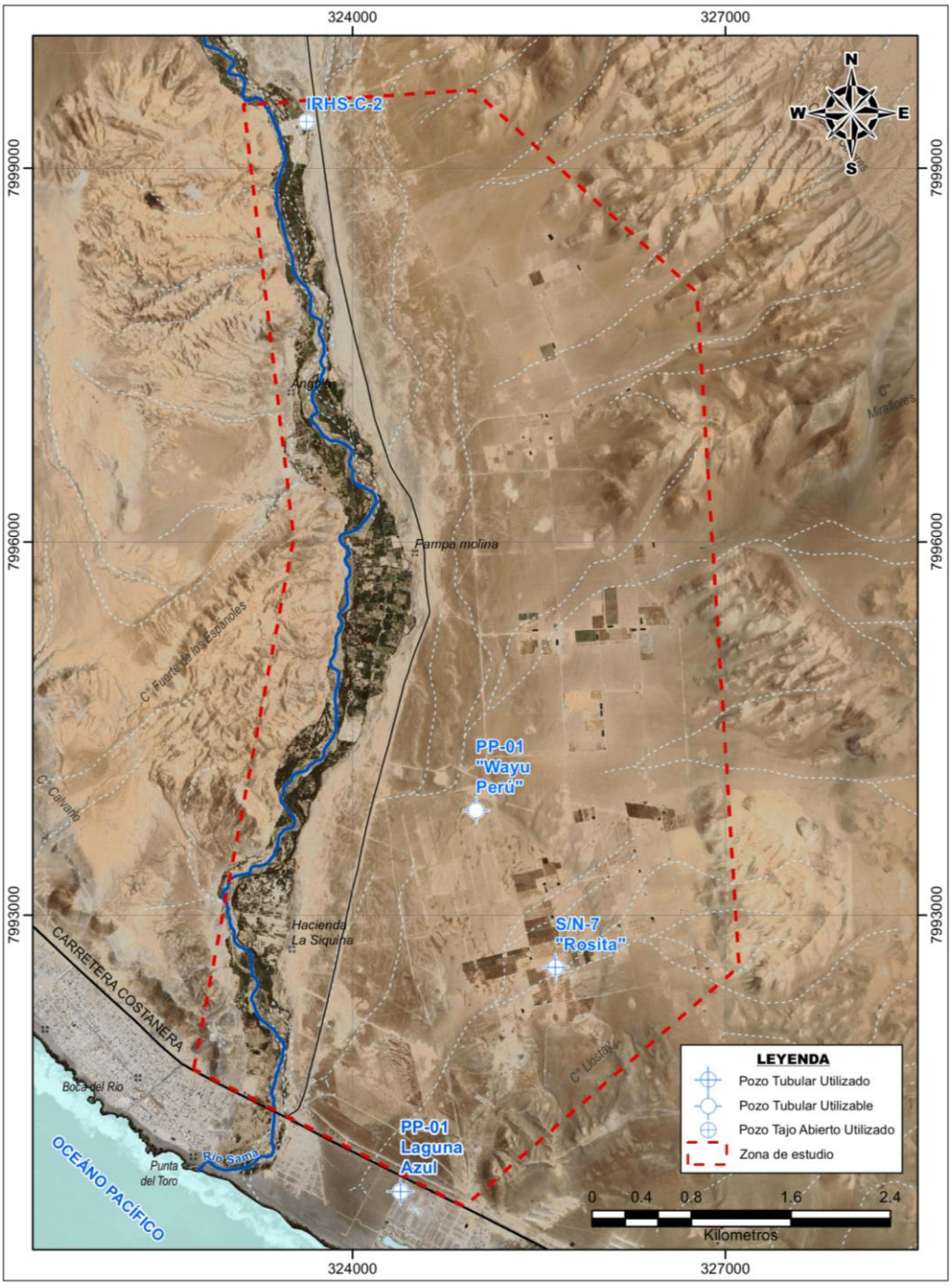
Pozos de pruebas de bombeo

Pozo	Coordenadas UTM WGS 84		N.E.	Caudal
	Este	Norte	(m)	(l/s)
PP-01 Laguna Azul	324386	7990780	8,10	20
PP-01 Wayu Perú	324990	7993845	32,10	21,70
S/N-7 Rosita	325630	7992583	27,77	30,41
IRHS C-2 Apaza	323628	7999377	0,27	4,12

Nota. Elaboración propia

Figura 84

Ubicación de pozos pruebas de bombeo



Nota. Elaboración propia

El tiempo de duración de las pruebas de bombeo estuvo supeditado a alcanzar la estabilización del nivel dinámico, es así que en los pozos PP-01 del Proyecto Laguna Azul, PP-01 Wayu Perú, S/N-7 Rosita e IRHS-C-2 se contaron con tiempos de bombeo de 24, 9, 6 y 3 horas respectivamente.

Al finalizar la fase de descenso, se detuvo el bombeo e inmediatamente se inició la fase de recuperación, realizándose mediciones de la variación de los niveles, hasta recuperar el nivel estático inicial.

En la tabla 41 se resume las horas de bombeo de la fase de descenso y recuperación.

Tabla 41

Tiempo total de prueba de bombeo pozos zona de estudio

Pozo	**Tiempo prueba de bombeo (horas)**	
	Fase descenso	**Fase recuperación**
PP-01 Laguna Azul	24	-
PP-01 Wayu Perú	9	-
S/N-7 Rosita	6	2
IRHS C-2 Apaza	3	3

Nota. Elaboración propia

Durante las pruebas de bombeo se realizaron lecturas de los niveles de agua, de acuerdo a los intervalos de tiempo descritos en la tabla 42.

Tabla 42

Intervalos de tiempo para toma de datos durante pruebas de bombeo

Tiempo de bombeo	Intervalos entre lecturas
0 a 5 min	Cada 30 segundos
5 a 10 min	Cada 1 minuto
10 a 20 min	Cada 2 minutos
20 min a 1 hora	Cada 5 minutos
1 a 2 horas	Cada 10 minutos
2 a 3 horas	Cada 15 minutos
3 a 5 horas	Cada 30 minutos
5 a 10 horas	Cada 1 horas
10 horas en adelante	Cada 2 horas

Nota. Elaboración propia

7.2. Procesamiento e interpretación de datos de pruebas de bombeo

Los datos de campo fueron digitalizados previamente en una planilla Excel, en la cual se ha graficado las curvas de descenso y recuperación para la determinación de los parámetros hidráulicos del acuífero (transmisividad y permeabilidad) y luego fueron verificados con el software AQUIFER TEST 2016.1, para tener mayor confiabilidad en los resultados.

La interpretación de las pruebas de bombeo se realizó empleando la fórmula de Theis-Jacob, debido a que esta metodologia es la que más se ajusta a las condiciones del acuífero evaluado:

- Tipo de acuífero: Libre. Si bien este método fue diseñado para acuíferos confinados, de acuerdo a Schulz & García (2018) se puede

utilizar este método siempre y cuando se cumpla que el descenso producido por el bombeo sea muy pequeño (hasta 10%) en comparación con el espesor saturado del acuífero o se realice la corrección de Jacob.

- Litología predominante: grava, arena y limo, característico de un depósito aluvial con regular a alta transmisividad.
- Característica clave: Al tratarse de un acuífero aluvial, por naturaleza es heterogéneo y anisótropo; pero según Vélez (2011) se puede asumir que es homogéneo e isótropo para fines prácticos.

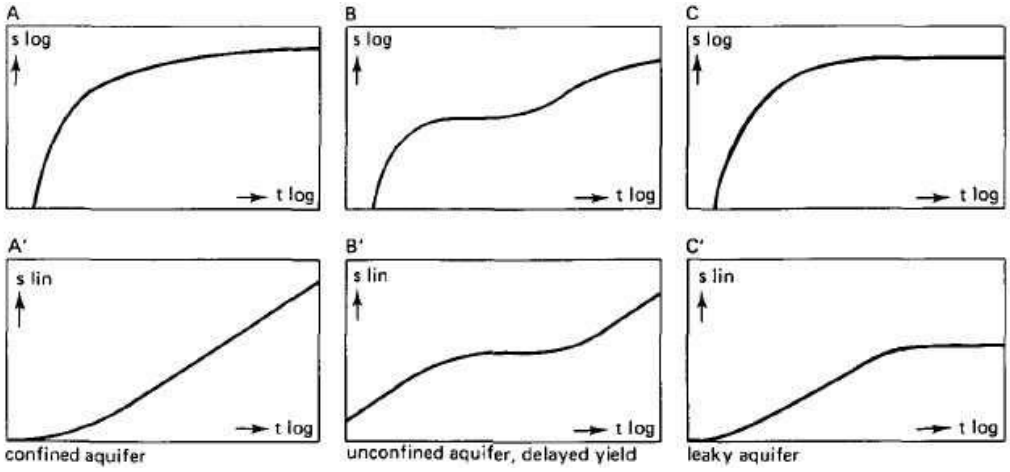
Además, el método de Theis-Jacob ha sido seleccionado frente a la solución de Newman, que teóricamente es el más adecuado para acuiferos libres según varios autores; por las siguientes razones:

- Es el método más utilizado por la Autoridad Nacional del Agua para interpretar pruebas de bombeo en acuiferos libres costeros, como el acuífero Caplina, valle de Asia, Ica, entre otros; lo que garantiza confiabilidad en los resultados obtenidos.
- Rápidez y sencillez: permite determinar la transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S) mediante un gráfico semilogaritmico sin necesidad de ajustar curvas complejas. Newman requiere el uso de curvas tipo, siendo su análisis más laborioso; tambien permite calcular T y S y adicionalmente, el almacenamiento especifico (S_y), necesario para caracterizar el movimiento del nivel freático, complicando el ajuste si no se toman buenos datos.

- Las gráficas de abatimiento vs. tiempo obtenidas en las pruebas de bombeo se ajustan mejor para la interpretación por Theis-Jacob, porque tienen un comportamiento lineal (solo etapa tardía), similar a un acuífero confinado, es decir presenta una sola curva; en cambio para emplear Newman la gráfica debe presentar un comportamiento bimodal (etapa tardía y etapa temprana), es decir presentar dos curvas, una forma de “S” (ver figura 85).
- Para que el método de Newman funcione correctamente y entregue resultados fiables exige de una red de pozos de observación (piezómetros) para la toma de datos de alta precisión en los primeros minutos, lo que no existe en la zona de estudio. Theis-Jacob es mucho más tolerante a estas deficiencias, ya que depende para su interpretación de los datos medios y tardíos.

Figura 85

Curvas tipo para acuíferos confinados y libres



Nota. Acuífero (a) confinado y (b) libre. Tomado de Gómez & Donado (2012)

Los parámetros hidráulicos han sido obtenidos de acuerdo al método propuesto en la tabla 43.

Tabla 43

Metodología para cálculo de parámetros hidráulicos

Parámetro hidráulico	Metodología	Ecuación
Transmisividad (T)	Fórmula de Theis y Jacob en pruebas de bombeo	$\mathrm{T} = 0.183\frac{\mathrm{Q}}{\Delta s}$
Permeabilidad (K)	Ecuación matemática División de “T” entre espesor de acuífero	$\mathrm{K} = \frac{T}{e}$
Coeficiente de almacenamiento (S)	Valor asumido ante falta de piezómetros	-

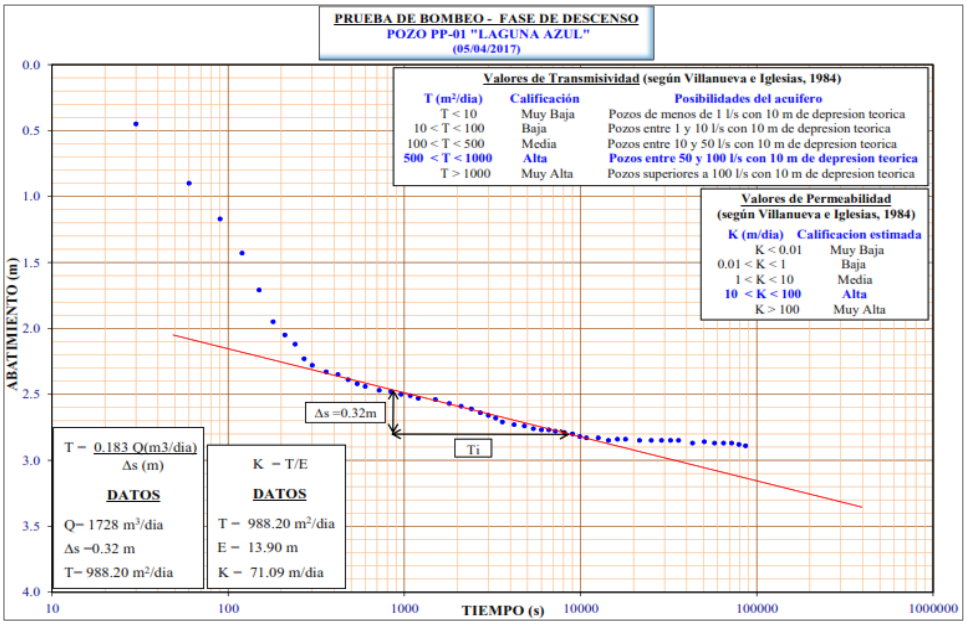
Nota. Q=caudal, Δs= abatimiento por ciclo logarítmico de tiempo, e=espesor de acuífero. Elaboración propia.

Para el cálculo de la permeabilidad, se consideró como espesor de acuífero, la diferencia entre la profundidad perforada de los pozos y el nivel estático del agua; solo para el caso IRHS C-2, de 1.20m de profundidad, se asumió un espesor de acuífero de la correlacion de los sondajes eléctricos verticales ejecutados en el sector Pampa Molina.

A continuación se muestran los gráficos de la interpretación manual realizada en Excel y con el programa AQUIFER TEST de las 04 pruebas de bombeo ejecutadas en pozos de la zona de estudio, en los cuales se observan resultados similares. Los formatos excel digitalizados, asi como, el reporte del programa AQUIFER-TEST, se muestran en el anexo 5 del presente estudio.

Figura 86

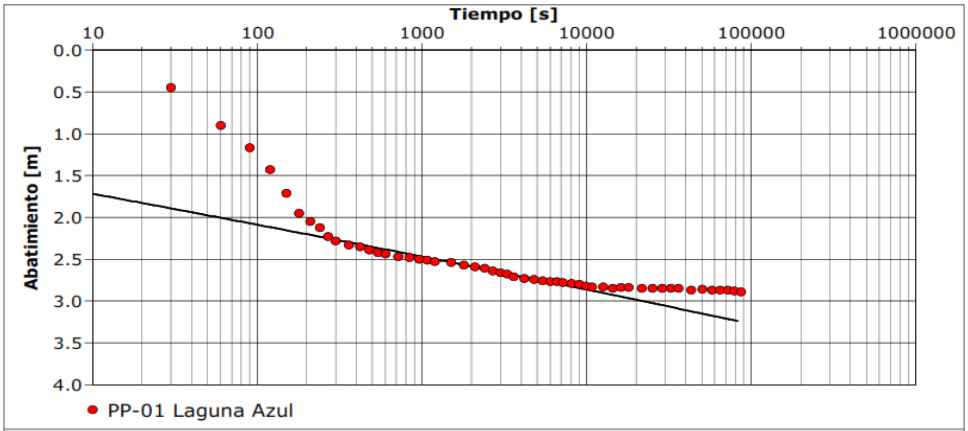
Gráfica en Excel prueba de bombeo-fase descenso pozo PP-01 Laguna Azul



Nota. Elaboración propia

Figura 87

Gráfica Aquifer-Test prueba de bombeo-fase descenso pozo PP-01 Laguna Azul



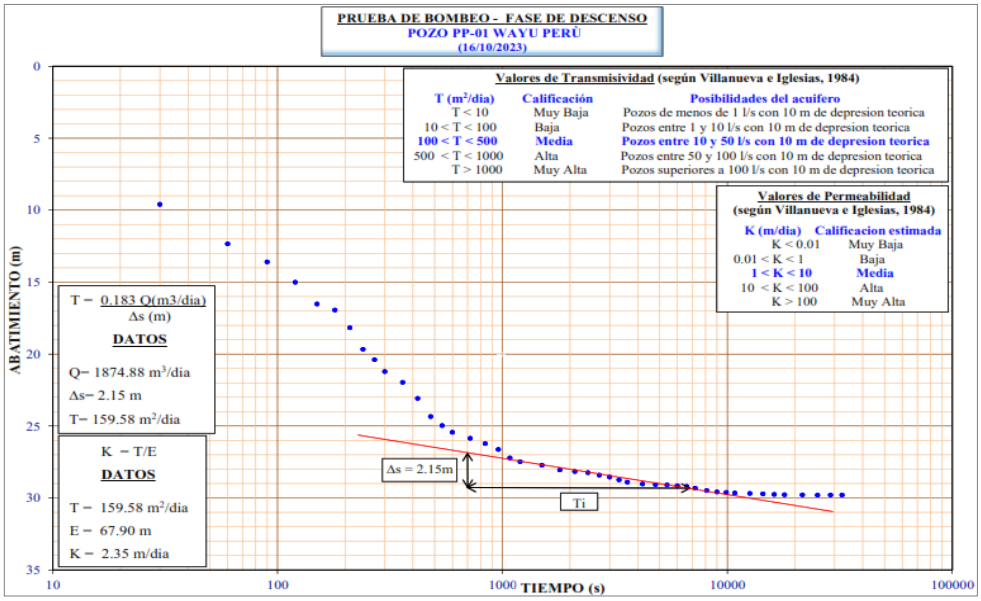
Calculation using Theis with Jacob Correction

Observation Well	Transmissivity [m²/d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
PP-01 Laguna Azul	992.90	71.43			

Nota. Elaboración propia

Figura 88

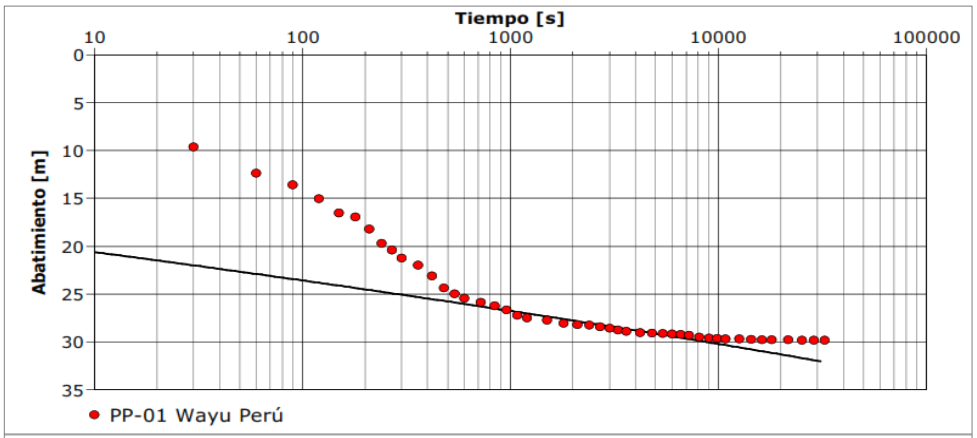
Gráfica en Excel prueba de bombeo-fase descenso pozo PP-01 Wayu Perú



Nota. Elaboración propia

Figura 89

Gráfica Aquifer-Test prueba de bombeo-fase descenso pozo PP-01 Wayu Perú

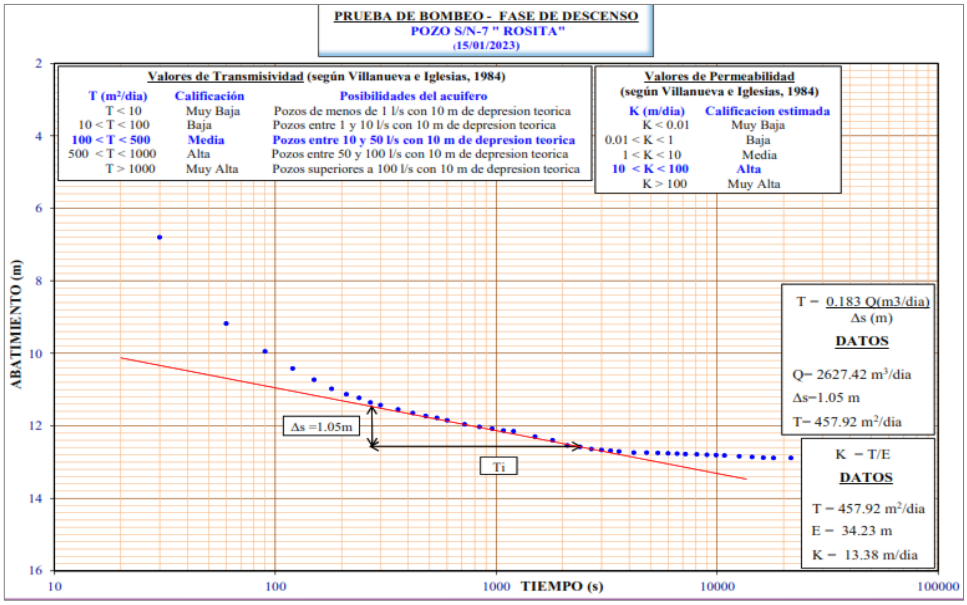


Calculation using Theis with Jacob Correction					
Observation Well	Transmissivity [m²/d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
PP-01 Wayu Perú	171.52	2.53			

Nota. Elaboración propia

Figura 90

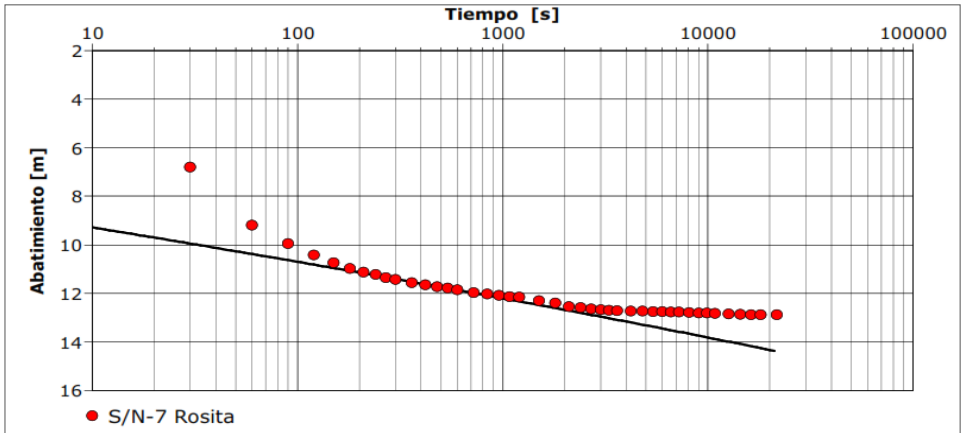
Gráfica en Excel prueba de bombeo-fase descenso pozo Rosita



Nota. Elaboración propia

Figura 91

Gráfica en Aquifer-Test prueba de bombeo-fase descenso pozo Rosita



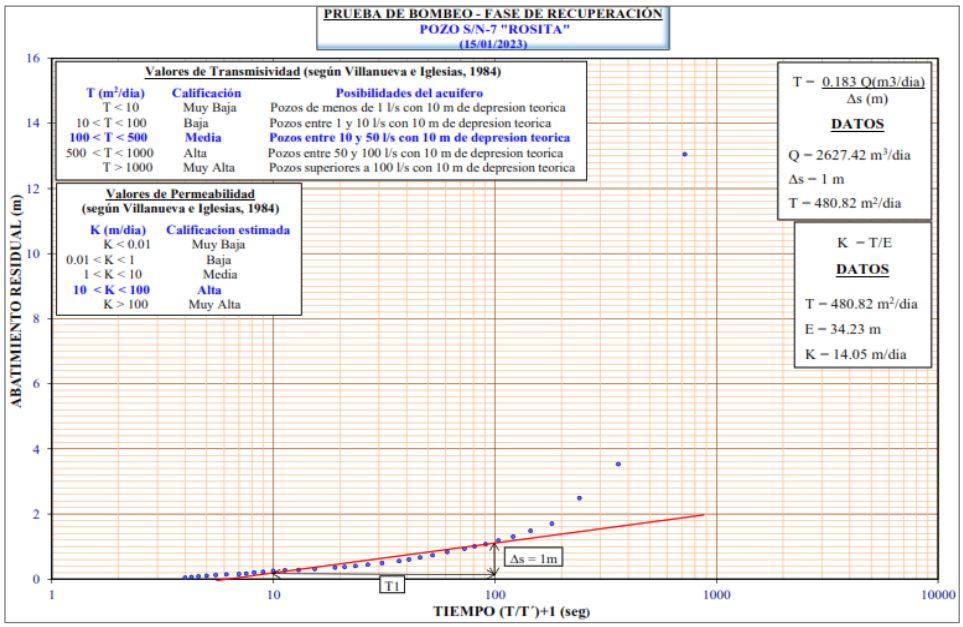
Calculation using Theis with Jacob Correction

Observation Well	Transmissivity [m²/d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
S/N-7 Rosita	480.50	14.04			

Nota. Elaboración propia

Figura 92

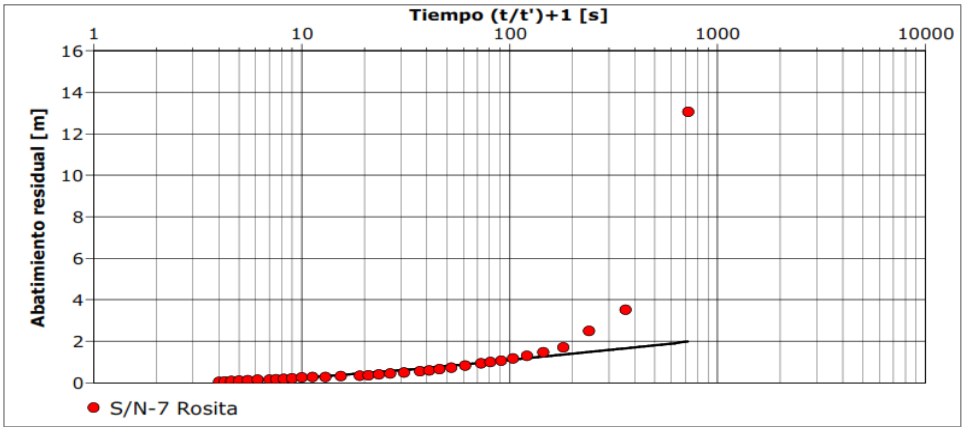
Gráfica Excel prueba de bombeo-fase recuperación pozo Rosita



Nota. Elaboración propia

Figura 93

Gráfica en Aquifer-Test prueba de bombeo-fase de recuperación pozo Rosita

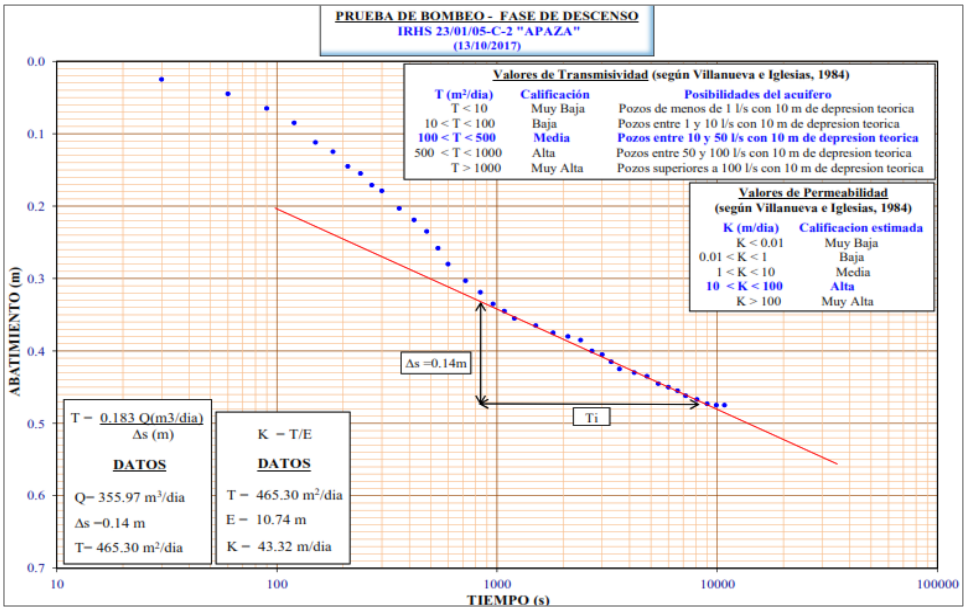


Calculation using Theis with Jacob Correction					
Observation Well	Transmissivity [m²/d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
S/N-7 Rosita	481.30	14.06			

Nota. Elaboración propia

Figura 94

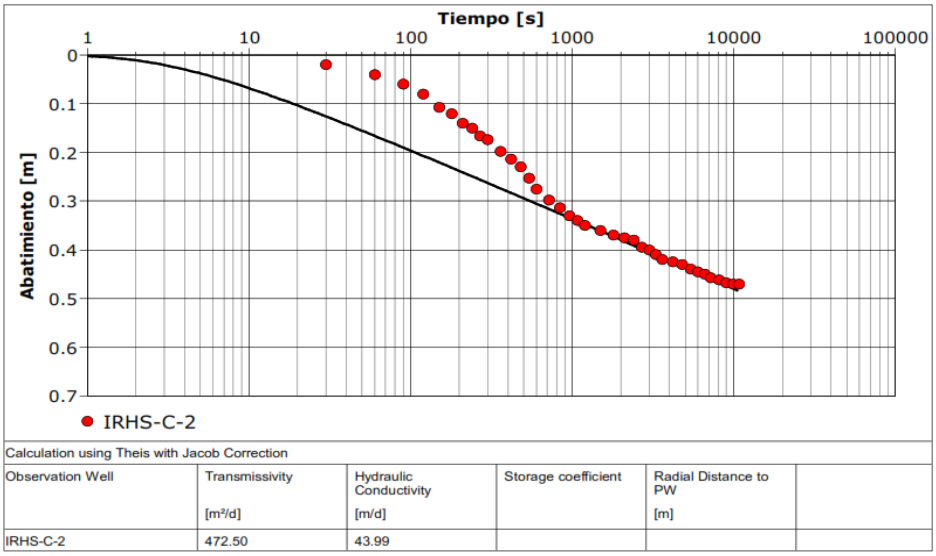
Gráfica Excel prueba de bombeo-fase descenso pozo IRHS C-2



Nota. Elaboración propia

Figura 95

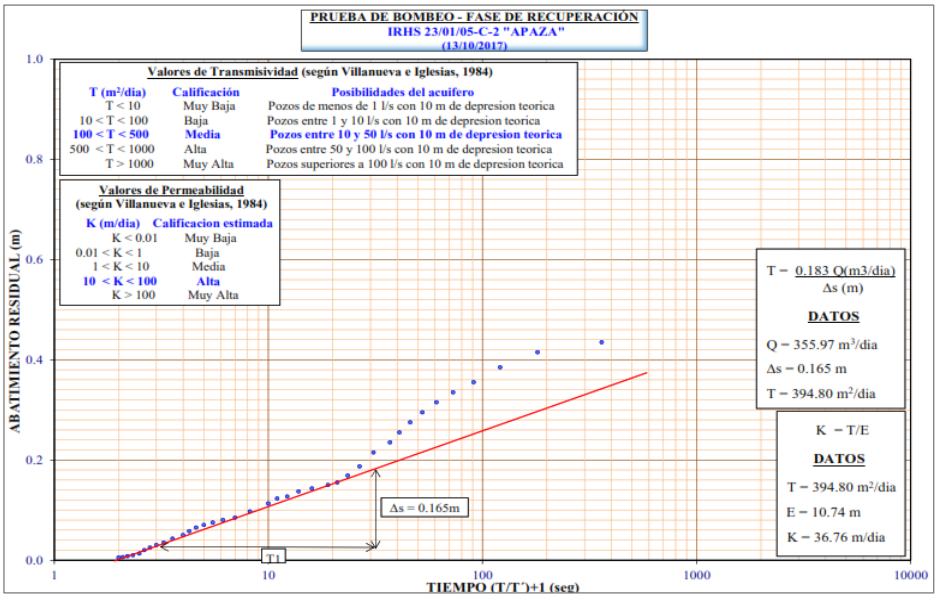
Gráfica en Aquifer-Test prueba de bombeo-fase descenso pozo IRHS C-2



Nota. Elaboración propia

Figura 96

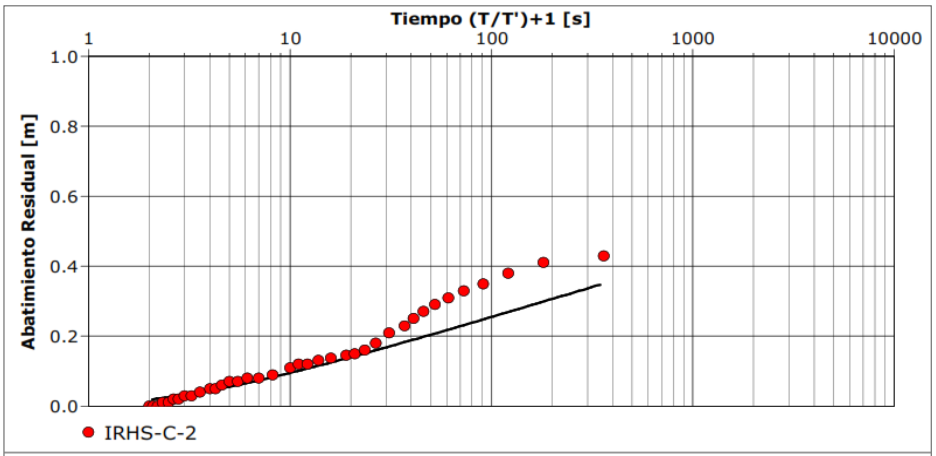
Gráfica en Excel prueba de bombeo-fase recuperación pozo IRHS C-2



Nota. Elaboración propia

Figura 97

Gráfica en Aquifer-Test prueba bombeo-fase de recuperación pozo IRHS C-2



Calculation using Theis with Jacob Correction

Observation Well	Transmissivity [m²/d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
IRHS-C-2	386.00	35.94			

Nota. Elaboración propia

7.3. Resultados de parámetros hidráulicos

En la tabla 44 se resumen los parámetros hidráulicos obtenidos de la interpretación efectuada en Excel con el método de Theis-Jacob, tanto de la fase de descenso como la recuperación.

Tabla 44

Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo

Pozo	Descenso		Recuperación	
	T (m^2/día)	K (m/día)	T (m^2/día)	K (m/día)
PP-01 Laguna Azul	988,20	71,09	-	-
PP-01 Wayu Perú	159,58	2,35	-	-
S/N-7 Rosita	457,92	13,38	480,82	14,05
IRHS C-2	465,30	43,32	394,80	36,76

Nota. Elaboración propia

7.3.1. Transmisividad (T) y permeabilidad (K)

La transmisividad varía entre 159,58 m^2/dia a 988,20 m^2/dia y la permeabilidad entre 2,35 m/dia a 71,09 m/dia, valores que según Villanueva e Iglesias (1984) clasifican como media a alta, característico de un acuífero libre de regulares a buenas características hidrogeológicas.

7.3.2. Coeficiente de almacenamiento (S)

Ante la ausencia de pozos piezométricos, se ha asumido un coeficiente de almacenamiento de 5%, tomando como base la naturaleza y características litológícas del acuífero local, en comparación con zonas similares según tabla 17.

Capítulo VIII: Hidrogeoquímica

La calidad del agua subterránea depende de las condiciones del acuífero, su litología, velocidad de circulación, calidad del agua de infiltración, factores hidrodinámicos y de las actividades humanas. La composición físico-química del agua se adquiere al momento de la circulación en el subsuelo y por entrar en contacto con diferentes tipos de rocas y minerales (INGEMMET, 2009).

La presente evaluación hidrogeoquímica está orientado a definir el grado de mineralización y características físico-químicas de las aguas subterráneas del sector Pampa Molina para determinar su calidad para fines agrícolas.

Los resultados obtenidos han sido comparados con los estándares de calidad ambiental (ECA) para aguas destinadas a consumo humano y riego de cultivos del Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM.

8.1. Parámetros físico-químicos in situ

Se ha efectuado una evaluación preliminar de la calidad de agua de la zona de estudio, mediante la medición de los parámetros físico-químico in situ de: conductividad eléctrica (C.E.), pH y temperatura de las aguas de los pozos y fuentes inventariadas, empleando medidores multiparamétricos de calidad de agua; haciendo énfasis en la conductividad eléctrica, parámetro que permite determinar preliminarmente la salinidad y estimar si las aguas son aptas para los fines requeridos. Los resultados obtenidos, se muestran en la tabla 45.

Tabla 45

Parámetros físico-químicos in situ fuentes de agua sector Pampa Molina

Pozo y/o fuente de agua	Parámetros físico-químicos in situ		
	pH	Temperatura °C	Conductividad (mS/cm)
Cocha 01	-	30,0	6,08
Cocha 02	-	25,0	3,07
IRHS-C-1	6,88	22,1	5,94
IRHS-C-2	6,67	22,8	1,78
IRHS-6	7,28	25,0	7,45
IRHS-7	6,76	25,5	9,79
IASS-73	6,80	25,0	6,56
S/N-1	7,88	26,6	2,38
S/N-2	7,75	26,2	1,64
S/N-3	8,25	27,7	4,60
S/N-4	7,76	28,5	1,72
S/N-5 Sr. de Huanca	7,03	32,4	1,97
S/N-6 Sr. de Huanca	7,69	25,0	1,82
S/N-7 Rosita	8,10	27,5	2,01
S/N-9 Sr, Guillén	7,78	25,5	3,40
S/N-10 Laguna Azul	7,80	27,8	2,71
S/N-11	-	27,5	3,51
S/N-12	-	28,0	2,97
S/N-13	-	26,9	1,46
PP-01 Laguna Azul	8,10	25,0	2,34
PP-01 Wayu Perú	6,68	26,7	3,21
TA-01 Wayu Perú	6,70	26,5	4,92

Nota. Elaboración propia

8.1.1. Conductividad eléctrica (C.E.)

La conductividad eléctrica es la propiedad que tiene el agua de conducir la corriente eléctrica. Depende de varios factores, principalmente la concentración y tipo de sales ionizables disueltas, naturaleza, carga formada y temperatura (INRENA, 2006).

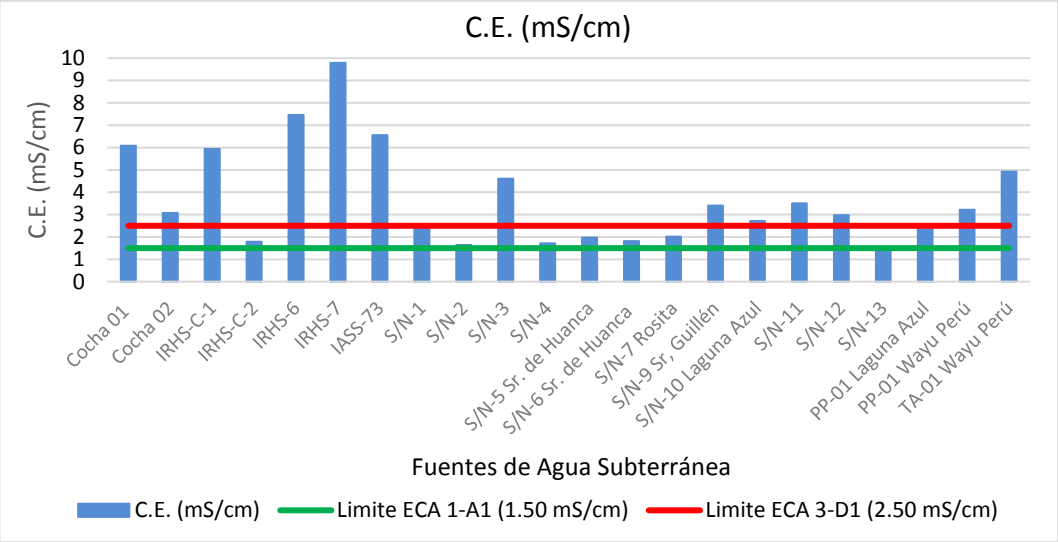
De la evaluación hidrogeoquímica preliminar, se ha obtenido valores de conductividad eléctrica que fluctúan entre 1,46 mS/cm a 9,79 mS/cm y que corresponden a aguas de regular, alta y muy alta mineralización.

El límite máximo permisible para agua potable de este parámetro según la norma MINAM ECA 1-A1 es de 1,50 mS/cm, por lo que solo el pozo S/N-13 presentaría agua de buena calidad para consumo humano.

Para riego de cultivos, el límite máximo permisible de los ECA 3-D1 es de 2,50 mS/cm, por lo que solo la Cocha IRHS C-2 y los pozos S/N-1, S/N-2, S/N-4, S/N-5, S/N-6 “Sr. de Huanca”, S/N-7 “Rosita”, S/N-13 y PP-01 Laguna Azul presentan aguas aptas para fines agrícolas. Las demás fuentes de agua, sobrepasan los estándares de calidad para uso potable y agrícola; por lo que solo podrán ser utilizados en el riego de cultivos muy tolerantes a las sales y de suelos permeables (ver figura 98 y tabla 46).

Figura 98

Variación de conductividad eléctrica de fuentes de agua inventariadas



Nota. Elaboración propia

Tabla 46

Clasificación de fuentes de agua según los límites máximos permisibles de conductividad para uso poblacional y riego del D.S. N° 004-2017-MINAM

Categoría	Fuentes de Agua	Nro.	%
Uso poblacional y riego de cultivos	S/N-13	1	4,55
Uso en riego de cultivos	IRHS C-2, S/N-1, S/N-2, S/N-13, S/N-5, S/N-6 Sr. de Huanca, S/N-7 Rosita y PP-01 Laguna Azul	8	36,36
Uso en cultivos altamente tolerantes a las sales	S/N-3, S/N-9 Guillén, S/N-10 Laguna Azul, S/N-11, S/N-12, IRHS-6, IRHS-7, IRHS-C-01, IASS-73, Cocha 01, Cocha 02, TA-01 y PP-01 Wayu Perú	13	59,09
	Total	**22**	**100**

8.1.2. pH

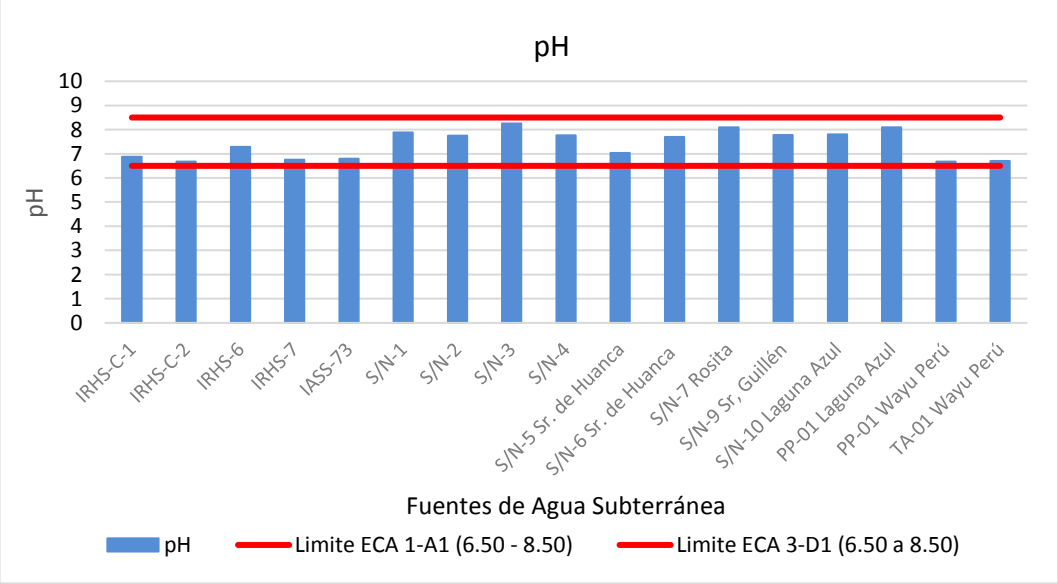
El pH viene a ser la medida de la concentración de los iones de hidrógeno en el agua, el cual es utilizado como índice de alcalinidad o acidez del agua (INRENA, 2006).

En el área de estudio, el pH fluctúa entre 6,67 a 8,25, valores que caracterizan a aguas ligeramente ácidas a alcalinas.

Según los límites máximos permisibles de la Norma MINAM ECA 1-A1 y ECA 3-D1 de 6,50 a 8,50; todas las fuentes de agua inventariadas se clasifican como aptas para consumo humano y riego de cultivos (ver figura 99).

Figura 99

Variación de pH de fuentes de agua subterránea inventariadas



Nota. Elaboración propia

8.2. Análisis físico-químico en laboratorio

8.2.1. Recolección de muestras de agua subterránea

Para la determinación de los parámetros físicos-químicos y elementos iónicos mayoritarios disueltos en las aguas subterráneas del sector Pampa Molina, se tomaron muestras de agua en 07 pozos del área de estudio: 01 en pozo a tajo abierto y 06 en pozos tubulares (ver figura 100), siguiendo los protocolos de seguridad y procedimiento de toma de muestras remitidos por los laboratorios.

Esta actividad fue ejecutada por la empresa Edgar Manuel Acosta Pinto Ingenieros S.A.C. en diferentes campañas (2017-2023), contando con la participación directa de la tesista.

Las muestras de agua fueron recolectadas y preservadas en botellas plásticas debidamente etiquetadas y conservadas, y luego fueron enviadas a los laboratorios para los análisis respectivos.

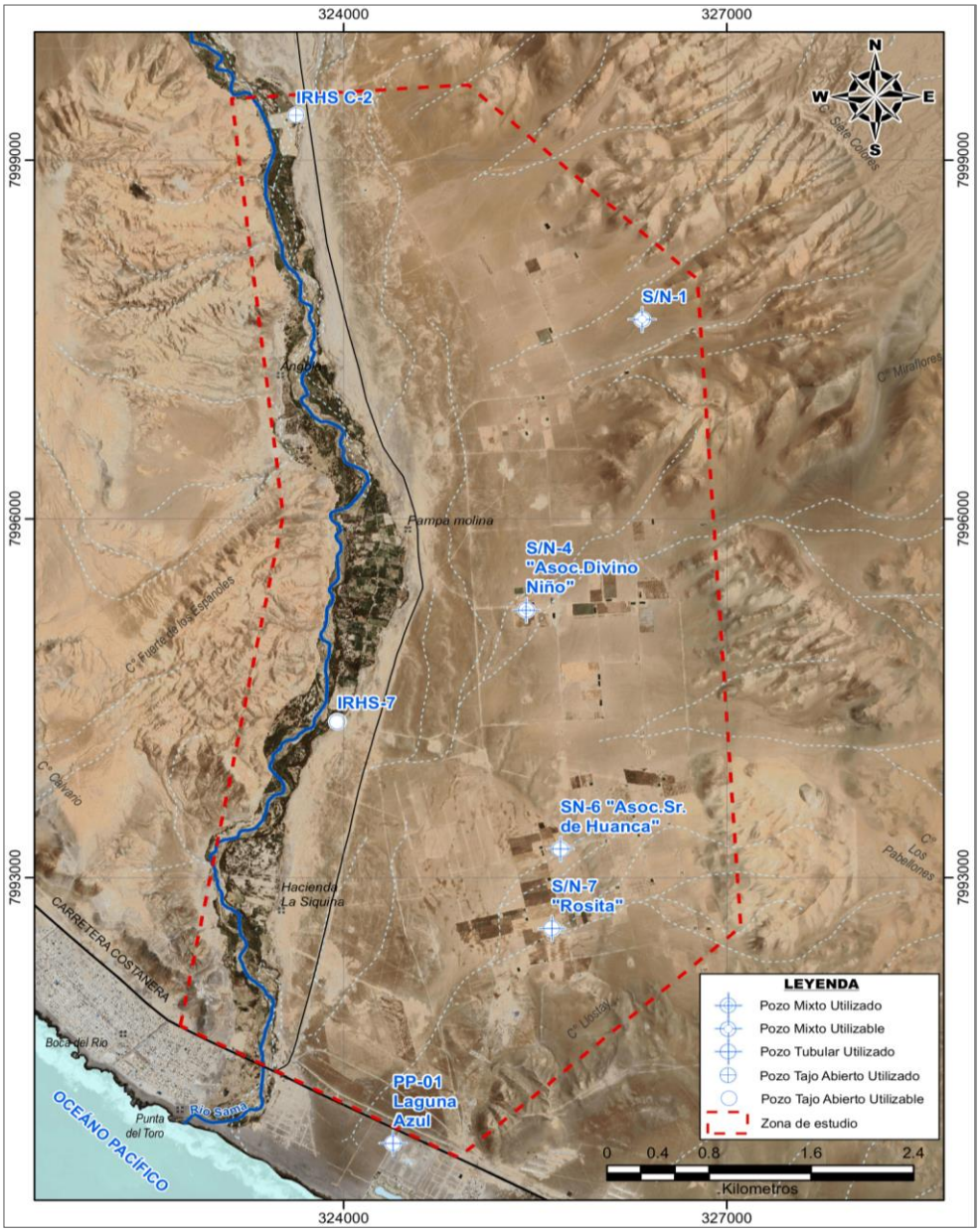
8.2.2. Parámetros analizados en laboratorio

Para la caracterización hidroquímica, se analizaron en laboratorio los parámetros descritos a continuación:

- Conductividad y pH
- Sólidos disueltos totales (TDS)
- Dureza
- Cationes principales: calcio, magnesio, sodio y potasio,
- Aniones principales: cloruros, sulfatos, nitratos y bicarbonatos

Figura 100

Ubicación pozos de muestreo de agua para análisis físico-químico en laboratorio



Nota. Elaboración propia

En la tabla 47 se presenta el resumen de resultados de los parámetros físico-químicos analizados en los pozos de la red hidrogeoquímica.

Tabla 47

Resumen de parámetros físico-químicos de las muestras analizadas del sector Pampa Molina

Fuente de Agua	pH	C.E. (mS/cm)	TDS (mg/l)	Dureza $CaCO_3$ (mg/l)	Ca^{2+} (mg/l)	Mg^{2+} (mg/l)	Na^{+} (mg/l)	K^{+} (mg/l)	Cl^{-} (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)	NO_3^{-} (mg/l)	HCO_3^{-} (mg/l)
IRHS C-2	8,20	1,874	-	370,27	107,56	17,11	249,10	19,26	229,57	345,26	< 0,3	102,47
S/N-1	7,97	2,340	1382	-	62,31	16,84	382,98	9,97	469,05	371,64	3,77	105
S/N-4	7,95	1,685	962	-	58,54	12,71	267,71	10,92	264,63	292,42	1,87	91,10
S/N-6 Sr. de Huanca	7,69	1,823	-	290,93	88,68	17,53	291,83	14,81	340,89	350,74	2,73	107,05
S/N-7 Rosita	7,93	1,992	1242	-	70,16	15,32	337,17	12,20	362,72	355,23	2,31	109,40
PP-01 Laguna Azul	7,80	2,340	-	344,54	97,73	22,08	350,50	15,06	468,40	336,46	0,90	125,93
IRHS-7	6,93	9,780	6784	-	647,02	118,53	1365,33	57,11	2377,28	2114,02	<0,06	346,70

Nota. Elaboración propia

8.2.3. Balance iónico de las muestras

Para la elaboración de los diagramas de clasificación de las aguas subterráneas, se requiere de un balance iónico que permita verificar la precisión del análisis de las muestras. Esto se obtiene como un porcentaje de error (%EBI) tomando la diferencia de cationes y aniones y dividiendo por la suma de los mismos, multiplicando por 100 para obtener un porcentaje (e), así poder determinar también como imbalance de carga (%Cl); para lo cual primeramente se debe convertir las concentraciones de los elementos de miligramos por litro a equivalentes por litro. El porcentaje máximo de error aceptado es de 10%, de tal manera que las muestras que superen este valor no deben ser consideradas para fines de interpretación. La fórmula para el balance iónico es la siguiente:

$$\%EBI = \frac{\sum(cationes) - \sum(aniones)}{\sum(cationes) + \sum(aniones)}\ x\ 100\%$$

$$\%Cl = \frac{(\sum(cationes) - \sum(aniones))\ x\ 100\%}{(\sum(cationes) + \sum(aniones))/2} = 2\ \%EBI$$

La tabla 48 muestra el porcentaje de error del balance iónico de cada muestra analizada del sector Pampa Molina.

En términos generales, la mayoría de los análisis estuvieron dentro del ±10% de error y de la desviación estándar < ± 20 % de imbalance de carga (Cl), motivo por el cual se consideran resultados aceptables. Las concentraciones de iones y el desequilibrio general de carga negativa sugieren que la solución es deficiente en cationes o con aniones excesivos.

Tabla 48

Balance iónico muestras de agua analizadas sector Pampa Molina

Fuente de agua	Cationes					Aniones					%Error	%Cl
	Ca^{2+} (meq/l)	Mg^{2+} (meq/l)	Na^{+} (meq/l)	K^{+} (meq/l)	ΣC	Cl^{-} (meq/l)	SO_4^{2-} (meq/l)	NO_3^{-} (meq/l)	HCO_3^{-} (meq/l)	ΣA		
IRHS C-2	5,38	1,41	10,83	0,49	18,11	6,47	7,19	0,00	1,68	15,34	8,28	16,56
S/N-1	3,12	1,39	16,65	0,25	21,41	13,21	7,74	0,06	1,72	22,74	-3.01	-6,02
S/N-4	2,93	1,05	11,64	0,28	15,90	7,45	6,09	0,03	1,49	15,07	2,68	5,36
S/N-6 Sr. de Huanca	4,43	1,45	12,69	0,38	18,95	9,60	7,31	0,04	1,75	18,71	0,64	1,28
S/N-7 Rosita	3,51	1,27	14,66	0,31	19,75	10,22	7,40	0,04	1,79	19,45	0,76	1,52
PP-01 Laguna Azul	4,89	1,82	15,24	0,39	22,34	13,19	7,01	0,01	2,06	22,28	0,13	0,26
IRHS-7	32,35	9,80	59,36	1,46	102,97	66,97	44,04	0,00	5,68	116,69	-6.25	-12,50

Nota. Elaboración propia

8.2.4. Representación gráfica para clasificación hidroquímica del agua

La clasificación química del agua subterránea se realizó usando métodos gráficos como los diagramas de Piper, Stiff y Schoeller elaborados mediante el software AQUACHEM 4.0, con el fin de caracterizar el tipo de agua y evaluar las posibles variaciones en la zona de estudio; para lo cual se seleccionaron los aniones y cationes predominantes descritos en la tabla 48.

8.2.4.1. Diagrama de Piper

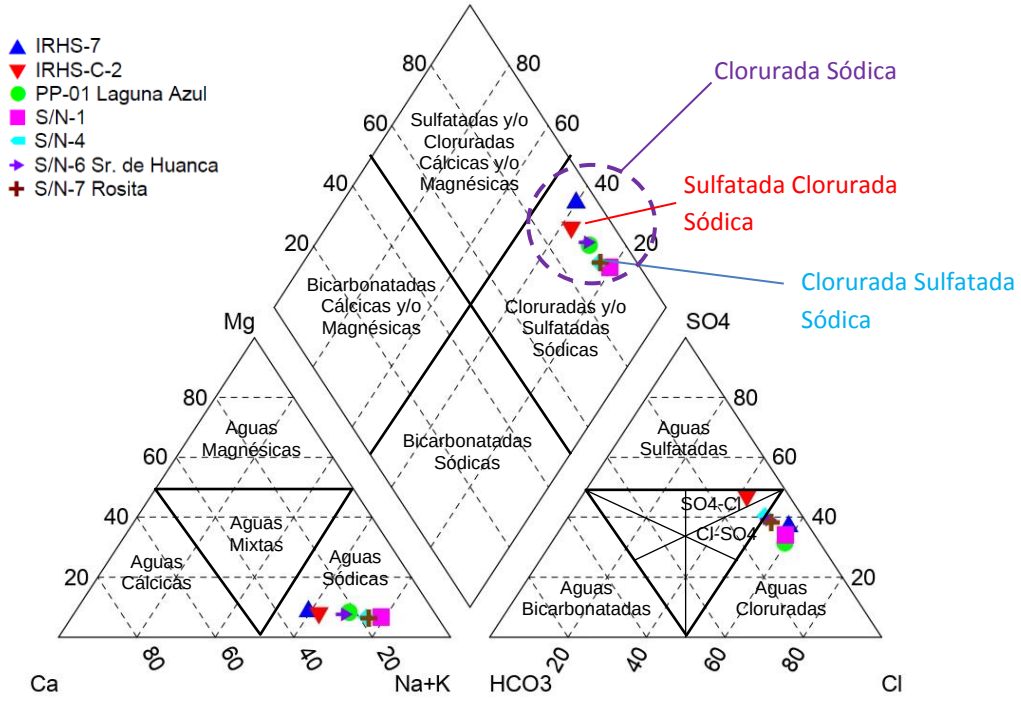
El diagrama de Piper permite establecer de forma directa el tipo de agua en relación a las facies hidrogeoquímicas e ilustrar las potenciales mezclas relacionadas entre diferentes tipos de agua.

La figura 101 muestra el diagrama de Piper con la clasificación de las 07 muestras de aguas subterráneas analizadas, del cual podemos observar que todas las muestras se concentran en el rombo derecho y que según la clasificación de Piper Hill denotan aguas del tipo clorurada y/o sulfatada sódica, con una alta vulnerabilidad debido a su elevada salinidad; siendo las familias cloruradas sódicas las más predominantes, con elevada concentración de cloruro y sodio; seguidas de algunas mezclas con el ion sulfato que denotan familias del tipo clorurada sulfatada sódica como es el caso del pozo S/N-4 y sulfatada clorurada sódica, correspondiente al pozo IRHS-C-2.

En la tabla 49 se presentan las facies hidrogeoquimicas y familias químicas para cada muestra de agua analizada.

Figura 101

Diagrama Piper acuífero Pampa Molina-parte baja valle Sama



Nota. Elaboración propia

Tabla 49

Tipo y familia química aguas subterráneas sector Pampa Molina

Pozo	Facies hidrogeoquímicas	Familia química
IRHS C-2	Na-Ca-SO_4-Cl	Sulfatada clorurada sódica
S/N-1	Na-Cl-SO_4	Clorurada sódica
S/N-4	Na-Cl-SO_4	Clorurada sulfatada sódica
S/N-6 Sr. de Huanca	Na-Ca-Cl-SO_4	Clorurada sódica
S/N-7 Rosita	Na-Cl-SO_4	Clorurada sódica
PP-01 Laguna Azul	Na-Ca-Cl-SO_4	Clorurada sódica
IRHS-7	Na-Ca-Cl-SO_4	Clorurada sódica

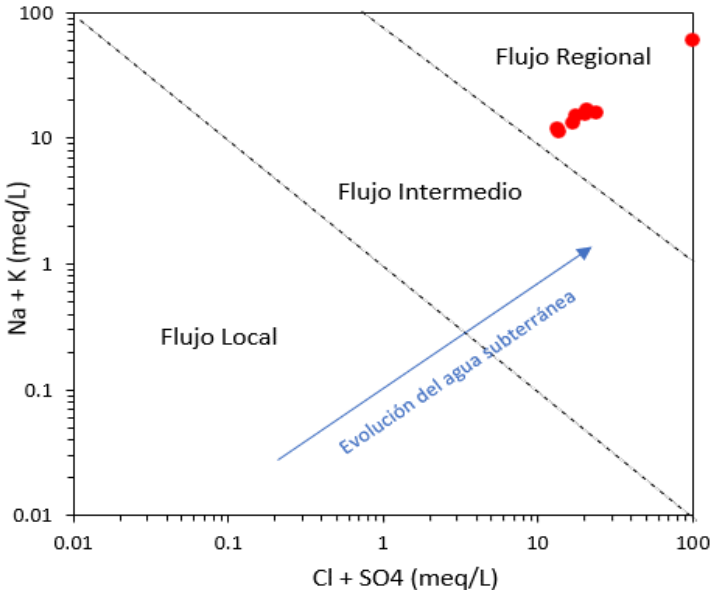
Nota. Elaboración propia

Las aguas cloruradas sódicas de la zona de estudio se deben a que el acuífero está compuesto de depósitos aluviales (gravas y arenas) con presencia de estratos salinos y altos contenidos de sodio y/o también por las filtraciones de las aguas del río Sama.

Dueñas & Moreno (2018) indica que este tipo de facies hidrogeoquímicas en el valle Sama, corresponden a un flujo regional; el cloruro es indicador de un largo tiempo de residencia. Esto fue corroborado mediante el diagrama de Scatter según Mifflin (1988) que proporciona información de la evolución del agua subterránea en base a la creciente concentración de los iones $Cl+SO_4$ vs Na+K a lo largo del flujo; evidenciándose una tendencia a flujo regional (ver figura 102).

Figura 102

Diagrama de Scatter $Cl+SO_4$ vs Na+K (según Mifflin, 1988) acuífero Pampa Molina-parte baja valle Sama



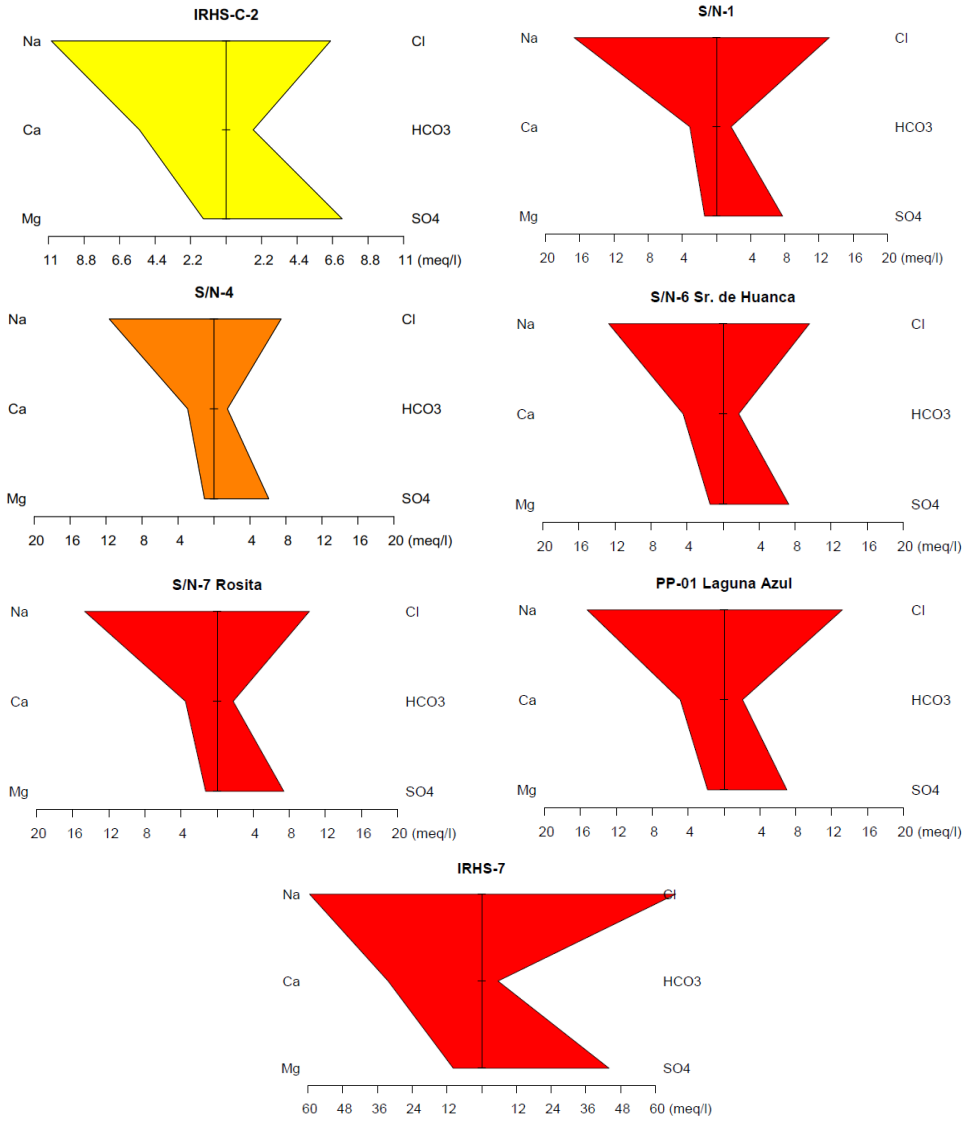
Nota. Elaboración propia

8.2.4.2. Diagrama de Stiff

La figura 103 muestra los diagramas de Stiff con la representación de la concentración de los iones mayoritarios de las 07 muestras de agua analizadas.

Figura 103

Diagramas de Stiff, sector Pampa Molina



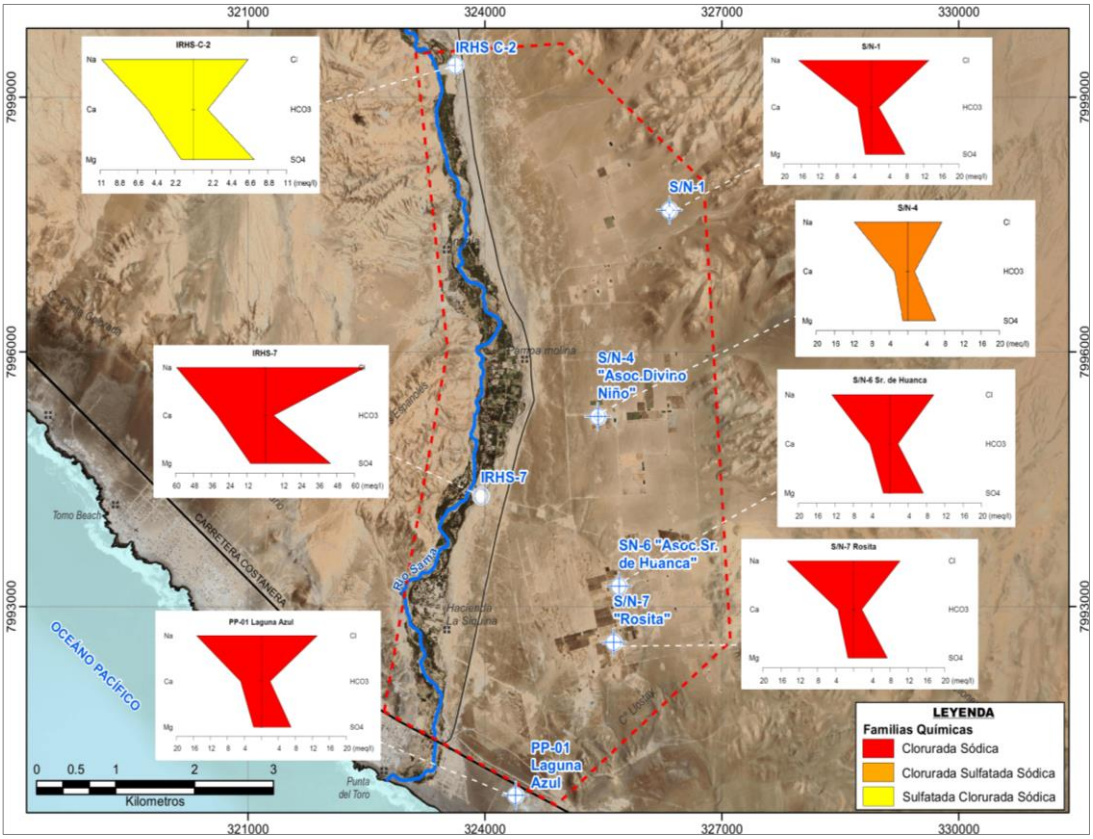
Nota. Elaboración propia

En los diagramas de Stiff se aprecia que el Sodio es el catión mayoritario y el Cloruro y Sulfato los aniones mayoritarios, las cuales tienen una relación proporcional con el grado de mineralización del agua, tal y como lo indica las conductividades eléctricas resultantes.

Para visualizar la distribución espacial de la composición química de las aguas del acuífero, se elaboró un mapa con los diagramas de Stiff de las muestras analizadas (ver figura 104), del cual se concluye que en casi todo el área de estudio predominan la familia química clorurada sódica, solo en el pozo S/N-4 de Pampa Molina se presentarían aguas cloruradas sulfatadas sódicas y en el sector La Vituña predominaría la familia química sulfatada clorurada sódica, representado por el IRHS C-2; pero según la dirección de flujo, las aguas parecen mantener una misma composición con predominancia de los cationes sodio sobre los demás y de los aniones cloruro principalmente, seguido del sulfato. Conceptualmente este tipo de familias están asociados a zonas salinas de baja recarga o tránsito lento.

Figura 104

Distribución espacial de diagramas de Stiff, sector Pampa Molina



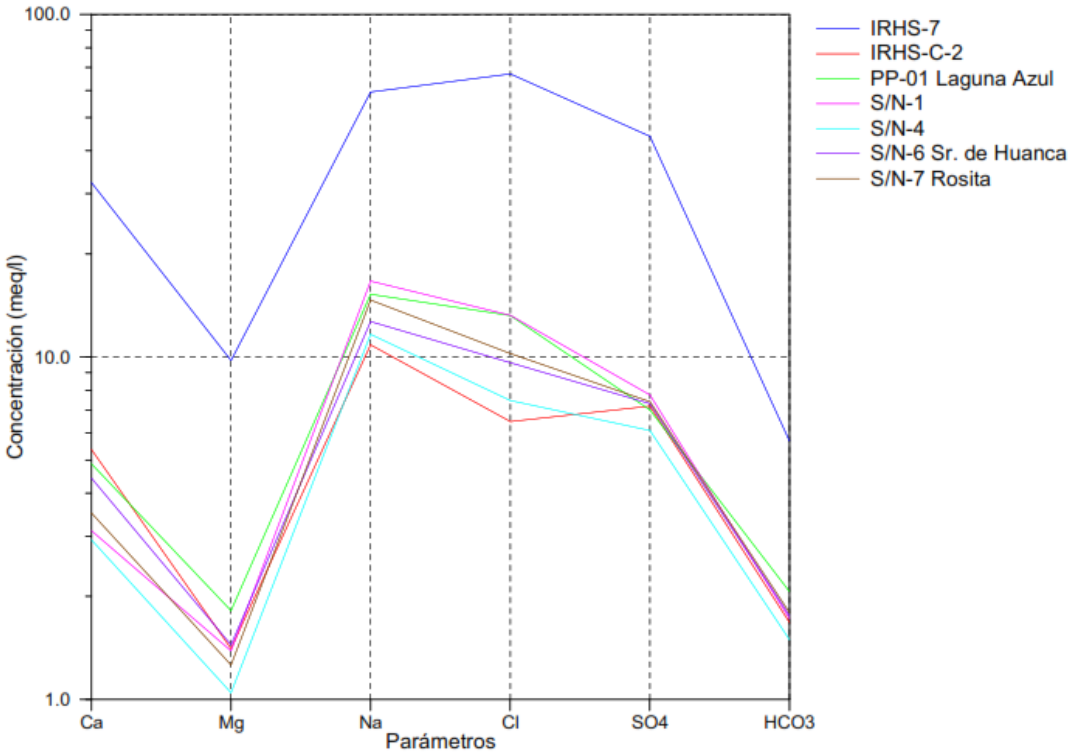
Nota. Elaboración propia

8.2.4.3. Diagrama de Schoeller

Se elaboró el diagrama de Schoeller para las 07 muestras de agua subterránea del área de estudio (ver figura 105), con la finalidad de representar el contenido en meq/l de los elementos predominantes, tanto de aniones como de cationes. Además, de acuerdo al INRENA (2006), la representación de varios análisis permite comparaciones y diferencias de los distintos tipos de agua, permitiendo obtener grupos definidos.

Figura 105

Diagrama de Schoeller, acuífero sector Pampa Molina



Nota. Elaboración propia

De la Figura 105 se interpreta lo siguiente:

- Las muestras analizadas presentan concentraciones iónicas que guardan proporción entre ellas y su grado de evolución química es semejante; denotando predominio de los iones sodio y cloruro y en segunda instancia influenciada por el ion sulfato, respaldando las tendencias mostradas por los diagramas anteriormente mencionados.
- La calidad del agua en la parte baja de la zona de estudio, cercano al litoral (pozo PP-01 Laguna Azul), presenta un mayor predominio de Cl^- seguido del aumento de Na^+ y SO_4^{2-}, esto debido a que el acuífero en

este sector está compuesto de depósitos de playa (arenas y limos) con presencia de costras de sal y restos de conchuelas, así como, altos contenidos de Na^+ y SO_4^{2-}.

- El pozo IRHS-7, ubicado en la parte media del sector Pampa Molina y colindante a la margen izquierda del río Sama, presenta la mayor concentración de iones con respecto a las demás fuentes de agua, debido a que capta directamente las filtraciones del río Sama (aguas de alta salinidad y de muy mala calidad, principalmente en época de estiaje mayo-noviembre), así como, las aguas procedentes de las áreas agrícolas del cauce del río.
- Las aguas del pozo IRHS-C-2, ubicado en el sector La Vituña, presenta mayor predominio de SO_4^{2-}, seguido de Na^+ y Cl^-; que estaría relacionado a las aportaciones de agua subterránea provenientes de la Quebrada Agua Dulce, que es de mejor calidad, comprobado por la similitud de familias químicas de esta quebrada y el acuífero del Pozo IRHS C-2.

8.2.5. Comparación de resultados con los estándares nacionales de calidad ambiental del agua

En la tabla 50 se presentan los resultados físico-químicos de cada uno de los pozos analizados y los límites máximos permisibles que dicta los estándares nacionales de calidad ambiental del agua del D.S. N° 004-2017-MINAM ECA 1-A1 para uso poblacional y ECA 3-D1 para uso agrícola.

Tabla 50

Comparación de resultados de análisis físico-químicos con los límites máximos permisibles de los ECA del D.S. N° 004-2017-MINAM

Parámetros	Fuentes de agua subterránea							Límites máximos permisibles D.S. N° 004-2017-MINAM	
	IRHS-C-2	S/N-1	S/N-4	S/N-6 Sr. de Huanca	S/N-7 Rosita	PP-01 Laguna Azul	IRHS-7	ECA 1-A1 consumo humano	ECA 3-D1 riego de cultivos
pH	8,20	7,97	7,95	7,69	7,93	7,80	6,93	**6.5 – 8.5**	**6.5 – 8.5**
C. E. (mS/cm)	1,87	2,34	1,69	1,82	1,99	2,34	9,78	**1,50**	**2,50**
TDS (mg/l)	-	1382	962	-	1242	-	6784	**1000**	**-**
Dureza (mg/l)	370,27	224,95(*)	198,51(*)	290,93	238,29(*)	344,54	2103,71(*)	**500**	**-**
Ca^{2+} (mg/l)	107,56	62,31	58,54	88,68	70,16	97,73	647,02	**-**	**-**
Mg^{2+} (mg/l)	17,11	16,84	12,71	17,53	15,32	22,08	118,53	**-**	**-**
Na^{+} (mg/l)	249,10	382,98	267,71	291,83	337,17	350,50	1365,33	**-**	**-**
K^{+} (mg/l)	19,26	9,97	10,92	14,81	12,20	15,06	57,11	**-**	**-**
Cl^{-} (mg/l)	229,57	469,05	264,63	340,89	362,72	468,40	2377,28	**250**	**500**
SO_4^{2-} (mg/l)	345,26	371,64	292,42	350,74	355,23	336,46	2114,02	**250**	**1000**
NO_3^{-} (mg/l)	<0,30	3,77	1,87	2,73	2,31	0,90	<0,06	**50**	**-**
HCO_3^{-} (mg/l)	102,47	105	91,10	107,05	109,40	125,93	346,70	**-**	**518**

Nota. (*) Dureza total del agua calculada en base a las concentraciones de los iones de calcio y magnesio. Elaboración propia

Como se puede observar, los estándares de calidad ambiental (ECA) para uso potable y riego de cultivos de la norma MINAM (2017) no establece límites máximos permisibles para los iones Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} y K^{+}; sin embargo su evaluación es importante porque la concentración de estos iones podría afectar la calidad del agua y generar efectos perjudiciales para la salud y/o los cultivos.

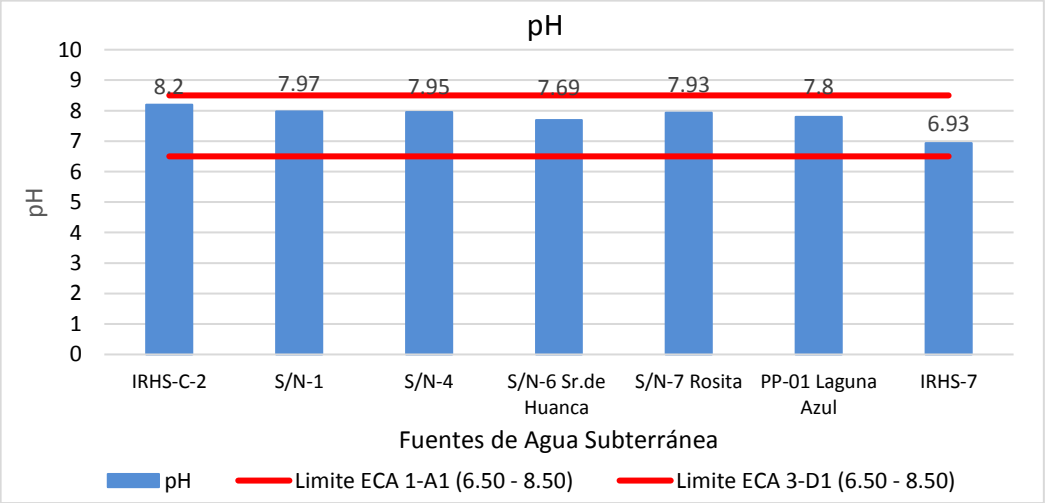
La evaluación de los principales elementos analizados en laboratorio, se describen a continuación:

- pH

El pH fluctúa entre 6,93 a 8,20; valores que representan a aguas subterráneas ligeramente ácidas a ligeramente alcalinas y que se encuentran dentro de los límites máximos permisibles de los ECA 1-A1 para consumo humano y ECA 3-D1 para riego de cultivos (6,50 a 8,50). Ver Figura 106.

Figura 106

Variación de pH en fuentes de agua subterránea



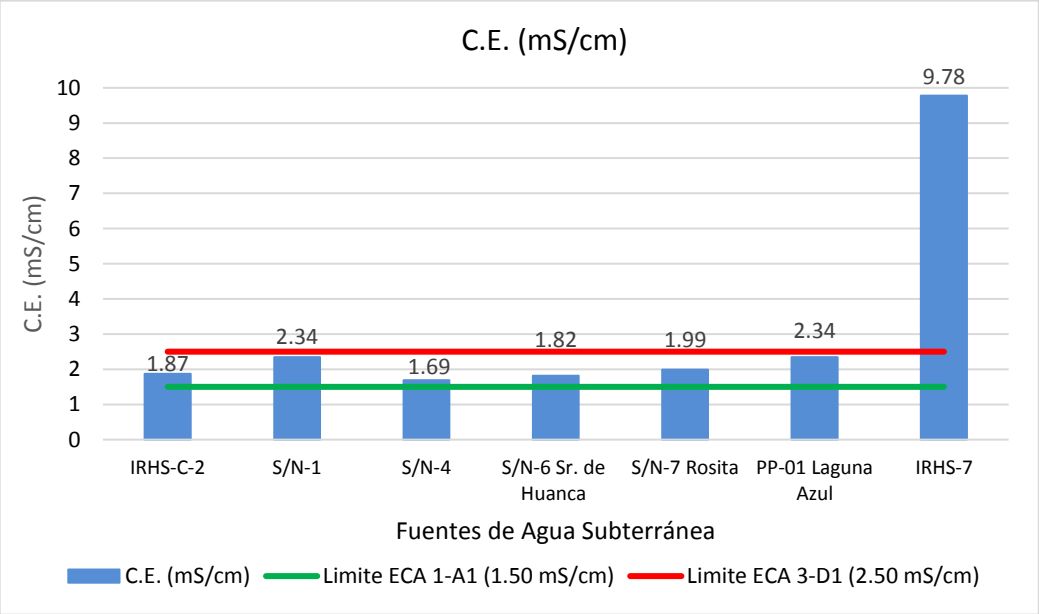
Nota. Elaboración propia

- Conductividad eléctrica (C.E.)

La conductividad eléctrica obtenida en laboratorio varía de 1,69 mS/cm a 9,78 mS/cm, identificando a aguas de regular a muy alta salinidad y mineralización. Estos valores superan el límite máximo permisible de los ECA 1-A para consumo humano (<1,50 mS/cm), por lo que clasificarían como aguas no aptas para uso potable. Sin embargo, de acuerdo a los límites permisibles de los ECA 3-D1 (<2,50 mS/cm), son Aptas para el riego de cultivos; con excepción del pozo IRHS-7 que registra una conductividad de 9,78 mS/cm y solo podrá ser utilizado en el riego de cultivos muy tolerantes a las sales y de suelos muy permeables (ver figura 107).

Figura 107

Variación de conductividad en fuentes de agua subterránea



Nota. Elaboración propia

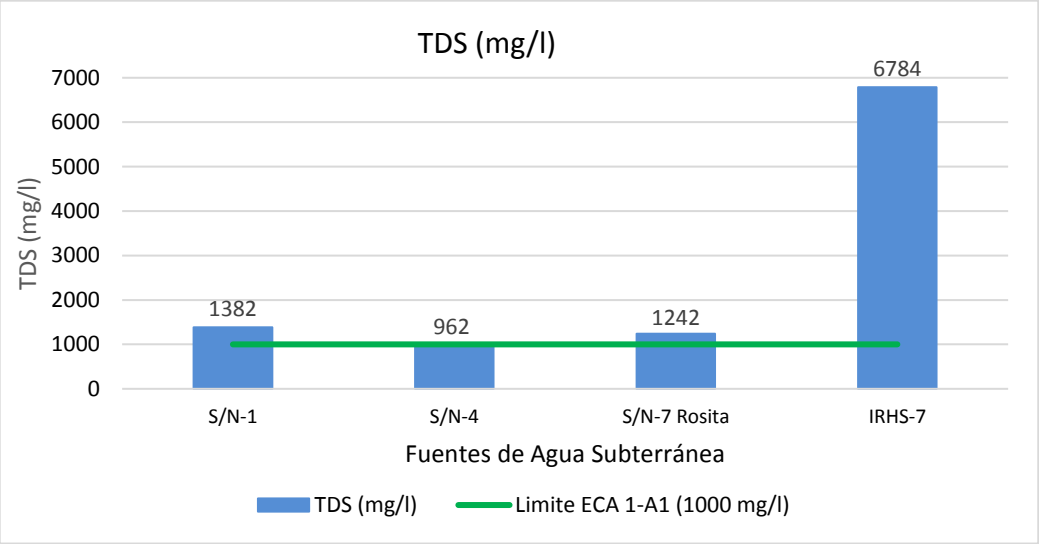
- Sólidos disueltos totales (TDS)

El nivel de los sólidos disueltos totales significa la cantidad total de sales disueltas en un litro de agua (INRENA, 2006).

En la zona evaluada, los sólidos disueltos totales fluctúan entre 962 mg/l a 6784 mg/l, presentándose bajas concentraciones solo en el pozo S/N-4, que no supera el límite máximo permisible de los ECA 1-A1 para consumo humano (<1000 mg/l). Los demás pozos sobrepasan los límites de potabilidad de las aguas (ver figura 108).

Figura 108

Variación de sólidos disueltos totales en fuentes de agua subterránea



Nota. Elaboración propia

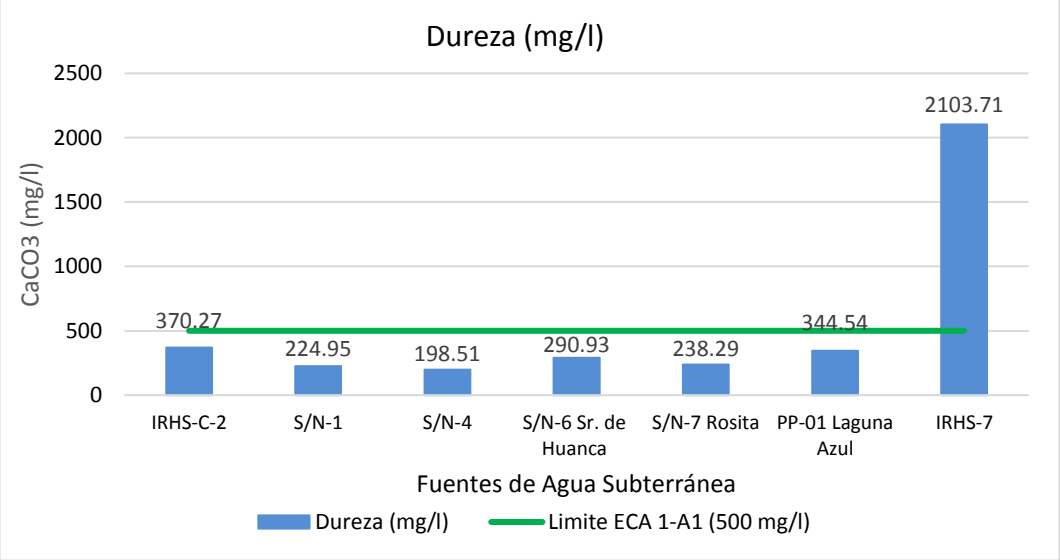
- Dureza ($CaCO_3$)

La dureza de las aguas varía de 198,51 mg/l a 2103,71 mg/l, valores que corresponden a aguas duras a muy duras y que se encuentran, en general, dentro

del límite máximo permisible de los ECA 1-A1 (<500 mg/l), clasificando como aptas para uso poblacional; con excepción del pozo IRHS-7 que sobrepasa el límite de potabilidad de las aguas (ver figura 109).

Figura 109

Variación de dureza en fuentes de agua subterránea



Nota. Elaboración propia

- Cloruro (Cl^-)

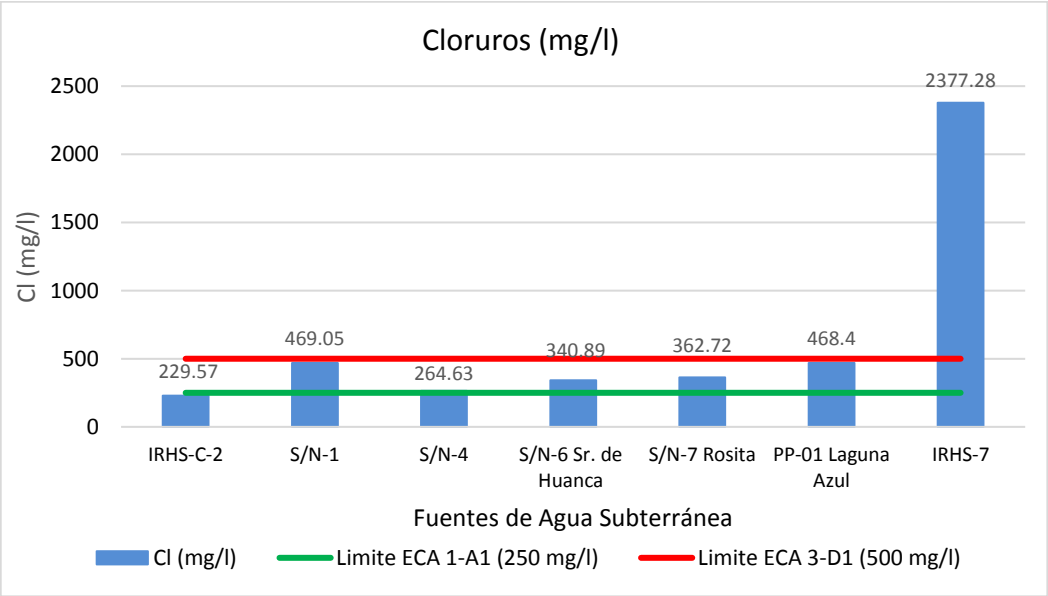
El ion cloruro es uno de los más conocidos por sus efectos de salinidad al agua, en general es muy soluble y muy estable en disolución y difícilmente precipitable. Asimismo no se oxida ni se reduce a aguas minerales (Coarita, 2017).

Este ion se presenta en regular a muy alta concentración, con valores entre 229,57 mg/l a 2377,28 mg/l. De acuerdo a los límites máximos permisibles de los ECA 1-A1 para consumo humano (<250 mg/l), solo el pozo IRHS-C-2 tiene agua

de buena calidad para fines de agua potable. Los demás pozos cumplen con el límite permisible de los ECA 3-D1 para fines agrícolas (<500 mg/l), con excepción del IRHS-7, que presenta alta concentración, del orden de 2377,28 mg/l (ver figura 110).

Figura 110

Variación de concentración de cloruros en fuentes de agua subterránea



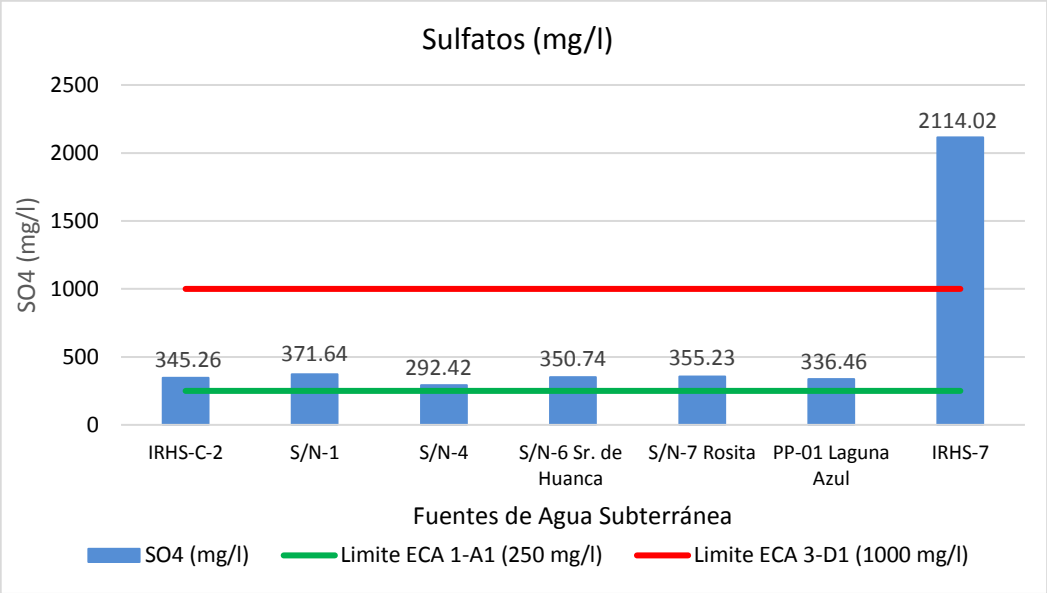
Nota. Elaboración propia

- Sulfato (SO_4^{2-})

El ion Sulfato fluctúa entre 292,42 mg/l a 2114,02 mg/l, valores que sobrepasan los límites máximos permisibles de los ECA 1-A1 para consumo humano (<250 mg/l); pero se encuentran dentro del límite permisible de los ECA 3-D1 para fines agrícolas (<1000 mg/l), con excepción del pozo IRHS-7, que presenta una alta concentración de 2114,02 mg/l (ver figura 111).

Figura 111

Variación de concentración de sulfatos en fuentes de agua subterránea



Nota. Elaboración propia

- Nitrato (NO_3^-)

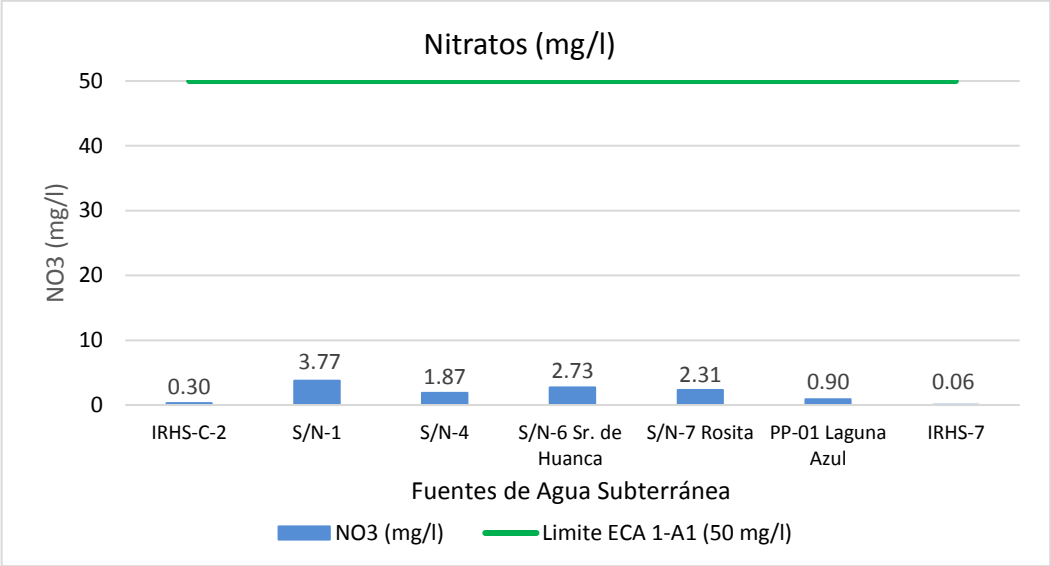
En la zona se presentan bajas concentraciones del ion nitrato que fluctúan entre 0,06 mg/l a 3,77 mg/l, valores que se encuentran dentro de los límites máximos permisibles de los ECA 1-A1 para consumo humano (<50 mg/l). Ver figura 112.

- Bicarbonato (HCO_3^-)

Se presentan bajas concentraciones de bicarbonatos que varían entre 91,10 mg/l a 346,70 mg/l y que se encuentran dentro de los límites máximos permisibles de los ECA 3-D1 para riego de cultivos (<518 mg/l). Ver figura 113.

Figura 112

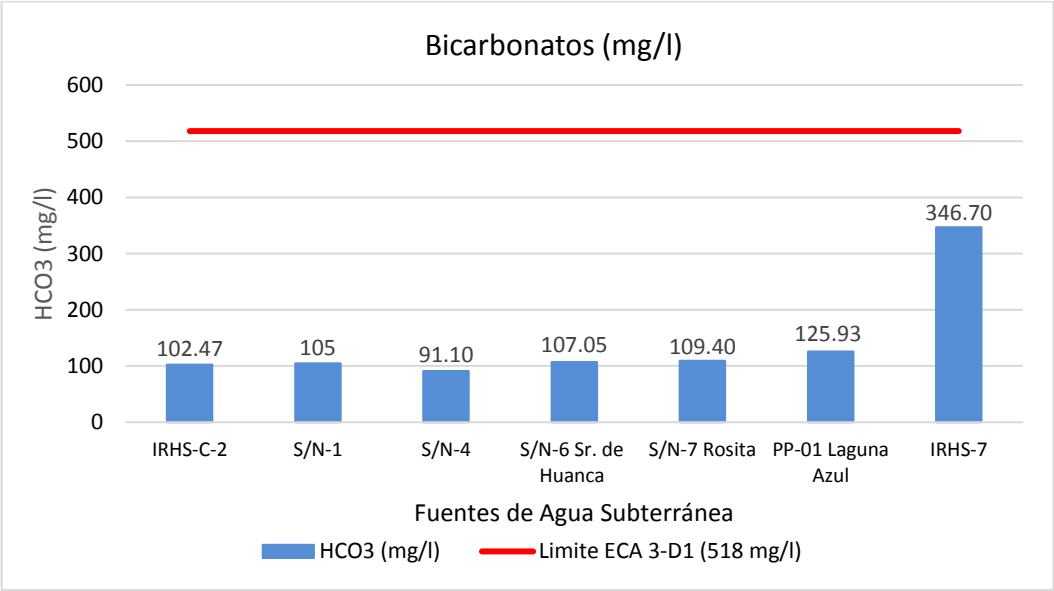
Variación de concentración de nitratos en fuentes de agua subterránea



Nota. Elaboración propia

Figura 113

Variación de concentración de bicarbonatos en fuentes de agua subterránea



Nota. Elaboración propia

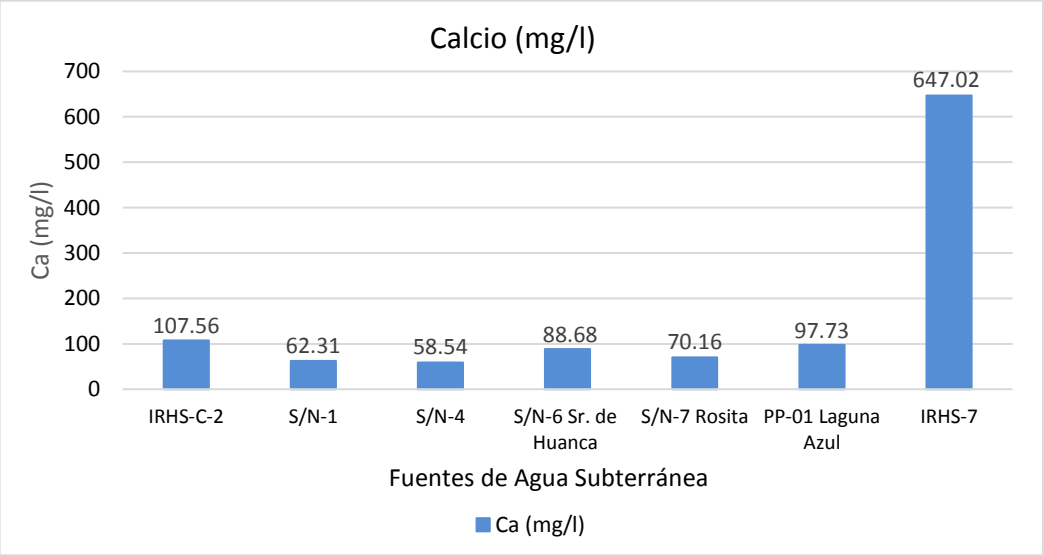
- Calcio (Ca^{2+})

El ion calcio fluctúa entre 58,54 mg/l a 647,02 mg/l, presentando una alta concentración la muestra de agua del pozo IRHS-7. (ver figura 114)

El D.S. N°004-2017-MINAM no establece límites máximos permisibles del calcio en agua para uso potable y riego; la evaluación del riesgo se realiza a través de la dureza total y RAS (que relaciona el sodio con el calcio y magnesio). En el D.S. N° 002-2008-MINAM se establecía un límite máximo permisible para riego de 200 mg/l, pero actualmente esta norma no se encuentra vigente.

Figura 114

Variación de concentración del ion calcio en fuentes de agua subterránea



Nota. Elaboración propia

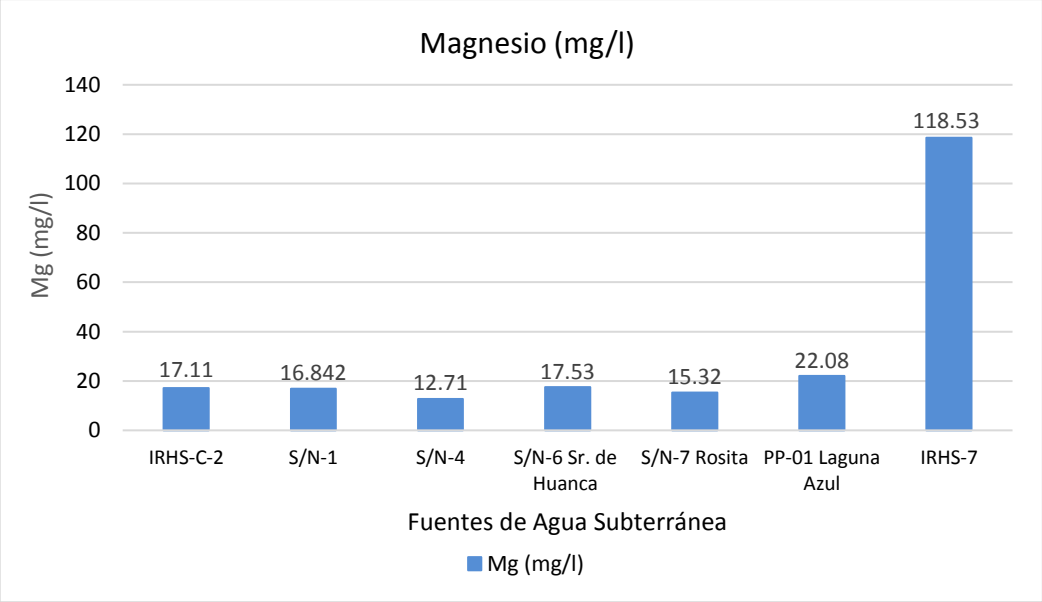
- Magnesio (Mg^{2+})

El ion magnesio es del orden de 12,71 mg/l a 118,53 mg/l, presentando una alta concentración la muestra de agua del pozo IRHS-7 (ver figura 115).

El D.S. N°004-2017-MINAM no establece límites máximos permisibles del magnesio en agua para uso potable y riego; la evaluación del riesgo se realiza a través de la dureza total y RAS (que relaciona el sodio con el calcio y magnesio). En el D.S. N° 002-2008-MINAM se establecía un límite máximo permisible para riego de 150 mg/l, pero actualmente esta norma no se encuentra vigente.

Figura 115

Variación de concentración del ion magnesio en fuentes de agua subterránea



Nota. Elaboración propia

- Sodio (Na^+)

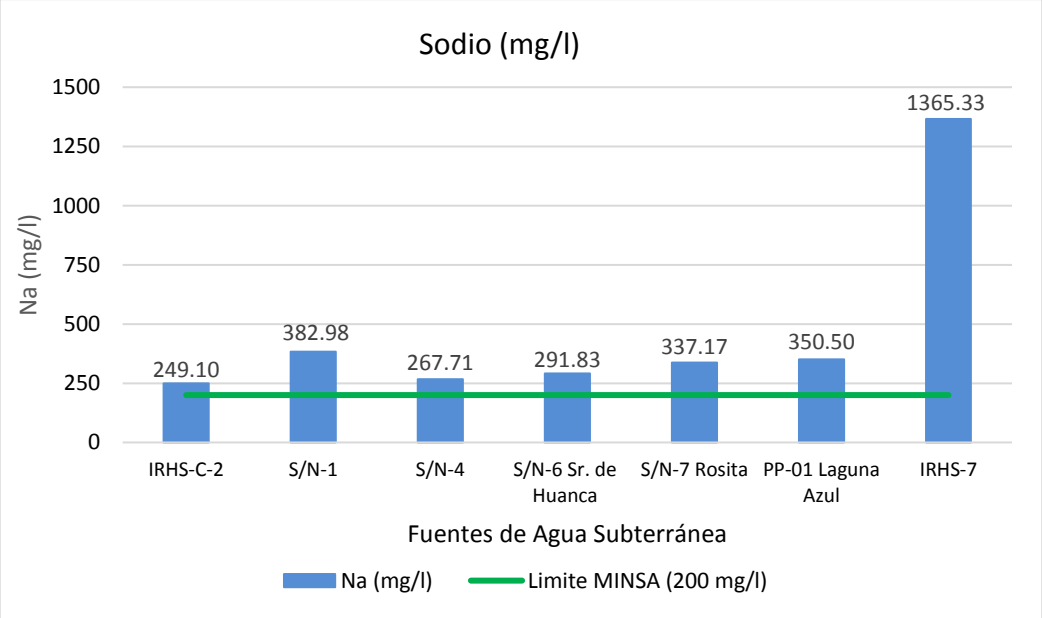
El ion sodio fluctúa entre 249,10 mg/l a 1365,33 mg/l; presentando una alta concentración la muestra de agua del pozo IRHS-7 (ver figura 116).

El D.S. N° 004-2017-MINAM no establece límites máximos permisibles del sodio en agua para uso potable y riego; la evaluación del riesgo se realiza a través

del RAS, que relaciona el sodio con el calcio y magnesio. En el D.S. N° 031-2010 MINSA se establece un límte máximo permisible para consumo humano de <200 mg/l y en el D.S. N° 002-2008-MINAM establecía un límite máximo permisible para riego de 200 mg/l, pero actualmente esta última no se encuentra vigente. En estas condiciones, si comparamos los resultados obtenidos con el reglamento del MINSA, concluimos que todas las muestras clasificarían como no aptas para consumo humano (ver figura 116).

Figura 116

Variación de concentración del ion sodio en fuentes de agua subterránea



Nota. Elaboración propia

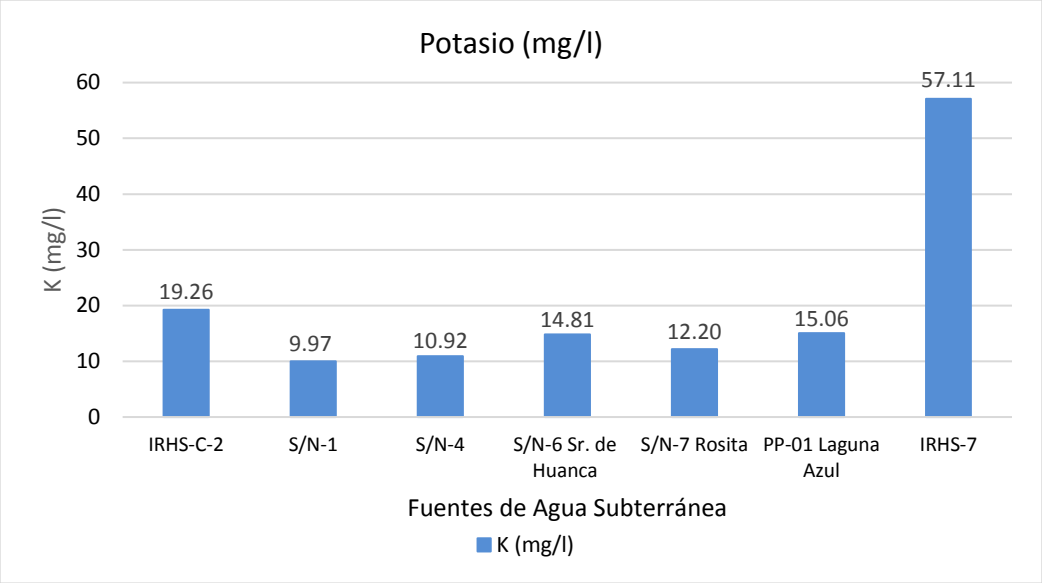
- Potasio (K^+)

El ion potasio fluctúa entre 9,97 mg/l a 57,11 mg/l; presentando una alta concentración la muestra de agua del pozo IRHS-7 (ver figura 117).

El D.S. N°004-2017-MINAM no establece límites máximos permisibles del potasio en agua para uso potable y riego, ni tampoco existe otra norma nacional para este ion, porque no representa un riesgo para la salud ni para las plantas en concentraciones normales y suele ser un componente natural del agua.

Figura 117

Variación de concentración del ion potasio en fuentes de agua subterránea



Nota. Elaboración propia

Capítulo IX: Resultados y discusión

9.1. El reservorio acuífero

9.1.1. Geometría del reservorio

9.1.1.1. Forma y límites

El valle de Sama (zona cultivable) es de forma alargada, observándose que tanto en su parte inicial como final el ancho es de muy reducida longitud, a excepción de las pampas aledañas que son amplias en ambas margenes del río Sama (INRENA, 2006).

El reservorio acuífero de la zona de estudio presenta una forma irregular: en el sector la Vituña (convergencia con la quebrada Agua Dulce) es de ancho muy reducido, que se va ensanchando progresivamente hacia el sector Pampa Molina, para luego reducirse ligeramente cerca al litoral, por la playa LLostay y finalmente volverse a ensanchar hasta llegar en sus límites con el mar.

Está delimitado en sus dos flancos por afloramientos rocosos de la cadena costanera con cobertura eólica, representados por lo cerros Siete Colores, Miraflores, Los Pabellones, Llostay, Calvario, Fuerte Los Españoles y La Mina.

El límite vertical ha sido establecido por los resultados de prospección geofísica e información de perforaciones de pozos, determinándose que el acuífero local en su base estaría limitado por rocas impermeables de la Formación Chocolate, que se encontrarían indistintamente entre los 23m a 130m de profundidad.

9.1.1.2. Dimensiones

El reservorio acuífero local presentaría las siguientes dimensiones:

- En el sector la Vituña, ingreso a la cadena costanera, se tiene un ancho de 1,3 km entre los cerros La Mina y Siete Colores, desconociéndose el espesor de acuífero, porque los sondajes eléctricos verticales (SEVs) ejecutados en la zona de estudio no abarcaron este sector y tampoco se cuenta con información de pozos perforados que hayan llegado a interceptar el techo basamento, pero se infiere en correlación que presentaría un espesor promedio de 25m, siendo conveniente investigar con estudios posteriores.
- En el sector de Pampa Molina alcanza un ancho promedio de 3 km entre los cerros Fuerte Los Españoles y Los Pabellones y presentaría espesores variables de 9m a 80m debido a la morfología del basamento (referencia 72 SEVs ejecutados en la zona de estudio y pozos S/N-7 y PP-01 Wayu Perú).
- Cerca al Litoral y carretera Costanera Sur, alcanza un ancho de 2 km entre los cerros Calvario y Llostay y presentaría espesores de 13m a 26m (referencia SEVs 1, 2, 71 y 72 ejecutados en la zona y pozo PP-01 Laguna Azul).

9.1.2. Naturaleza y origen del acuífero

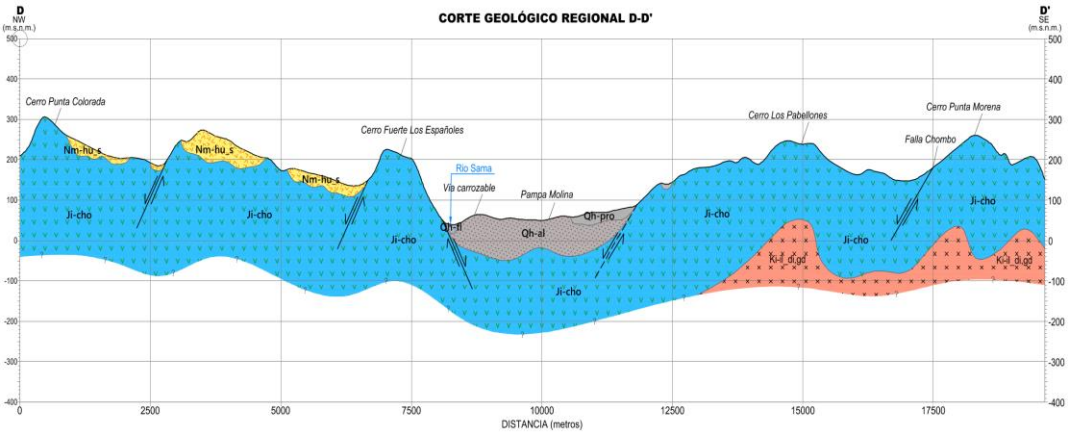
El acuífero del valle Sama es del tipo poroso no consolidado y está constituido principalmente por sedimentos aluviales que tienen amplia distribución

en el valle (parte cultivable) y en forma secundaria, por materiales de origen fluvial y eólico, del Cuaternario reciente. El principal responsable de su formación, es el río Sama; mientras que ciertos sectores de las pampas aledañas, han sido rellenadas por materiales procedentes de avenidas de agua (INRENA, 2006).

El reservorio acuífero de Pampa Molina Molina - parte baja del valle Sama, por evidencias geológicas, geomorfológicas y métodos indirectos de prospección geofísica (SEVs), se postula que se habría formado por la caída de bloques debido a la reactivación de un sistema de fallas (Miraflores, Chombo, entre otras) y que posteriormente fue rellenado por depósitos aluviales y con interdigitaciones de depósitos de playa, formando el acuífero (ver figura 118).

Figura 118

Corte geológico regional que evidencia la formación del acuífero Pampa Molina



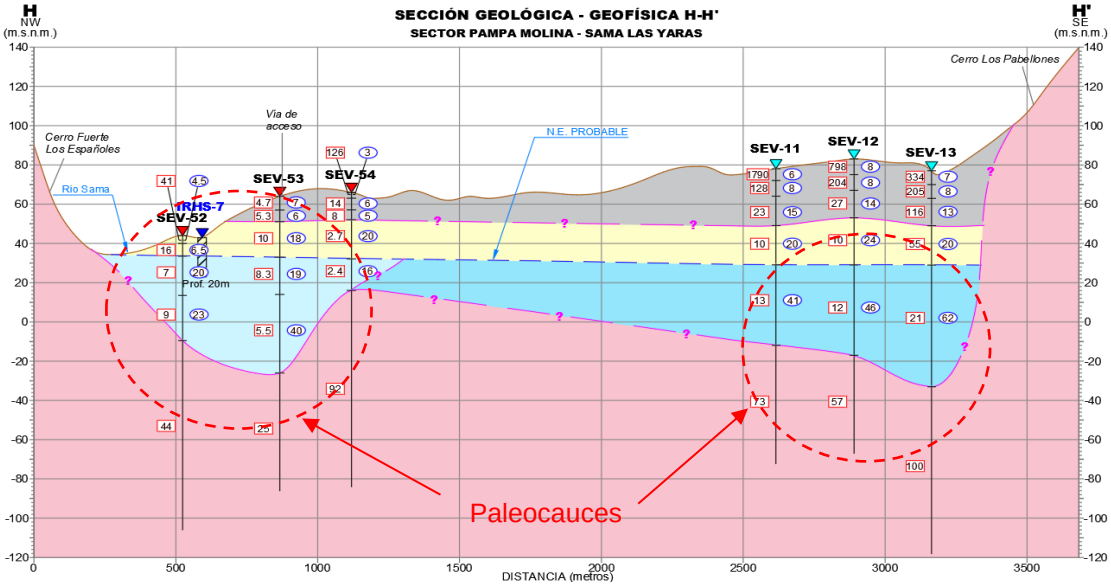
Nota. Elaboración propia

De acuerdo a las investigaciones geofísicas (SEVs) se han identificado dos paleocauces, el primero se ubica en la margen izquierda del valle (aguas abajo) y

el otro en la margen derecha (aguas abajo), lo que nos indicaría el cambio del curso del río Sama a lo largo del tiempo (ver figura 119)

Figura 119

Sección geofísica que muestra los dos paleocauces del sector Pampa Molina



Nota. Elaboración propia

De esta manera se habría dado origen a la formación del acuífero actual en este sector, el cual está constituido principalmente por depósitos aluviales y al sur de la zona de estudio (cerca al litoral) por depósitos marinos del Cuaternario reciente.

9.1.3. Litología

Regionalmente, el acuífero del valle Sama está constituido por cantos, cenizas, guijarros, gravas, arenas, arcillas y limos entremezclados en diferentes proporciones, formando horizontes de espesores variables, que se presentan en forma alternada en sentido vertical (INRENA, 2006).

El acuífero en el curso inferior del valle Sama se encuentra emplazado en sedimentos permeables del Cuaternario fluvial, los mismos que han sido acarreados y depositados en el curso del valle por el río Sama. Los sedimentos están constituidos por estratos de grava, gravilla, arenas mal seleccionadas e inconsolidadas que intercalan irregularmente con lentes de limos y arcillas (CORDETACNA, 1985).

De acuerdo a los resultados de 72 sondajes eléctricos verticales (método indirecto) ejecutados en la zona de estudio y principalmente a la información de perforaciones de 03 pozos: S/N-7 Rosita, PP-01 Wayu Perú y PP-01 Laguna Azul (método directo), el reservorio subterráneo local presentaría la secuencia litológica siguiente:

- **Zona no saturada,** presenta un espesor total de 9m a 60m y está comprendida por dos horizontes:
    - Un horizonte superficial de materiales de buena, regular y baja permeabilidad de grava, canto rodado, bolonería, arena, limo, arcilla en estado seco del Cuaternario reciente y/o estrato salino, con resistividades de 3,8 Ohm-m a 9627 Ohm-m.
    - Un horizonte profundo de materiales de regular, baja y muy baja permeabilidad, de grava, arena, limo, arcilla en estado seco del Cuaternario reciente y/o estrato salino, con resistividades de 1,7 Ohm-m a 232 Ohm-m.

- **Zona saturada,** que conforma el acuífero actualmente explotable de la zona de estudio, con espesor total de 9m a 80m. Está comprendida por dos horizontes:
    - Un horizonte de materiales de baja a muy baja permeabilidad de arena, limo, arcilla en estado saturado del Cuaternario reciente y/o estrato salino, con resistividades de 1,3 Ohm-m a 9,3 Ohm-m.
    - Un horizonte de materiales de regular a baja permeabilidad de arena, grava, canto rodado y limo en estado saturado del Cuaternario reciente, con resistividades de 10 Ohm-m a 60 Ohm-m.
- **Basamento rocoso,** conformado por rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Chocolate, de características impermeables, con resistividades de 25 Ohm-m a 995 Ohm-m, que se encontrarían a partir de los 23m a 130m de profundidad.

9.2. La napa freática

9.2.1. Naturaleza, origen de las aguas subterráneas y frentes de recarga

Según el INRENA (2006) la napa freática contenida en el acuífero del valle Sama es predominantemente libre y superficial; siendo su principal fuente de alimentación las aguas que se infiltran en la parte alta de la cuenca (zona húmeda), así como también las que se infiltran a través del lecho del río, de los canales de riego no revestidos, así como de las áreas de cultivo bajo riego.

CORDETACNA (1985) indica que la alimentación de la napa del curso inferior del valle Sama se efectúa a través del cauce del valle, debido a la infiltración que se produce en la zona bajo riego y del río Sama, especialmente en tiempo de avenidas. También recarga al acuífero las filtraciones provenientes de los estratos permeables a través de las quebrabas que convergen al valle.

Algunos profesionales estipulaban que existía una probable recarga del acuífero Caplina a la cuenca Sama; sin embargo los resultados del estudio efectuado por la ANA el 2022, corroboraron mediante análisis de isótopos estables de oxígeno-18 (δ18O) y deuterio (δ2H) realizados en el Laboratorio de Isótopos Ambientales de la Universidad de Waterloo en Ontario-Canadá, que no existe aporte de la cuenca Caplina, a excepción de dos manantiales ubicados en la parte alta de la Cuenca Sama, cerca a la divisoria de aguas con la cuenca Caplina.

Por criterios geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos y principalmente a los resultados obtenidos en la presente investigación, se infiere que las aguas subterráneas que se explotan del sector Pampa Molina tienen su origen en la infiltración del agua de lluvia en la zona altoandina (cabecera de cuenca) en épocas de grandes precipitaciones pluviales y que se movilizaron a través del propio río Sama, acarreando gran cantidad de materiales que fueron depositados en las pampas de este sector. Los frentes de alimentación al acuífero son los siguientes:

- Recarga principal procedente de las filtraciones directas e indirectas del río Sama, que es el principal aportante de la recarga hídrica y el

permanente alimentador del acuífero del valle durante épocas de lluvia; a lo largo de su curso existirían zonas permeables que estarían alimentando el subsuelo del sector Pampa Molina a través de los paleocauces existentes que han sido corroborados por el método indirecto de SEVs.

- Recarga de las áreas de cultivo que se encuentran bajo riego en ambas márgenes del río Sama.
- Probable recarga proveniente de las quebradas Agua Dulce y Las Brujas, debido a la similitud en la calidad de agua y familia química con el pozo IRHS C-2; por lo que es conveniente investigar a mayor detalle.

Si bien los resultados de los análisis físico-químicos realizados a muestras de agua del sector Pampa Molina - Sama, han determinado alta mineralización, con valores de conductividad eléctrica y propiedades físico-químicas muy diferentes al agua del río Sama, esto no significa que no existiría recarga de este río; porque en épocas de avenidas el río Sama presenta menor salinidad. Adicionalmente si consideramos que existe una recarga proveniente de las quebradas Agua Dulce y Las Brujas al acuífero Pampa Molina, entonces también se justificarían los resultados obtenidos, porque las aguas de estas quebradas son de mejor calidad y al mezclarse con las aguas del río sama, disminuirían las concentraciones de las sales.

A continuación se exponen los criterios tomados en cuenta para la identificación de los frentes de recarga descritos líneas arriba:

Recarga por infiltración de río

- Este frente de recarga se ha definido en base a la similitud de parámetros físico-químicos entre las aguas subterráneas del acuífero en estudio y el río Sama. El pozo IRHS-7 presenta altas concentraciones en sus elementos, al encontrarse ubicado muy cerca del cauce de la margen izquierda del río.

Recarga por precipitación

- Estudios anteriores recopilados indican que en la zona alto andina las precipitaciones representan un aporte renovable de agua subterránea a los depósitos cuaternarios y que fluyen de manera regional en sentido NE-SW hacia la zona del valle Sama.
- Información meteorológica y el balance climático realizado, demuestran que en la zona de estudio las precipitaciones son escasas, aunado a la condiciones geológicas y geomorfológicas.

Agua antigua

- Las aguas de la zona de estudio presentan altas concentraciones del ion cloruro. Según Dueñas & Moreno (2018) el cloruro es un indicador de un largo tiempo de residencia.
- La facie química predominante es la clorurada/sulfatada sódica.
- El Diagrama de Scatter según Mifflin elaborado, muestra que las aguas analizadas del acuífero tendrían una tendencia a flujo regional.

En el área de estudio la recarga es principalmente horizontal por la recarga lateral de agua subterránea desde las zonas altas, moviéndose a través de los depósitos permeables que forman el acuífero en la parte baja del valle.

La recarga vertical por infiltración de lluvias es casi nula, debido a que las precipitaciones son escasas en este sector, no constituyendo una fuente significativa de recarga; pero si se presentaría una recarga vertical por el retorno de agua de riego en el cauce del río Sama donde existen abundantes áreas agrícolas, así como, por la recarga del río Sama, principalmente en épocas de máximas avenidas.

La recarga vertical por la lluvia principalmente ocurre en la parte alta de la cuenca del río Sama (>4300 m.s.n.m.) por la infiltración de agua de lluvia y escorrentía superficial, aportando al flujo regional.

Estos son solo resultados preliminares, la única manera directa de definir el origen y antigüedad del agua y diferenciar entre recarga por infiltración de río, recarga por precipitación o agua antigua, es a través de un análisis isotópico detallado como el de isótopos estables oxígeno-18 ($\delta 18O$) y deuterio ($\delta 2H$).

9.2.2. Profundidad del techo de la napa

Con la información de la profundidad de los niveles de agua de los pozos y fuentes inventariadas (ver tabla 50), se ha realizado la Carta de Isoprofundidad de la napa acuífera (mapa 38 – anexo 1), que muestra que la profundidad del nivel freático fluctúa entre 0,27m a 67,58m, observándose los niveles más superficiales

en los pozos cercanos al río Sama y los niveles de agua más profundos, en los pozos cercanos a los cerros del flanco derecho del valle (aguas arriba).

9.2.3. Morfología del techo de la napa freática

Con la finalidad de conocer la morfología de la superficie piezométrica del acuífero local y determinar de forma general la dinámica de las aguas subterráneas (dirección de flujo, gradiente hidráulica, zona de recarga y descarga), se elaboró la Carta de Hidroisohipsas (mapa 39 – anexo 1), tomando como base las mediciones de los niveles piezométricos (nivel de agua con respecto al nivel del mar) de los pozos y fuentes de agua inventariadas (ver tabla 51).

Las curvas de hidroisohipsas muestran que el flujo de agua subterránea en la zona de estudio sigue dos direcciones :

- Una dirección principal de norte - sur, con gradiente hidráulica entre 0,7% a 1,5%, paralela al curso del río Sama, cuyas cotas del nivel del agua fluctúan de 9 m.s.n.m. a 88 m.s.n.m.
- Una dirección secundaria de noroeste - sureste, con gradiente hidráulica entre 1% a 1,5%, variando las cotas del nivel del agua de 59 m.s.n.m. a 88 m.s.n.m.

Tabla 51

Profundidad y cota del nivel de agua subterránea pozos sector Pampa Molina

Pozo y/o fuente de agua	Cota terreno (m.s.n.m.)	N.E. (m)	Cota del N.E. (m.s.n.m.
Cocha 01	20	1,00	19,00
Cocha 02	13	0,50	12,50
IRHS-C-01	36	0,50	35,50
IRHS-C-02	81	0,27	80,73
IRHS-6	32	5,82	26,18
IRHS-7	44	6,37	37,63
IASS-41	83	2,20	80,80
IASS-73	20	5,40	14,60
S/N-1	126	66,92	59,08
S/N-2	94	43,90	50,10
S/N-3	101	67,58	33,42
S/N-4	80	55,00	25,00
S/N-5 Sr. de Huanca	56	33,50	22,50
S/N-6 Sr. de Huanca	56	33,00	23,00
S/N-7 Rosita	45	27,77	17,23
S/N-8	36	27,00	9,00
S/N-9 Sr. Guillén	36	27,39	13,61
S/N-10 Laguna Azul	18	8,15	9,85
S/N-11	24	11,40	12,60
S/N-12	29	14,90	14,10
S/N-13	108	20,00	88,00
PP-01 Laguna Azul	18	8,10	9,90
TA-01 Wayu Perú	56	30,30	25,70
PP-01 Wayu Perú	58	32,10	25,90

Nota. Elaboración propia

9.3. Caracterización hidrodinámica del acuífero

Para la caracterización hidráulica del acuífero del sector Pampa Molina, se analizaron los resultados de los parámetros hidráulicos obtenidos de las pruebas de bombeo ejecutadas en 04 pozos de la zona de estudio, comparándolos con valores típicos de varios autores y se realizaron los mapas de distribución espacial de permeabilidad y transmisividad.

9.3.1. Evaluación de resultados de pruebas de bombeo

La tabla 52 presenta un resumen de los valores de transmisividad (T) y permeabilidad (K) promedios obtenidos de la interpretación en Excel de la fase de descenso y recuperación de las 04 pruebas de bombeo ejecutadas en la zona, los cuales fueron comparados con los valores de Custodio & Llamas (1983) que se muestran en la tabla 16 del marco teórico de la presente tesis.

Tabla 52

Comparación de valores de parámetros hidráulicos promedio de pozos del sector Pampa Molina – Sama con la clasificación de Custodio & Llamas (1983)

Pozos	**Parámetros hidráulicos promedio**		**Clasificación del acuífero según Custodio & Llamas (1983)**
	T (m^2/día)	**K (m/día)**	
PP-01 Wayu Perú	159,58	2,35	Regular
S/N-7 Rosita	469,37	13,72	Regular a bueno
PP-01 Laguna Azul	988,20	71,09	Buen acuífero
IRHS C-2	430,05	40,04	Regular a bueno

Nota. Elaboración propia

Estos resultados determinan que el acuífero del sector evaluado presentaría regular a buen potencial hidrogeológico, con presencia de materiales permeables de gravas y arenas; siendo el pozo PP-01 Laguna Azul, ubicado al Sur de la zona de estudio, el de mejores características hidráulicas.

La tabla 53 presenta un resumen de la correlación de los valores de permeabilidad promedio obtenidos de las pruebas de bombeo, con los valores típicos de Freeze & Cherry y Domenico & Schwartz (tabla 17 del marco teórico de la presente tesis), que clasifican a los terrenos de acuerdo a este parámetro.

Tabla 53

Comparación de la permeabilidad promedio de pozos del sector Pampa Molina – Sama con valores típicos de varios autores

Pozos	**K (m/día)**	**Clasificación de acuerdo a varios autores**	
		Freeze & Cherry	**Domenico & Schwartz**
PP-01 Wayu Perú	2,35	Arena/Arena arcillosa	Arena fina a gruesa
S/N-7 Rosita	13,72	Arena/Arena arcillosa	Arena fina a gruesa
PP-01 Laguna Azul	71,09	Arena/Arena arcillosa	Arena gruesa/Grava
IRHS C-2	40,04	Arena/Arena arcillosa	Arena media a gruesa/Grava

Nota. Elaboración propia

Como se puede observar según la clasificación de Freeze & Cherry se trataría de acuíferos constituidos por arena y/o arena arcillosa. Según la clasificación de Domenico & Schwartz, los Pozos PP-01 Wayu Perú y S/N-7 Rosita clasificarían como acuíferos constituidos por arena fina a gruesa; el PP-01 Laguna

Azul como un acuífero consituido por arena gruesa y/o grava y el pozo IRHS C-2, por arena media a gruesa y/o grava.

9.3.2. Zonificación hidráulica del acuífero

La zonificación de los principales parámetros hidráulicos del acuífero, se ha realizado siguiendo la clasificación de Villanueva e Iglesias (1984), que permite categorizar la calidad de un acuífero de forma cualitativa; resultados que se describen a continuación:

9.3.2.1. Distribución de la transmisividad

Los valores de transmisividad promedio en el Sector Pampa Molina varían entre 159,58 m^2/día a 988,20 m^2/día. De acuerdo a la clasificación establecida por Villanueva e Iglesias (1984), se han identificado 02 zonas, cuyos valores son clasificados cualitativamente como media y alta, tal como se muestra en la tabla 54 y figura 120.

Tabla 54

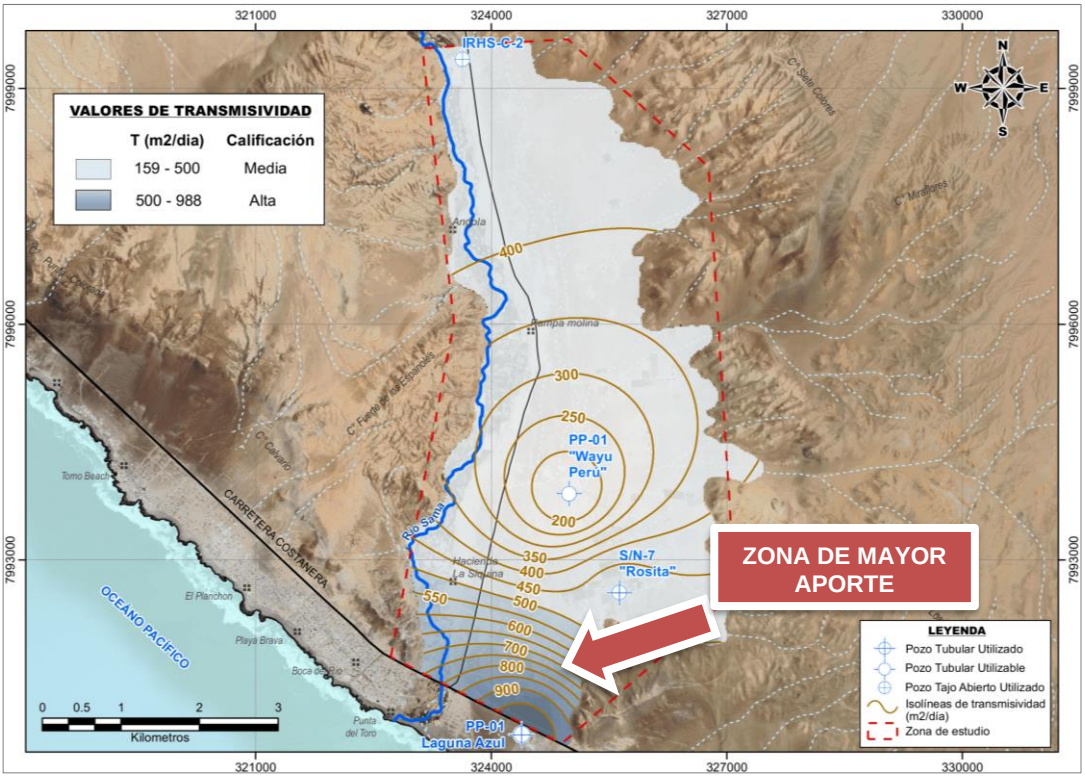
Clasificación cualitativa de la transmisividad, sector Pampa Molina

Clasificación	Rango de transmisividad (m^2/día)
Media	159,58 a 500
Alta	500 a 988,20

Nota. Elaboración propia

Figura 120

Distribución de la transmisividad



Nota. Elaboración propia

- **Zona de transmisividad media.** Se extiende en la parte media y alta del área de estudio, relacionada con la ubicación de los pozos PP-01 Wayu Perú, S/N-7 Rosita e IRHS C-2.

  Esta clasificación para los pozos de la parte media (PP-01 Wayu Perú y S/N-7 Rosita) se debe a los bajos valores de permeabilidad y buenos espesores de acuífero, donde se registran caudales de 21,70 l/s y 30,41 l/s, respectivamente; lo que indica que es una zona del acuífero de regular productividad.

Para el pozo de la parte alta (IRHS C-2), esta clasificación se debe al regular valor de permeabilidad y poco espesor de acuífero debido a que se ubica en la zona de estrangulamiento del valle, cuyas características inciden en el rendimiento del pozo siendo comparativamente más bajo, registrándose un caudal de producción de 4,72 l/s. Este resultado indicaría que es una zona del acuífero de baja productividad.

- **Zona de transmisividad alta**. Se localiza al sur del área de estudio, cerca al litoral costero, relacionada con la ubicación del pozo PP-01 Laguna Azul. Su clasificación se debe al alto valor de permeabilidad y al regular espesor de acuífero, registrándose un caudal de 20 l/s; lo que indicaría que es una zona del acuífero de regular productividad y que de mayor aporte.

9.3.2.2. Distribución de la permeabilidad

Los valores de permeabilidad promedio en el Sector Pampa Molina varían entre 2,35 m/día a 71,09 m/día. De acuerdo a la clasificación establecida por Villanueva e Iglesias (1984), se han identificado 02 zonas, cuyos valores son clasificados cualitativamente como media y alta, se muestra en la tabla 55 y figura 121.

Tabla 55

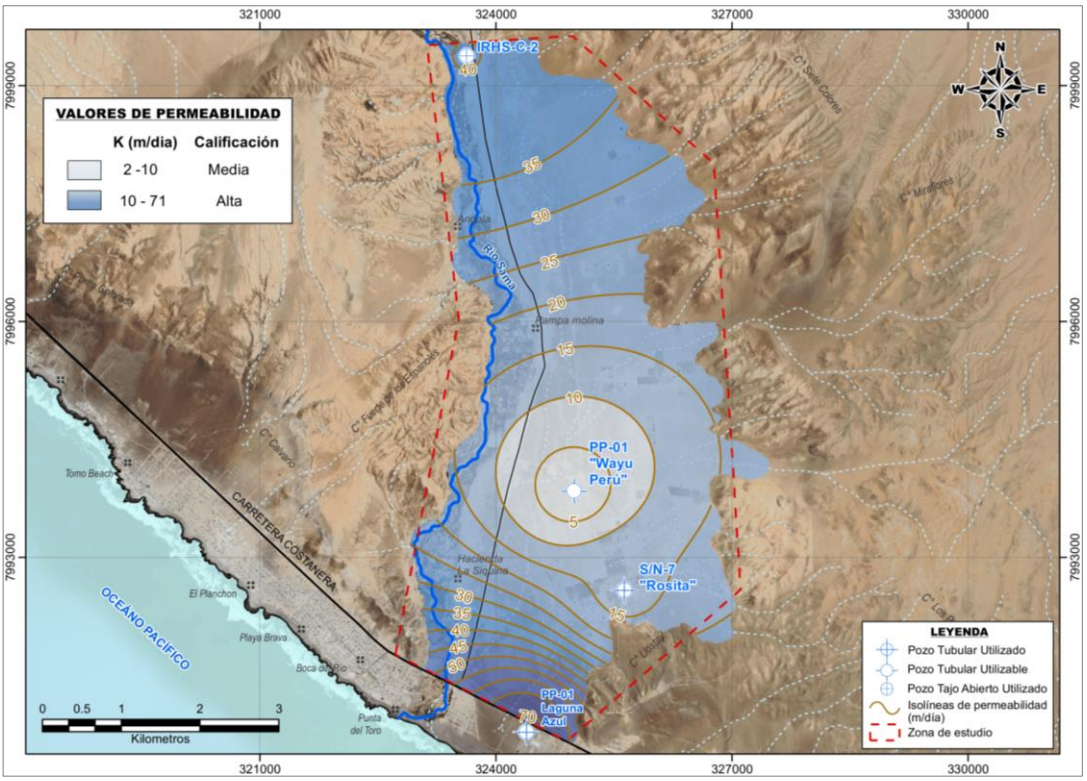
Clasificación cualitativa de la permeabilidad, sector Pampa Molina

Clasificación	Rango de permeabilidad (m/día)
Media	2,35 a 10
Alta	10 a 71,09

Nota. Elaboración propia

Figura 121

Distribución de la permeabilidad



Nota. Elaboración propia

- **Zona de permeabilidad media.** Se localiza en la parte media del área de estudio, relacionada con la ubicación del pozo PP-01 Wayu Perú,

que está compuesto por materiales de baja y regular permeabilidad de arena, grava y canto rodado en matriz limo-arcillosa.

- **Zona de permeabilidad alta**. Representa el sector de mayor potencial hidrogeológico. Se extiende en la parte alta y baja del área de estudio, relacionada con la ubicación de los pozos IRHS C-2, S/N-7 Rosita y PP-01 Laguna Azul, debido a que presentan materiales permeables.

9.4. Caracterización hidrogeoquímica del acuífero

La clasificación química del agua subterránea se realiza en base a diagramas triangulares, circulares, de barras o indicadores rápidos como alcalinidad, dureza, etc., y mapas hidrogeoquímicos, que son herramientas eficientes para visualizar las variaciones temporales y espaciales de la misma, así como de su composición (ANA, 2018).

9.4.1. Evaluación de resultados de diagramas hidroquímicos

Para la caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea del acuífero del sector Pampa Molina se elaboraron los diagramas y gráficos hidroquímicos de Piper, Stiff y Schoeller, tomando en cuenta los iones mayoritarios descritos en el Capítulo 8, que permitieron arribar a las siguientes conclusiones:

- El diagrama de Piper indica que las aguas analizadas son principalmente del tipo cloruradas sódicas, altamente mineralizadas, lo que se ha visto reflejado en las bajas resistividades eléctricas obtenidas en la interpretación de sondajes eléctricos verticales (secciones geofísicas) y las conductividades eléctricas de las aguas.

Solo los pozos S/N-4 e IRHS-C-2 muestran mezclas con importantes concentraciones de sulfato, denotando una familia química clorurada sulfatada sódica y sulfatada clorurada sódica, respectivamente.

- Los diagramas de Stiff muestran que el sodio es el catión mayoritario y para los aniones, predomina el cloruro seguido del sulfato.
- En el diagrama de Schoeller se aprecia el predominio de los iones sodio y cloruro en las muestras de agua y en segunda instancia el ion sulfato, respaldando las tendencias mostradas por los diagramas anteriormente mencionados. El pozo IRHS-7 presenta la mayor concentración de iones, debido a que capta directamente las filtraciones del río Sama (aguas de alta salinidad y de muy mala calidad, principalmente en época de estiaje (mayo-noviembre) así como, las aguas procedentes de las áreas agrícolas del cauce del río.

9.4.2. Zonificación hidrogeoquímica del acuífero

Para visualizar la variación de los parámetros físico químicos de las aguas subterráneas en el sector Pampa Molina, se elaboraron los mapas de distribución espacial hidrogeoquímicos para la conductividad eléctrica y los iones principales (cationes y aniones) de cloruros, sulfatos, sodio y calcio, que se describen a continuación:

9.4.2.1. Distribución de la conductividad eléctrica

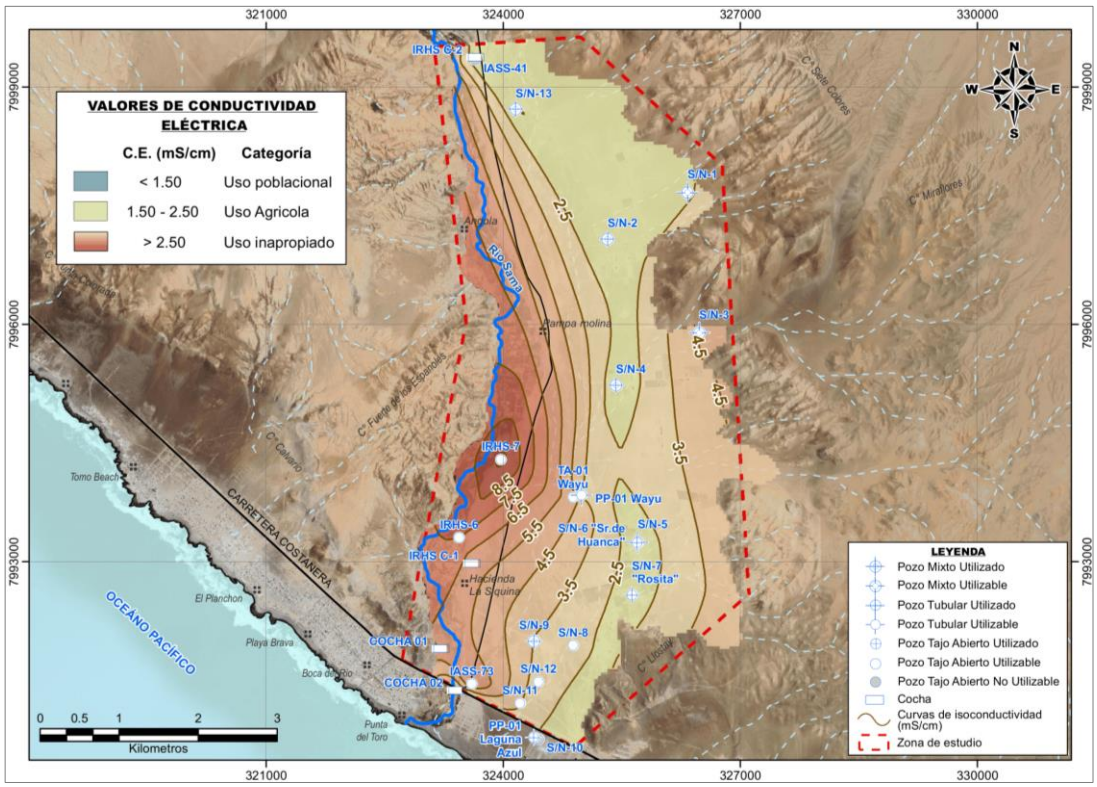
Con los valores de conductividad eléctrica in situ obtenidos de los pozos y fuentes de agua inventariadas, se elaboró el mapa de isoconductividad

(figura 122), del cual se concluye que solo el pozo S/N-14 presentaría agua de buena calidad para consumo humano.

La calidad del agua subterránea para fines agrícolas tiende a mejorar hacia la parte central del sector Pampa Molina y por el sector la Vituña (C.E.< 2,50 mS/cm) y a incrementarse hacia el sureste de la zona de estudio, asi como, hacia el litoral y río Sama (2,50 mS/cm < C.E. < 9,79 mS/cm), debido a la presencia de estratos salinos, lavado de suelos, cercanía al litoral y/o a la recarga que recibe del río Sama (agua de muy mala calidad altamente salobre).

Figura 122

Isoconductividad eléctrica del agua subterránea



Nota. Elaboración propia

Este mapa de isoconductividad también confirma que la baja resistividad detectada en los sondajes eléctricos verticales (SEVs) no se atribuye exclusivamente a la calidad del agua, dado que la alta salinidad es una característica predominante en casi toda el área de estudio. Por lo tanto, los bajos valores de resistividad responderían principalmente a la presencia de sedimentos finos (limos y arcillas) o a la existencia de estratos salinos.

9.4.2.2. Distribución del ion cloruro

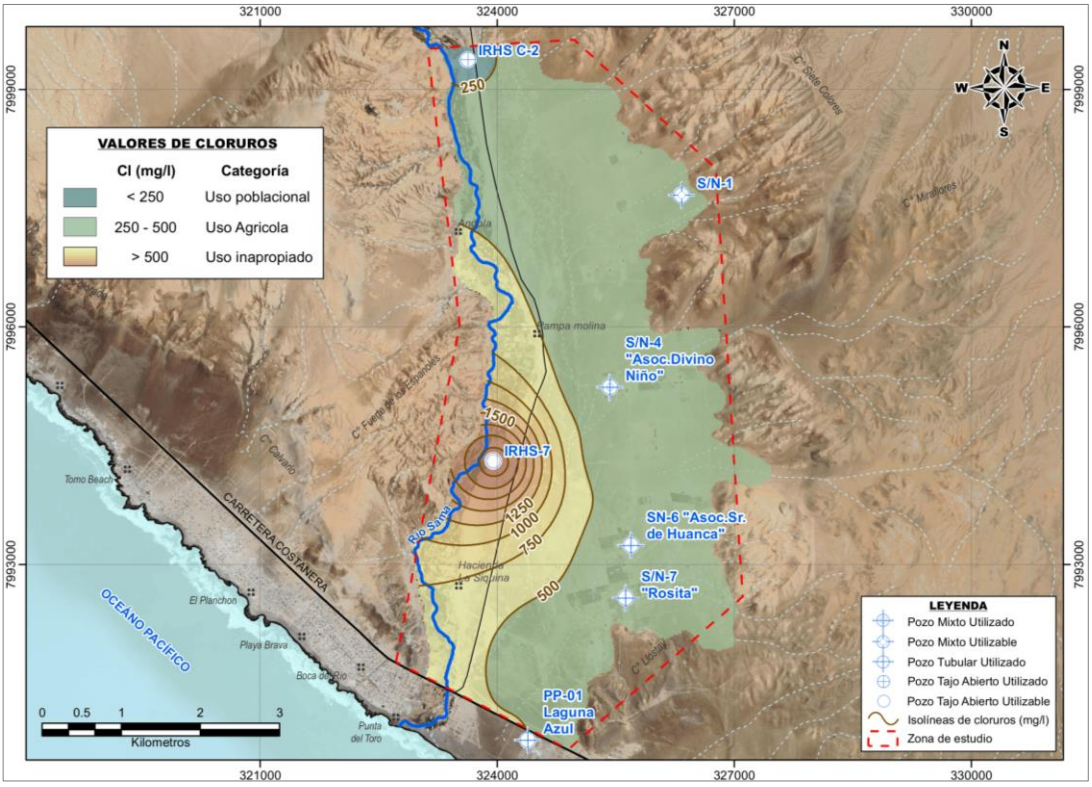
Con los valores del ion cloruro obtenidos de los análisis físicos-químicos realizados en laboratorio, se ha elaborado el mapa de distribución de cloruros (figura 123); donde se puede observar que solo el Pozo IRHS C-2 ubicado en el sector la Vituña presentaría agua de buena calidad para uso poblacional.

La mejor calidad del agua subterránea para uso agrícola se dispone al norte y este de la zona de estudio (Cl^- < 250 mg/l) y tiende a incrementarse hacia el litoral y río Sama (250 mg/l < Cl^- < 2377,28 mg/l), excediendo los límites máximos permisibles de los estándares de calidad ambiental para riego de cultivos (ECA 3-D1); por lo que solo deben utilizarse bajo ciertas restricciones.

El alto contenido de cloruros en los pozos cercanos al litoral no se debería a problemas de intrusión marina, sino representan aguas salobres, porque el agua de mar tiene alrededor de 20000 mg/l y las aguas subterráneas de 10 a 3000 mg/l.

Figura 123

Distribución del ion cloruro



Nota. Elaboración propia

La mejor calidad del agua subterránea para uso agrícola se dispone al norte y este de la zona de estudio (Cl^- < 250 mg/l) y tiende a incrementarse hacia el litoral y río Sama (250 mg/l < Cl^- < 2377,28 mg/l), excediendo los límites máximos permisibles de los estándares de calidad ambiental para riego de cultivos (ECA 3-D1); por lo que solo deben utilizarse bajo ciertas restricciones.

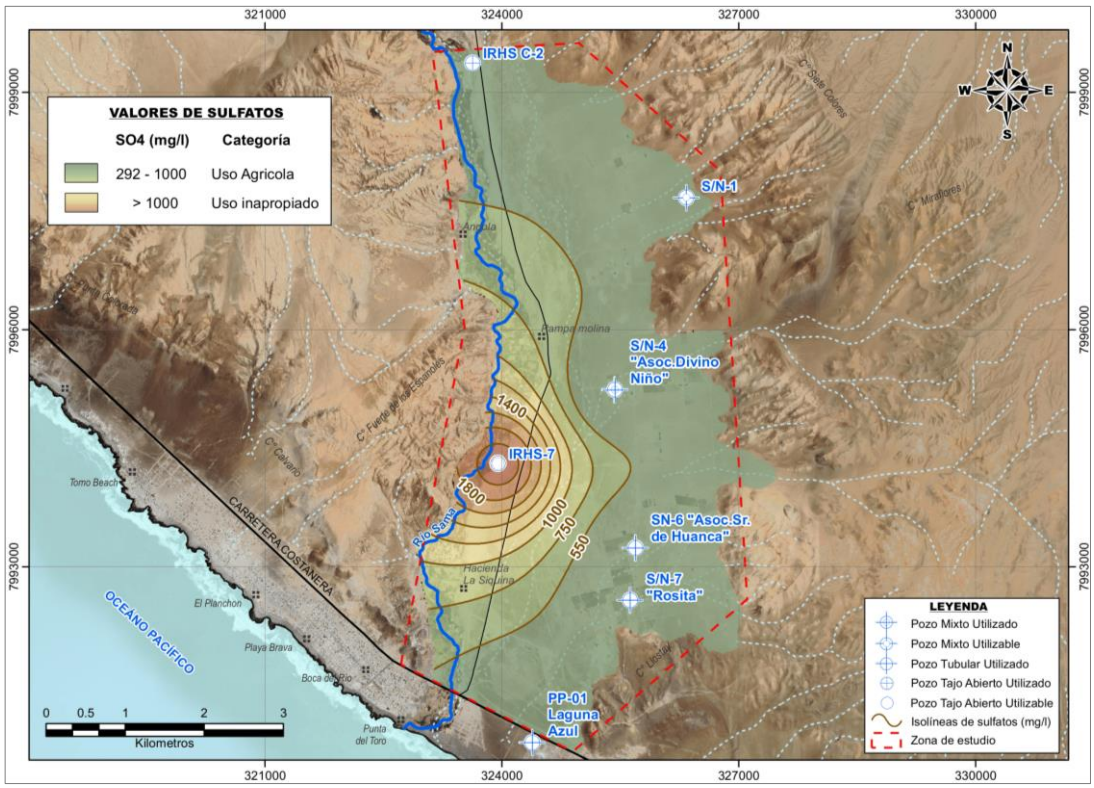
El alto contenido de cloruros en los pozos cercanos al litoral no se debería a problemas de intrusión marina, sino representan aguas salobres, porque el agua de mar tiene alrededor de 20000 mg/l y las aguas subterráneas de 10 a 3000 mg/l.

9.4.2.3. Distribución del ion sulfato

Con los valores de concentración del ion sulfato obtenidos de los análisis físicos-químicos realizados en laboratorio, se ha elaborado el mapa de distribución de sulfatos (figura 124); observándose que la mejor calidad del agua subterránea se dispone al norte y este del área de estudio (SO_4^{2-} < 1000 mg/l) y tiende a incrementarse hacia el litoral y cerca al río Sama (1000 mg/l < SO_4^{2-} < 2114,02 mg/l), que exceden los límites máximos permisibles de los estándares de calidad ambiental para riego de cultivos (ECA 3-D1).

Figura 124

Distribución del ion sulfato



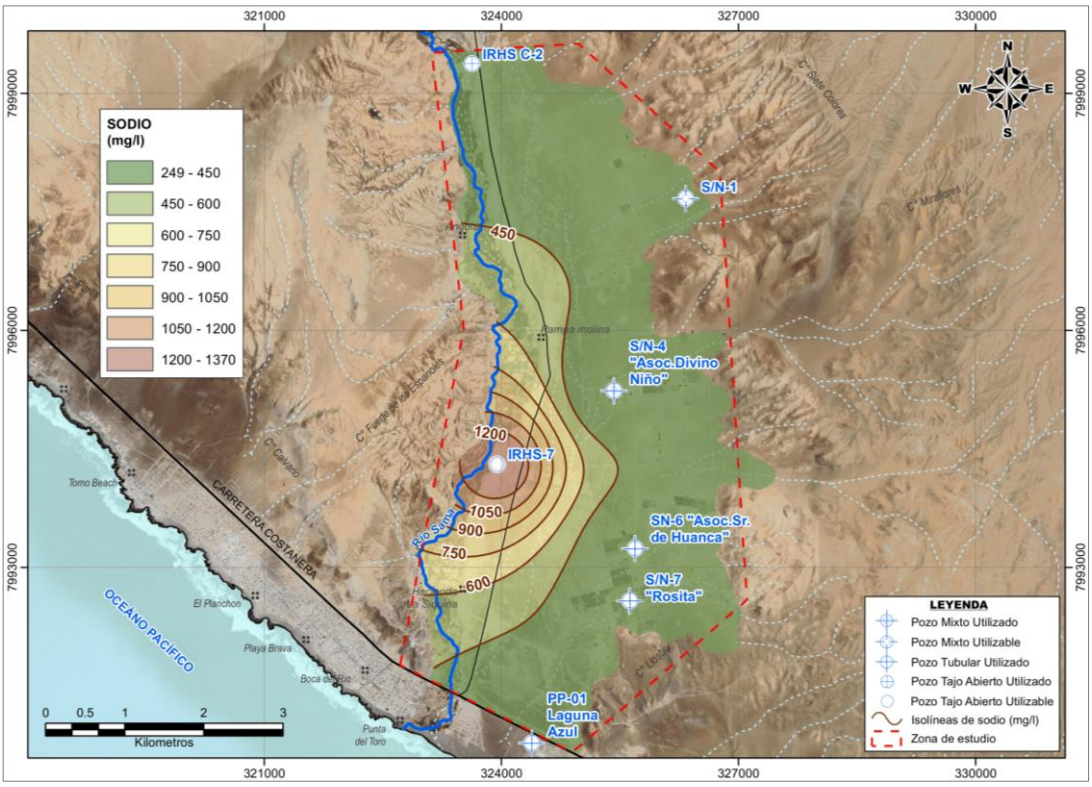
Nota. Elaboración propia

9.4.2.4. Distribución del ion sodio

Con los valores de concentración del ion sodio obtenidos de los análisis físicos-químicos realizados en laboratorio, se ha elaborado el mapa de distribución de sodio (figura 125); donde se puede observar que la mejor calidad del agua subterránea se dispone al norte y este del área de estudio y tiende a incrementarse hacia el sur y río Sama, por la presencia de suelos con altos contenidos de sodio, filtraciones que reciben del río Sama y/o cercanía al litoral.

Figura 125

Distribución del ion sodio



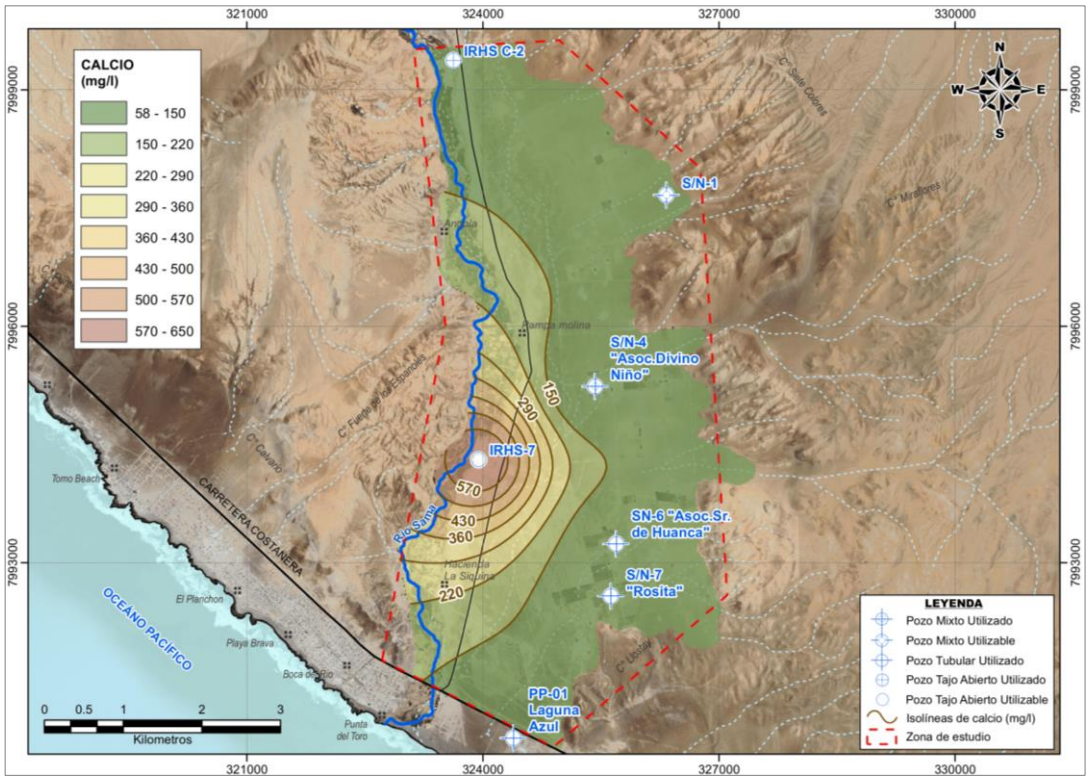
Nota. Elaboración propia

9.4.2.5. Distribución del ion calcio

Con los valores de concentración del ion calcio obtenidos de los análisis físicos-químicos realizados en laboratorio, se ha elaborado el mapa de distribución de calcio (figura 126); donde se puede observar que la mejor calidad del agua subterránea se dispone al norte y este del área de estudio y tiende a incrementarse hacia el litoral y cerca al río Sama, presentándose el mayor contenido de este ion en el pozo IRHS-7 (647,02 mg/l).

Figura 126

Distribución del ion calcio



Nota. Elaboración propia

9.5. Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas

9.5.1. Aptitud del agua para consumo humano

9.5.1.1. Análisis de la calidad de agua de acuerdo a la comparación con los estándares de calidad ambiental (ECA) para consumo humano

De la comparación de los parámetros físico-químicos con los ECA-1-A1 para consumo humano del D.S. N° 004-2017-MINAM, se aprecia que todos los pozos muestran altos valores de conductividad y sulfatos que superan los límites máximos permisibles. Del mismo modo los cloruros muestran excedencias, con excepción del pozo IRHS C-2. Los sólidos disueltos totales se presentan en altas concentraciones en los pozos S/N-1, S/N-7, S/N-10; mientras que la dureza es excesivamente alta en el pozo IRHS-7. Por lo expuesto, las muestras de agua analizadas se clasificarían como no aptas para consumo humano.

En la tabla 56 se presenta la clasificación específica de apto/no apto para cada uno de los pozos, de acuerdo al límite permisible de cada parámetro de la norma ECA 1-A1 (consumo humano) y en la table 57, se resume los parámetros físico-químicos que exceden los límites permisibles para cada muestra de agua analizada.

Tabla 56

Parámetros que exceden los ECA 1-A1 del D.S. N° 004-2017-MINAM en las muestras de agua de la zona de estudio

Pozos y/o fuentes de agua	Parámetros que exceden los límites de los ECA 1-A1 para consumo humano
IRHS C-2	C.E., SO_4
S/N-1	C.E., TDS, Cl, SO_4
S/N-4	C.E., Cl, SO_4
S/N-6 Sr. de Huanca	C.E., Cl, SO_4
S/N-7 Rosita	C.E., TDS, Cl, SO_4
S/N-10 Laguna Azul	C.E., TDS, Cl, SO_4
PP-01 Laguna Azul	C.E., Cl, SO_4
IRHS-7	C.E., TDS, Dureza, Cl, SO_4

Nota. Elaboración propia

Tabla 57

Clasificación de muestras de agua de acuerdo a los límites máximos permisibles de los ECA 1-A1 para consumo humano de la norma MINAM

Parámetros	Límites máximos permisibles ECA 1-A1 MINAM consumo humano	Pozos y fuentes de agua subterránea													
		IRHS-C-2		S/N-1		S/N-4		S/N-6 Sr. de Huanca		S/N-7 Rosita		PP-01 Laguna azul		IRHS-7	
pH	**6.5 – 8.5**	8,20	Apto	7,97	Apto	7,95	Apto	7,69	Apto	7,93	Apto	7,80	Apto	6,93	Apto
C.E.(mS/cm)	**1,50**	1,87	No Apto	2,34	No Apto	1,69	No Apto	1,82	No Apto	1,99	No Apto	2,34	No Apto	9,78	No Apto
TDS (mg/l)	**1000**	-	-	1382	No Apto	962	Apto	-	.	1242	No Apto	-	-	6784	No Apto
Dureza(mg/l)	**500**	370,27	Apto	224,95	Apto	198,51	Apto	290,93	Apto	238,29	Apto	344,54	Apto	2103,71	No Apto
Cl^- (mg/l)	**250**	229,57	Apto	469,05	No Apto	264,63	No Apto	340,89	No Apto	362,72	No Apto	468,40	No Apto	2377,28	No Apto
SO_4^{2-} (mg/l)	**250**	345,26	No Apto	371,64	No Apto	292,42	No Apto	350,74	No Apto	355,23	No Apto	336,46	No Apto	2114,02	No Apto
NO_3^- (mg/l)	**50**	<0,30	Apto	3,77	Apto	1,87	Apto	2,73	Apto	2,31	Apto	0,90	Apto	<0,06	Apto

Nota. Elaboración propia

9.5.1.2. Potabilidad de las aguas

Para determinar la aptitud de las aguas subterráneas para el consumo humano, se ha elaborado el diagrama de potabilidad de las muestras de agua del área de estudio (ver figura 127), del cual podemos concluir que solo 02 muestras contienen aguas aceptables a mediocres, 04 son aguas mediocres y solo el pozo IRHS-7 presentaría agua de muy mala calidad (ver tabla 58).

Tabla 58

Tipos de agua según la potabilidad, acuífero Pampa Molina

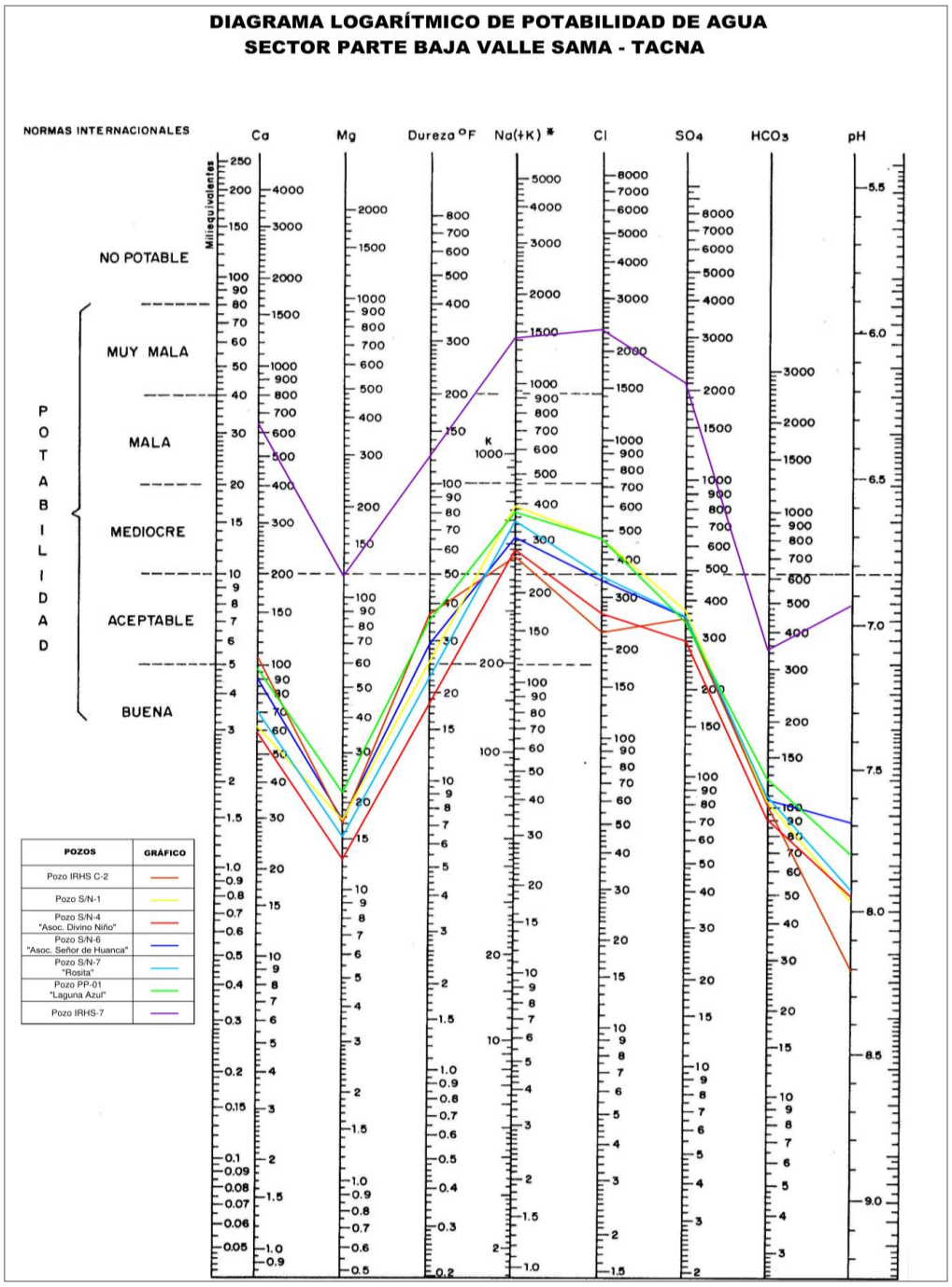
Pozos y/o fuentes de agua	Tipo de agua
IRHS C-2	Aceptable a mediocre
S/N-1	Mediocre
S/N-4	Aceptable a mediocre
S/N-6 Sr. de Huanca	Mediocre
S/N-7 Rosita	Mediocre
PP-01 Laguna Azul	Mediocre
IRHS-7	Muy mala

Nota. Elaboración propia

En estas condiciones se recomienda evitar utilizar las aguas del sector Pampa Molina para el consumo humano y solo emplearlas en la agricultura y/o ganadería bajo ciertas restricciones.

Figura 127

Diagrama logarítmico de potabilidad de agua, acuífero Pampa Molina



Nota. Elaboración propia

9.5.2. Aptitud del agua para uso agrícola

En aguas para uso agrícola la calidad es definida por la concentración de iones específicos Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} y K^{+} como cationes; CO_3^{2-} Cl^{-} y SO_4^{2-} como aniones, y otros de menor proporción como el B^{3+}, I^{-} y NO_3. (Carabelí et al., 2019).

La CE y el Na^{+} son dos parámetros fundamentales que definen la aptitud del agua para riego. El alto contenido de sales en el agua de irrigación genera un aumento de la presión osmótica en la solución del suelo, disminuyendo la adsorción de agua por parte de las plantas. Las sales, además de afectar directamente el crecimiento de las plantas, afectan la constitución del suelo, su permeabilidad y estructura, afectando indirectamente el crecimiento de la planta (Duchaufour, 1984).

9.5.2.1. Análisis de la calidad de agua de acuerdo a la comparación con los estándares de calidad ambiental (ECA) para riego de cultivos

De la comparación de los parámetros físico-químicos con los ECA 3-D1 para riego de cultivos del D.S. N° 004-2017-MINAM, se aprecia que solo el pozo IRHS-7 muestra altos valores de conductividad, cloruros y sulfatos que superan los límites máximos permisibles; los demás pozos clasifican como Aptos para uso agrícola.

En la tabla 59 se muestra la clasificación específica de apto/no apto para cada uno de los pozos, de acuerdo al límite permisible de cada parámetro de la norma ECA 3-D1 (uso agrícola) y en la tabla 60, se resume los parámetros físico-químicos que exceden los límites permisibles para cada muestra de agua.

Tabla 59

Clasificación de muestras de agua de acuerdo a los límites máximos permisibles de los ECA 3-D1 para riego de cultivos de la norma MINAM

Parámetros	Límites máximos permisibles ECA 3-D1 MINAM riego de cultivos	Pozos y fuentes de agua subterránea													
		IRHS-C-2		S/N-1		S/N-4		S/N-6 Sr. de Huanca		S/N-7 Rosita		PP-01 Laguna Azul		IRHS-7	
pH	**6.5 – 8.5**	8,20	Apto	7,97	Apto	7,95	Apto	7,69	Apto	7,93	Apto	7,80	Apto	6,93	Apto
C.E.(mS/cm)	**2,50**	1,87	Apto	2,34	Apto	1,69	Apto	1,82	Apto	1,99	Apto	2,34	Apto	9,78	No Apto
Cl^- (mg/l)	**500**	229,57	Apto	469,05	Apto	264,63	Apto	340,89	Apto	362,72	Apto	468,40	Apto	2377,28	No Apto
SO_4^{2-} (mg/l)	**1000**	345,26	Apto	371,64	Apto	292,42	Apto	350,74	Apto	355,23	Apto	336,46	Apto	2114,02	No Apto
HCO_3^- (mg/l)	**518**	102,47	Apto	105	Apto	91.10	Apto	107.05	Apto	109.40	Apto	125.93	Apto	346.70	Apto

Nota. Elaboración propia

Tabla 60

Parámetros que exceden los ECA 3-D1 del D.S. N° 004-2017-MINAM en las muestras de agua de la zona de estudio

Pozos y/o fuentes de agua	Parámetros que exceden los límites de los ECA 3-D1 para riego de cultivos
IRHS C-2	-
S/N-1	-
S/N-4	-
S/N-6 Sr. de Huanca	-
S/N-7 Rosita	-
PP-01 Laguna Azul	-
IRHS-7	C.E., Cl, SO_4

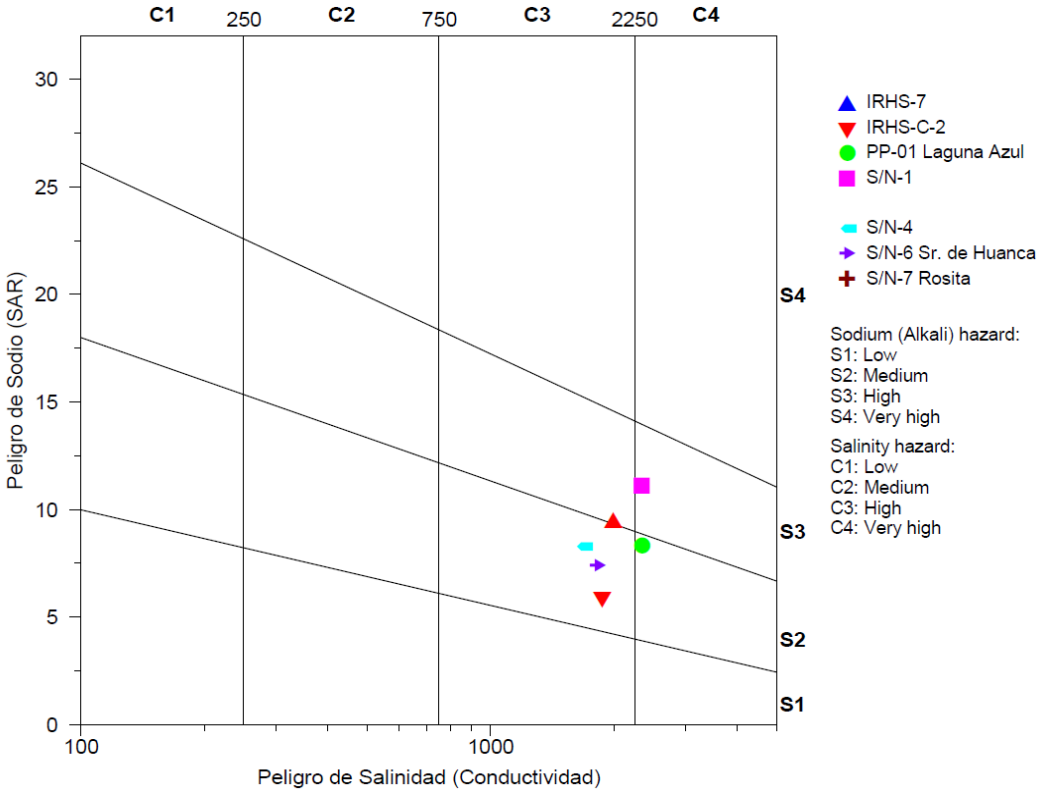
Nota. Elaboración propia

9.5.2.2. Clases de agua según el RAS y la conductividad eléctrica

La calidad del agua subterránea del sector Pampa Molina con fines de riego ha sido determinada en base a las normas propuestas por el Laboratorio de Salinidad de Riverside, California EE.UU., empleando el Diagrama de Wilcox, que utiliza la conductividad eléctrica (C.E.) y la relación de absorción de sodio (RAS); el cual fue elaborado mediante el programa AQUACHEM 4.0 (ver figura 128).

Figura 128

Diagrama de Wilcox de clasificación del agua para riego, acuífero Pampa Molina



Nota. Elaboración propia

En la figura 128 se observa que 04 muestras de agua son de tipo C3S2 (aguas de alta salinidad y de regular contenido de sodio que pueden ser utilizadas en la agricultura bajo ciertas condiciones); 01 muestra del tipo C4S2 (aguas de muy alta salinidad y de regular contenido de sodio que pueden ser utilizadas en la agricultura bajo ciertas condiciones); 01 muestra del tipo C4S3 (aguas de muy alta salinidad y de alto contenido de sodio que pueden ser utilizadas en la agricultura bajo ciertas condiciones) y 01 muestra del tipo C4S4 (aguas de muy alta salinidad y de muy alto contenido de sodio que no es aconsejable para el riego en general)

correspondiente al pozo IRHS-7. En la Tabla 61 se presenta el resumen de la aptitud de riego para las muestras de agua de la zona de estudio.

Tabla 61

Clasificación del agua según RAS y la C.E., acuífero Pampa Molina

Pozos	C.E. (mS/cm)	R.A.S.	Aptitud de riego
IRHS C-2	1,87	5,89	C3S2
S/N-1	2,34	11,11	C4S3
S/N-4	1,69	8,27	C3S2
S/N-6 Sr. de Huanca	1,82	7,41	C3S2
S/N-7 Rosita	1,99	9,50	C3S2
PP-01 Laguna Azul	2,34	8,33	C4S2
IRHS-7	9,78	12,95	C4S4

Nota. R.A.S.=Índice que relaciona la concentración de Na^{+} con la de Ca^{2+} y Mg^{2+}. Elaboración propia.

Por lo expuesto, se recomienda el uso de estas aguas solo en cultivos muy tolerantes a las sales y de suelos permeables con buen drenaje.

En el sector Pampa Molina los cultivos que se vienen implementando y se proyecta implementar son principalmente el olivo, la quinua y la pitahaya orgánica, cultivos muy tolerantes a la salinidad con C.E. hasta de 5 mS/cm, 15 mS/cm y 10 mS/cm, respectivamente; por tal motivo, es factible el uso de las aguas para el riego de este tipo de cultivos, pero tomando las precauciones pertinentes para evitar la salinización del suelo.

9.6. Caudal de flujo subterráneo

El caudal de flujo subterráneo se calculó a través de una sección perpendicular a la corriente de agua. El método utilizado fue la aplicación de la Ley de Darcy (flujo a través de medio poroso), es decir la velocidad en que se produce el flujo subterráneo, la que es transformada en descarga al relacionarse con la superficie de la sección que atraviesa.

La fórmula de Darcy es aplicable para determinar el caudal de escurrimiento, siempre y cuando la gradiente hidráulica sea débil, como es el presente caso. La fórmula se expresa de las siguientes maneras:

$Q = K*A*i$ (1)

$Q = K*H*L*i$ (2)

$Q = T*L*i$ (3)

Donde:

Q = Caudal de escurrimiento en m^3/s.

K = Permeabilidad en m/s.

T= Transmisividad en m^2/s.

H= Espesor del lecho del acuífero en metros.

L= Longitud de la sección en metros.

i= Gradiente hidráulico

Para el cálculo del caudal del flujo subterráneo que ingresa al acuífero Pampa Molina-Sama, se ha aplicado la expresión (3) de Darcy: Q=T*L*i, donde se ha considerado una sección de 2800m de longitud que une límites impermeables; una transmisividad promedio representativa de 0,0059 m^2/s (511,80 m^2/día) obtenida de las pruebas de bombeo de pozos de la zona y gradiente hidráulico de 1% (0,01), la cual se obtuvo de la interpretación de las curvas de hidroisohipsas. De esta forma, se ha calculado un flujo de agua subterránea de 0,165 m^3/s, equivalente a 165 l/s.

9.7. Balance hídrico

El sistema hidrogeológico funciona como un ciclo dinámico en el que interactúan las entradas (recarga), salidas (descarga) y almacenamiento de agua (reservas). A continuación, se detallan los componentes del balance hídrico del acuífero de la zona de estudio:

ENTRADAS

La recarga al acuífero procede de las siguientes fuentes:

- La infiltración directa de las precipitaciones en la zona alto andina (>3000 m.s.n.m.), donde el flujo se desplaza regionalmente en dirección NE-SW hacia el valle Sama. Esta recarga es una de las más importantes para la zona de estudio, debido a la extensión de la cuenca receptora, que recolecta la infiltración de las precipitaciones y de la escorrentía superficial en la parte baja y media de la cuenca.

- Según MINAG & ANA (2010), en la cabecera de la cuenca Sama se registra una precipitación total anual promedio de 340 mm/año, del cual se desconoce el porcentaje que correspondería a la escorrentía superficial y recarga local.
- Estudios del valle Sama realizados por la empresa EMAP Ingenieros SAC, indican una escorrentía regional anual de 68 MMC, de la cual el 20% se infiltra principalmente por el lecho del río y áreas de cultivo, es decir 430 l/s (13,75 MMC/año).

- El flujo subterráneo regional del Valle Sama que ingresaría al acuífero del sector Pampa Molina, sería de 165 l/s, calculado mediante la ecuación de Darcy: Q=T*L*i.
- Debido que las precipitaciones en la zona de estudio son escasas, no constituyen una fuente significativa de recarga, por lo que no han sido consideradas en el balance hídrico.
- Asimismo, los flujos procedentes de las quebradas Las Brujas y Agua Dulce, no han sido incluidos en el balance hídrico, porque deben ser previamente evaluados a mayor detalle.

SALIDAS

La salida de agua subterránea del sistema acuífero corresponde netamente a la tasa de bombeo de los pozos. Del inventario de fuentes de agua subterránea realizado en la zona de estudio, hasta el año 2024, se ha identificado un caudal de bombeo de 36,10 l/s.

En la tabla 62 se resume el balance hídrico total calculado para el acuífero Pampa Molina – Sama, donde se ha considerado como ENTRADA, el flujo subterráneo regional que ingresa a la zona y como SALIDA, el volumen de explotación de los pozos en actual operación, dando como resultado una variación de reservas positiva de +128,90 l/s (+4,06 MMC). Este resultado confirma que existe suficiente disponibilidad hídrica en el sector Pampa Molina, garantizando que la extracción actual de los pozos no compromete el equilibrio alimentación-explotación.

Tabla 62

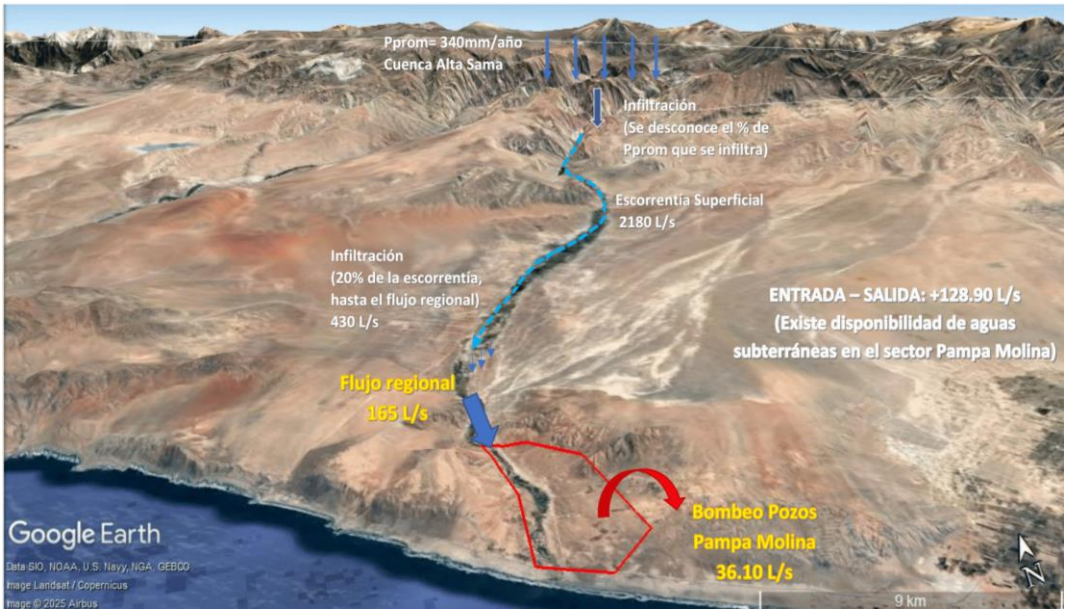
Balance hídrico acuífero Pampa Molina – parte baja valle Sama

Descripción	**Volumen anual**	
	l/s	MMC/año
Entrada		
Flujo subterráneo regional que ingresa al sector Pampa Molina (ecuación de Darcy) Q=T*L*i = 0,0059 m2/s* 2800m *0.01)	165,00	5,20
Salida		
Gasto pozos en actual explotación (inventario fuentes de agua)	36,10	1,14
Variación de la reserva	+128,90	+4,06

Nota. Elaboración propia

Figura 129

Esquema conceptual de ingresos y salidas del sistema acuífero



Nota. Elaboración propia

9.8. Reservas de agua subterránea del acuífero Pampa Molina-Sama

9.8.1. Modelo 3D del reservorio acuífero

Se ha elaborado un modelo geológico 3D en el software Leapfrog Geo 5.1 con el objetivo de determinar principalmente el volumen del horizonte saturado, que servirá para calcular las reservas totales almacenadas del acuífero del sector Pampa Molina – Sama.

Base de datos para la elaboración del modelo

Para la generación del modelo geológico 3D, se utilizaron las 18 secciones geológicas-geofísicas del presente trabajo de investigación, las cuales fueron correlacionadas con la geológica de la zona y litología de pozos perforados.

Procedimiento del modelado

- Se importó la topografía generada a partir del modelo de elevación digital (DEM) en ARCGIS (ver figura 130), generando curvas de nivel a 25 metros, creándose de esta forma una malla de superficie (mesh).
- Se importó y georreferenció las 18 secciones geológicas-geofísicas (figura 131), tomando como apoyo las coordenadas de algunos puntos en las secciones, para ubicarlas correctamente en el espacio 3D.
- Se definieron las capas a considerar en el modelo. Tomando como referencia los horizontes delimitados en las secciones geológicas-geofísicas, se establecieron 03 capas, quedando de la siguiente forma:

Tabla 63

Capas asignadas al modelo geológico

N° Capa	Clasificación	Horizontes según secciones geofísicas
Capa 1	Zona no saturada	Horizonte I-No saturado superficial y Horizonte II-No saturado subsuperficial
Capa 2	Zona saturada	Horizonte III-Acuífero
Capa 3	Basamento rocoso	Horizonte IV-Basamento impermeable

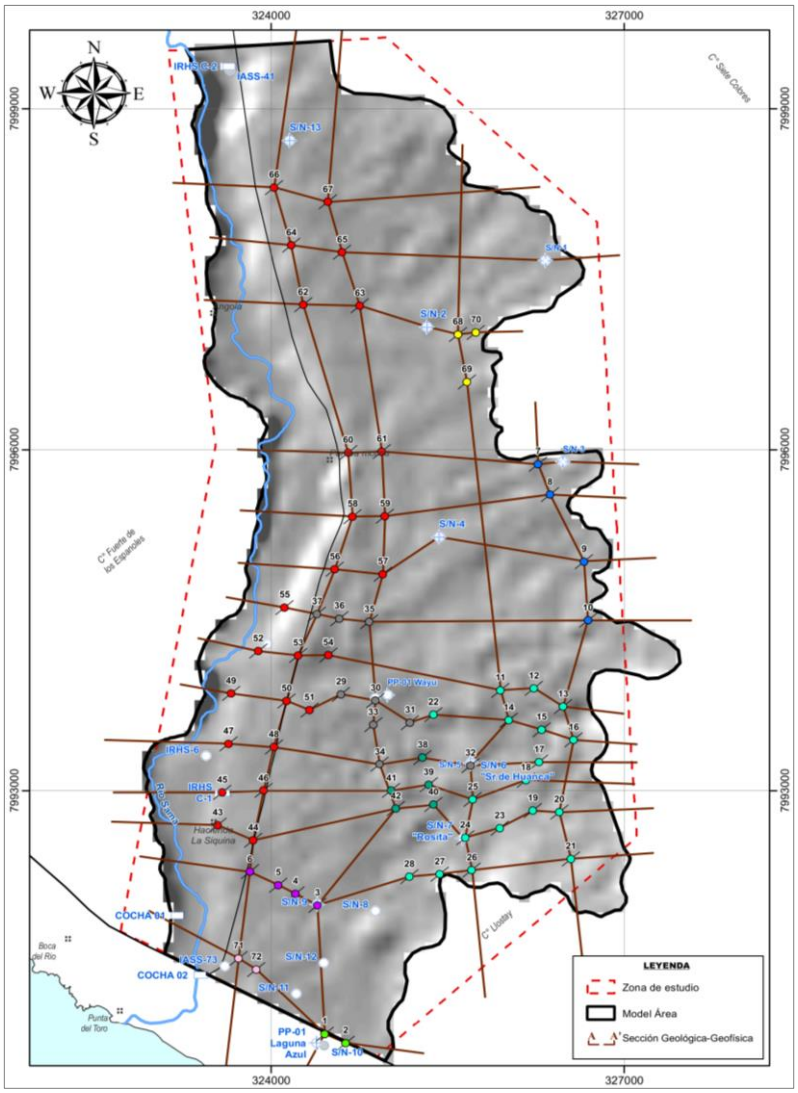
Nota. Elaboración propia

- Se inició con la digitalización de los contactos de cada una de las capas, creando para esto, sobre cada sección, polilíneas en los contactos superior e inferior para cada una de ellas. El contacto superior de la primera capa quedó definido por la malla de superficie (topografía), mientras que la base de la tercera capa fue establecida de acuerdo a la profundidad dada en las secciones geofísicas.

- Luego se procedió a crear superficies con dicha líneas 3D. Se definió una resolución de 20m
- Culminada la creación y edición de cada capa, se procedió a crear los volúmenes con las superficies interpoladas (ver figura 132)

Figura 130

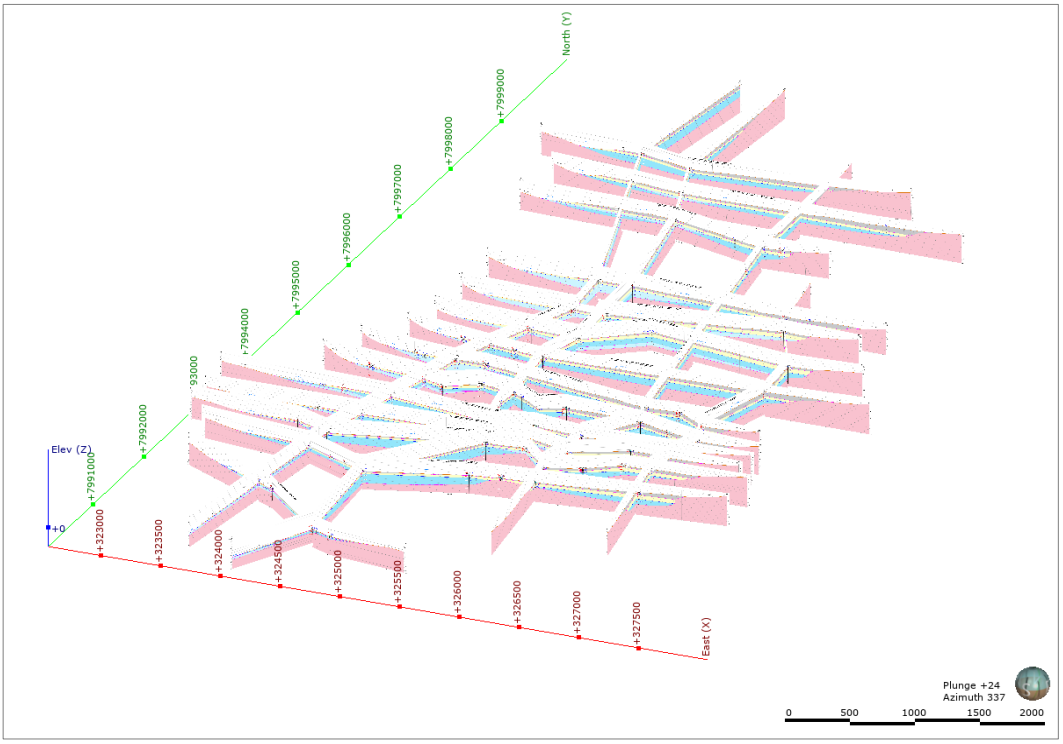
DEM del área de estudio utilizado para el modelo geológico 3D



Nota. Elaboración propia

Figura 131

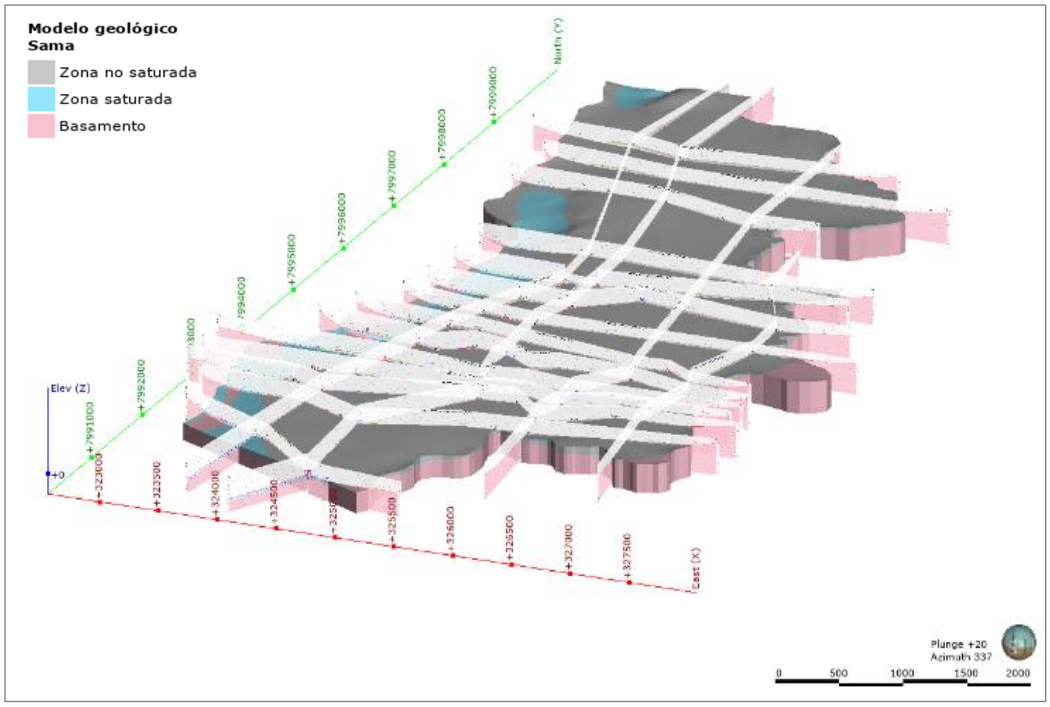
Secciones geológica-geofísicas para modelo geológico 3D



Nota. Elaboración propia

Figura 132

Construcción del modelo geológico 3D



Nota. Elaboración propia

Descripción de los resultados obtenidos

En la tabla 64 se presenta el resumen de los volúmenes obtenidos del modelo geológico 3D realizado en Leapfrog Geo, para cada una de las capas establecidas en el modelo. De igual forma se presenta la figura 133 con la distribución integral de las capas generadas.

Tabla 64

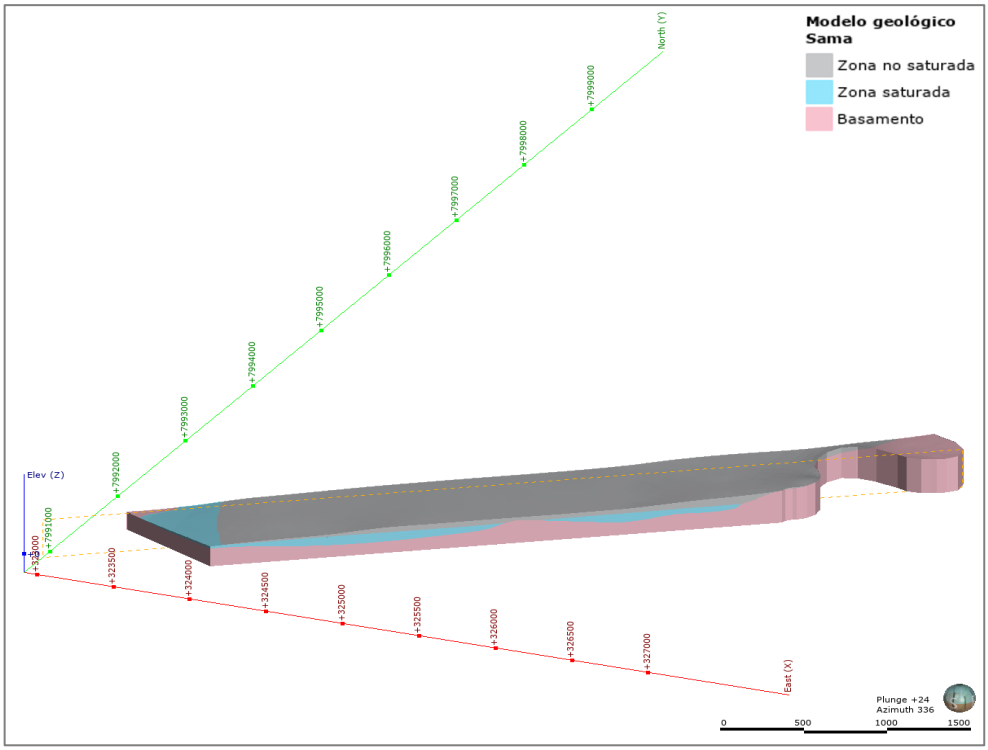
Volúmenes de las capas asignadas al modelo geológico

N° Capa	Clasificación	Descripción	Volumen (m^3)
Capa 1	Zona no saturada	Bolonería, canto rodado, grava, arena, limo, arcilla y/o estrato salino	596660000
Capa 2	Zona saturada	Grava, canto rodado, arena, limo, arcilla y/o estrato salino	866070000
Capa 3	Basamento rocoso	Rocas volcánicas y sedimentarias	3398900000

Nota. Elaboración propia

Figura 133

Capas del modelo geológico 3D en Leapfrog Geo



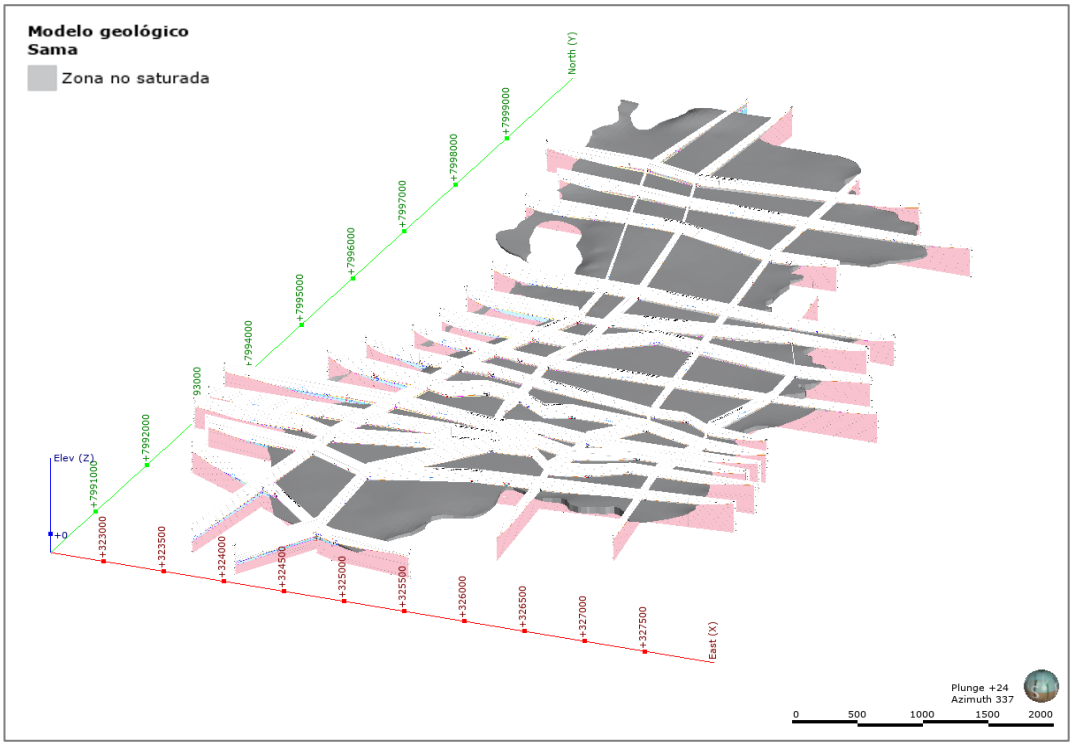
Nota. Elaboración propia

a) Zona no saturada

Esta zona, de acuerdo a la litología establecida en las secciones geológica-geofísicas, estaría compuesta de bolonería, canto rodado, grava, arena, limo, arcilla y/o estrato salino. El volumen estimado para esta zona, según el modelo geológico 3D, es de aproximadamente 596660000 m³ (ver figura 134).

Figura 134

Vista del sólido de la zona no saturada en Leapfrog Geo



Nota. Elaboración propia

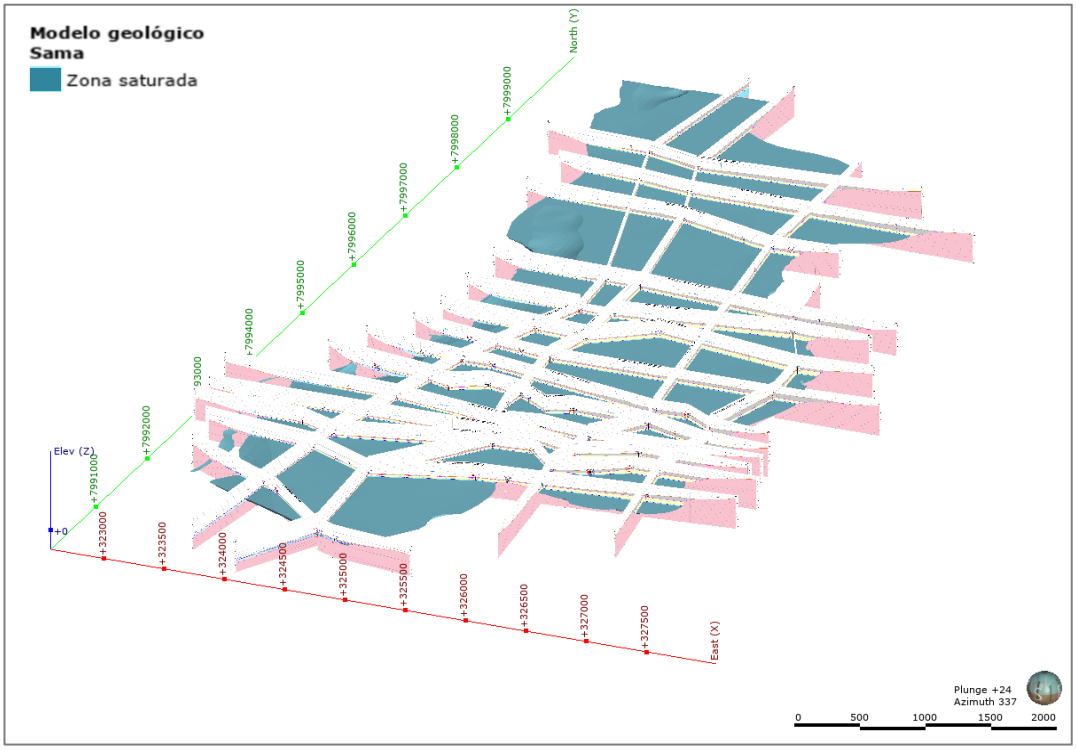
b) Zona saturada (Acuífero)

Esta zona es la de mayor importancia, porque representa al acuífero del sector en estudio. De acuerdo a la litología establecida en las secciones geológica-

geofísicas, estaría compuesta de grava, canto rodado, arena, limo, arcilla y/o estrato salino. El volumen estimado para esta zona, según el modelo geológico 3D, es de aproximadamente 866070000 m³. Este resultado permitirá determinar las reservas almacenadas en el acuífero (ver figura 135).

Figura 135

Vista del sólido de la zona saturada en Leapfrog Geo



Nota. Elaboración propia

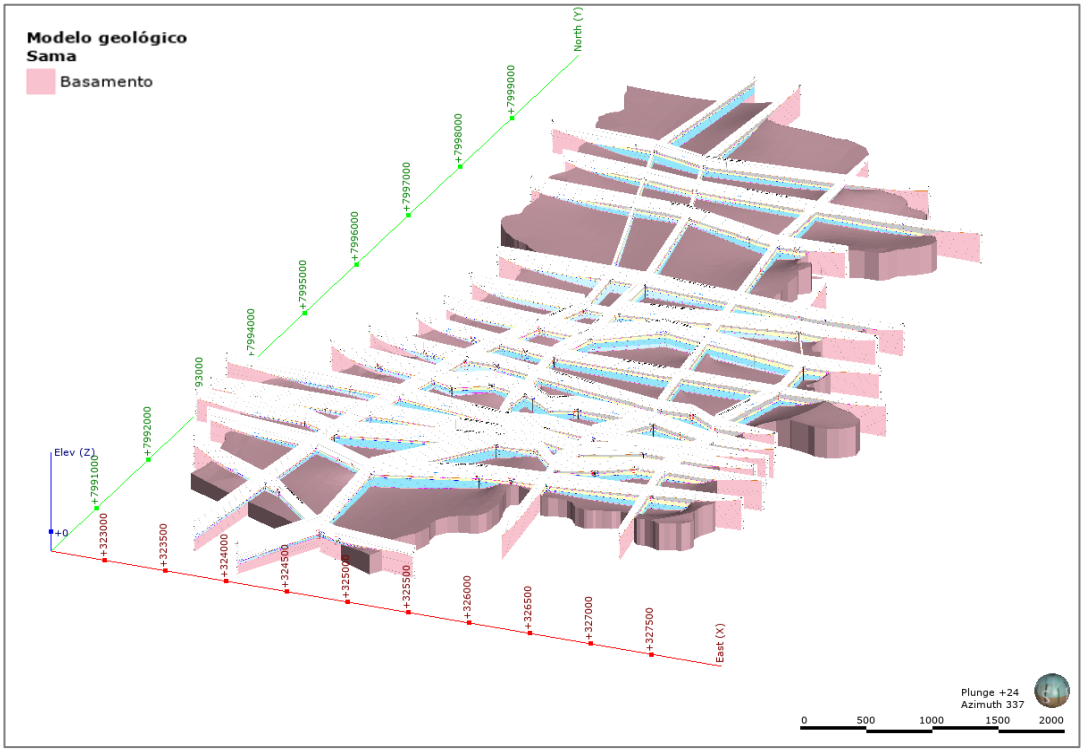
c) Basamento rocoso

Esta zona estaría representada por las rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Chocolate. El volumen total estimado, según el modelo geológico 3D, es de aproximadamente 3398900000 m³. Su limite base en el modelo fue la

profundidad de investigación a la que se alcanzó con los sondajes eléctricos verticales (ver figura 136).

Figura 136

Vista del sólido del basamento rocoso en Leapfrog Geo



Nota. Elaboración propia

9.8.2. Reservas totales

Uno de los aspectos más importantes de un estudio hidrogeológico es determinar los volúmenes de agua almacenada en el reservorio acuífero, en la medida que su conocimiento implique contar con los elementos suficientes acerca de la disponibilidad hídrica subterránea existente y sus posibilidades de explotación (INRENA, 2006).

Las reservas totales de un acuífero (Rt) se cuantifican a partir de la siguiente ecuación:

$Rt = V * S$ (1)

$Rt = H * A * S$ (2)

Donde:

V = Volumen saturado (m^3)

S = Coeficiente de almacenamiento

H = Espesor promedio del acuífero saturado (m)

A = Área en planta del acuífero (m^2)

Para el cálculo de las reservas de agua subterránea del acuífero en estudio, se ha utilizado la expresión (1): $Rt = V * S$; donde se ha considerado un volumen saturado de 866070000 m^3 , obtenido mediante el modelo geológico 3D desarrollado en Leapfrog y un coeficiente de almacenamiento de 5%. De esta forma se ha determinado que las reservas totales almacenadas en el acuífero Pampa Molina – Sama serían de 43303500 m^3 (43,30 MMC).

9.8.3. Reservas explotables

Las reservas potencialmente explotables indican el volumen total de agua subterránea aún no explotado que puede ser aprovechado en el futuro. En términos cuantitativos es representado por la diferencia entre las reservas renovables y el volumen de agua subterránea extraído (ANA, 2022).

Para el caso del área de estudio se ha estimado que puede ser un 10% del total de agua almacenada, es decir 4,33 MMC; volumen que puede ser extraido del acuífero sin ser perjudicado.

Esto demostraría que la actual operación de los pozos y fuentes de agua subterránea del sector Pampa Molina, equivalente a un volumen de explotación de 1,14 MMC/año, no estaría afectando las reservas permanentes del acuífero local, debido a que en el balance hídrico subterráneo la descarga es menor a la recarga; sin embargo hay que considerar que estos cálculos son estimaciones preliminares. Según el INRENA (2006) para obtener resultados confiables el cálculo de los recursos hídricos explotables debe basarse en un gran número de datos para un largo período de años. En relación a la zona de estudio, no existen piezómetros de control, que permitan definir los años hidrológicos, así como, también las piezometrías máximas y mínimas de cada año.

9.9. Modelo hidrogeológico conceptual

El área de estudio se encuentra ubicado en una penillanura a unos 3 km del litoral, con elevaciones entre 15 m.s.n.m. a 250 m.s.n.m., margen izquierda del río Sama; limitado en ambos flancos por afloramientos rocosos de la cadena costanera, que se comportan como una barrera condicionante de la circulación de las aguas subterráneas. Los materiales de mayor interés hidrogeológico son los depósitos del Cuaternario reciente, que componen las pampas costaneras y faja litoral, con material clástico y detrítico.

En los pozos perforados se ha podido constatar que el acuífero local es libre, asociado a materiales de depósitos aluviales y marinos, con espesores entre 9m a 80m, presentando la mayor acumulación de materiales permeables a lo largo del probable antiguo paleocauce existente en la zona, corroborado por las resistividades y espesores obtenidos en los SEVs (secciones geofísicas).

Existen dos unidades hidrogeológicas principales que permiten la ocurrencia de las aguas subterráneas en el área de estudio (ver figura 136):

- ACUÍFERO. Representado por los depósitos del Cuaternario reciente de naturaleza detrítica no consolidada; conformados por gravas, cantos rodados, arenas, limos y arcillas, de porosidad primaria y permeabilidad media a alta, que constituyen un medio poroso de regulares a buenas características hidrogeológicas, favorables a la circulación y almacenamiento del flujo subterráneo. De acuerdo a las pruebas de bombeo ejecutadas en la zona de estudio se presentan permeabilidades (K) de 2,35 m/día a 71,09 m/dia y transmisividades (T) de 159,58 m^2/día a 988,20 m^2/día.
- ACUITARDO. Representado por la Formación Chocolate (Ji-cho), formada por rocas volcánicas y sedimentarias, con permeabilidad muy baja a impermeable, debido a sus características granulométricas y grado de compactación. Esta formación geológica actúa como basamento para el acuífero local y de acuerdo a los SEVs ejecutados y perforaciones se estima que se encontrarían a partir de los 23m a 130m de profundidad.

En la tabla 65 se muestra las unidades hidrogeológicas del sector en estudio, en los cuales se les ha asignando valores de permeabilidad de las pruebas de bombeo ejecutadas en la zona de estudio. Solo para el caso del acuitardo se ha tomado de referencia el valor indicado en el estudio de la ANA (2022).

Tabla 65

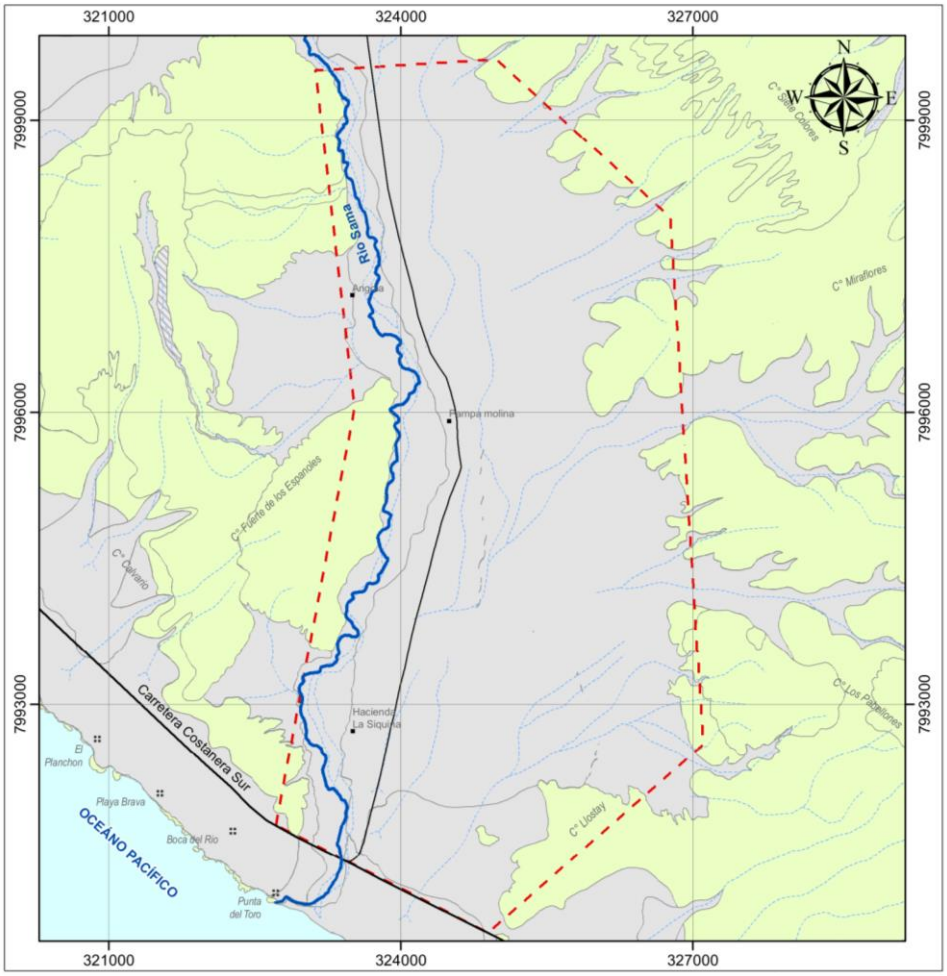
Unidades hidrogeológicas de la zona de estudio

Unidades hidrogeológicas	Unidad litoestratigráfica		Permeabilidad (m/día)	Característica
Acuífero	Qh-al	Depósito aluvial	2 a 14	Permeable
	Qh-fl	Depósito fluvial	40	Permeable
	Qh-pl	Depósito de playa	26 a 71	Permeable
Acuitardo	Ji-cho	Formación Chocolate	$9x10^{-7}$ a $9x10^{-5}$ (*)	Poco permeable a impermeable

Nota. (*) Permeabilidad del estudio ANA (2022). Elaboración propia.

Figura 137

Unidades hidrogeológicas del área de estudio y alrededores



LEYENDA			
CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA	**SIMB.**	**UNIDAD LITOESTRATIGRÁFICA**	**LITOLOGÍA**
Acuífero Detrítico	Qh-fl	**Depósito fluvial**	Canto rodado, grava, arena, limo y arcilla transportados y depositados en el cauce del rio.
	Qh-eo	**Depósito eólico**	Arenas de grano fino a medio de origen eólico.
	Qh-al	**Depósito aluvial**	Canto rodado, grava, arena, limo y arcilla.
	Qh-pl	**Depósito de playa**	Arena y limo con costras de sal y restos de conchuelas.
Acuitardo	Nm-hu	**Fm. Huaylillas**	Tobas, ignimbritas con fragmentos líticos de pómez.
	Jms-pu,ca	**Fm. Puente Cachios**	Lutitas, limolitas, areniscas cuarzo feldespáticas
	Jm-so	**Fm. Socosani**	Calizas grises, lutitas negras, rojizas, areniscas calcáreas.
	Ji-cho	**Fm. Chocolate**	Flujo de lava andesítica con secuencias de lutitas y areniscas.

Nota. Elaboración propia

La zona de estudio se caracteriza por presentar un clima árido en el que las precipitaciones son muy escasas, pero que contribuyen en parte al flujo de agua subterránea. Sin embargo, la magnitud de esta recarga no es suficiente como para justificar los caudales observados en los pozos de bombeo.

De acuerdo al análisis de la información existente y los resultados del presente estudio, se infiere que el agua que se explota del sector Pampa Molina, tiene su origen en la infiltración del agua de lluvia en época de grandes precipitaciones pluviales y que se movilizaron a través del propio río, acarreando gran cantidad de materiales que fueron depositados en las pampas de este sector.

La recarga se produce principalmente por la alimentación directa e indirecta del río Sama que es el principal aportante de la recarga hídrica y el permanente alimentador del acuífero del valle durante épocas de lluvia; a lo largo de su curso existirían zonas permeables que estarían alimentando el subsuelo del sector Pampa Molina a través de los paleocauces existentes que han sido corroborados por el método indirecto de SEVs. Además, recibiría las filtraciones de las áreas agrícolas de ambas márgenes del río y las que se encuentran bajo riego aguas arriba de la zona de estudo. Adicionalmente, se estima que existiría una probable recarga proveniente de las quebradas Agua Dulce y Las Brujas, debido a la similitud en la calidad de agua y familia química con el pozo IRHS C-2; por lo que es conveniente investigar a mayor detalle.

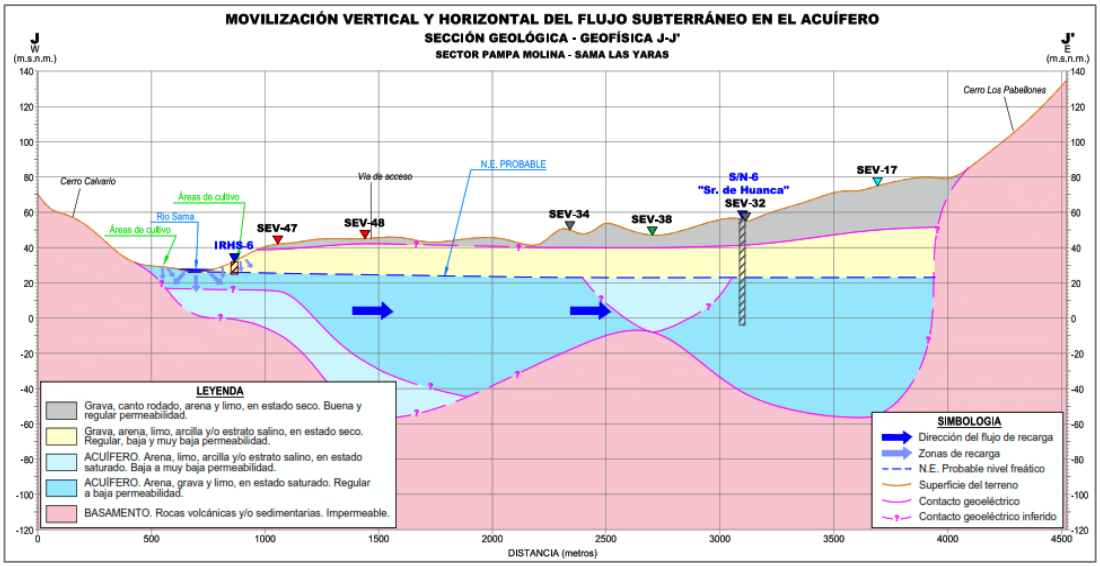
La descarga se produce por las extracciones a través de pozos de bombeo, que asciende a 1,14 MMC/año.

Localmente, el volumen almacenado de agua subterránea es de 43,30 MMC; por lo que se estima que las extracciones actuales no estarían afectando las reservas permanentes del acuífero local.

En la figura 138 se representa la movilización vertical y horizontal del flujo subterráneo, procedente de las filtraciones del río Sama, así como de las áreas de cultivo de ambas márgenes del río. Adicionalmente, podemos observar la existencia de dos paleocauces, uno relacionado con el probable antiguo cauce del río y el otro relacionado con el curso actual del río Sama. La figura 139 representa la movilización horizontal del flujo subterráneo, coincidente con la dirección principal del mismo (curvas de hidroisohipsas).

Figura 138

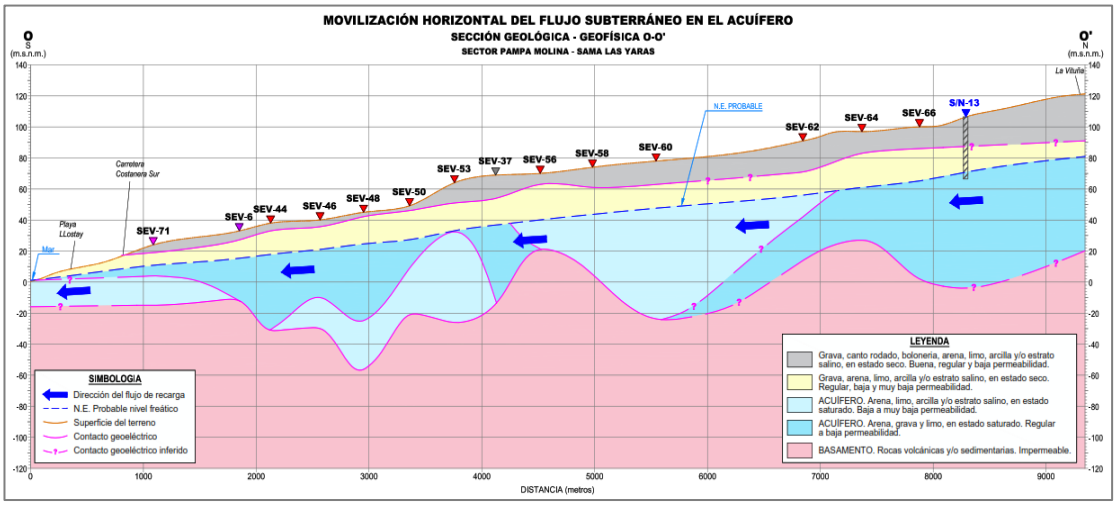
Movilización vertical y horizontal del flujo subterráneo, sección geológica-geofísica J-J'



Nota. Elaboración propia

Figura 139

Movilización horizontal del flujo subterráneo, sección geológica-geofísica O-O'



Nota. Elaboración propia

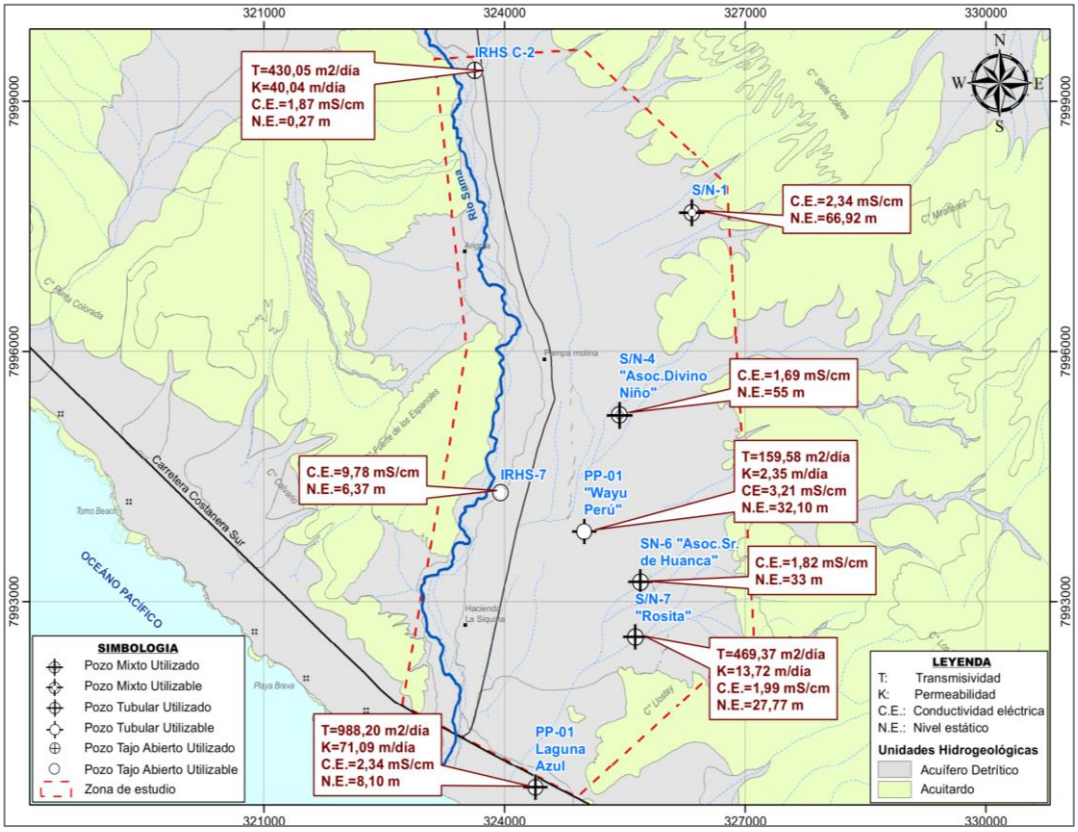
La morfología de la napa es relativamente uniforme, observándose que el desplazamiento del flujo subterráneo sigue una trayectoria principal de norte a sur con gradiente hidráulica de 0,7% a 1,5%, paralela al curso del río Sama y una dirección secundaria de noroeste a sureste, con gradiente hidráulica de 1% a 1,5%. Los niveles de agua varían entre 0,27m a 67,58m, donde los niveles más superficiales se presentan en la zona cercana al río Sama y los niveles más profundos, cercano a los cerros del flanco derecho del valle (aguas arriba).

De acuerdo a los resultados de los análisis físico químicos realizados a muestras de agua de la zona de estudio, se ha determinado una familia química predominante clorurada sódica; que en comparación con el diagrama de Scatter, correspondería a un flujo regional de un largo tiempo de residencia.

En la figura 140 se muestra el modelo conceptual en 2D del acuífero local, que integra información hidrogeológica, hidrodinámica e hidroquímica.

Figura 140

Modelo conceptual en 2D

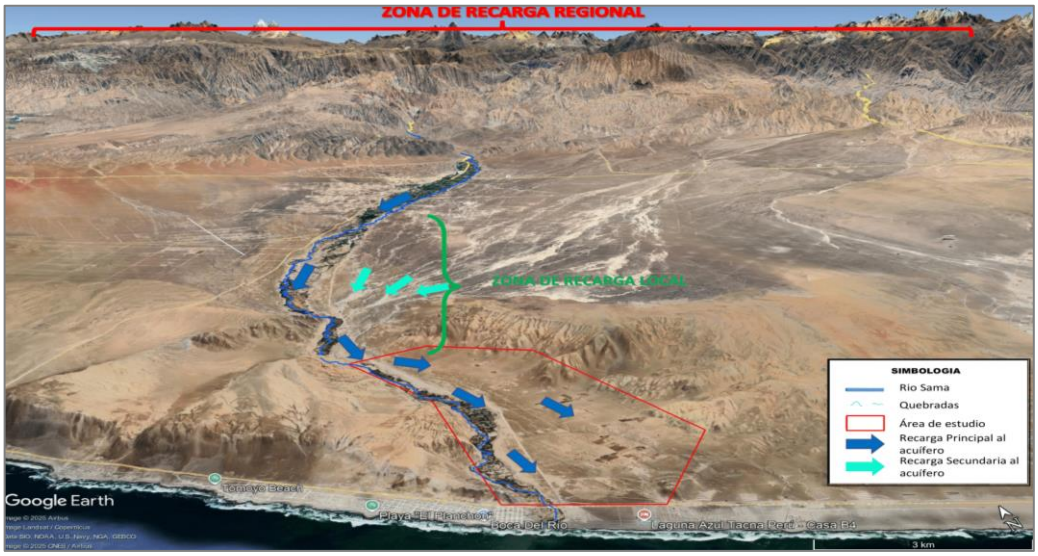


Nota. Elaboración propia

La figura 141 muestra las zonas de recarga (regional y local) y el movimiento de las aguas subterráneas en la zona de estudio. En la figura 142, el modelo conceptual en 3D de los componentes del sistema acuífero Pampa Molina, que permite comprender como se almacena y mueve las aguas subterráneas.

Figura 141

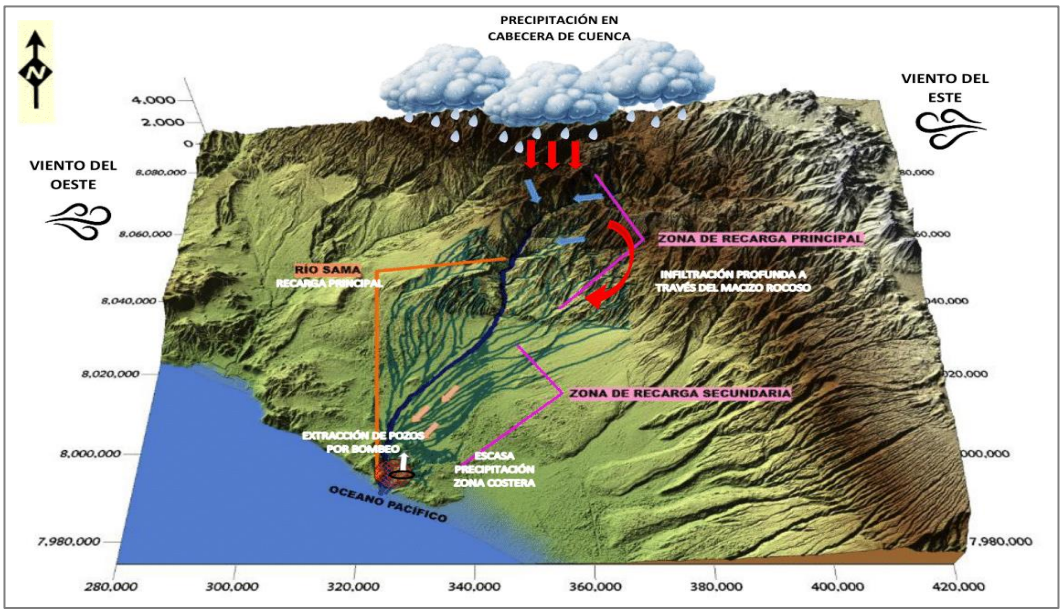
Modelo conceptual en planta del sistema acuífero Pampa Molina



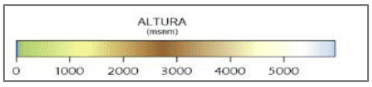
Nota. Imagen Google Earth. Elaboración propia

Figura 142

Modelo conceptual en 3D de componentes del sistema acuífero Pampa Molina



Nota. Elaboración propia



Bajo estas premisas, se estima que la unidad acuífera del área de estudio posee capacidad para suministrar agua de una forma razonable para uso agrícola, basado en la extracción racional de los recursos permanentes.

En tal sentido y considerando la dirección de flujo, calidad de agua, el desarrollo agrícola y la geometría del acuífero, es que se recomienda la perforación de piezómetros de control que permita monitorear permanentemente la evolución de los niveles de agua y calidad de agua. Así mismo, llevar un control estricto de los caudales de bombeo y el régimen de explotación, ya que de ello dependerá la elaboración de una ajustada programación de explotación sostenible del acuífero Pampa Molina.

9.10. Propuesta preliminar de la red piezométrica e hidrogeoquímica de monitoreo del agua subterránea

El monitoreo de las aguas subterráneas es esencial y se hace para determinar la disponibilidad y la evaluación del recurso hídrico, este debe ejecutarse por periodo de tiempo, dependiendo del estado del acuífero y el aspecto de interés que lo requiera. Los resultados del monitoreo de aguas subterráneas se usan para el planteamiento y mejoría de estrategias, políticas de protección, conservación y aprovechamiento del recurso hídrico. Un programa de redes de monitoreo permitirá comprender la respuesta de un acuífero en cuanto a calidad y cantidad, que se entiende como profundidad del nivel estático, a lo largo del tiempo. Estos tipos de programas son indispensables para lograr una gestión adecuada del recurso hídrico subterráneo (ANA, 2022).

En base a los resultados obtenidos del estudio realizado, se propone la instalación de una red piezométrica e hidrogeoquímica de monitoreo de aguas subterráneas en el sector Pampa Molina; de acuerdo a los siguientes criterios:

- No existen piezómetros en el área evaluada.
- En sectores donde no existe información litológica de pozos.
- Existen zonas que no cuentan con información de niveles estáticos y calidad de agua.
- Desde el punto de vista geológico-geofísico, en sectores donde se han identificado zonas permeables.
- En sectores donde de acuerdo a los resultados geofísicos habría cambio en la resistividad de los materiales, que indicarían una variación en la calidad de agua.
- En la zona del litoral para evaluar periódicamente la calidad del agua subterránea frente al agua de mar y descartar una probable intrusión marina.
- En la zona adyacente al río Sama para determinar si existe interconexión hidráulica.
- Con la finalidad de monitorear las zonas de recarga y descarga.

Por lo expuesto se recomienda la instalación de 24 piezómetros con una profundidad de 10m por debajo del nivel estático, que permitirán evaluar el acuífero en cantidad y calidad, controlando las fluctuaciones del nivel freático, la evolución de los parámetros físico-químicos, la conductividad eléctrica y adicionalmente, obtener mayor información litológica (ver tabla 66).

Tabla 66

Red de monitoreo propuesto en el sector Pampa Molina – parte baja valle Sama

Piezómetro propuesto	Coordenadas UTM WGS 84		N.E. (m)	Prof. de perf. (m)
	Este	Norte		
PZ-1	323687	7991277	6	16
PZ-2	324136	7991108	9	19
PZ-3	324672	7990970	12	22
PZ-4	323733	7992308	18	28
PZ-5	324373	7992074	23	33
PZ-6	325179	7991764	28	38
PZ-7	323968	7993164	20	30
PZ-8	325017	7992828	28	38
PZ-9	326459	7992406	60	70
PZ-10	324196	7993968	24	34
PZ-11	325417	7993659	36	46
PZ-12	326297	7993539	49	59
PZ-13	324811	7995409	26	36
PZ-14	325568	7995363	41	51
PZ-15	326432	7995258	46	56
PZ-16	324443	7996643	35	45
PZ-17	325100	7996605	35	45
PZ-18	325662	7996596	45	55
PZ-19	324149	7997785	35	45
PZ-20	324902	7997732	36	46
PZ-21	326100	7997667	59	69
PZ-22	323839	7999094	30	40
PZ-23	324612	7999072	39	49
PZ-24	325221	7999025	55	65

Nota. Elaboración propia

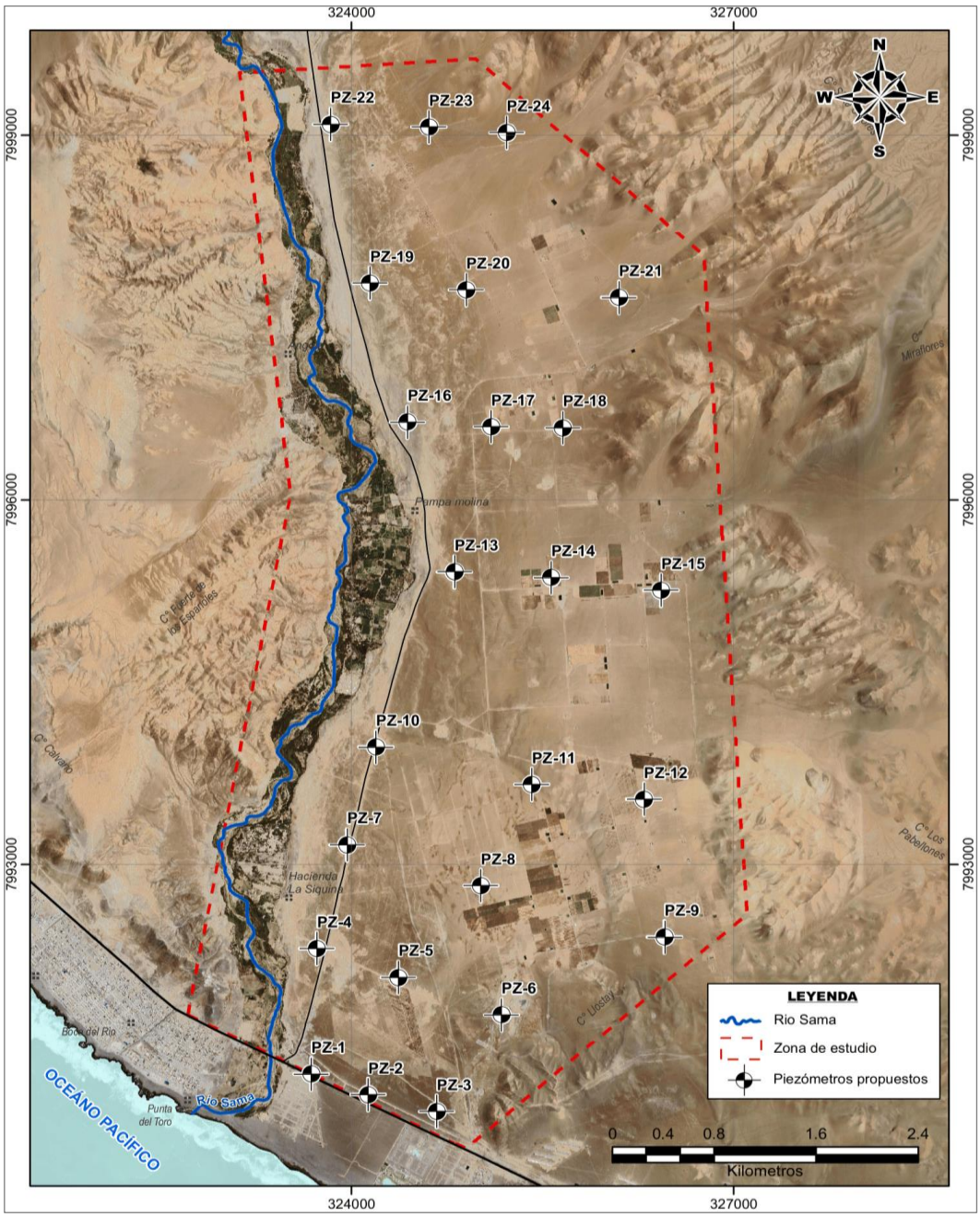
A continuación se describen los criterios tomados en cuenta para la ubicación de los piezómetros propuestos en la zona de estudio:

- Se ubicaron los piezómetros PZ-1, PZ-4, PZ-7, PZ-10, PZ-13, PZ-16, PZ-19 y PZ-22 cercanos al río Sama, para evaluar la relación de este río con la calidad de las aguas subterráneas del sector Pampa Molina.
- Se ubicaron los piezómetros PZ-13, PZ-14, PZ-15, PZ-16, PZ-17, PZ-18, PZ-19, PZ-20, PZ-21 PZ-22, PZ-23 y PZ-24 donde no se cuenta con información litológica de pozos perforados en la zona.
- Se proponen los piezómetros PZ-20, PZ-17, PZ-18, PZ-14, PZ-11, PZ-12, PZ-8, PZ-6 y PZ-3 en la zona del probable antiguo paleocauce; además de acuerdo a los SEVs ejecutados, estarían relacionados con las zonas de mayor resistividad y espesor de acuifero.
- Se ubicaron los piezómetros PZ-22, PZ-23 y PZ-24, con la finalidad de evaluar la probable zona de recarga proveniente de las quebradas Las Brujas y Agua Dulce y la procedente de las áreas de cultivo de ambas márgenes del río Sama hacia el probable antiguo paleocauce.
- Se proponen los piezómetros PZ-1, PZ-2, PZ-3, PZ-4, PZ-5 y PZ-6 en el área cercana al litoral, relacionado con la zona de descarga y adicionalmente poder evaluar la conductividad eléctrica del agua, TDS y demás parámetros de calidad, además de la ocurrencia de altas concentraciones de sodio y cloruro por su cercanía al mar.

En la figura 143 se puede observar la distribución espacial de los piezómetros propuestos.

Figura 143

Red de piezómetros propuestos para monitoreo de aguas subterráneas en el sector Pampa Molina



Nota. Elaboración propia

9.11. Verificación de la confiabilidad de la data

Debido a la naturaleza exploratoria de la presente investigación y a que los datos hidrogeológicos son variables con una dependencia espacial y temporal, es que en la presente investigación no se ha empleado métodos estadísticos convencionales para la validación de la confiabilidad de los datos, porque la estadística requiere una muestra aleatoria y representativa. Al no cumplirse esto, las pruebas estadísticas de confiabilidad pierden validez científica.

Además para que una prueba estadística sea válida se requiere de un gran número de muestras ($n > 30$). En la presente tesis, los datos obtenidos son escasos y limitados, por ejemplo las pruebas de bombeo se efectuaron en solo 4 pozos y se analizaron solo 07 muestras de agua en laboratorio. Aplicar estadística a una muestra tan pequeña genera resultados sin significancia real.

Frente a esta situación se resalta la importancia de la construcción de los pozos piezométricos propuestos en el sector de Pampa Molina, los cuales permitirán el monitoreo sistemático del acuífero y obtener datos importantes para correlacionarlos con los resultados actuales.

En consecuencia, la confiabilidad de los datos obtenidos solo se puede verificar mediante la coherencia de resultados y la comparación con información de estudios anteriores:

a) Datos de prospección geofísica

La geofísica es un método indirecto. La confiabilidad de los datos geofísicos obtenidos en la presente investigación, se ha verificado mediante la

correlación con la litología de los pozos: PP-01 Wayu Perú, S/N-7 Rosita y PP-01 Laguna Azul, los cuales se ubican principalmente en la parte media-baja de la zona de estudio; detectando concordancia entre ambos, pero la confiabilidad de los datos es limitado, es decir puntual solo para la zona donde se ubican estos pozos, debido a la extensión del área de estudio y la ausencia de una mayor información litológica.

b) Datos de prueba de bombeo

Los resultados de pruebas de bombeo son técnicamente confiables, porque se verificó que los datos obtenidos de parámetros hidráulicos son adecuados para el tipo de acuífero evaluado (acuífero libre), el cual está constituido de grava, canto rodado, arena y limo.

c) Datos hidrogeoquímicos

La confiabilidad de los datos hidrogeoquímicos obtenidos del análisis en laboratorio, han sido verificados mediante el balance iónico correspondiente, para lo cual se calculó el porcentaje de error (%EBI), con la siguiente ecuación:

$$\%EBI = \frac{\sum(cationes) - \sum(aniones)}{\sum(cationes) + \sum(aniones)} \, x \, 100\%$$

El criterio de aceptación fue el siguiente:

- **< 5%:** Excelente confiabilidad.
- **5% a 10%:** Aceptable, pero requiere revisión de posibles iones no medidos.

- **>10%:** Los datos no son confiables; la muestra debe ser analizada de nuevo o descartada.

Los análisis estuvieron dentro del <5% de error, motivo por el cual se consideran resultados de excelente confiabilidad; mientras que la muestra del pozo IRHS C-2 presentó un error de 8%, clasificando como aceptable. En conclusión, las 07 muestras de agua analizadas son confiables.

d) Cálculo de reservas

Al ser un dato que se obtiene mediante fórmula, relacionando el volumen del área saturada por el coeficiente de almacenamiento, se debe comprobar previamente la confiabilidad del modelo geológico 3D, así como la obtención del parámetro hidráulico.

El modelo geológico 3D se realizó con las secciones geológica-geofísicas y como se indicó lineas arriba, el método geofísico es un método indirecto. Referente al parámetro de coeficiente de almacenamiento utilizado, este ha sido estimado en 5% considerando de que se trata de un acuífero libre.

Por lo expuesto, la única manera inmediata de verificar la confiabilidad de este resultado, es mediante la comparación con resultados de estudios anteriores. De esta forma se ha verificado que el valor obtenido es confiable, porque guarda relación con las reservas obtenidas por el INRENA el 2006 para el valle Sama.

En la tabla 67 se presenta una comparación de los resultados obtenidos en la presente investigación, con algunos valores típicos representativos de acuíferos similares, como el valle Sama, La Yarada, Locumba (Cinto) e Ilo.

Tabla 67

Comparación de resultados con valores típicos de acuíferos similares

Parámetros	Acuíferos				
	Pampa Molina	**Valle de Sama**	**Caplina (La Yarada)**	**Valle de Locumba (Cinto)**	**Valle de Ilo**
Permeabilidad (m/día)	2 a 71	-	0,5 a 375	42,64	7 a 248
Transmisividad (m2/día)	159 a 988	-	78 a 269123	2132	52 a 1581
C.E. (mS/cm)	1,69 a 9,78	0,69 a 20,81	0,70 a 11,13	0.14 a 0.4	0,42 a 2,82
Familia Hidroquímica predominante	Clorurada Sódica	Sulfatada Sódica/ Clorurada Sódica	Clorurada Sódica	Bicarbonata da Cálcica	Bicarbonata da Cálcica/ Sulfatada Cálcica
N.E. (m)	0,27 a 67,58	0,83 a 39,07	5 a 180	-	0,90 a 2,68
Dirección de flujo	N a S	NE a SO/ N a S	NE a SO	NE a SO/ N a S	NE a SO/ SE a NO
Volumen de explotación (MMC)	1,14	0,05	197,64	-	0,34
Recarga (MMC)	5,20	-	57,46	-	-
Balance hídrico (MMC)	+4,06	-	-126,64	-	-
Reserva total (MMC)	43,30	68,16	3392,55	123	5,09

Nota. Elaboración propia

Para la elaboración de esta tabla, se consultaron informes técnicos de organismos oficiales como la ANA e INGEMMET, que se detallan a continuación:

- “Estudio hidrogeológico del valle Sama” del INRENA (2006)
- “Estudio hidrogeológico Integral del sistema acuífero Caplina” de la ANA (2022)
- “Hidrogeología de la cuenca del río Locumba” del INGEMMET (2009)
- “Estudio hidrogeológico del valle de Ilo” del INRENA (2006)

Capítulo X: Conclusiones y recomendaciones

10.1. Conclusiones

- La evaluación hidrogeológica integral realizada en la zona de estudio, que ha incluido el mapeo geológico-geomorfológico, actualización del inventario de fuentes de agua, logueo de pozos existentes, ensayos de bombeo y análisis físico-químico, ha permitido determinar las características y condiciones hidrogeológicas del acuífero del sector Pampa Molina – parte baja del valle Sama que definen su comportamiento y funcionamiento ante el bombeo de pozos principalmente informales y establecer lineamientos para la explotación racional del agua subterránea con fines agrícolas.
- Del análisis e interpretación de ensayos de prospección geofísica mediante 72 sondajes eléctricos verticales (SEVs) que han sido correlacionados con información de algunas perforaciones de pozos, se ha determinado que el acuífero Pampa Molina es de naturaleza libre, constituido principalmente por sedimentos aluviales del Cuaternario reciente y al sur de la zona de estudio (cerca al litoral), por sedimentos marinos, de regular a baja permeabilidad, con espesores variables entre 9m a 80m; teniendo como basamento del acuífero a las rocas volcánicas y sedimentarias de la Formación Chocolate, de muy baja permeabilidad a impermeables, que se estiman se encontrarían a partir de los 23m a 130m de profundidad. Adicionalmente, por los

resultados de SEVs, se postula que existirían dos paleocauces, el primero se ubica en la margen izquierda del valle (aguas abajo) relacionado con zonas de mayor permeabilidad y espesor y el otro en la margen derecha (aguas abajo), lo que nos indicaría el cambio del curso del río Sama a lo largo del tiempo.

- Mediante la interpretación de 04 pruebas de bombeo existentes, en cuya ejecución ha participado la tesista, se logró calcular los parámetros hidraúlicos del acuífero del sector Pampa Molina, donde la transmisividad (T) varía de 159,58 m²/día a 988,20 m²/día y la permeabilidad (K) entre 2,35 m/día a 71,09 m/día, valores que caracterizan a un acuífero libre de regulares a buenas características hidrogeológicas. Ante la ausencia de pozos piezométricos en la zona, se ha asumido un coeficiente de almacenamiento (S) de 5%, tomando como base la naturaleza y características litológícas del acuífero, en comparación con zonas similares.
- Se logró determinar la calidad de las aguas subterráneas en el sector Pampa Molina, en base a análisis físico-químicos de 07 muestras de agua y de acuerdo a los Estándares de Calidad de Agua (ECA) para riego y uso poblacional de las normativas peruanas vigentes, concluyendo que las aguas subterráneas en este sector son principalmente de naturaleza clorurada sódica, debido al alto contenido de cloruros, sulfatos y sodio. Solo en el sector de la Vituña, se presenta una mezcla de agua siendo del tipo sulfatada clorurada sódica, esto

debido a la recarga directa que recibiría de la quebrada Agua Dulce. La evaluación de los resultados de los parámetros físico-químicos según los Estándares de calidad Ambiental del D.S. N° 004-2017-MINAM, demuestran que las aguas de la zona de estudio no se recomiendan para el uso poblacional al ser principalmente de calidad mediocre a muy mala (pozo IRHS-7) y existen restricciones para el riego de cultivos, por los altos valores de conductividad y presencia de altas concentraciones del ion cloruro y sodio. Por lo expuesto, las aguas de este sector solo podrán ser utilizados en el riego de cultivos muy tolerantes a las sales y de suelos muy permeables con buen drenaje, pero tomando las precauciones pertinentes para evitar la salinización del suelo. En estas condiciones es factible el uso de estas aguas para el riego de los cultivos que se vienen implementando y se proyecta implementar en la zona, como es el olivo, la quinua y la pitahaya orgánica, que son muy tolerantes a la salinidad con C.E. hasta de 5 mS/cm, 15 mS/cm y 10 mS/cm, respectivamente.

- Se estima que el agua subterránea del sector Pampa Molina tiene su origen en la infiltración del agua de lluvia en época de grandes precipitaciones pluviales y que se movilizaron a través del propio río, acarreando gran cantidad de materiales que fueron depositados en las pampas de este sector. La recarga se produce principalmente por la alimentación directa e indirecta del río Sama que es el principal aportante de la recarga hídrica y el permanente alimentador del

acuífero del valle durante épocas de lluvia; a lo largo de su curso existirían zonas permeables que estarían alimentando el subsuelo del sector Pampa Molina a través de los paleocauces existentes que han sido corroborados por el método indirecto de SEVs. Además recibiría las filtraciones de las áreas agrícolas de ambas márgenes del río y las que se encuentran bajo riego aguas arriba de la zona de estudio. Adicionalmente, se estima que existiría una probable recarga proveniente de las quebradas Agua Dulce y Las Brujas, que es conveniente investigar.

- La disponibilidad del recurso hídrico subterráneo en el sector Pampa Molina, se ha determinado en base al cálculo de las reservas, concluyendo que la reserva total del acuifero Pampa Molina se estima en 43,30 MMC, del cual las reservas explotables representarían el 10%, es decir 4,33 MMC; esto demostraría que la actual explotación de los pozos y fuentes de agua subterránea, principalmente informales, que asciende a un volumen de 1,14 MMC/año, no estaría afectando las reservas permanentes del acuífero local, porque según el balance hídrico subterráneo, la descarga es menor a la recarga, lo que se vio reflejado al obtener una variación de reservas positiva.

10.2. Recomendaciones

- Actualizar de manera permanente los inventarios de fuentes de agua subterránea en el área de estudio, para llevar un registro sistemático

de los niveles de agua, evolución de la calidad de agua y caudales de bombeo de los pozos en explotación.

- Actualizar el registro de caudales y regímenes de explotación (horas diarias de bombeo) de todos los pozos y fuentes de agua subterránea que estén actualmente operando en el área de estudio, para tener un volumen de extracción total confiable y que pueda ser representativa para escenarios predictivos de disponibilidad del recurso hídrico subterráneo en el tiempo.
- Realizar análisis isotópicos completos oxígeno-18 (δ18O) y deuterio (δ2H), para determinar la edad y origen de las aguas subterráneas en el acuífero Pampa Molina.
- Implementar la red de piezómetros propuestos para el control y monitoreo permanente del nivel freático y calidad de agua del acuífero Pampa Molina. Asimismo integrar sistemas avanzados de telemetría para el análisis en tiempo real de las variaciones del nivel de agua, caudal y calidad, que facilitará la toma de decisiones para un gestión sostenida y protección del recurso hídrico.
- Efectuar un modelo numérico para representar el comportamiento hidrogeológico del sistema acuífero, simular diferentes escenarios predictivos y evaluar la disponibilidad hídrica.
- Solicitar a las empresas del estado dedicadas al recurso hidrico, realizar estudios hidrogeológicos a mayor detalle del acuífero Pampa Molina-parte baja del valle Sama, para programar la perforación de

pozos diamantinos con recuperación de testigos, con sus correspondientes pruebas de permeabilidad y realizar las perforaciones de los piezómetros de control propuestos.

- Se recomienda implementar medidas de protección de la unidad acuífera Pampa Molina, para evitar el uso indiscriminado del recurso hidrico subterráneo y evitar de esta manera una catástrofe hídrica, como viene suscitándose en las pampas de La Yarada y Hospicio.

Bibliografía

abcAgro. (s.f.). *Diagnostico de Aguas de Riego*. Obtenido de http://www.abcagro.com/riego/diagnostico_aguas2.asp

Agua y SIG. (10 de Enero de 2011). *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos*. Obtenido de https://aguaysig.com/los-diagramas-mas-usados-para-la-interpretacion-de-analisis-hidroquimicos/

American Society for Testing and Materials. (20 de marzo del 2018). *ASTM D6431 - 18. Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Site Characterization.* Obtenido de https://www.astm.org/d6431-18.html

ANA. (2009). *Diagnóstico situacional de recarga de acuíferos.*

ANA. (2018). *Evaluación de la zona de veda en el Acuífero Caplina.*

ANA. (2022). *Estudio Hidrogeológico Integral del Sistema Acuífero Caplina.* Tacna.

Carabelí, J., Gómez G., J., Solano, M., LLumiquinga, G., Burgos, C., & Carrera V., D. (2019). Evaluación de la calidad de agua para riego y aprovechamiento del recurso hídrico de la Quebrada Togllahuayco. En Universidad Central del Ecuador, *Siembra* (págs. 46-63). Ecuador.

Chambilla E., W. (2014). *Tesis: Hidrogeología del Acuífero Layagache-Sama interrumpida por la evolución tectónica del Mio-Plioceno.* Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.

Coarita, F. (2017). *Tesis: Caracterización hidrodinámica e hidroquímica del acuífero La Yarada Media, en Tacna.* Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.

CORDETACNA. (1983). *Estudio Geofísico por S.E.V. para la Prospección de Aguas Subterráneas en el Valle de Sama - Tacna.* Tacna.

CORDETACNA. (1984). *Investigación Geofísica por SEV para determinar intrusion marina en la Yarada Media y Areas Favorables para explotación aguas subterráneas Curso Inferior Valle de Sama.* Tacna.

CORDETACNA. (1985). *Instalación de Agua Potable Vila Vila.* Estudio Complementario de Pre-factibilidad, Tacna.

Custodio, E. (1998). Recarga a los acuíferos: Aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre. En IGME, *Hidrología Subterránea - Boletin Geológico y Minero* (Vol. 109, págs. 13-29). España.

Custodio, E., & Cabrera, M. (2013). Métodos de estudio hidrogeológicos e hidrogeoquímicos. En J. C. Santamarta Cerezal, & Et.al., *Hidrología y Recursos Hídricos en Islas y terrenos volcánicos* (págs. 93-134). Madrid: Colegio de Ingenieros de Montes.

Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrologia Subterránea* (Vol. 2da. Edicion). Barcelona: Ediciones Omega S.A.

DRAT. (2023). *Anuario Estadístico Agrícola.* Tacna.

Duchaufour, P. (1984). *Edafologia; Edafogenesis y clasificacion.* Barcelona: Masson, S.A.

Dueñas, K., & Moreno, J. (2018). Evaluación Hidrogeoquímica y de Calidad de Agua, de la Parte Alta de la Cuenca del Rio Sama-Tacna, para identificar Fuentes de Consumo Humano. *Boletin de la Sociedad Geológica del Perú*.

Expósito, J. (2015). *Hidraulica de Captaciones [Diapositiva de PowerPoint].* Obtenido de Facultad de Geografia. Lic. en Geología Ambiental y Recursos Hídricos, Universidad Autónoma del Estado de México: https://core.ac.uk/download/pdf/55528199.pdf

Famiglietti, J. (2014). The Global Groundwater Crisis. *Nature Climate Change, 4*(11), págs: 945-948. doi:10.1038/nclimate2425

Franco, A., Ponce, S., & Rodríguez, J. (2012). Actividad Hidrogeológica del Sur del Perú, una evaluación situacional de las Cuencas de Sama y Locumba. *TECNIA*.

Garcia, M., & Fernández, A. (2008). *Hidrogeología Básica. Las aguas subterráneas y su flujo* (2da. Edición ed.). España: Ediciones FIEC.

García, R., & Castro, E. (2018). *Apuntes sobre Exploración Geofísica y Técnicas de Perforación.* Proyecto de Investigación y Desarrollo 075/2011: "Comportamiento y evolución espacio-temporal del arsénico en aguas subterráneas de la República Argentina", COHIFE, Buenos Aires.

Gárfias, J., Bibiano, L., & Llanos, H. (2008). Uso Racional y Sostenible de los Recursos Hidricos del acuifero del valle de Toluca. *Ciencia Ergo Sum, 15*(1), págs: 61-72.

Gasulla, M. (1999). *Obtención de Imágenes de la Distribución de Impedancia Eléctrica en el Subsuelo, Aplicación a la Detección de Objetos Locales.*

Tesis doctoral, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, Barcelona. doi:http://dx.doi.org/10.5821/dissertation-2117-93628

Glesson, T., Wada, Y., Bierkens, M., & Van Beek, L. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature, vol: 488*, pags: 197-200. doi:10.1038/nature11295

Gómez, A., & Donado, L. (2012). Análisis de pruebas de bombeo: La prueba de Diagnóstico. *Universidad Nacional de Colombia*. doi:10.13140/2.1.4243.2327

INADE, & PET. (2004). *Estudio de Calidad de Agua Cuenca Sama.* Tacna.

INGEMMET. (1963). *Geología de los Cuadrángulos de La Yarada, Tacna y Huaylillas (Hojas 37-u, 37-v y 37-x).* Boletin N° 6 Serie A - Comisión Carta Geológica Nacional, Lima.

INGEMMET. (2009). *Hidrogeología de la Cuenca del Río Caplina.* Lima - Perú.

INGEMMET. (2012). *Geología de los Cuadrángulos de La Yarada, Tacna y Huaylillas. Hojas 37-u,37-v y 37-x.* Lima, Perú.

INGEMMET. (2021). *Hidrogeología de la cuenca del río Azángaro (019), región Puno.* Lima.

INGEMMET. (2021). *Neotectínica de la Región Tacna.* Lima - Perú.

INGEMMET. (2021). *Peligro Geológico en la región Tacna. Boletin Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 82.* Lima-Perú.

Ingeoexpert. (17 de Marzo de 2022). *¿Qué es la hidrogeología y para que sirve?* Obtenido de https://ingeoexpert.com/2022/03/17/que-es-la-hidrogeologia-

y-para-que-sirve/?srsltid=AfmBOopuLBARW5QFxulkJF0z1-hbKhU_FbursaBOeb2TSL95yyMA1aOk

INRENA. (2006). *Estudio Hidrogeológico del Valle de Sama.* Lima.

Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration.* Oxford: Blackwell Science.

Kirsch, R., & Ernstson, K. (2006). Geoelectrical Methods. En R. Kirsch, *Groundwater Geophysics, A Tool for Hydrogeology* (2nd ed.). Germany: Springer. doi:10.1007/978-3-540-88405-7

Martínez A., P., Martínez S., P., & Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología.* Madrid-España: Ediciones Mundi-Prensa.

MINAG, & ANA. (2010). *Estudio de Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en las Cuencas de los Rios Locumba y Sama.*

Murillo D., J. (2002). Uso conjunto y recarga artificial de acuiferos, su aplicacion a Andalucia y en particular a la provincia de Jaen. *Presente y Futuro de las Aguas Subterraneas en la Provincia de Jaen*.

Ordoñez, J. (2011). Aguas Subterráneas - Acuíferos. En S. G. Partneship, *Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico* (Sociedad Geográfica de Lima ed.). Lima - Perú.

Orellana, E. (1972). *Prospección Geoeléctrica en corriente continua* (2da. ed.). Madrid, España: Paraninfo.

Pulido B., A. (2001). Sobreexplotacion de acuiferos y desarrollo sostenible. En A. Pulido B., & J. &. Calaforra Ch., *Problematica de la gestion del agua en regiones semiaridas* (págs. Págs: 115-132). Almeria, España.

Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.* New Delhi, India: Garsington Road.

Sahuquillo, A. (2009). La importancia de las aguas subterráneas. *X Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica, N° 1*(103), 97-114. Obtenido de https://rac.es/ficheros/doc/00923.pdf

Sánchez, F. (s.f.). *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología.* Obtenido de Hidrología Hidrogeología: https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf

Schulz, C., & García, R. (2018). *Apuntes sobre Geohidrología Ambiental.* Proyecto de Investigación y Desarollo 075/2011: "Comportamiento y evolución espacio-temporal del arsénico en aguas subterráneas de la República Argentina", COHIFE, Buenos Aires.

Valdivieso, A. (s.f.). *QUE ES UN ACUÍFERO*. Obtenido de IAGUA: https://www.iagua.es/respuestas/que-es-acuifero

Vallejo, A. (2003). Focos Potenciales de contaminacion. En A. Pulido B., & A. Vallejos I, *Gestion de Recursos Hidricos* (págs. 113-125).

Vélez, M. (2011). *Hidráulica de Aguas Subterráneas* (Vol. 3ra. Edición). Colombia.

Villanueva, M., & Iglesias, A. (1984). *Pozos y Acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo.* Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.

Yampasi, L. (2019). *Tesis: "Aplicación del Método de Sondaje Eléctrico Vertical para la ubicación de Pozos de Agua Subterránea en los Centros Poblados*

de Buena Vista y Miraflores en el Distrito de Sama, Provincia y Región de Tacna". Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa.

Younger, P. (2007). *Groundwater in the environment, an introduction.* Oxford, UK: Blackwell Publishing.

Anexos

Matriz de consistencia

TITULO: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA – TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
PROBLEMA GENERAL: ¿Cómo determinar las características y condiciones hidrogeológicas del acuífero del sector Pampa Molina – parte baja del valle Sama, para conocer su comportamiento y funcionamiento ante el bombeo de pozos, principalmente informales y de esta manera, establecer lineamientos para la explotación racional del agua subterránea con fines agrícolas?	**OBJETIVO GENERAL:** Determinar las características y condiciones hidrogeológicas del acuífero del sector Pampa Molina – parte baja del valle Sama, para conocer su comportamiento y funcionamiento ante el bombeo de pozos, principalmente informales y de esta manera, establecer lineamientos para la explotación racional del agua subterránea con fines agrícolas	**HIPÓTESIS GENERAL:** La evaluación hidrogeológica integral permite determinar las características y condiciones hidrogeológicas del acuífero del sector Pampa Molina – parte baja del valle Sama, para conocer su comportamiento y funcionamiento ante el bombeo de pozos, principalmente informales y de esta manera, establecer lineamientos para la explotación racional del agua subterránea con fines agrícolas.	**VARIABLES INDEPENDIENTES:** - Evaluación Hidrogeológica del acuífero del sector Pampa Molina – parte baja del valle Sama **VARIABLES DEPENDIENTES:** - Explotación de aguas subterráneas	**TIPO DE INVESTIGACIÓN:** - Aplicada con un análisis cuantitativo y cualitativo. **NIVEL DE INVESTIGACIÓN:** - Descriptivo y explicativo **DISEÑO:** - No experimental y transeccional **POBLACIÓN:** - Sector de la parte baja del valle Sama – Distrito Sama Las Yaras - Tacna **MUESTRA:** - Sector Pampa Molina del Distrito Sama Las Yaras - Tacna.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS 1) ¿Cómo está configurado el acuífero del sector Pampa Molina (geometría, litología y limites)?	**OBJETIVOS ESPECÍFICOS:** 1) Determinar la configuración del acuífero del sector Pampa Molina (geometría, litología y limites) mediante ensayos de sondajes eléctricos verticales, en correlación con la geología del subsuelo y litología de pozos existentes	**HIPÓTESIS ESPECÍFICAS:** 1) El acuífero del sector Pampa Molina es un acuífero libre de espesores variables, constituido litológicamente por materiales de origen fluvio-aluvial del Cuaternario Reciente, teniendo como límite en su base a rocas impermeables del Jurásico (Formación Chocolate).		
2) ¿Cuáles son los parámetros hidráulicos del acuífero: transmisividad (T), permeabilidad (K) y coeficiente de almacenamiento (S)?	2) Definir los parámetros hidráulicos del acuífero: Transmisividad (T), Permeabilidad (K) y Coeficiente de almacenamiento (S), mediante la interpretación de pruebas de bombeo existentes, en las que ha participado la tesista.	2) El acuífero presenta regulares condiciones hidrogeológicas con valores de parámetros hidráulicos: Transmisividad (T) entre 100 a 500 m^2/día y Permeabilidad (K) entre 1 a 10 m/día.		

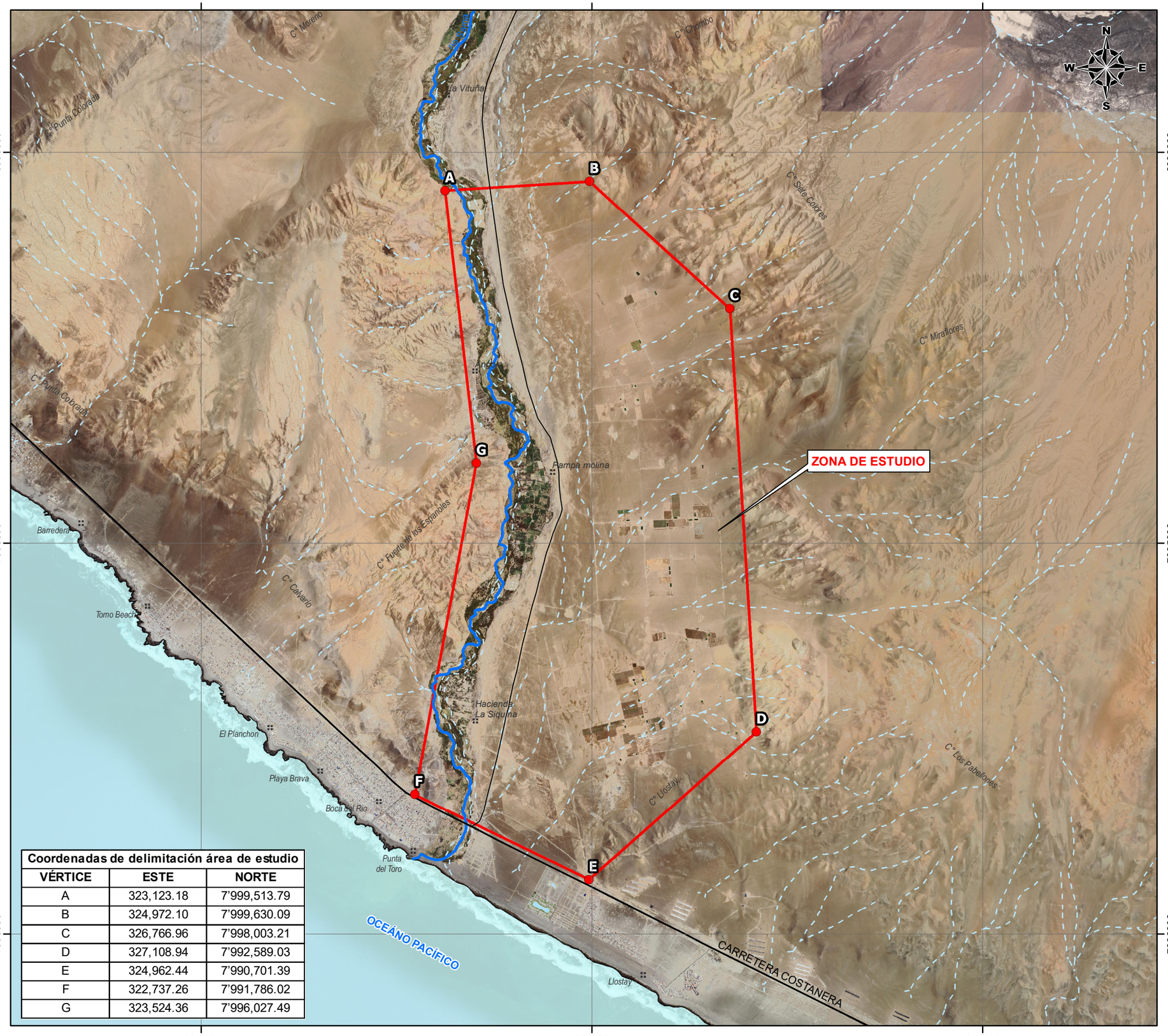
3) ¿Qué calidad de agua subterránea se presenta en el sector Pampa Molina?	3) Determinar la calidad del agua subterránea que presenta el sector Pampa Molina, en base a análisis físico químicos y de acuerdo a los Estándares de Calidad de Agua (ECA) para riego y uso poblacional de las normativas peruanas vigentes.	3) La calidad de agua subterránea que presenta el sector Pampa Molina es apta para el riego de cultivos tolerantes a las sales.	
4) ¿Cuál es el origen de las aguas subterráneas y las fuentes de recarga al acuífero del sector Pampa Molina?	4) Identificar el origen de las aguas subterráneas y las fuentes de recarga al acuífero del sector Pampa Molina.	4) Las aguas subterráneas del sector Pampa Molina tienen su origen en la infiltración del agua de lluvia en las partes altas de la Cuenca Sama, que se movilizan a través del propio río Sama. Las fuentes de recarga al acuífero local están dadas por las aguas que se infiltran a través del lecho del Rio Sama e infiltración de los excedentes de agua utilizados en el riego de cultivos de ambas márgenes del cauce del rio.	
5) ¿Cuánto es la disponibilidad hídrica subterránea del sector Pampa Molina?	5) Establecer cuánto es la disponibilidad hídrica subterránea del sector Pampa Molina.	5) En el sector Pampa Molina existe una disponibilidad hídrica subterránea de 5 MMC aproximadamente que puede ser aprovechada de manera adecuada para el riego de cultivos.	

Matriz de operacionalización de variables

TITULO: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA – TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

	VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS
VARIABLE INDEPENDIENTE	Evaluación hidrogeológica del acuífero del sector Pampa Molina – parte baja del valle Sama	Es un conjunto de estudios y análisis destinados a estimar la capacidad de los acuíferos para proporcionar recursos hídricos subterráneos en cantidad y calidad suficientes, bajo criterios de sostenibilidad, considerando las características hidrogeológicas del medio y las necesidades de uso (Custodio & Llamas, 1983)	Se realiza mediante estudios de campo, ensayos de bombeo, análisis geológicos e interpretación de información hidrogeológica existente	Configuración del acuífero	Litología	Mapa geológico, perfil litológico de pozos y ensayo de Sondajes Eléctricos Verticales
					Espesor saturado	
					Límites	
				Propiedades hidráulicas	Transmisividad (T)	Prueba de bombeo
					Permeabilidad (K)	
					Coeficiente de almacenamiento (S)	
				Calidad del agua subterránea	Parámetros físico-químicos de las aguas	Análisis físico-químico y diagramas hidrogeoquímicos
				Dinámica del agua subterránea	Profundidad del nivel freático	Mapas
					Dirección de flujo del agua subterránea	Mapas
				Recarga y descarga al acuífero	Fuentes de recarga	Información climática e hidrológica
					Extracción de pozos	Inventario de fuentes de agua
VARIABLE DEPENDIENTE	Explotación de aguas subterráneas	Es la utilización del agua del subsuelo para abastecimiento de poblaciones, riego y otros, que debe realizarse de manera sostenible sin afectar el equilibrio del sistema (Sahuquillo, 2009).	Se evalúa a partir del caudal explotable, calidad del agua y disponibilidad del recurso.	Disponibilidad hídrica subterránea	Caudal y volumen de explotación de pozos	Aforos medidos en pruebas de bombeo y/o registrados en el Inventario de fuentes de agua
					Reservas almacenadas	Cálculo matemático
				Aptitud del agua para riego	Conductividad, pH, RAS	Análisis físico-químico
					Clasificación del agua	Diagrama de Wilcox y ECAs norma MINAM para riego de cultivos
				Sostenibilidad de la explotación	Balance Hídrico	Cálculo matemático

Anexo 1. Mapas



Coordenadas de delimitación área de estudio		
VÉRTICE	ESTE	NORTE
A	323,123.18	7'999,513.79
B	324,972.10	7'999,630.09
C	326,766.96	7'998,003.21
D	327,108.94	7'992,589.03
E	324,962.44	7'990,701.39
F	322,737.26	7'991,786.02
G	323,524.36	7'996,027.49

LEYENDA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Zona de estudio

Escala Gráfica

0 440 880 1,760 2,640

Metros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

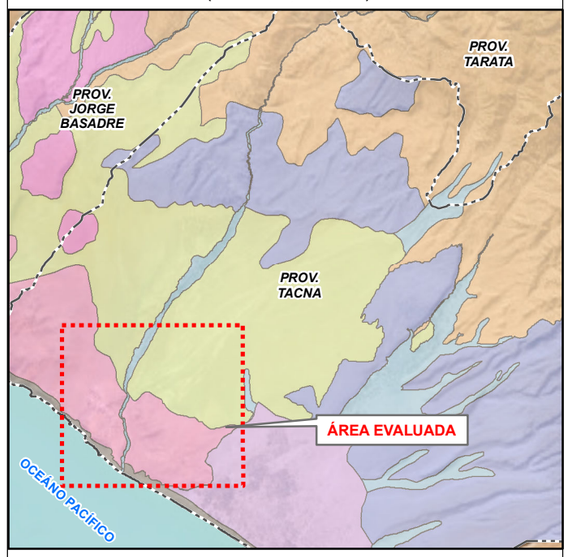
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: UBICACIÓN Y ACCESO A LA ZONA DE ESTUDIO

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/50,000	NOVIEMBRE 2025	N° 1

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA

MAPA DE UBICACIÓN PROVINCIAL
(ESC: 1/1,000,000)



SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Curva de nivel
- Zona de estudio

LEYENDA

- Cadena Costanera
- Cono Aluvial
- Pampa Costanera
- Terraza Aluvial
- Faja Litoral

Escala Gráfica

0 875 1,750 3,500 5,250

Metros

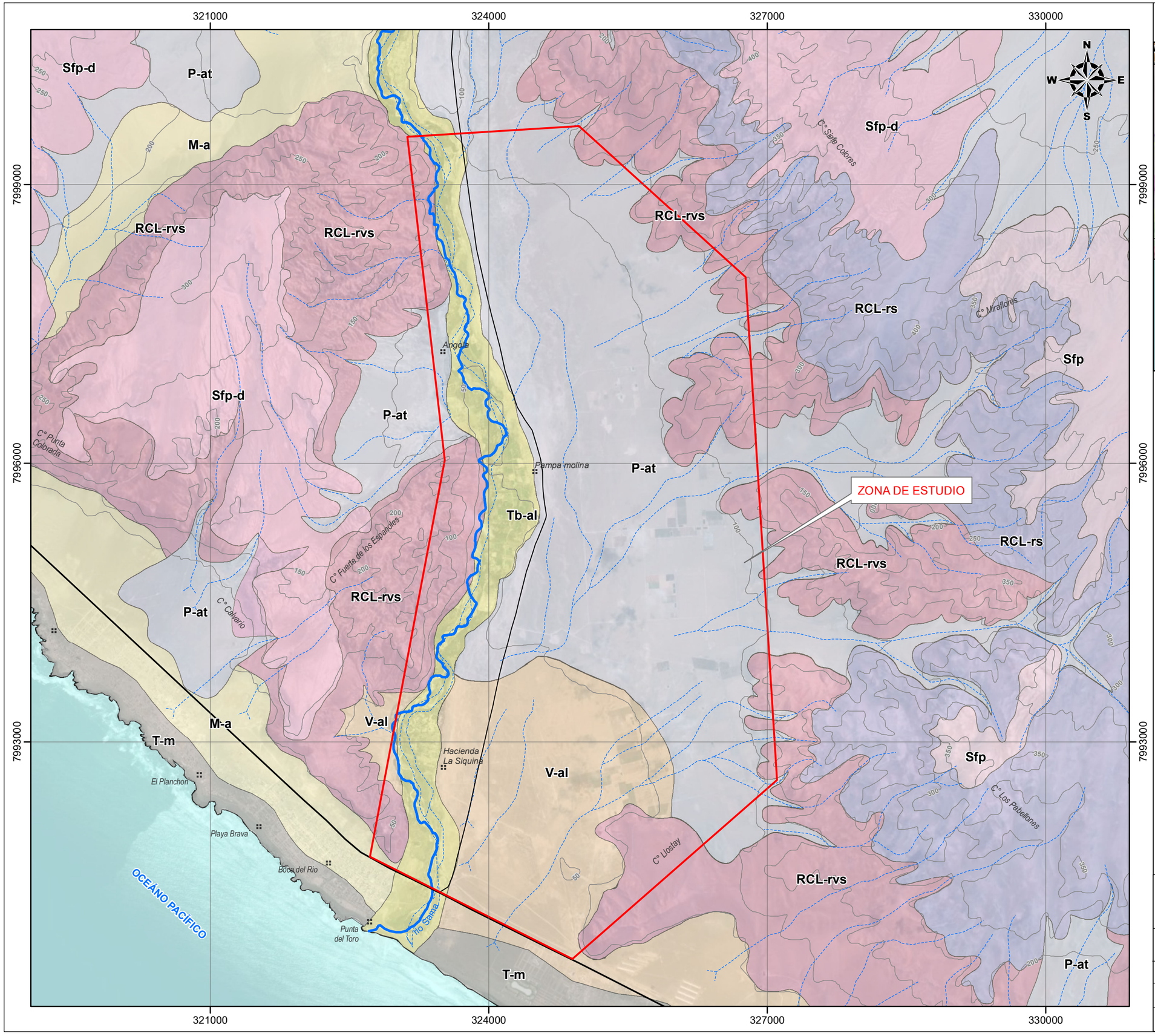
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

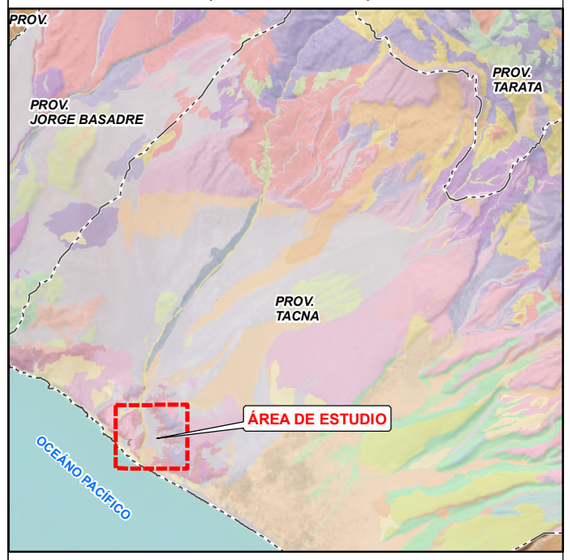
TÍTULO: GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
INGEMMET	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/100,000	NOVIEMBRE 2025	N° 2

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



MAPA DE UBICACIÓN PROVINCIAL
(ESC: 1/1,000,000)



SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Curva de nivel
- Zona de estudio

LEYENDA

T-m	Terraza marina
Tb-al	Terraza Baja Aluvial
P-at	Piedemonte Aluvio-Torrencial
V-al	Vertiente Aluvial
M-a	Mantos de Arena
Sfp	Superficie de Flujo Piroclástico
Sfp-d	Superficie de Flujo Piroclástico Disectado
RCL-rvs	Colina y Lomada en Roca Volcánica-Sedimentaria
RCL-rs	Colina y Lomada en Roca Sedimentaria

Escala Gráfica

0 360 720 1,440 2,160

Metros

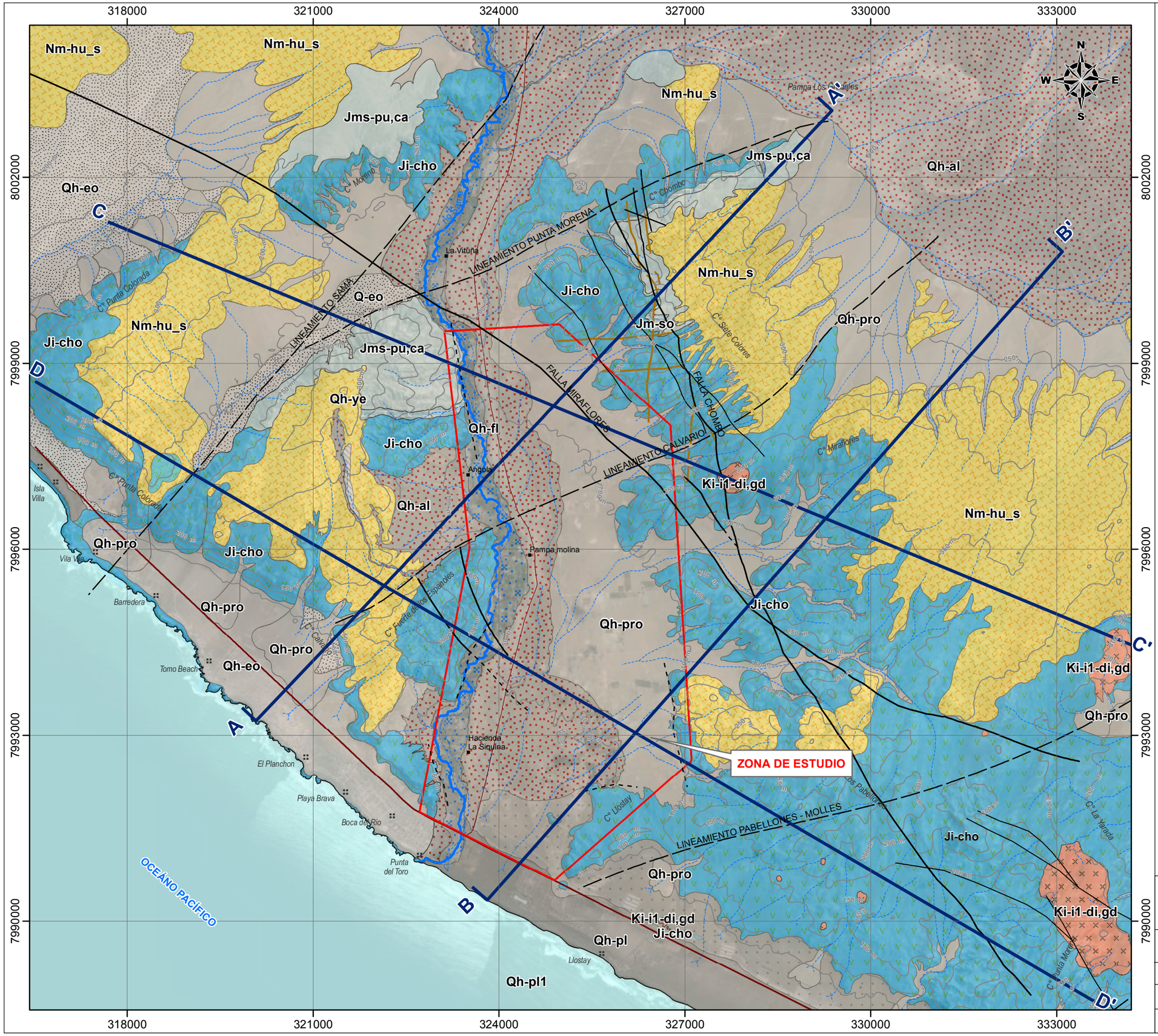
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: GEOMORFOLÓGICO LOCAL

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
INGEMMET	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/40,000	NOVIEMBRE 2025	N° 3

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



LEYENDA GEOLÓGICA

ERA	SIST.	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	ROCAS INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	**Qh-fl** — **Depósito fluvial** Arenas, gravas y cantos rodados subredondeados.	
			Qh-eo — **Depósito eólico** Arenas de grano fino a medio de origen eólico.	
			Qh-pro — **Depósito proluvial** Fragmentos subangulosos, heterométricos, gravas, cantos, con relleno limo-arenosa.	
			Qh-al — **Depósito aluvial** Cantos, grava y arenas subredondeados a redondeados polimícticas en matriz limoarcillosa formando terrazas.	
			Qh-ye — **Depósito de yeso**	
			Qh-pl1 — **Depósito de playa** Terraza marina con evidencia de retroceso del mar.	
			Qh-pl — **Depósito de playa** Terraza marina actual.	
MESOZOICO	NEÓGENO	PLIOCENO		
		MIOCENO	Formación Huayllillas — **Nm-hu_s** — **Miembro Superior** Tobas riodacíticas rosácea, ignimbritas blancas y rosáceas poco soldadas con fragmentos líticos de pómez.	
	CRETÁCEO	SUP.		
		INF.		**Ki-i1-di,gd** — **Superunidad Ilo** Diorita,granodiorita
	JURÁSICO	SUP.	Grupo Yura — **Jms-pu,ca** — **Formación Puente,Cachios** Lutitas, limolitas, areniscas cuarzo feldespáticas	
		MEDIO	**Jm-so** — **Formación Socosani** Calizas grises, lutitas negras, rojizas, areniscas calcáreas.	
		INF.	**Ji-cho** — **Formación Chocolate** Flujo de lava gris de composición andesítica, textura afanítica y porfídica.	

SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Curva de nivel
- Zona de estudio
- A A' Corte Geológico Regional

Geología

- Falla
- Falla Inferida
- Lineamiento
- Dique

Escala Gráfica

0 500 1,000 2,000 3,000

Metros

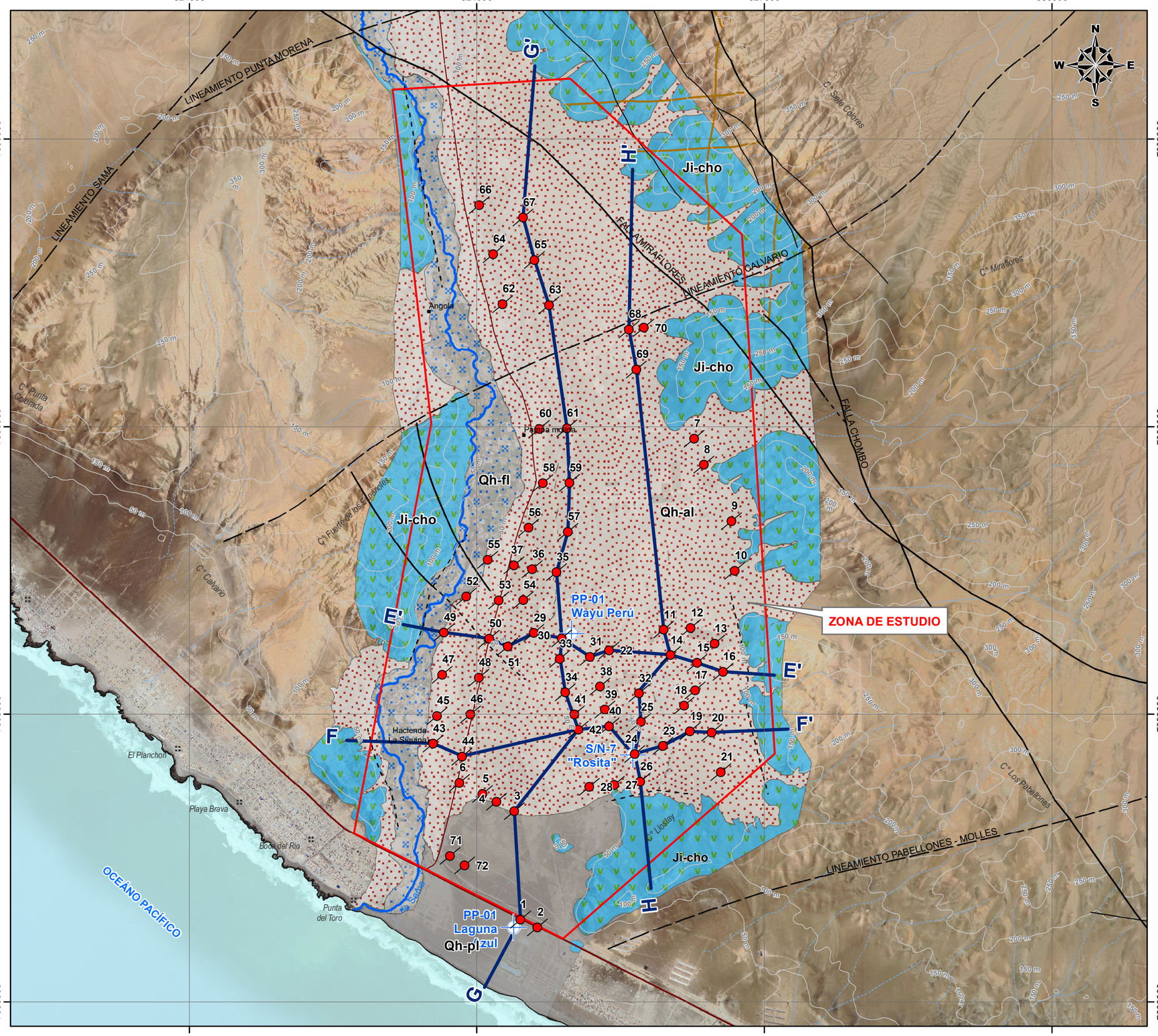
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: **GEOLOGÍA REGIONAL Y ESTRUCTURAL**

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
INGEMMET - ANA	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/50,000	NOVIEMBRE 2025	N° 4

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



LEYENDA GEOLÓGICA

ERA	SIST.	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qh-fl	**Depósito fluvial** Canto rodado, grava, arena, limo y arcilla transportados y depositados en el cauce del rio.
			Qh-al	**Depósito aluvial** Canto rodado, grava, arena, limo y arcilla.
			Qh-pl	**Depósito de playa** Arena y limo con costras de sal y restos de conchuelas.
MESOZOICO	JURÁSICO	INFERIOR	Ji-cho	**Formación Chocolate** Flujo andesíticos con secuencias de lutitas y areniscas.

SIMBOLOGIA

- Pozo con litología
- Sondaje Eléctrico Vertical
- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Curva de nivel
- Zona de estudio
- A A' Corte Geológico Local

Geología

- Falla
- Falla Inferida
- Lineamiento
- Dique

Escala Gráfica

0 360 720 1,440 2,160

Metros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

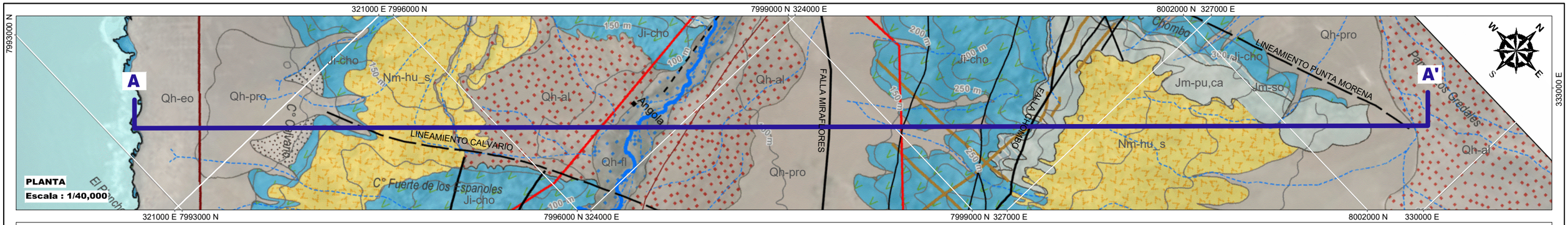
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

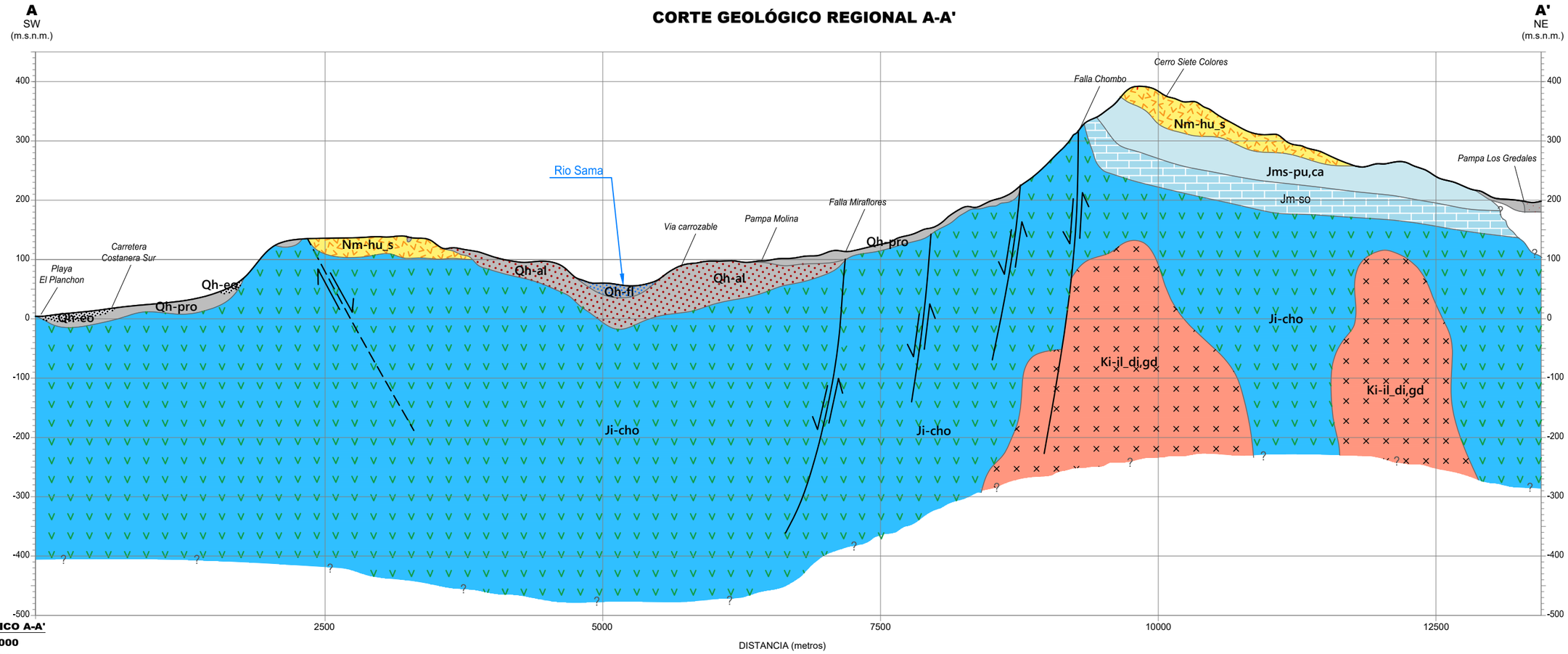
TÍTULO: GEOLOGÍA LOCAL

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/40,000	NOVIEMBRE 2025	N° 5

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



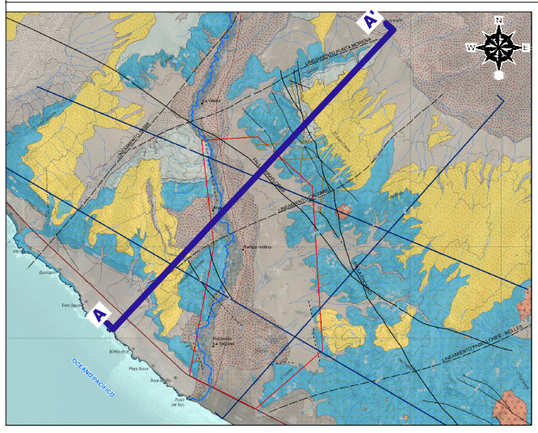
CORTE GEOLÓGICO REGIONAL A-A'



CORTE GEOLÓGICO A-A'

Escala H. : 1/40,000

Escala V. : 1/7,500



SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Zona de estudio
- A — A' Corte Geológico Regional
- Falla
- Falla inferida

LEYENDA GEOLÓGICA

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	UNIDADES INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qh-fl Depósito fluvial	
			Qh-eo Depósito eólico	
			Qh-pro Depósito proluvial	
			Qh-al Depósito aluvial	
	NEÓGENO	MIOCENO	Nm-hu_s Formación Huaylillas	
MESOZOICO	CRETÁCICO	INFERIOR		Batolito de la Costa Super Unidad Ilo: Ki-il_di,gd Diorita, Granodiorita
	JURÁSICO	MEDIO	Jm-pu,ca Formación Puente, Cachios	
			Jm-so Formación Socosani	
		INFERIOR	Ji-cho Formación Chocolate	

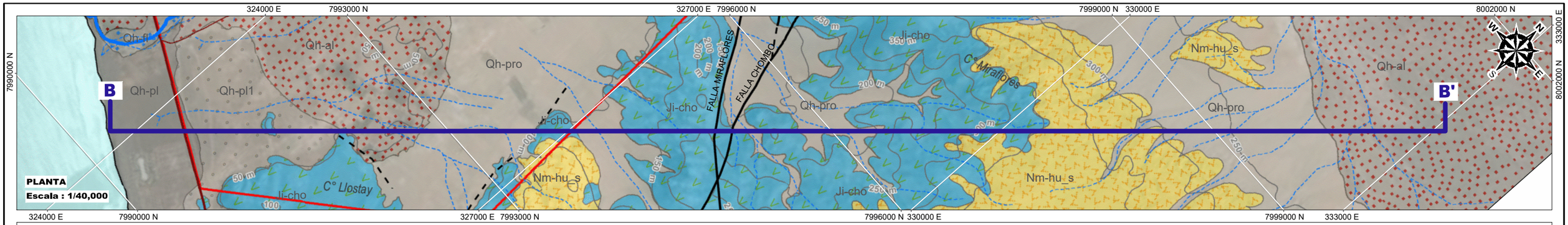
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

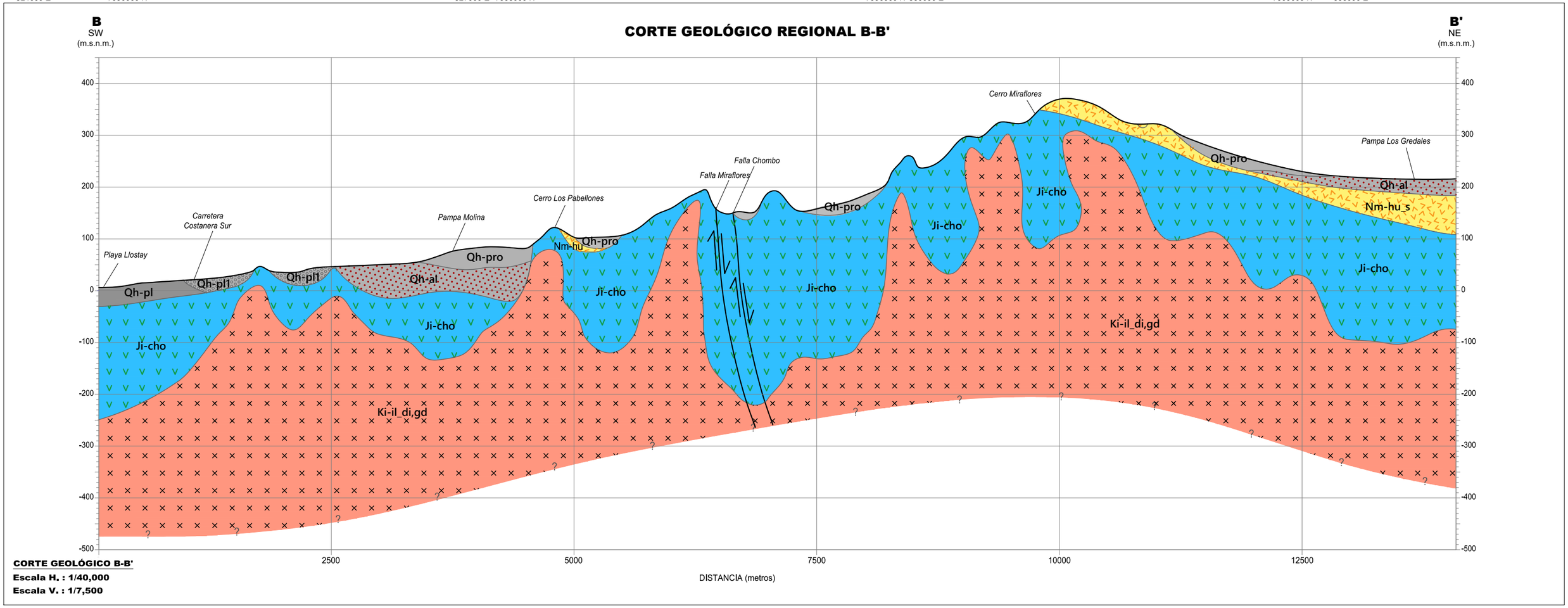
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

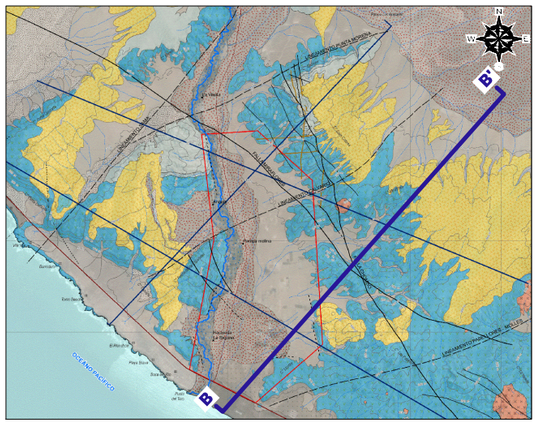
TÍTULO: CORTE GEOLÓGICO REGIONAL A-A'

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 6

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA







SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Zona de estudio
- A — A' Corte Geológico Regional
- Falla

LEYENDA GEOLÓGICA

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	UNIDADES INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qh-pro Depósito proluvial Qh-al Depósito aluvial Qh-pl Depósito de playa actual Qh-pl1 Depósito de playa	
	NEÓGENO	MIOCENO	Nm-hu_s Formación Huaylillas	Batolito de la Costa Super Unidad Ilo: Ki-il_di,gd Diorita, Granodiorita
MESOZOICO	CRETÁCICO	INFERIOR		
	JURÁSICO	INFERIOR	Ji-cho Formación Chocolate	

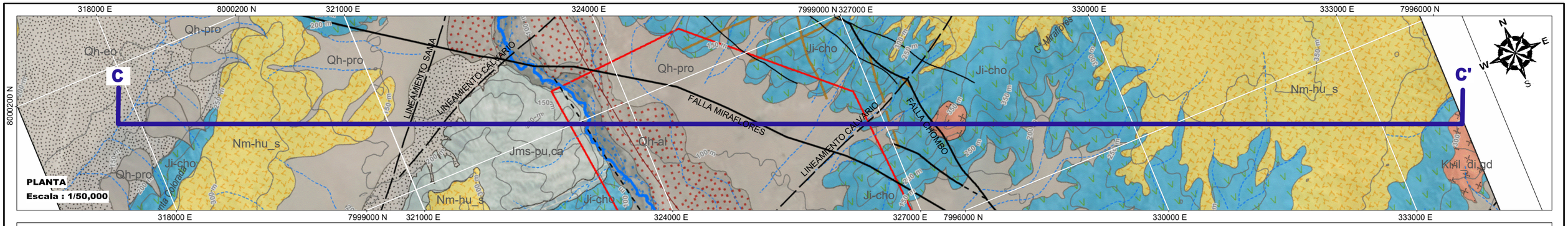
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

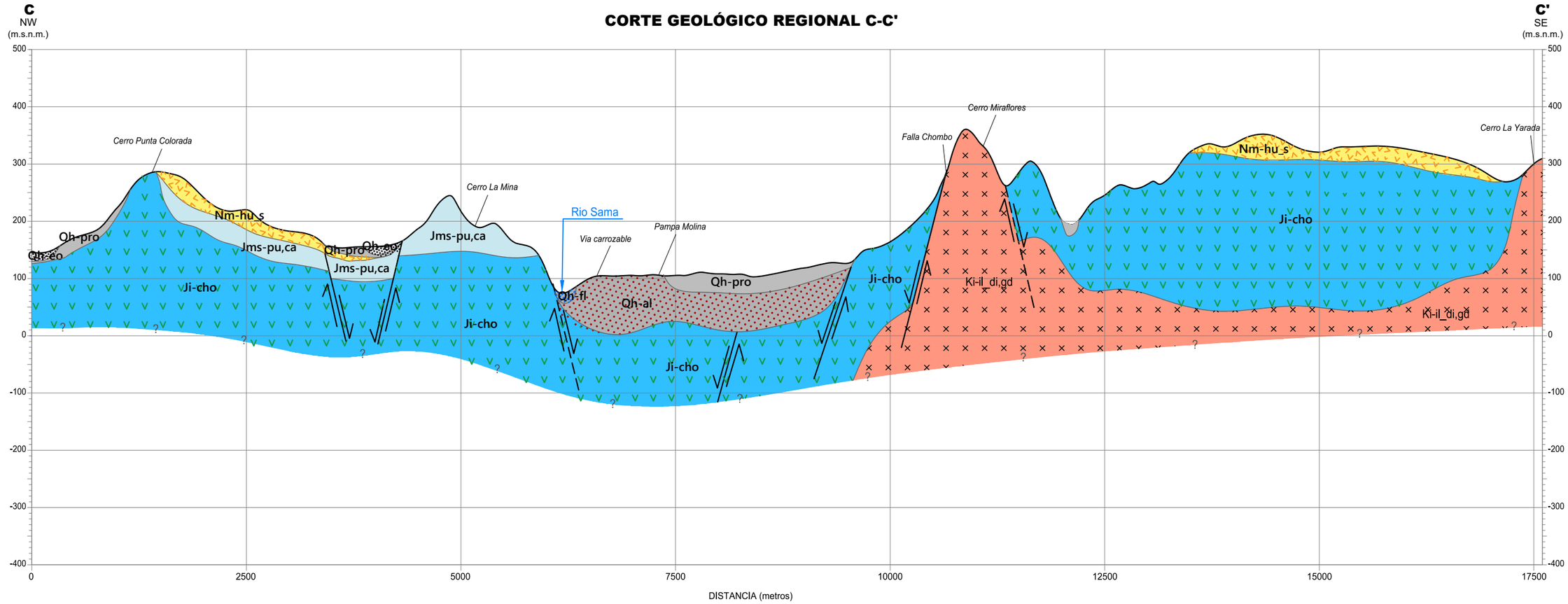
TÍTULO: CORTE GEOLÓGICO REGIONAL B-B'

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 7

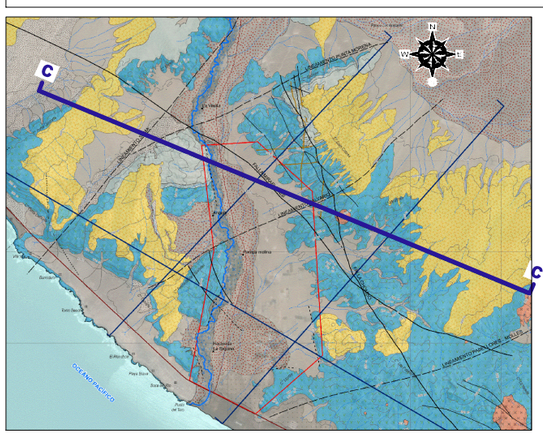
ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



CORTE GEOLÓGICO REGIONAL C-C'



CORTE GEOLÓGICO C-C'
Escala H. : 1/50,000
Escala V. : 1/7,500



SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Zona de estudio
- A A' Corte Geológico Regional
- Falla
- Falla inferida

LEYENDA GEOLÓGICA

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	UNIDADES INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qh-fl Depósito fluvial	
			Qh-eo Depósito eólico	
			Qh-pro Depósito proluvial	
			Qh-al Depósito aluvial	
	NEÓGENO	MIOCENO	Nm-hu_s Formación Huaylillas	
MESOZOICO	CRETÁCICO	INFERIOR		Batolito de la Costa Super Unidad Ilo: Ki-il_di,gd Diorita, Granodiorita
	JURÁSICO	MEDIO	Jm-pu,ca Formación Puente, Cachios	
		INFERIOR	Ji-cho Formación Chocolate	

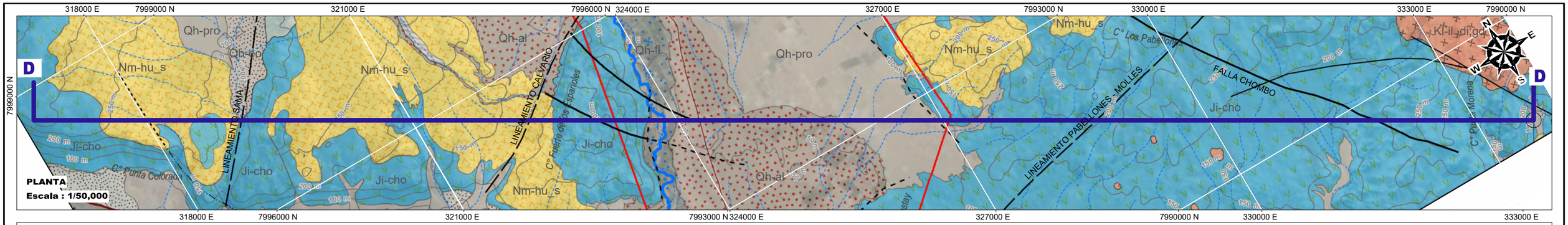
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

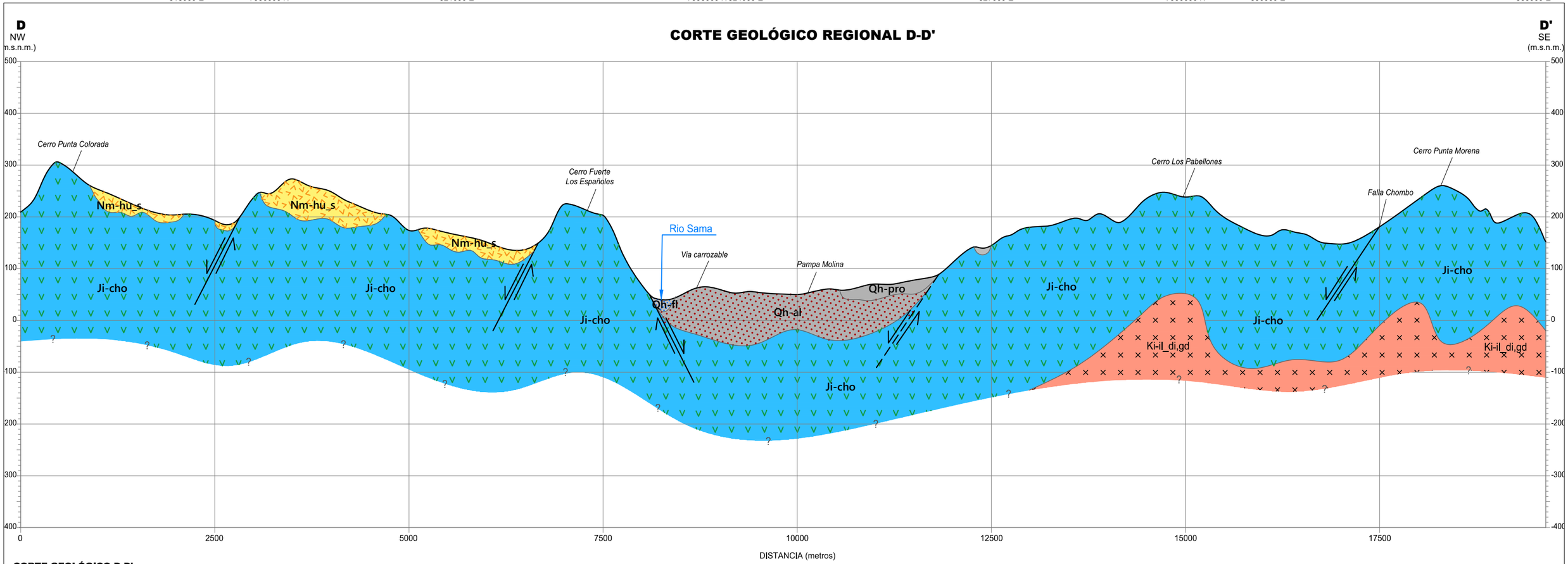
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

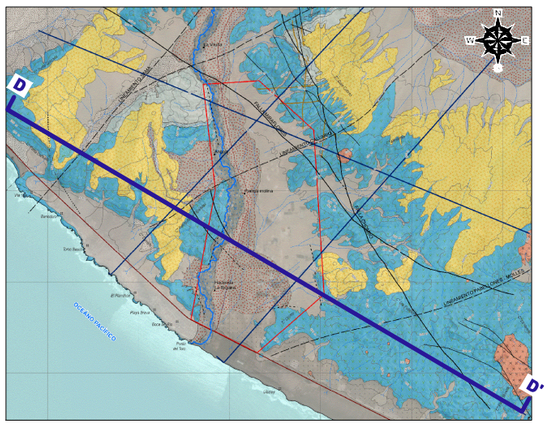
TÍTULO: CORTE GEOLÓGICO REGIONAL C-C'

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 8

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA







SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Zona de estudio
- A — A' Corte Geológico Regional
- Falla
- Falla inferida

LEYENDA GEOLÓGICA

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	UNIDADES INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qh-fl Depósito fluvial Qh-pro Depósito proluvial Qh-al Depósito aluvial	
	NEÓGENO	MIOCENO	Nm-hu_s Formación Huaylillas	
MESOZOICO	CRETÁCICO	INFERIOR		Batolito de la Costa Super Unidad Ilo: Ki-il_di,gd Diorita, Granodiorita
	JURÁSICO	MEDIO		
		INFERIOR	Ji-cho Formación Chocolate	

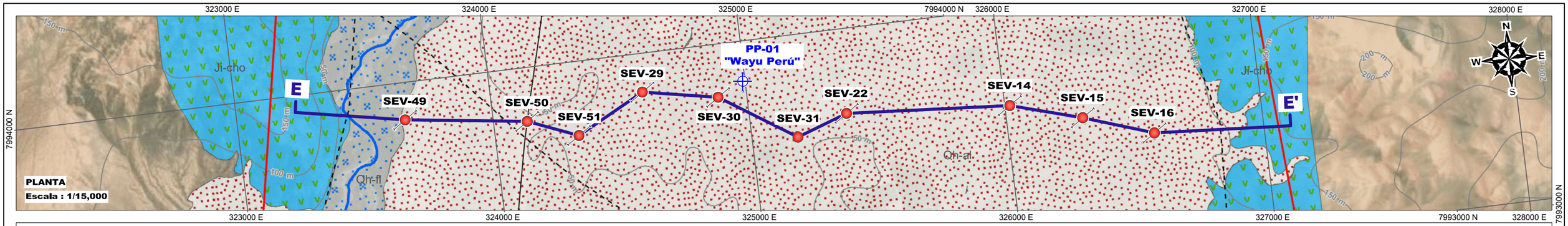
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: CORTE GEOLÓGICO REGIONAL D-D'

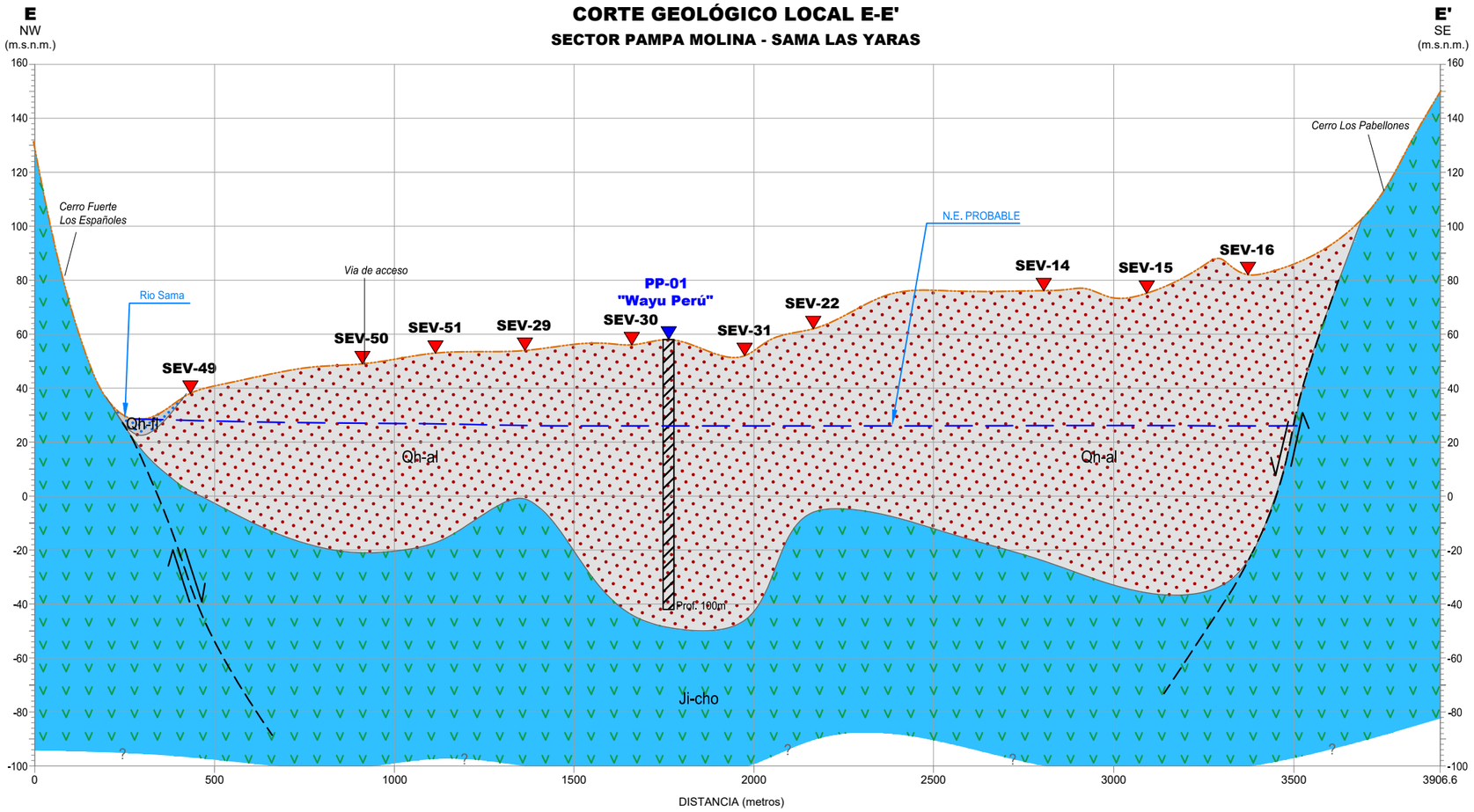
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 9

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



CORTE GEOLÓGICO LOCAL E-E'

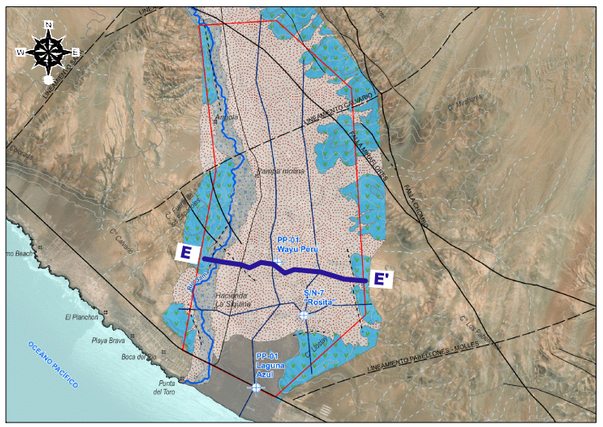
SECTOR PAMPA MOLINA - SAMA LAS YARAS



CORTE GEOLÓGICO E-E'

Escala H. : 1/15,000

Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- POZO — Pozo con litología
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geológico
- Falla inferida
- Via carrozable TA-611
- Río Sama
- Zona de estudio
- A A' — Corte Geológico local

LEYENDA GEOLÓGICA

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qh-fl Depósito fluvial	Canto rodado, grava, arena, limo y arcilla transportados y depositados en el cauce del río.
			Qh-al Depósito aluvial	Canto rodado, grava, arena, limo y arcilla.
MESOZOICO	JURÁSICO	INFERIOR	Ji-cho Formación Chocolate	Flujos andesíticos con secuencias de lutitas y areniscas.

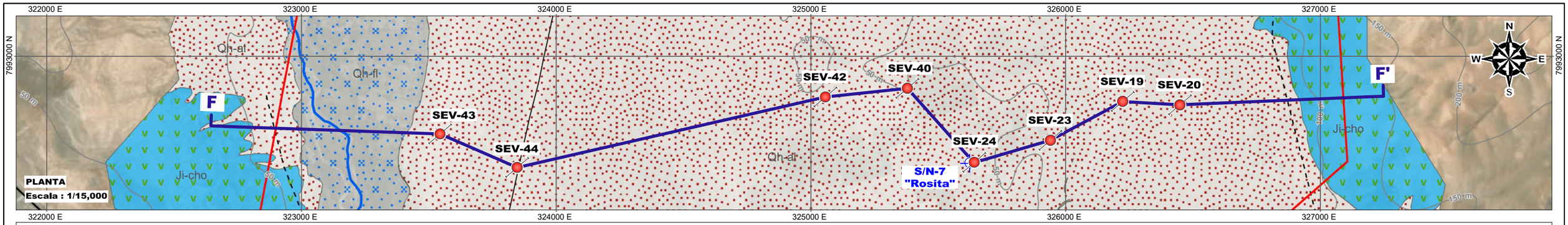
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: CORTE GEOLÓGICO LOCAL E-E'

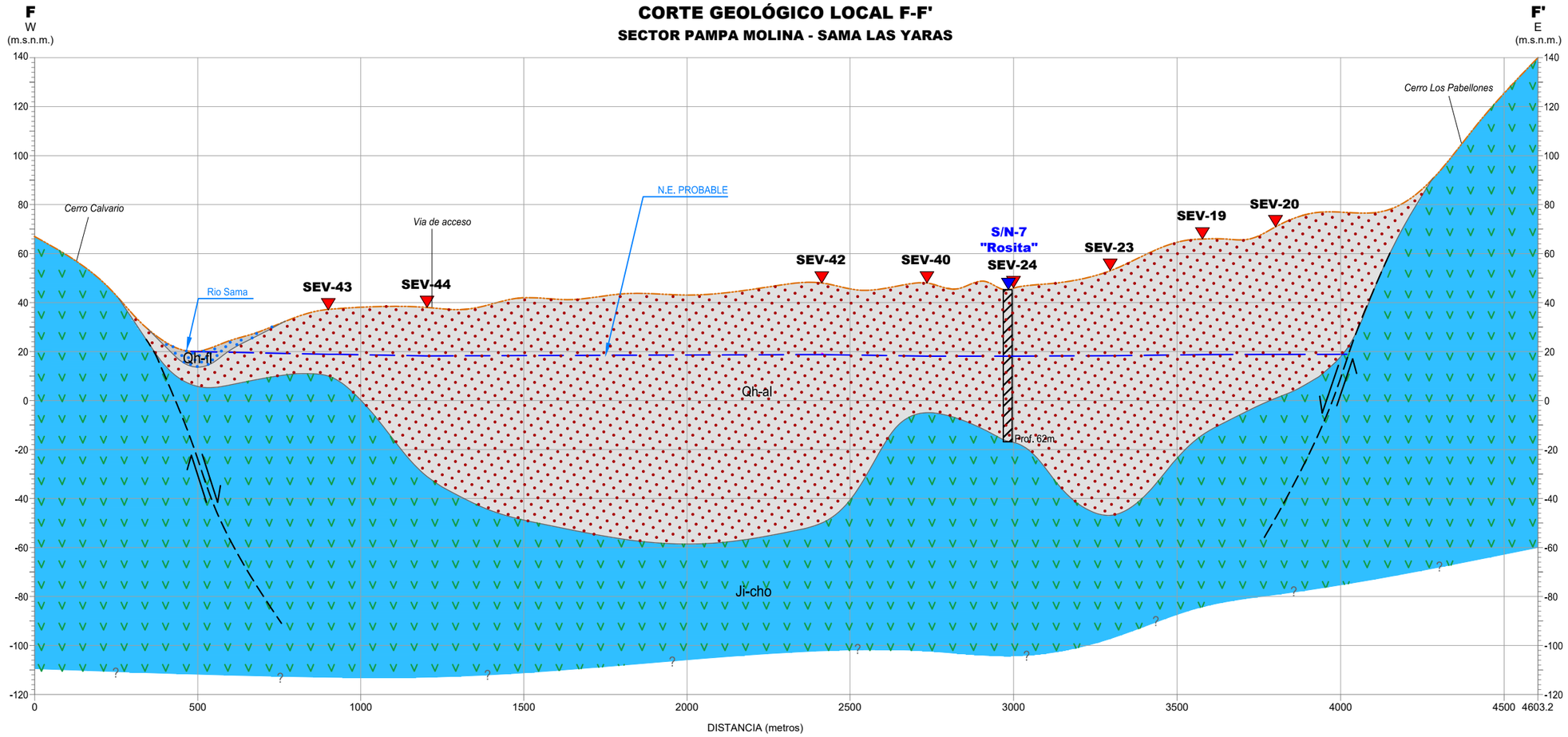
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 10

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA

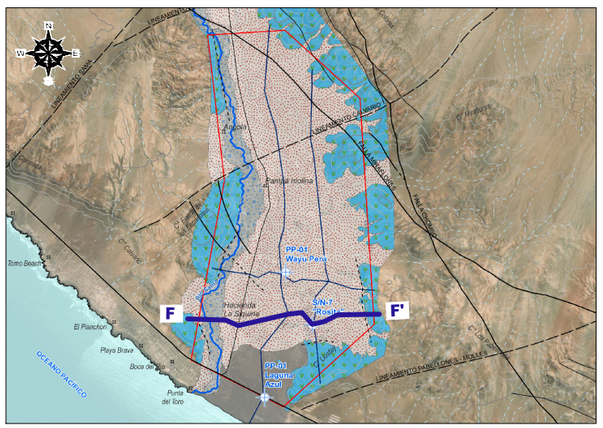


CORTE GEOLÓGICO LOCAL F-F'

SECTOR PAMPA MOLINA - SAMA LAS YARAS



CORTE GEOLÓGICO F-F'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- POZO — Pozo con litología
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geológico
- Falla inferida
- Via carrozable TA-611
- Río Sama
- Zona de estudio
- A A' — Corte Geológico local

LEYENDA GEOLÓGICA

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qh-fl Depósito fluvial	Canto rodado, grava, arena, limo y arcilla transportados y depositados en el cauce del río.
			Qh-al Depósito aluvial	Canto rodado, grava, arena, limo y arcilla.
MESOZOICO	JURÁSICO	INFERIOR	Ji-cho Formación Chocolate	Flujos andesíticos con secuencias de lutitas y areniscas.

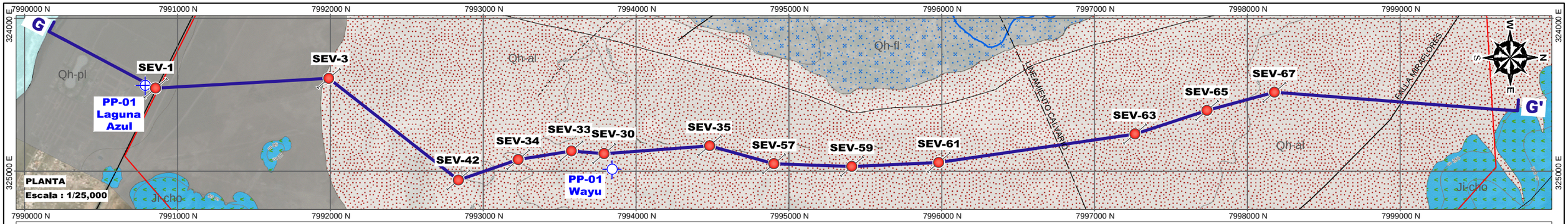
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

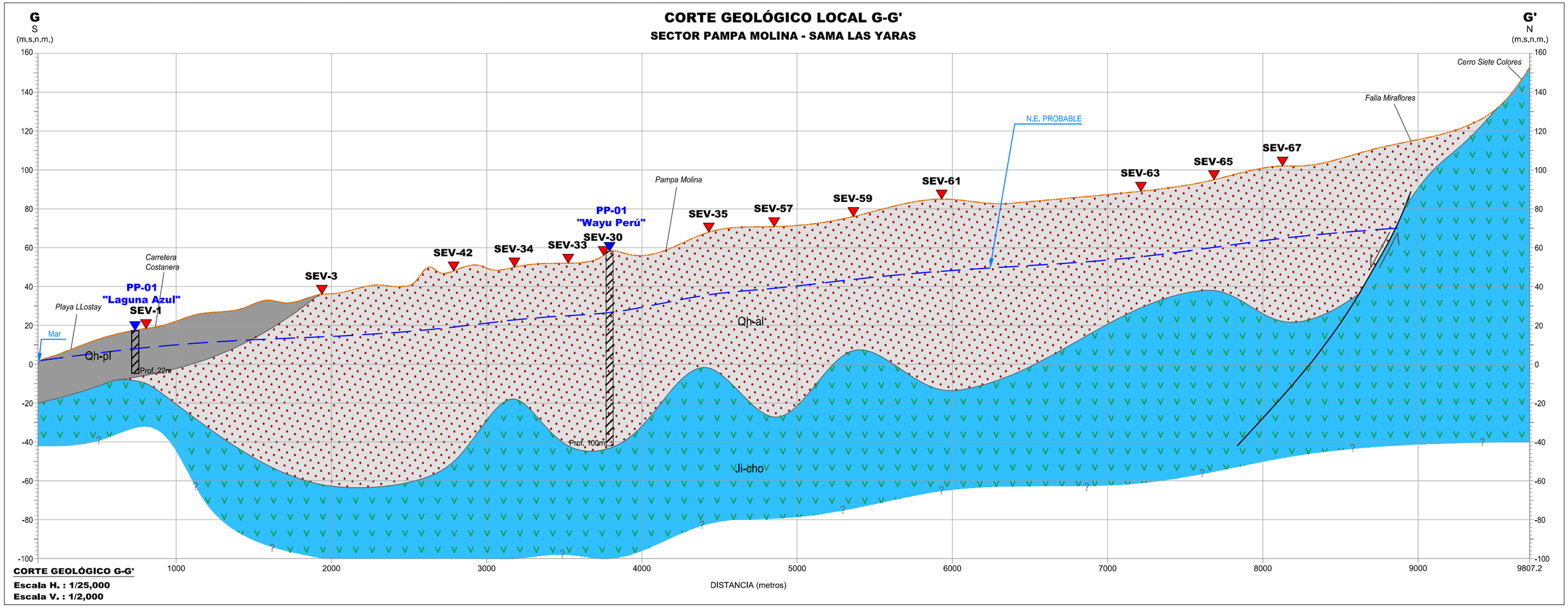
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

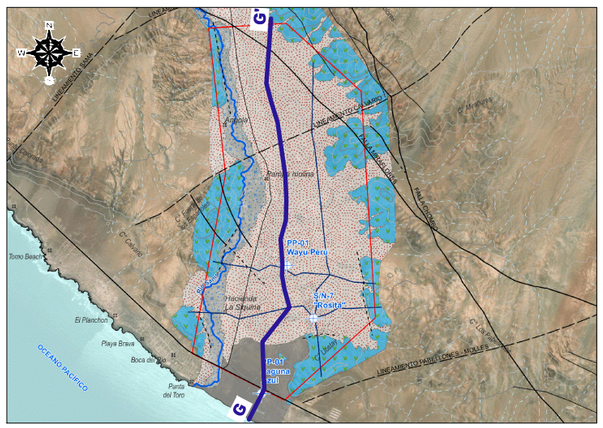
TÍTULO: CORTE GEOLÓGICO LOCAL F-F'

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 11

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA







SIMBOLOGIA

- POZO — Pozo con litología
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geológico
- Falla
- Lineamiento
- Via carrozable TA-611
- Zona de estudio
- A — A' Corte Geológico local

LEYENDA GEOLÓGICA

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qh-al Depósito aluvial	Canto rodado, grava, arena, limo y arcilla.
			Qh-pl Depósito de playa	Arena y limo con costras de sal y restos de conchuelas.
MESOZOICO	JURÁSICO	INFERIOR	Ji-cho Formación Chocolate	Flujos andesíticos con secuencias de lutitas y areniscas.

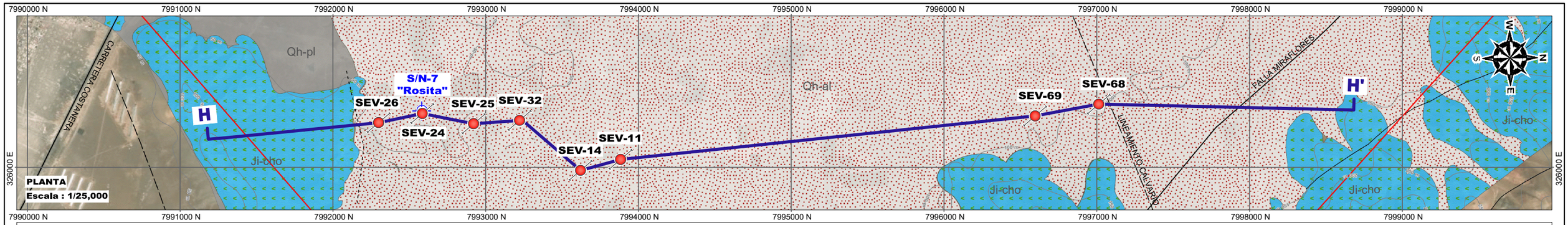
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: **EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

TÍTULO: **CORTE GEOLÓGICO LOCAL G-G'**

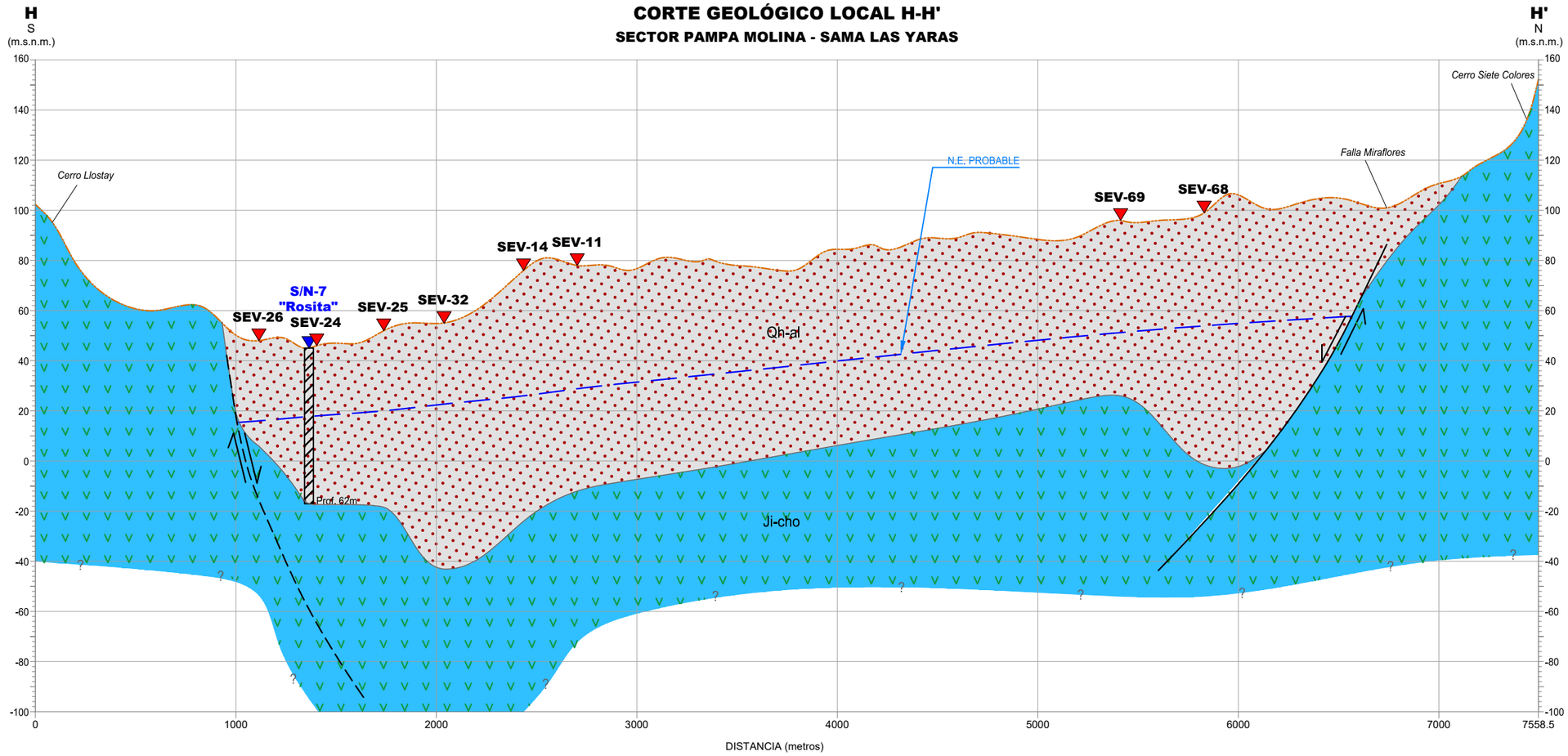
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 12

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



CORTE GEOLÓGICO LOCAL H-H'

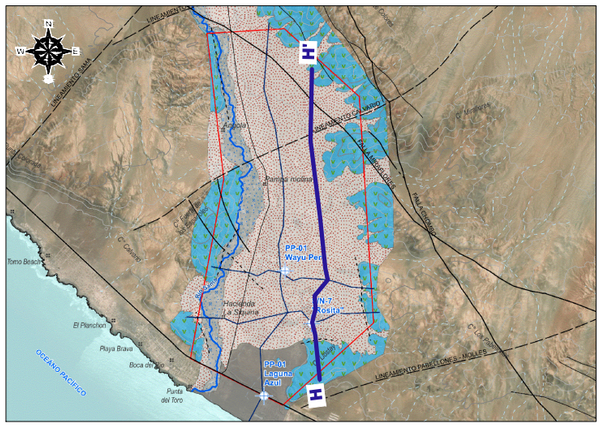
SECTOR PAMPA MOLINA - SAMA LAS YARAS



CORTE GEOELÓGICO H-H'

Escala H. : 1/25,000

Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- POZO — Pozo con litología
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geológico
- Falla
- Falla inferida
- Lineamiento
- Carretera Costanera Sur
- Zona de estudio
- A A' — Corte Geológico local

LEYENDA GEOLÓGICA

ERA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qh-al Depósito aluvial	Canto rodado, grava, arena, limo y arcilla.
MESOZOICO	JURÁSICO	INFERIOR	Ji-cho Formación Chocolate	Flujos andesíticos con secuencias de lutitas y areniscas.

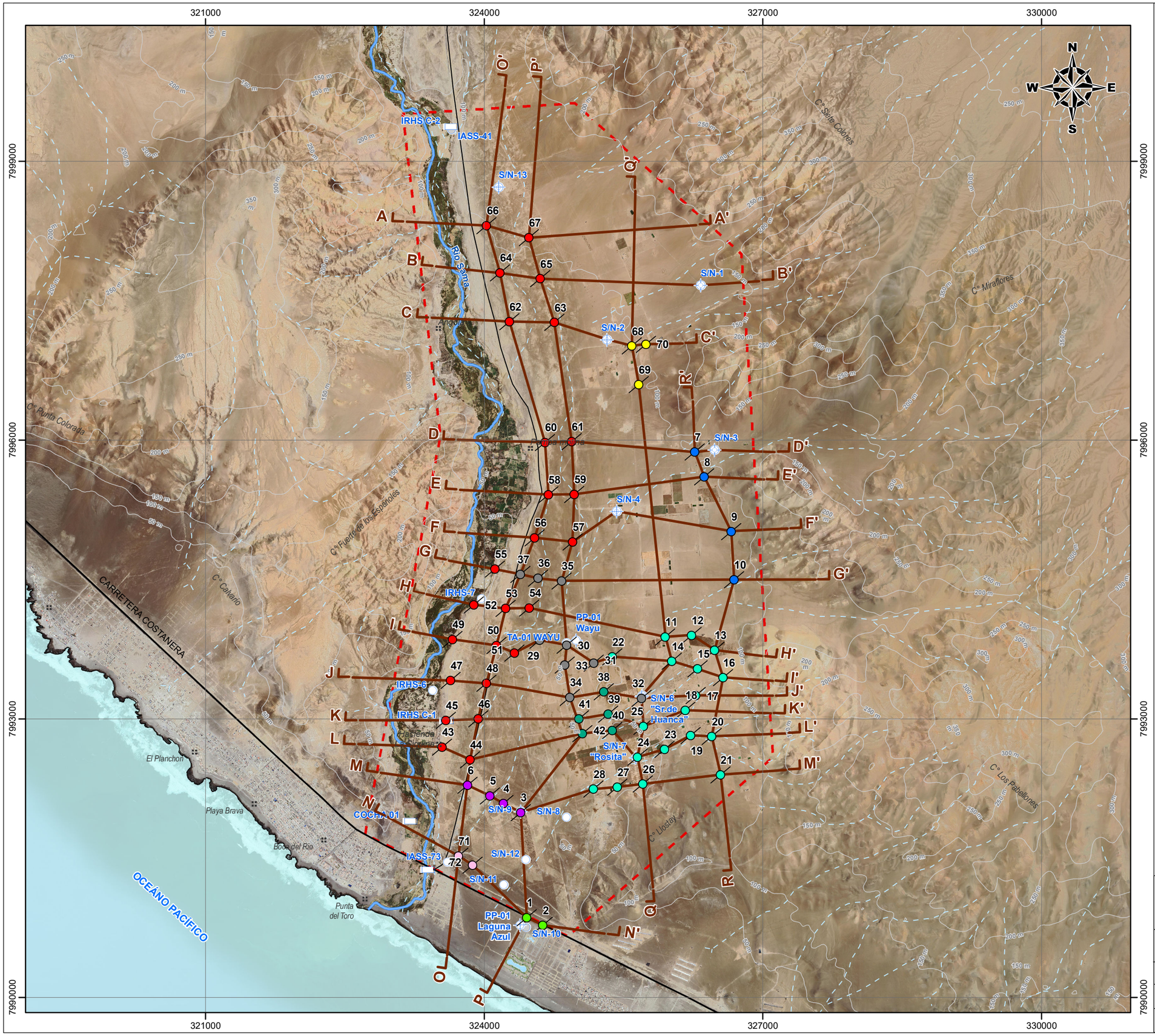
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: CORTE GEOLÓGICO LOCAL H-H'

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 13

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Curva de nivel
- Zona de estudio

Pozos y Fuentes de agua subterránea

- Pozo Mixto Utilizable
- Pozo Mixto Utilizado
- Pozo Tubular Utilizado
- Pozo Tubular Utilizable
- Pozo Tajo Abierto Utilizado
- Pozo Tajo Abierto Utilizable
- Pozo Tajo Abierto No Utilizable
- Cocha

LEYENDA

- Sondajes Eléctricos Verticales Proyecto Laguna Azul - EMAP SAC 2014
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Sr. Guillén - EMAP SAC 2017
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Sr. Mamani - EMAP SAC 2018
- Sondajes Eléctricos Verticales Asoc. Señor de Huanca - Ing. Pacheco 2019 y 2023
- Sondajes Eléctricos Verticales Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2023
- Sondajes Eléctricos Verticales comp. Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Paraiso - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Hda. La Siquina - Ing. Mita 2024
- A A' Sección Geológica-Geofísica

Escala Gráfica

0 350 700 1,400 2,100

Metros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

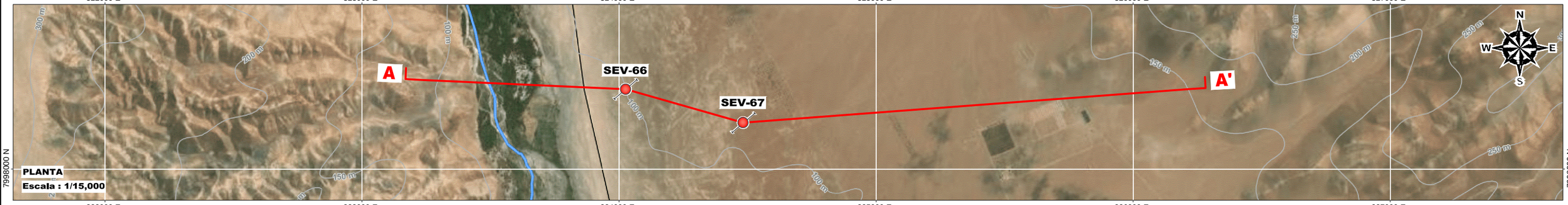
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

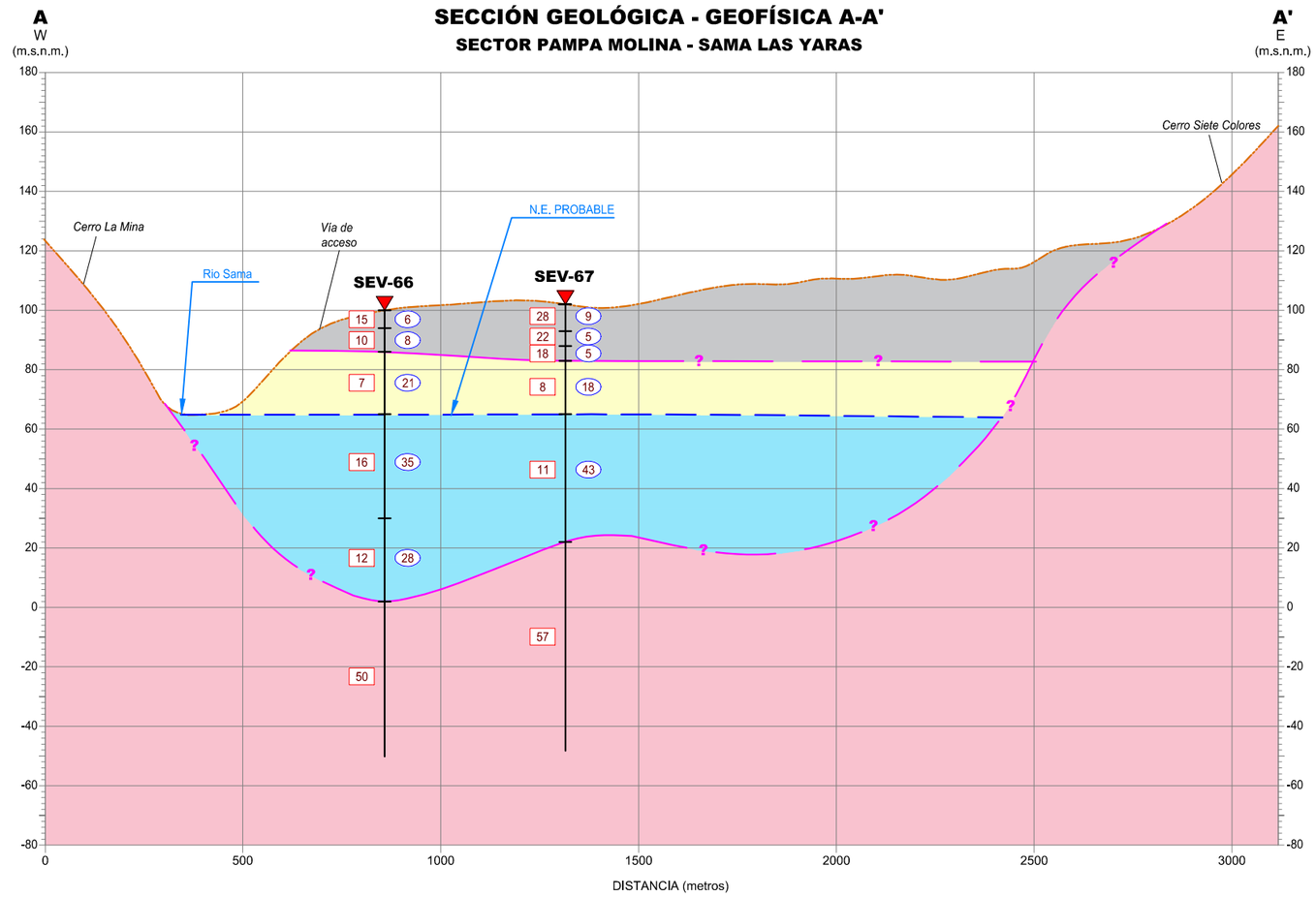
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: UBICACIÓN DE SEVs Y SECCIONES GEOFÍSICAS

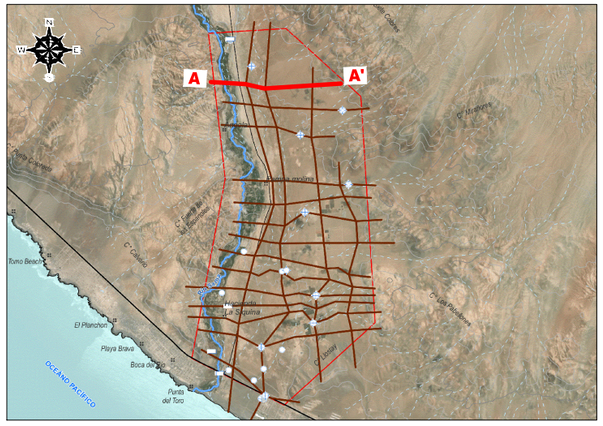
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/40,000	NOVIEMBRE 2025	N° 14

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA





SECCIÓN A-A'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, arena y limo, en estado seco. Regular permeabilidad.
- Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

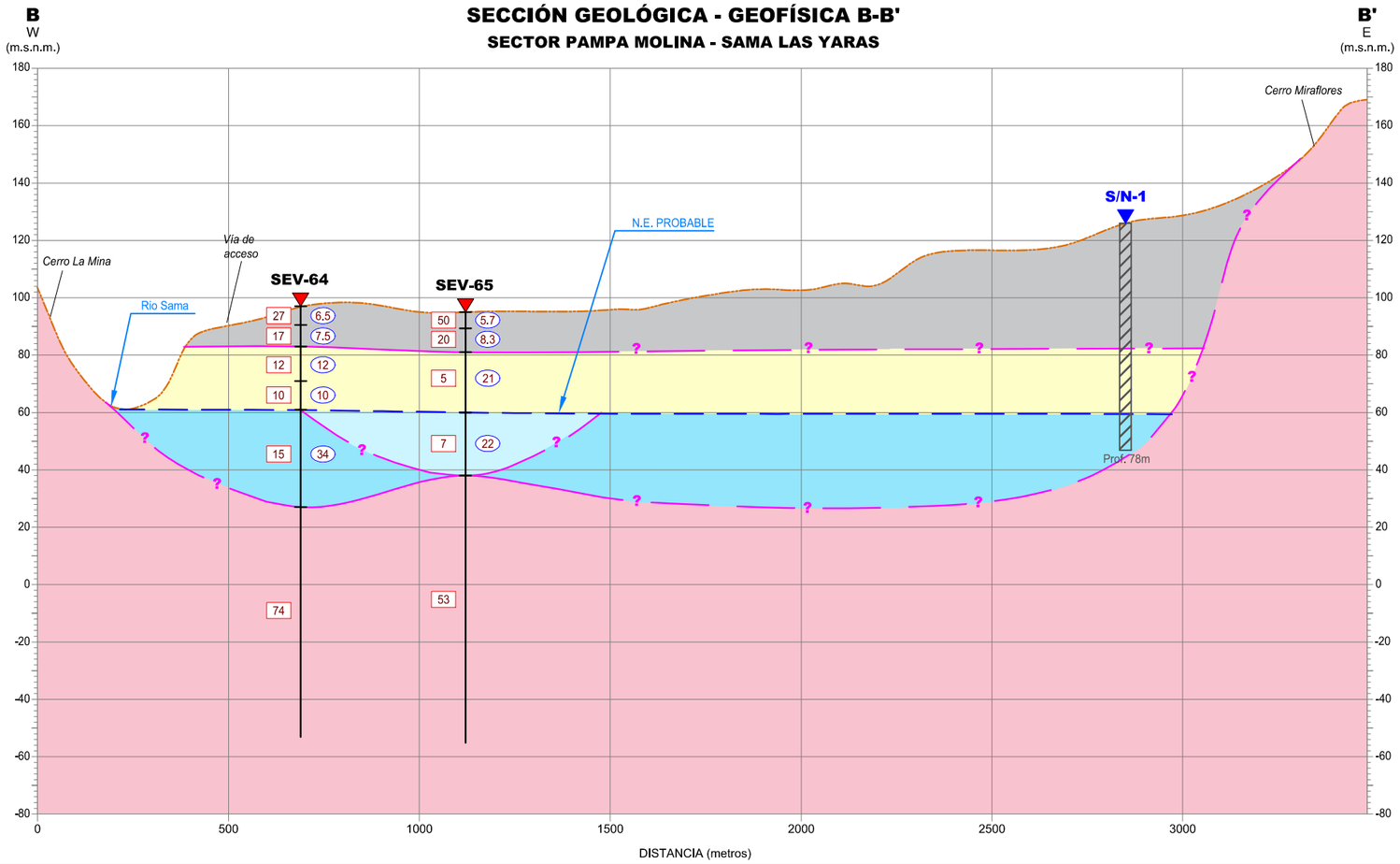
TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA A-A'

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 15

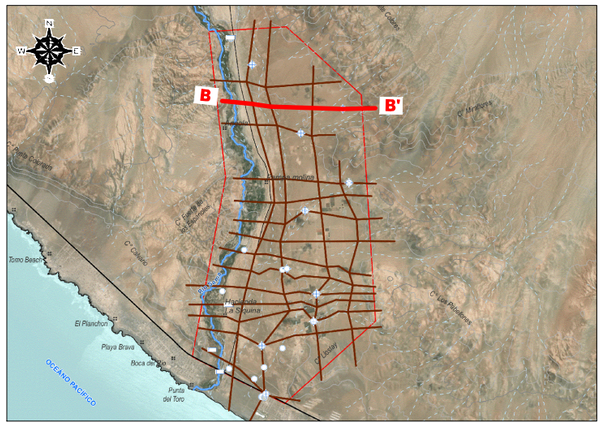
ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA

SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA B-B'

SECTOR PAMPA MOLINA - SAMA LAS YARAS



SECCIÓN B-B'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- **POZO** Pozo de agua subterránea
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, arena y limo, en estado seco. Regular permeabilidad.
- Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

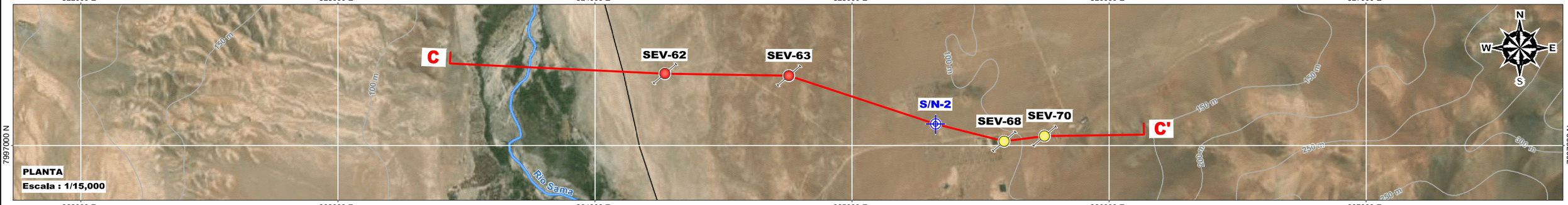
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

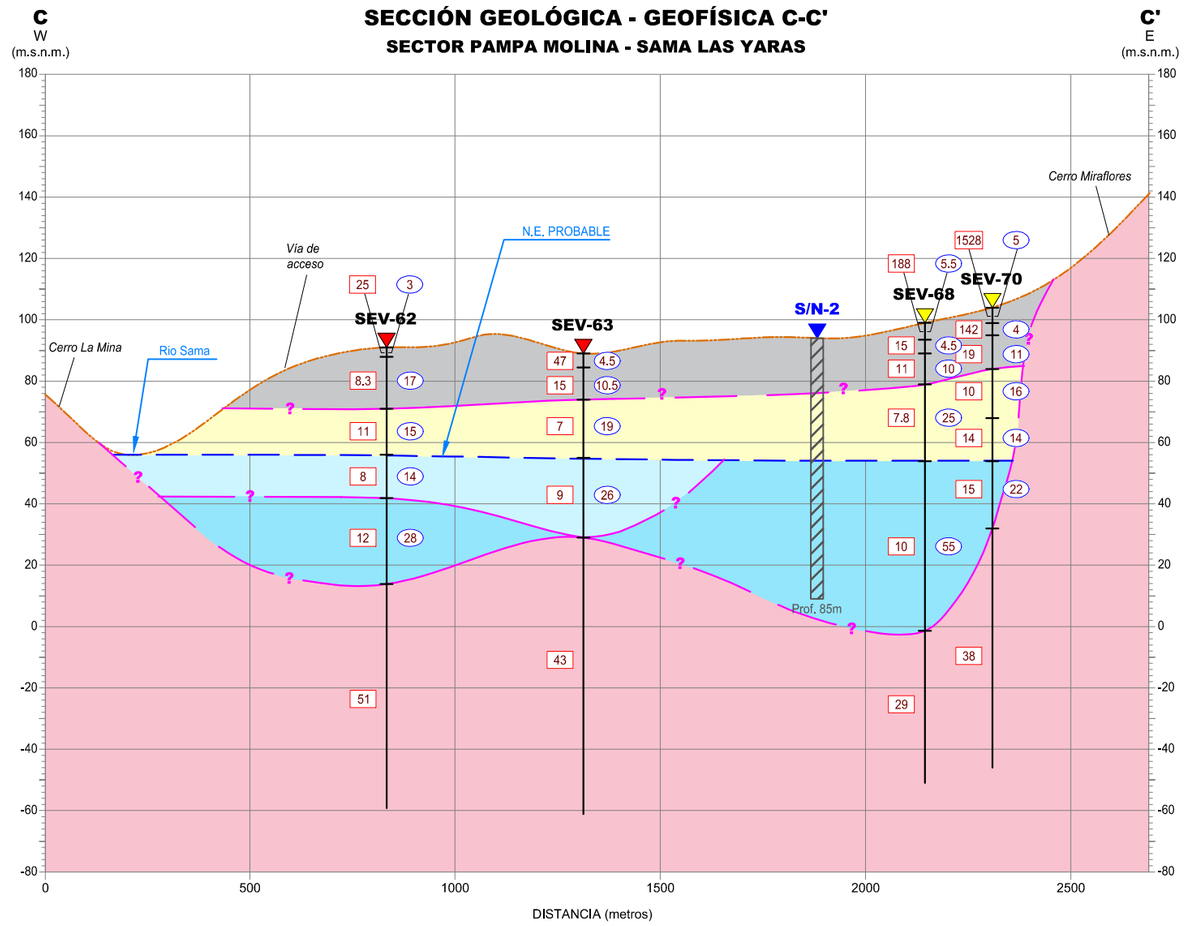
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA B-B'

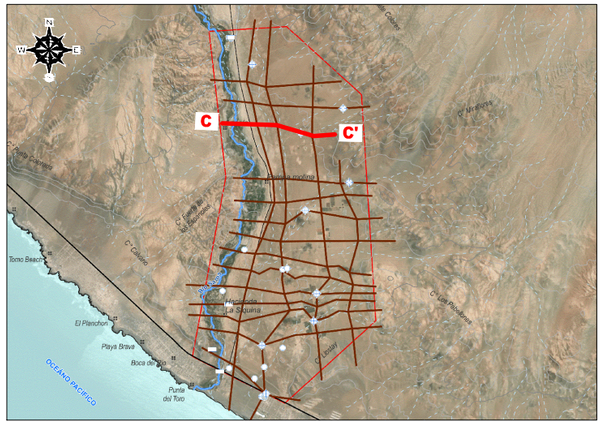
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 16

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA





SECCIÓN C-C'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Fundo Paraíso - EMAP 2024
- **POZO** Pozo de agua subterránea
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, canto rodado, boloneria, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Buena, regular y baja permeabilidad.
- Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

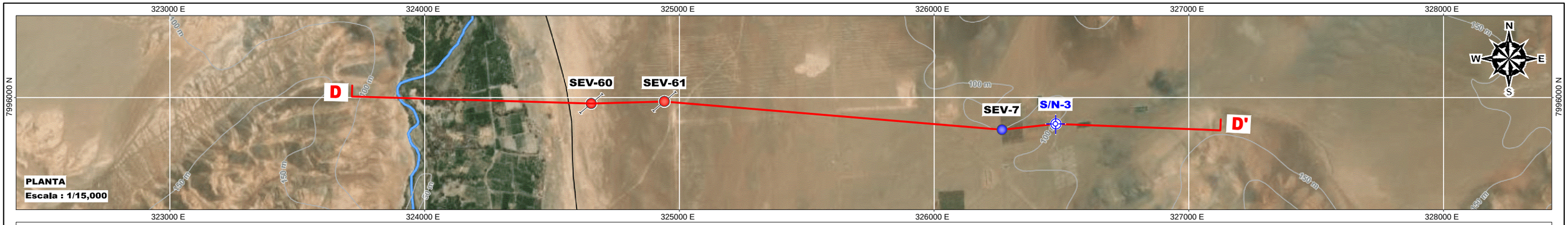
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

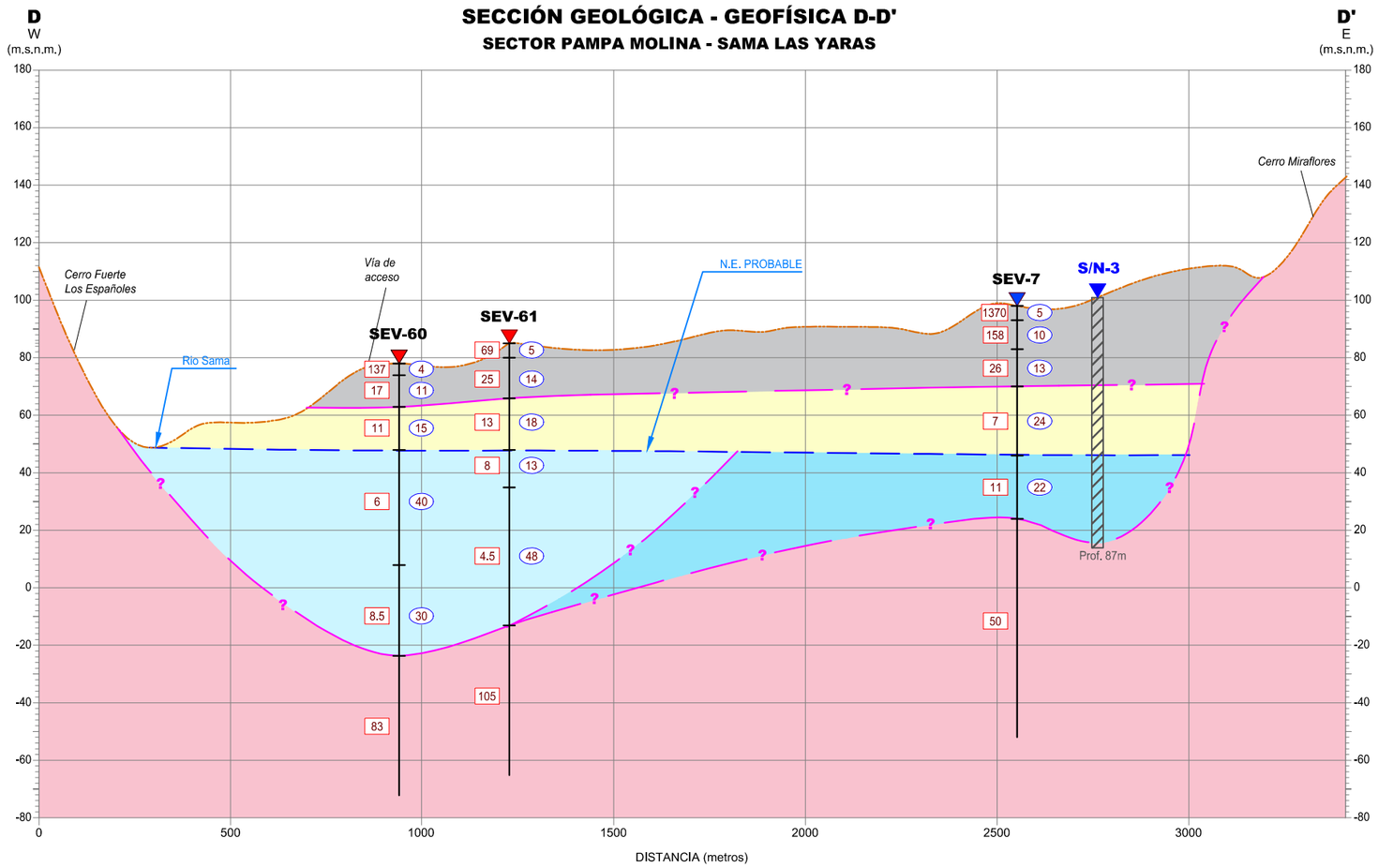
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA C-C'

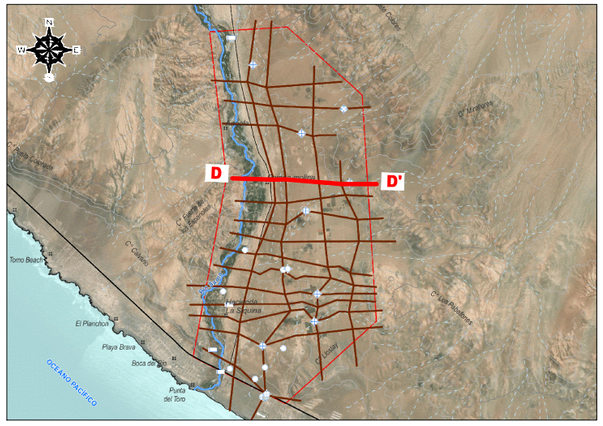
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 17

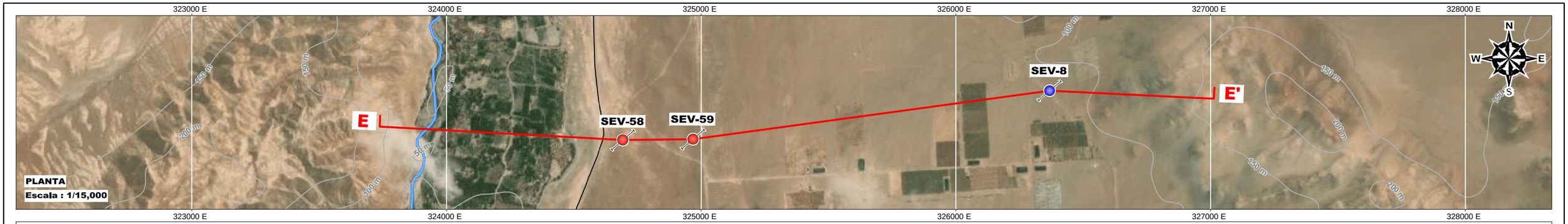
ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA

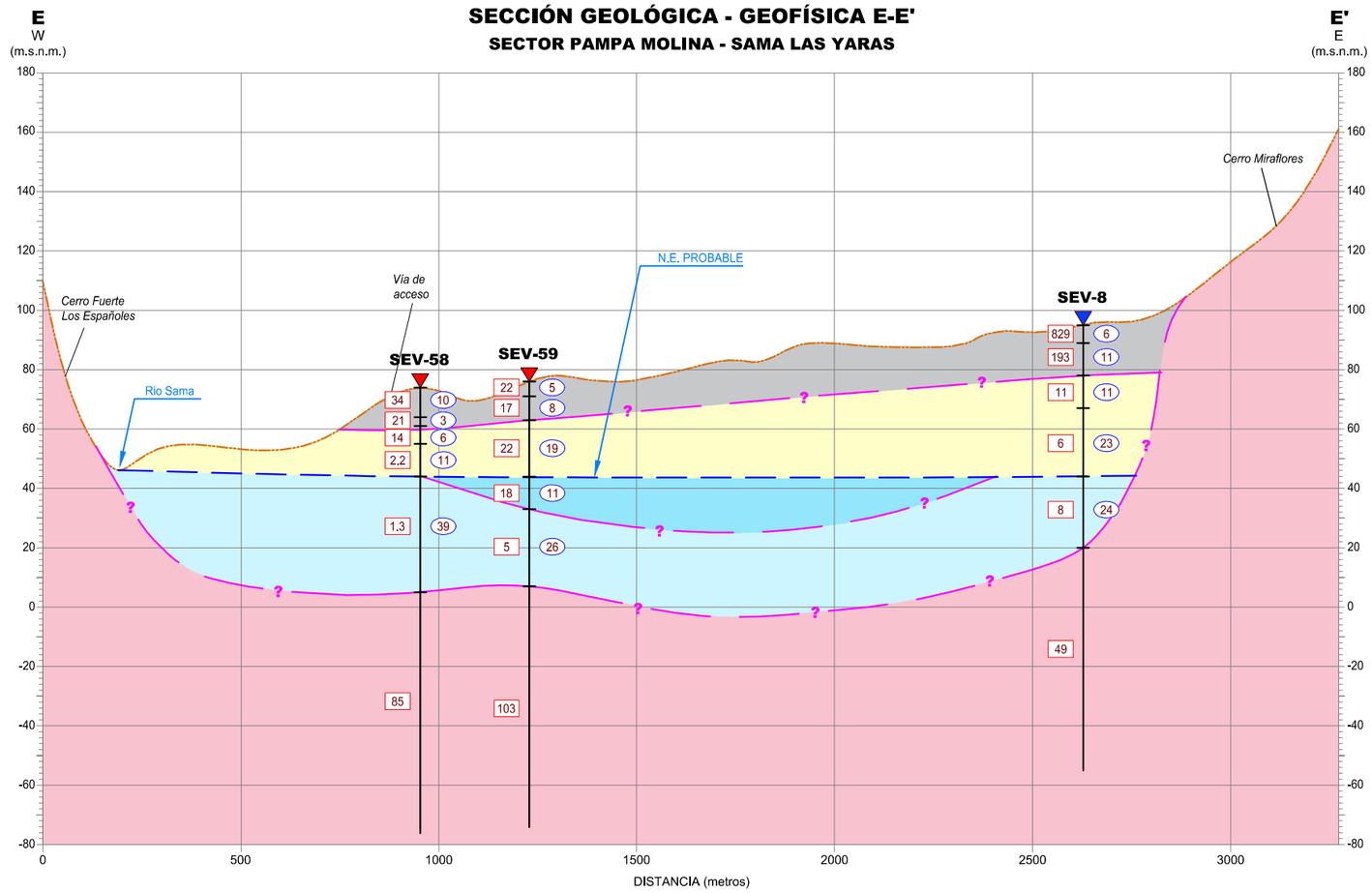




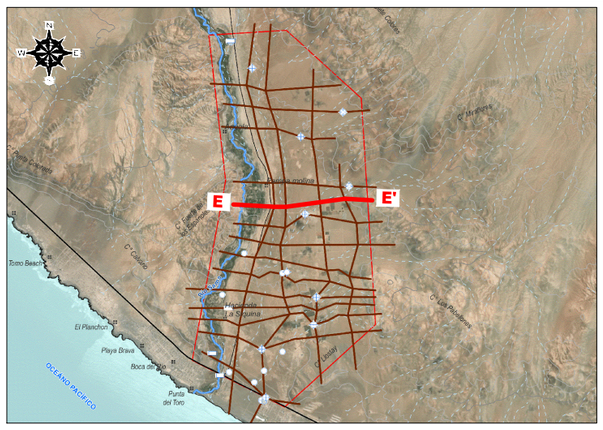
SECCIÓN D-D'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000


D
D'
Torno Beach
El Planchón
Playa Brava
Boca del río
Punta
del Toro
OCÉANO PACÍFICO
Pampa Molina
Sama las Yaras
Quebrada
Quebrada
Quebrada





SECCIÓN E-E'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** ▼ Sondaje Eléctrico Vertical Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- **SEV-1** ▼ Sondaje Eléctrico Vertical Fundo Sr. Mamani - EMAP 2018
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, canto rodado, arena y limo, en estado seco. Buena y regular permeabilidad.
- Grava, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Regular, baja y muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

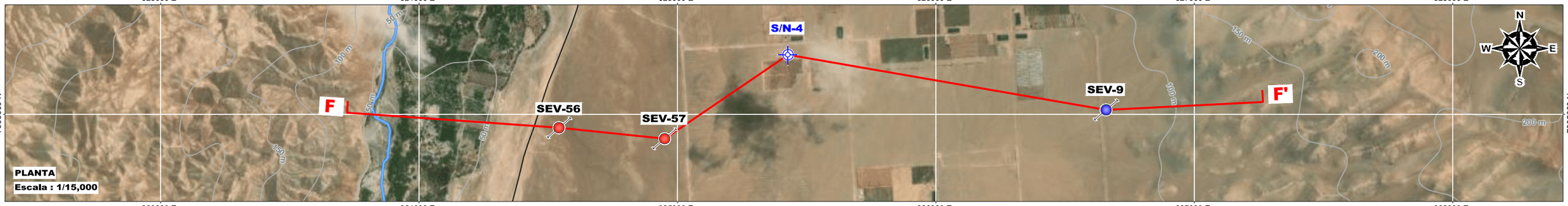
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

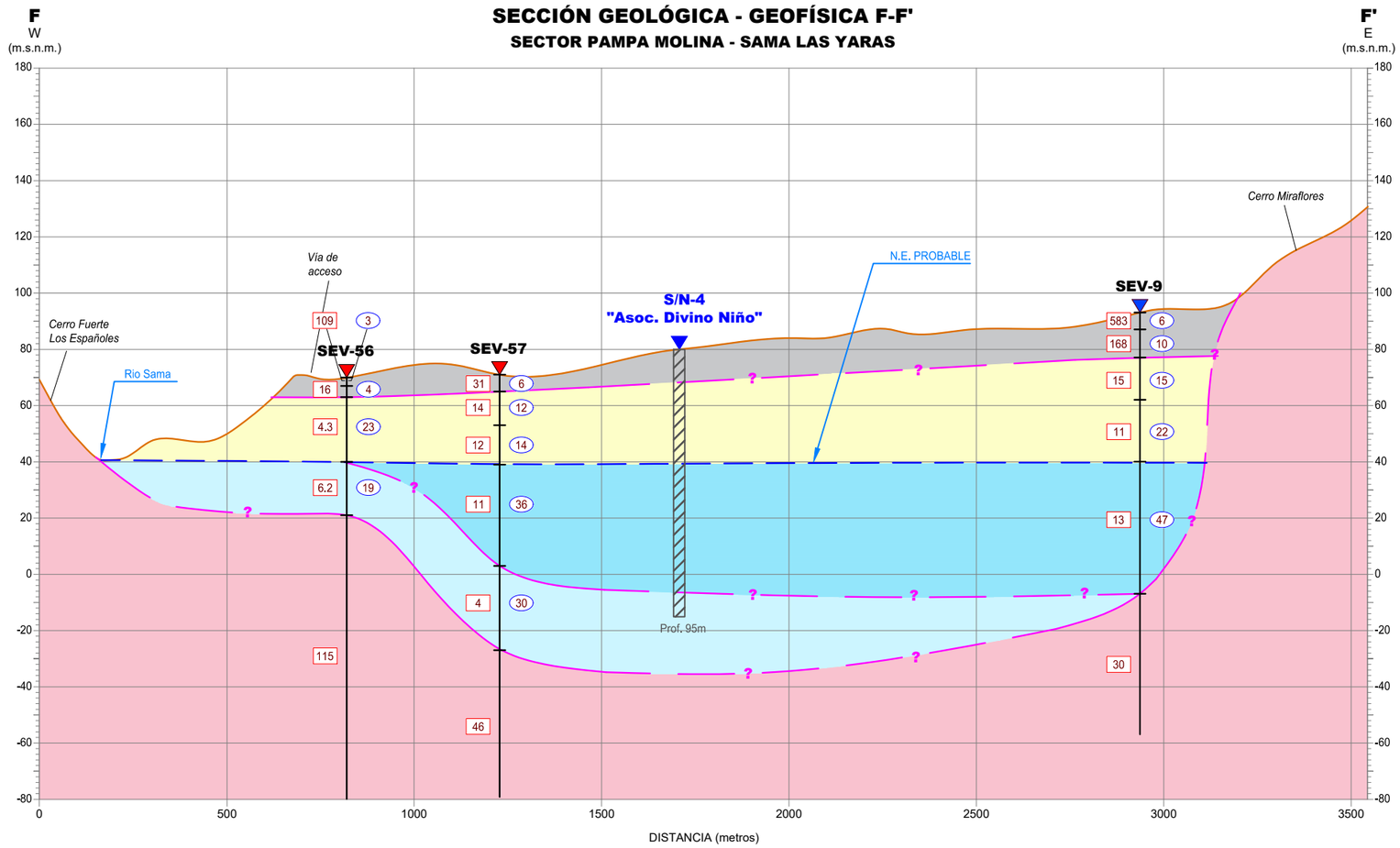
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA E-E'

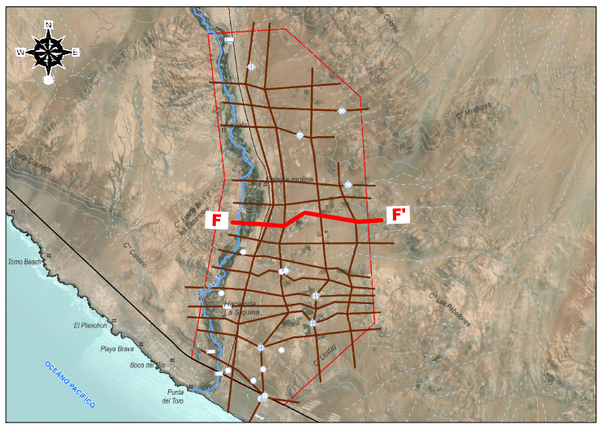
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 19

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA





SECCIÓN F-F'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** ▼ Sondaje Eléctrico Vertical Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- **SEV-1** ▼ Sondaje Eléctrico Vertical Fundo Sr. Mamani - EMAP 2018
- **POZO** ▼ Pozo de agua subterránea
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, canto rodado, arena y limo, en estado seco. Buena y regular permeabilidad.
- Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

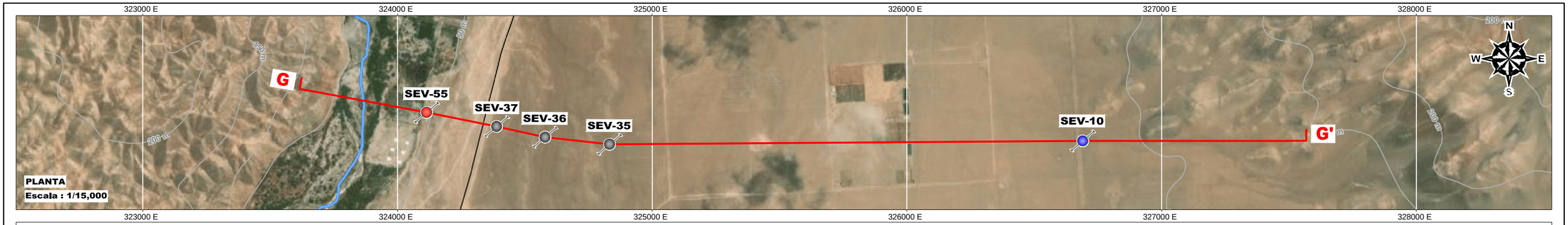
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

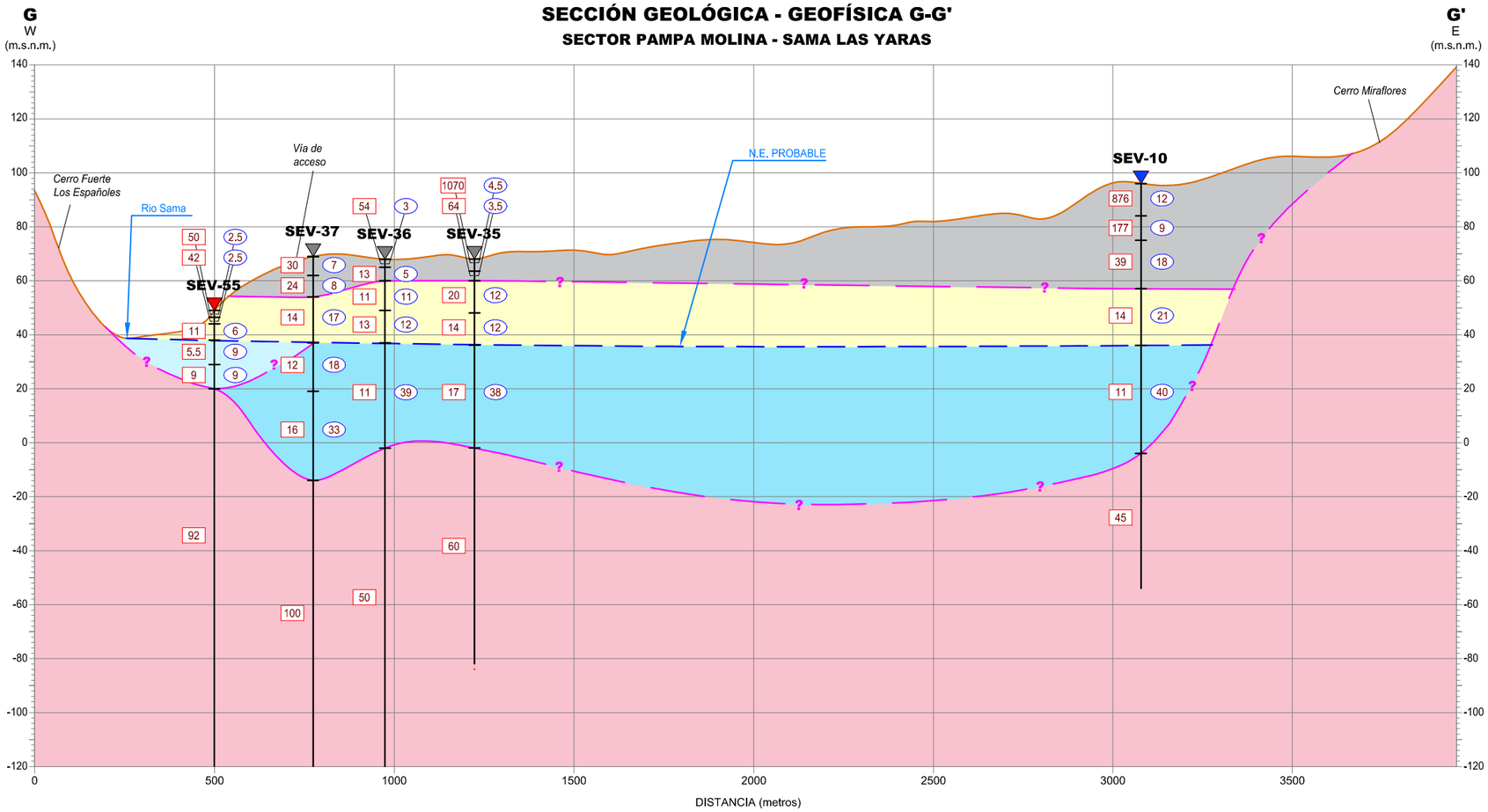
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA F-F'

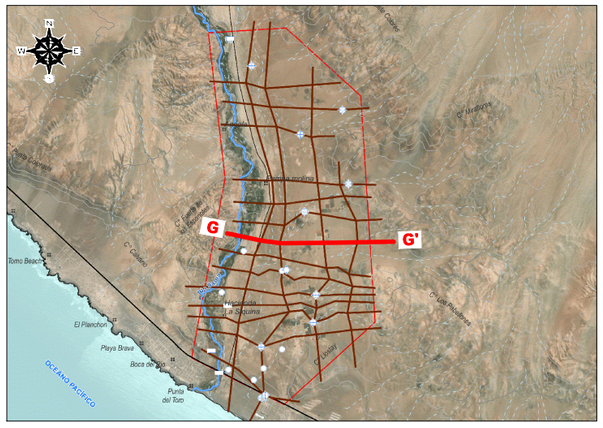
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 20

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA





SECCIÓN G-G'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Proyecto Wayu Perú - EMAP 2023
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Fundo Sr. Mamani - EMAP 2018
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, canto rodado, boloneria, arena y limo, en estado seco. Buena y regular permeabilidad.
- Grava, arena y limo, en estado seco. Regular a baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

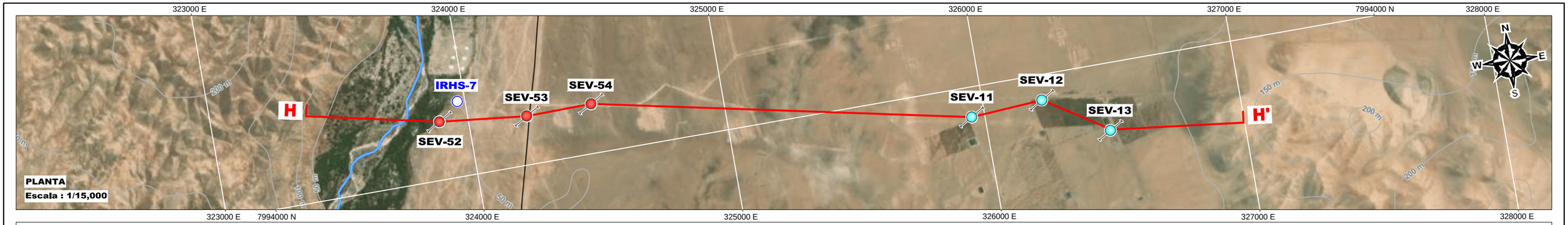
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA G-G'

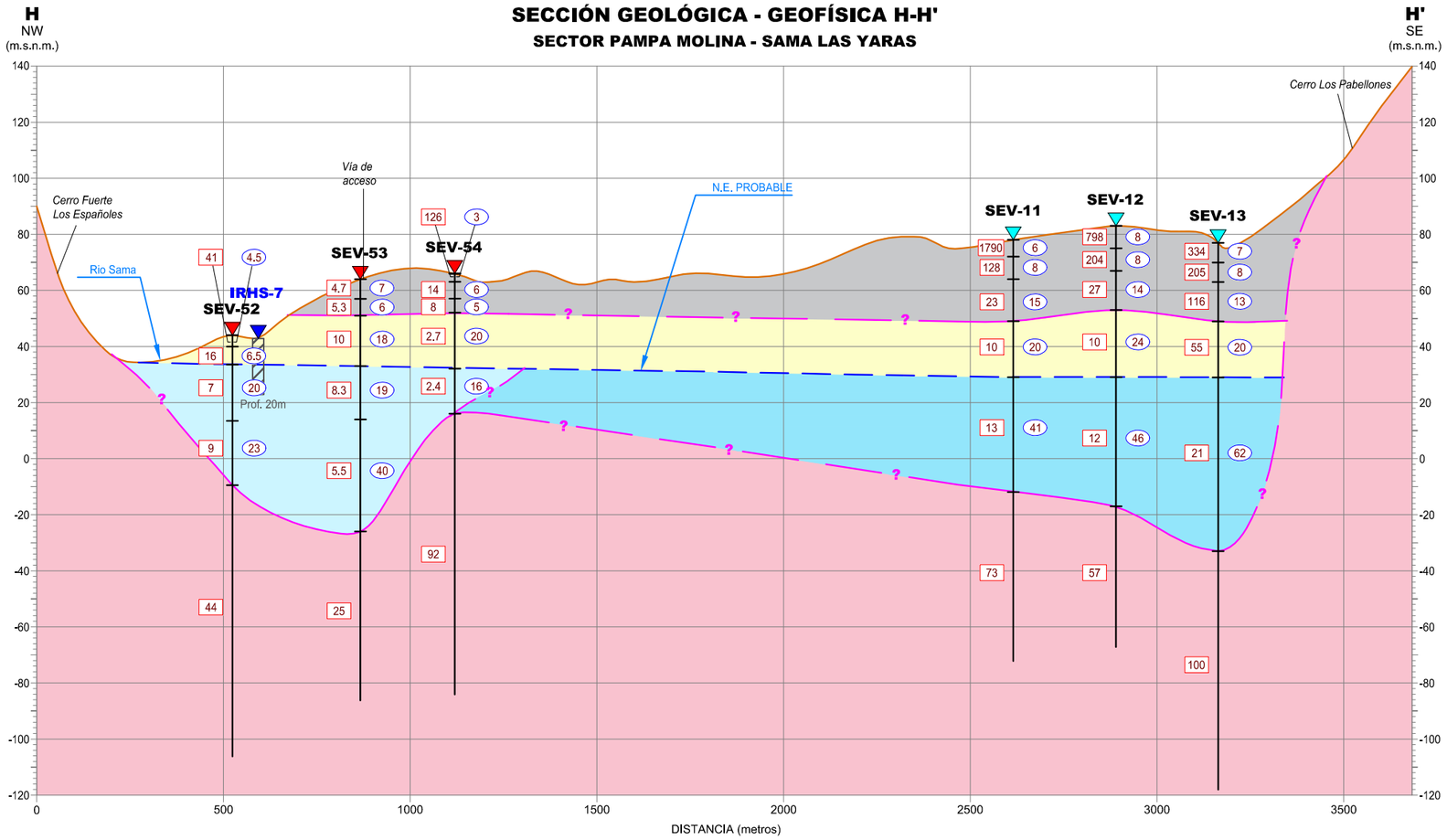
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 21

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA

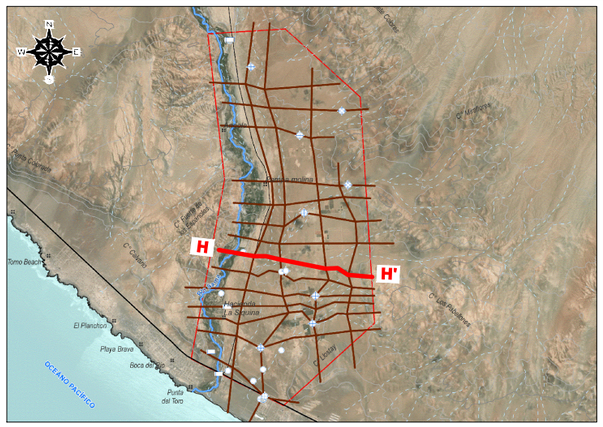


SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA H-H'

SECTOR PAMPA MOLINA - SAMA LAS YARAS



SECCIÓN H-H'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Asoc. Señor de Huanca - Ing.Pacheco 2019
- **POZO** Pozo de agua subterránea
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, canto rodado, boloneria, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Buena, regular y baja permeabilidad.
- Grava, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Regular, baja y muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

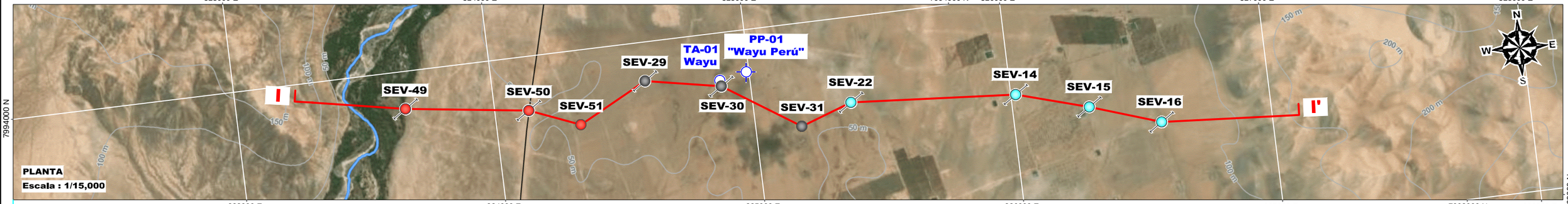
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

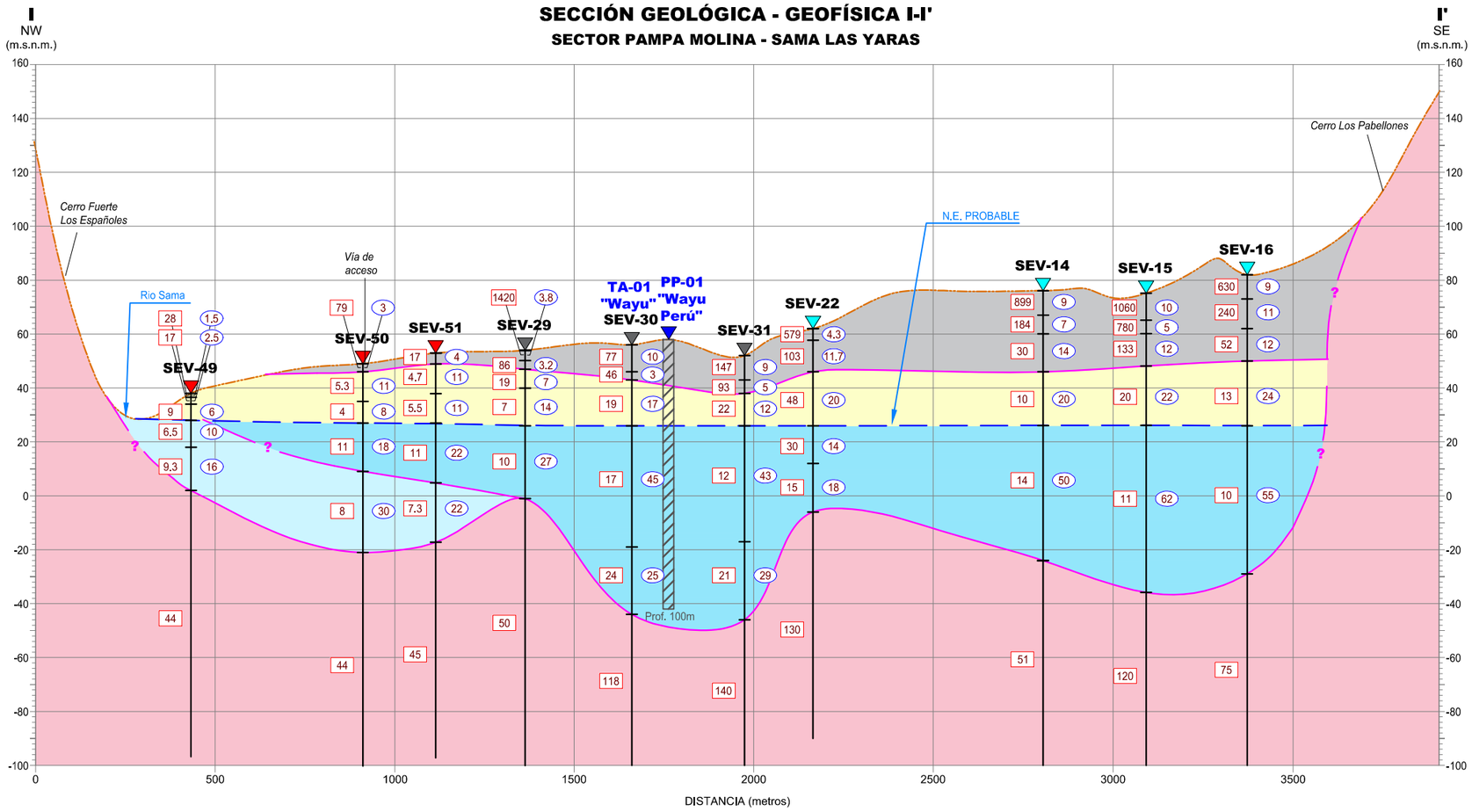
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA H-H'

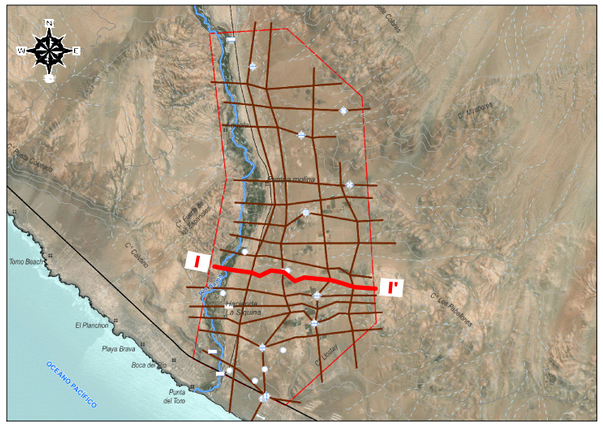
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 22

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA





SECCIÓN I-I'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Proyecto Wayu Perú - EMAP 2023
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Asoc. Señor de Huanca - Ing.Pacheco 2019
- **POZO** Pozo de agua subterránea
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, canto rodado, boloneria, arena y limo, en estado seco. Buena y regular permeabilidad.
- Grava, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Regular, baja y muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

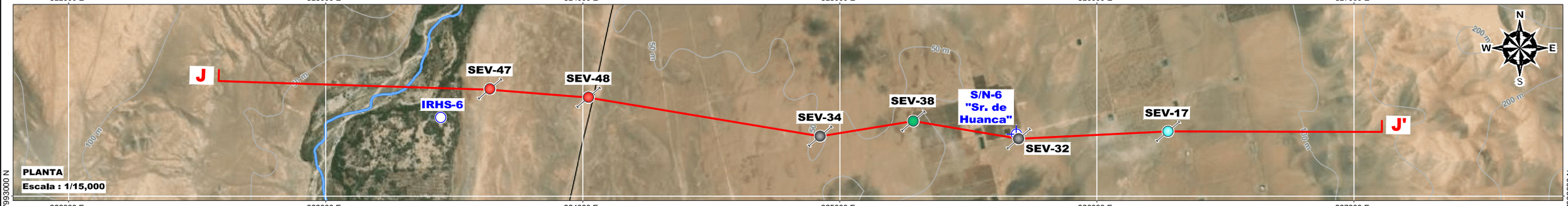
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

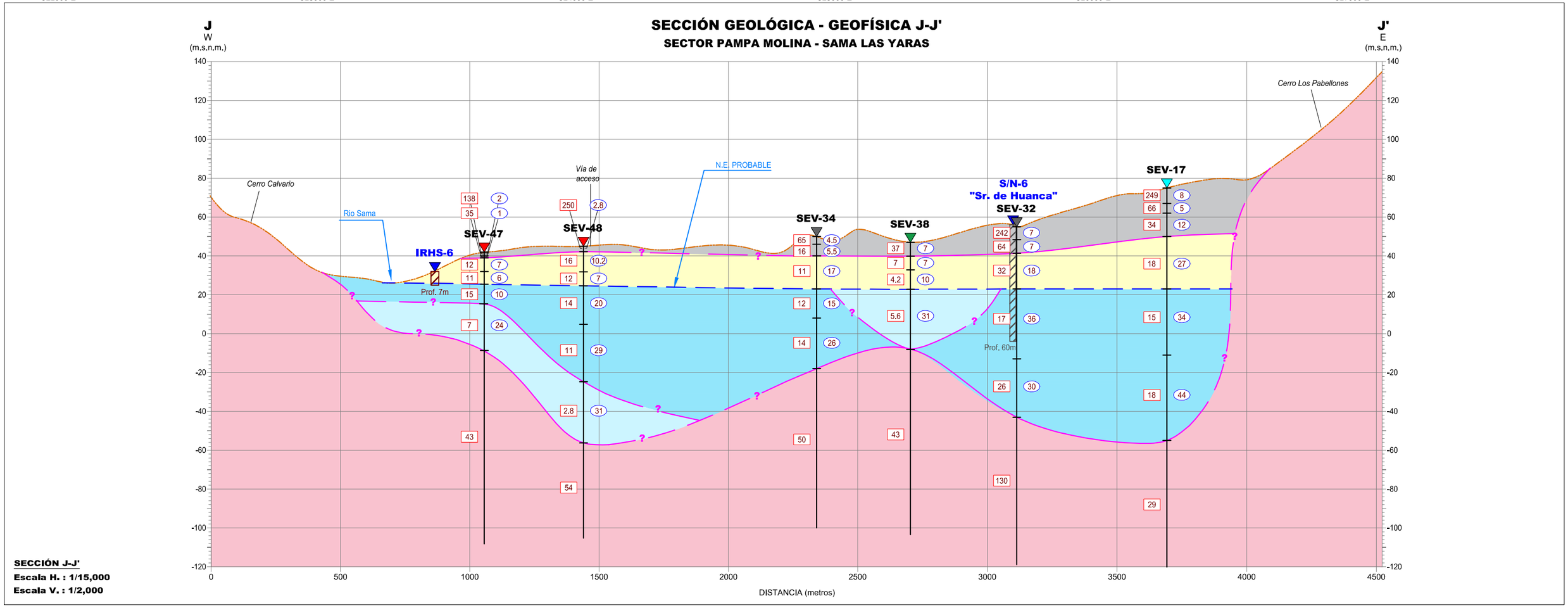
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

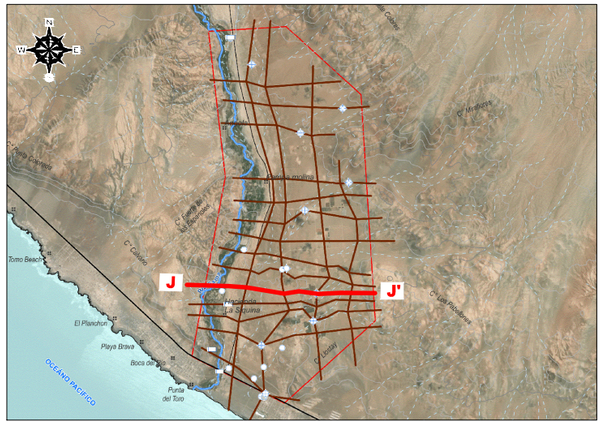
TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA I-I'

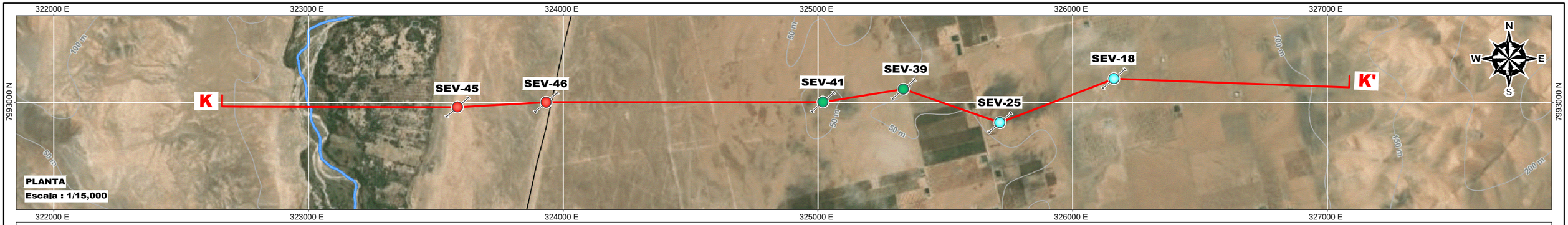
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 23

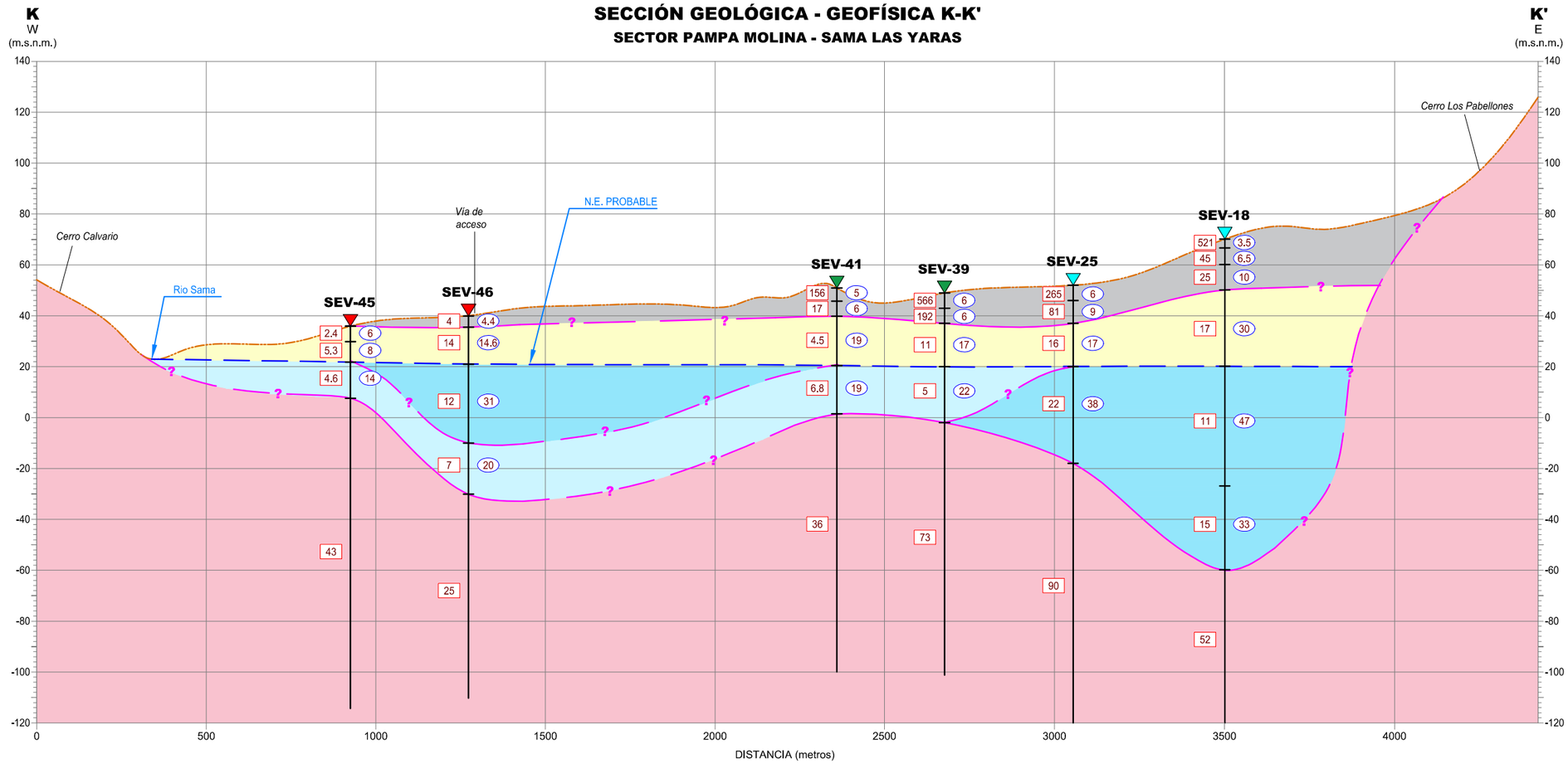
ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



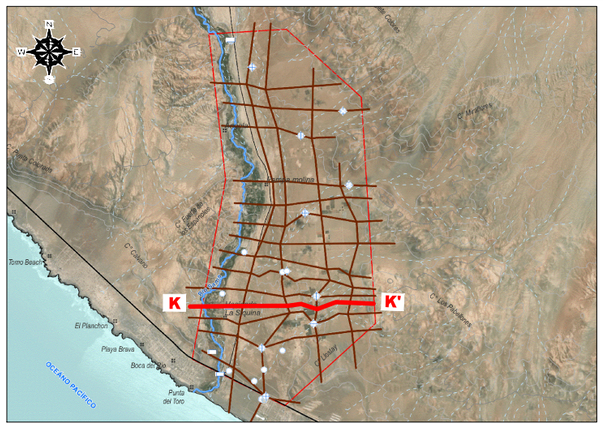



J
J'
Tomo Beach
El Planchon
Playa Brava
Bocas del Sama
Punta del Toro
OCEANO PACIFICO
La Yarada
Pampa Molina
Pampa Jarosita
Pampa Lechuza
Q. Calvario
Q. Los Pabellones
Q. Sama
Q. Uchusuma
Q. Tala
Q. Chuntay
Q. Tacalaya
Q. Ticaco
Q. Ticaco Grande
Q. Ticaco Chico
Q. Tala Grande
Q. Tala Chico
Q. Tala Pequeño
Q. Chuntay Grande
Q. Chuntay Chico
Q. Chuntay Pequeño
Q. Tacalaya Grande
Q. Tacalaya Chico
Q. Tacalaya Pequeño
Q. Ticaco Grande
Q. Ticaco Chico
Q. Ticaco Pequeño
Q. Uchusuma Grande
Q. Uchusuma Chico
Q. Uchusuma Pequeño





SECCIÓN K-K'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical compl. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Asoc. Señor de Huanca - Ing.Pacheco 2019
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, canto rodado, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Buena, regular y baja permeabilidad.
- Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

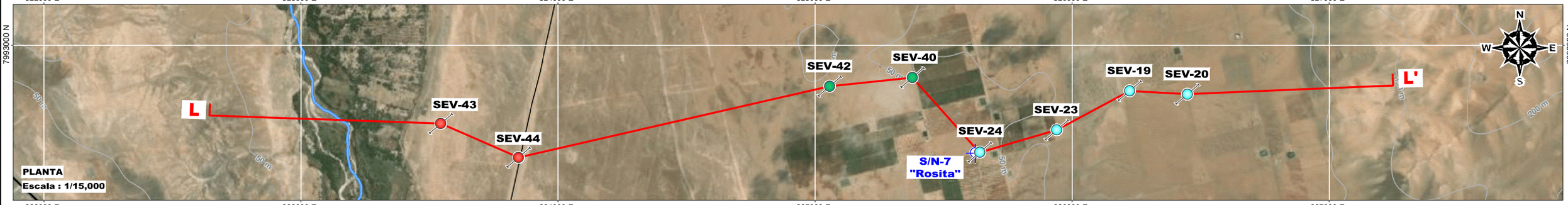
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

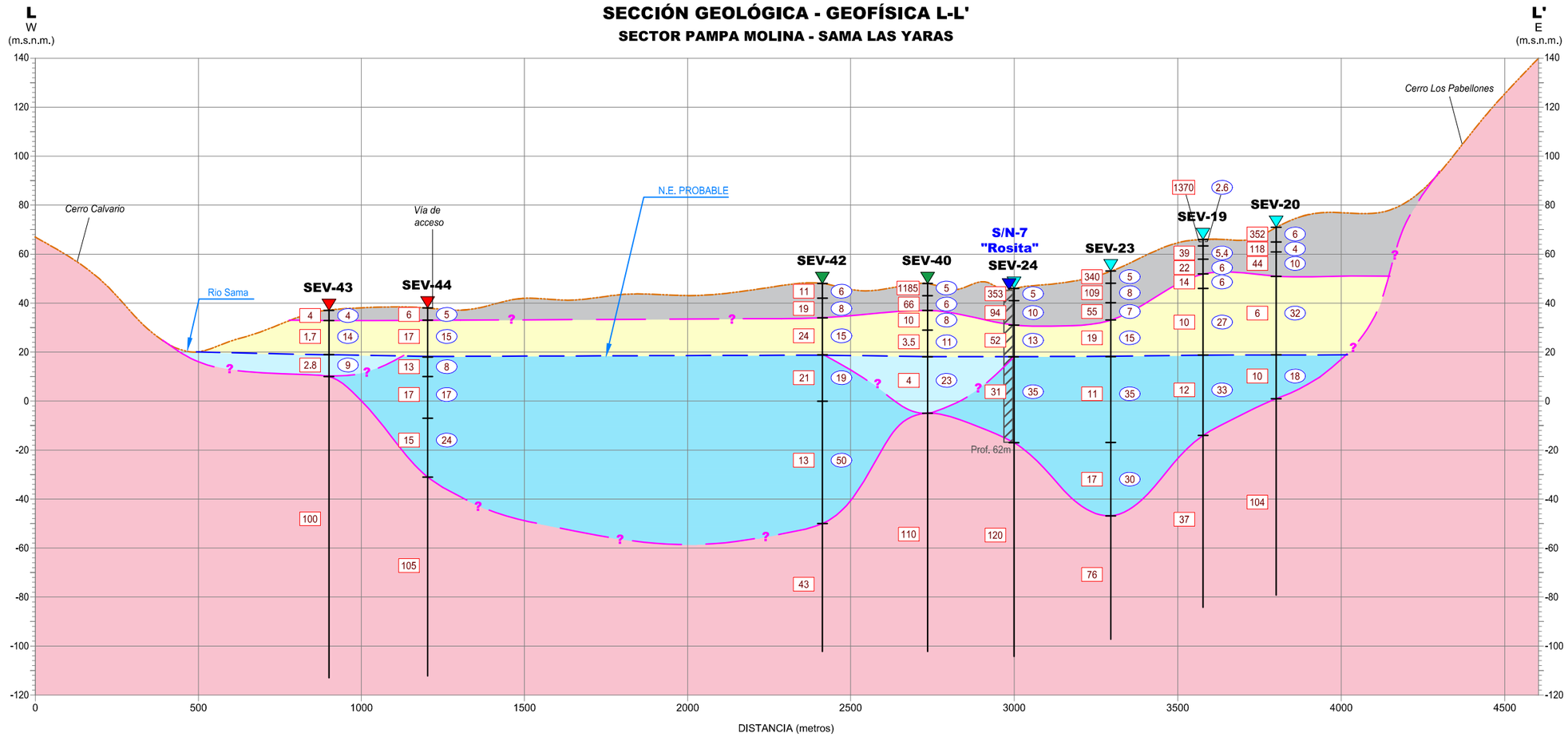
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA K-K'

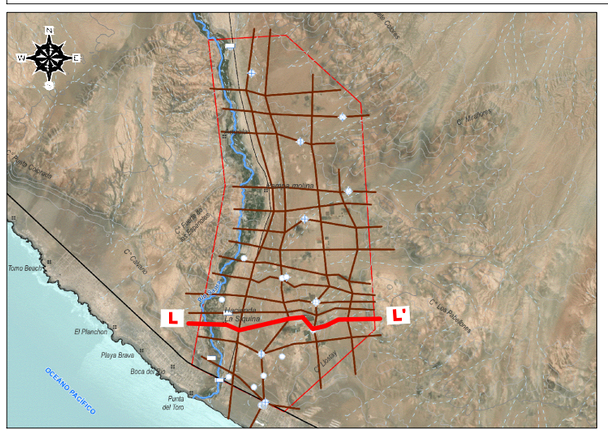
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 25

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA





SECCIÓN L-L'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical compl. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Asoc. Señor de Huanca - Ing.Pacheco 2019
- **POZO** Pozo de agua subterránea
- Resistividad (ohm - m)
- Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, canto rodado, boloneria, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Buena, regular y baja permeabilidad.
- Grava, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Regular, baja y muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

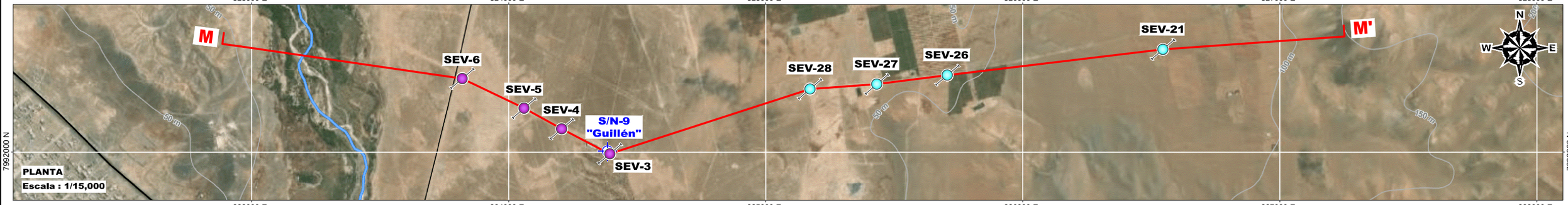
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

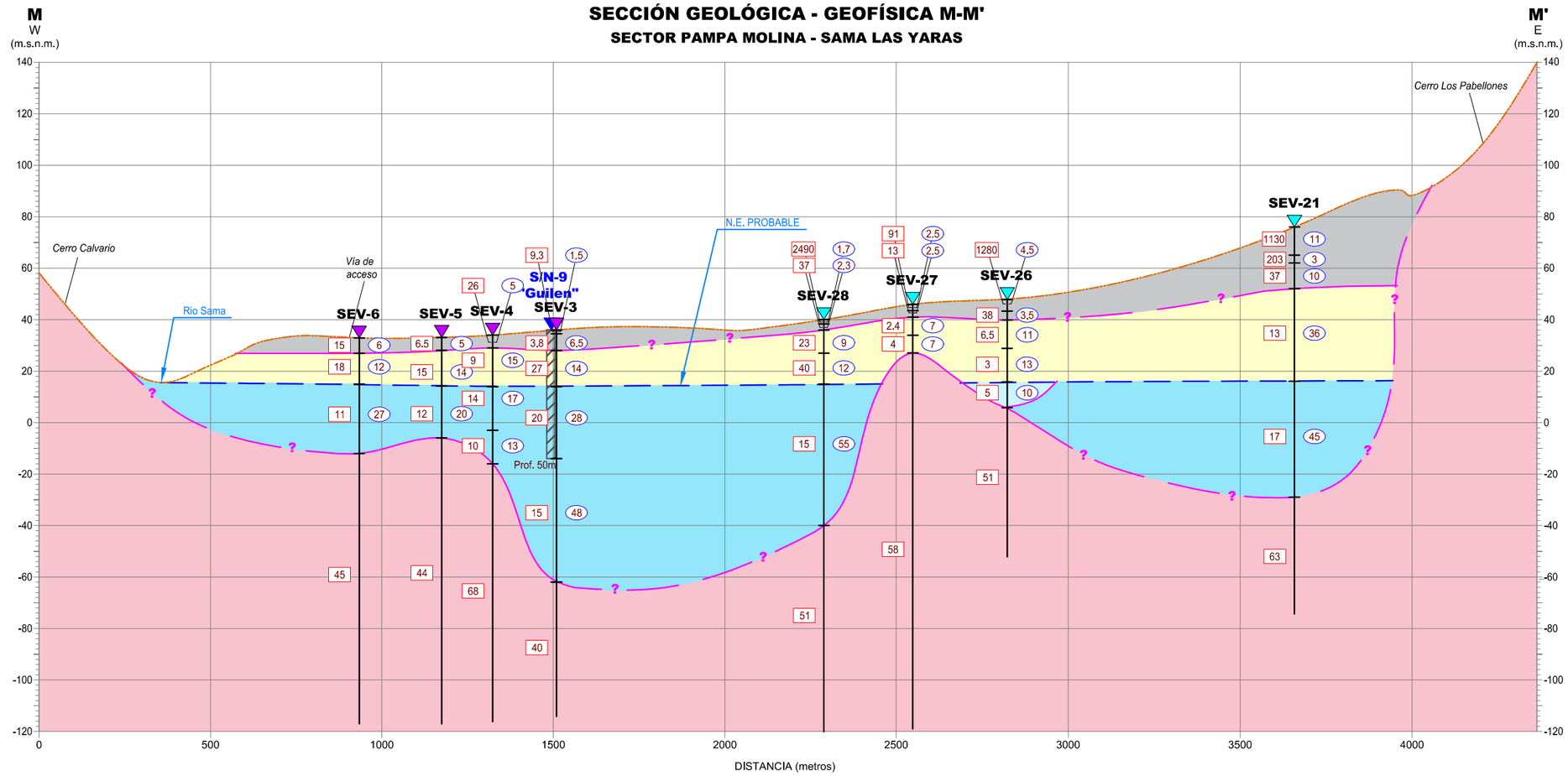
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA L-L'

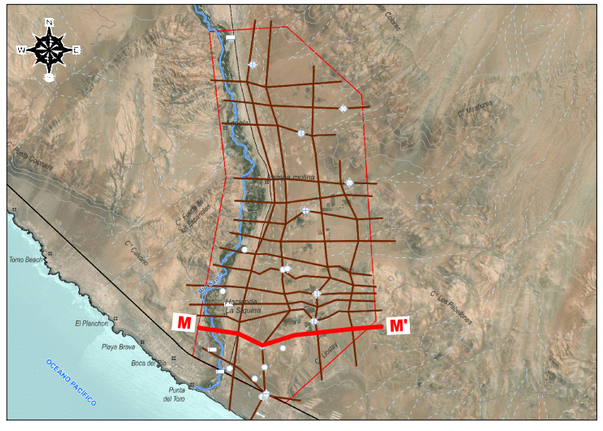
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 26

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA





SECCIÓN M-M'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Asoc. Señor de Huanca - Ing. Pacheco 2019 y 2023
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Fundo Sr. Guillén - EMAP 2017
- **POZO** Pozo de agua subterránea
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, canto rodado, boloneria, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Buena, regular y baja permeabilidad.
- Grava, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Regular, baja y muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

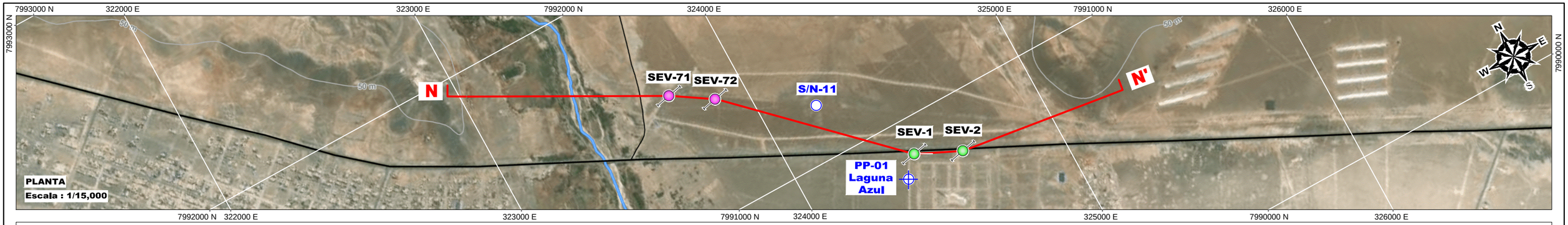
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

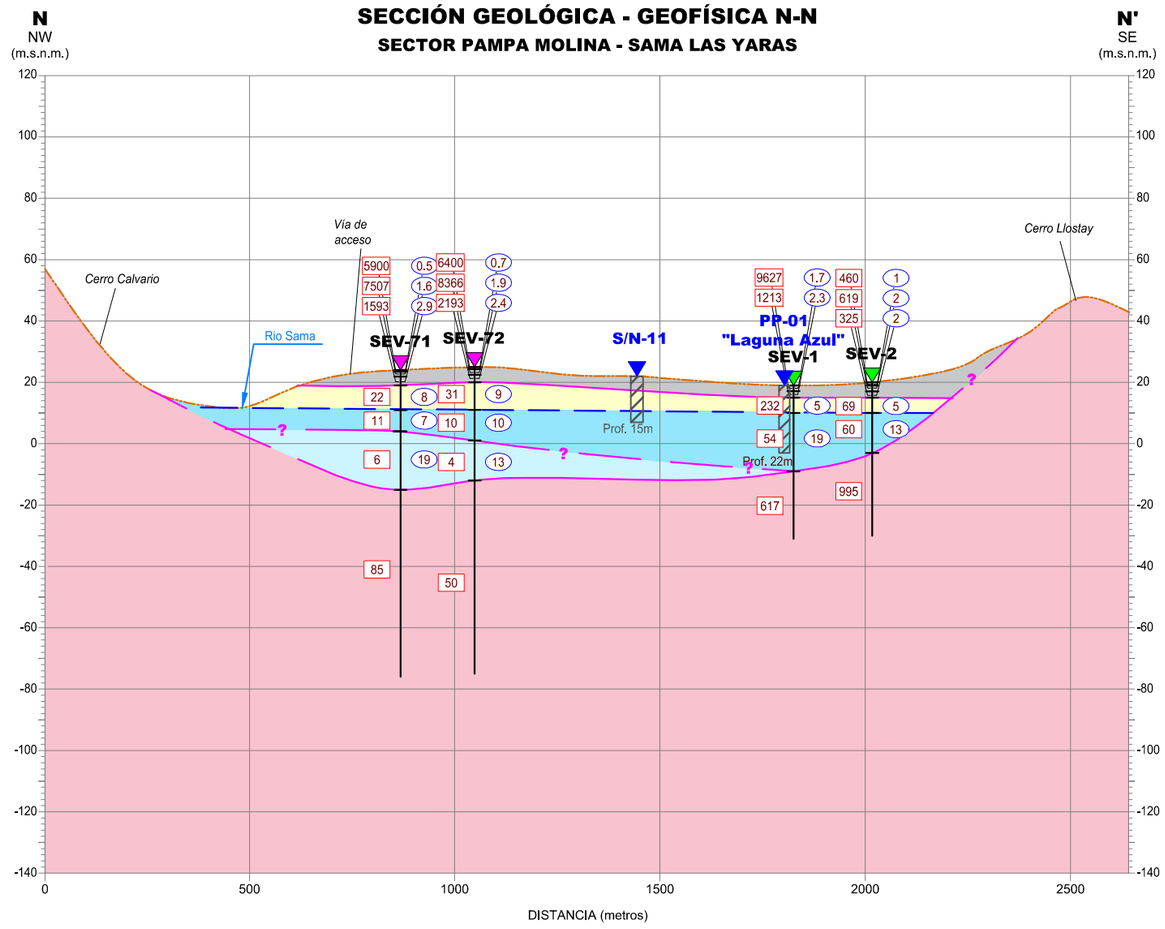
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA M-M'

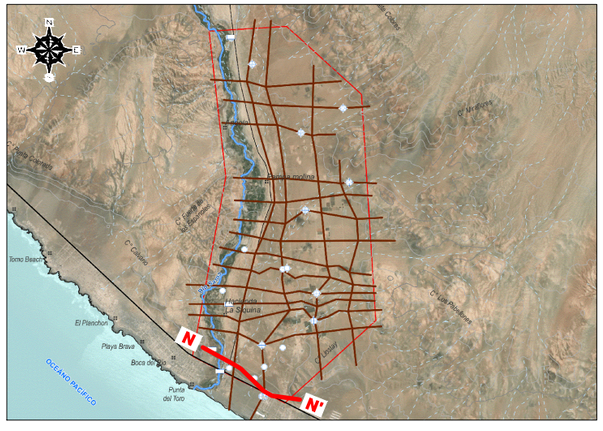
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 27

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA





SECCIÓN N-N'
Escala H. : 1/15,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Hda. La Siquina - Ing. Mita 2024
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Proyecto Laguna Azul - EMAP 2014
- **POZO** Pozo de agua subterránea
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Conchuelas, conglomerados, grava y arena, en estado seco. Buena permeabilidad.
- Conchuelas, conglomerados, grava, arena y limo, en estado seco. Buena a regular permeabilidad.
- ACUÍFERO. Conchuelas, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Conchuelas, arena, grava y limo, en estado saturado. Buena a regular permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

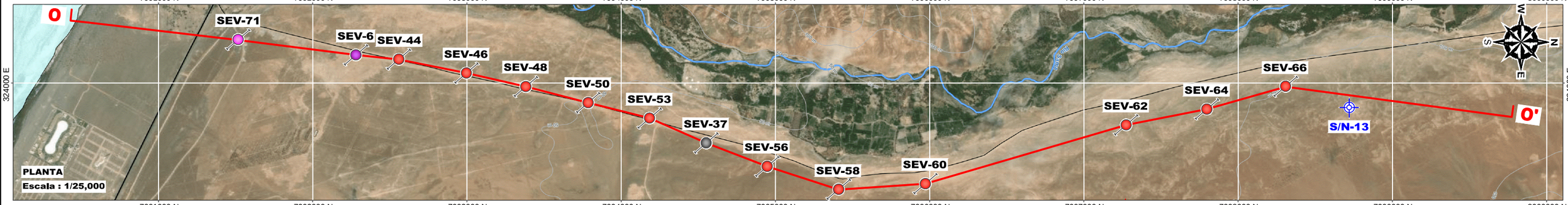
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA N-N'

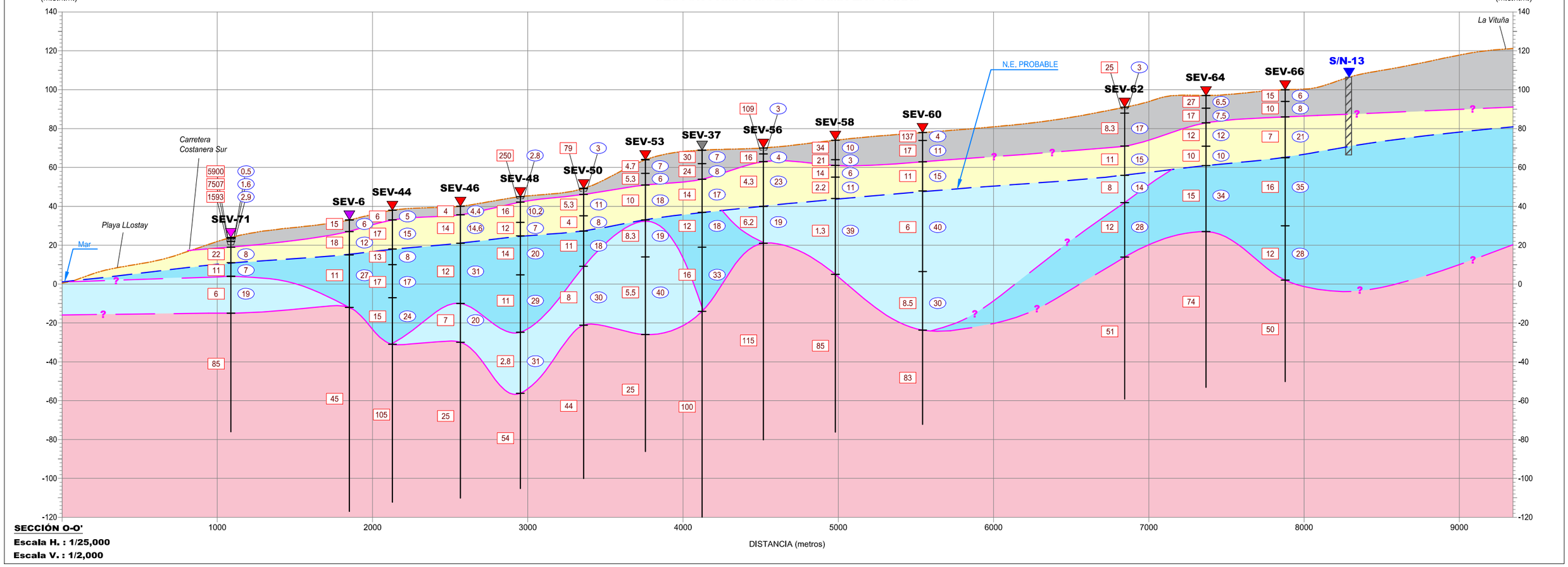
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 28

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA O-O'

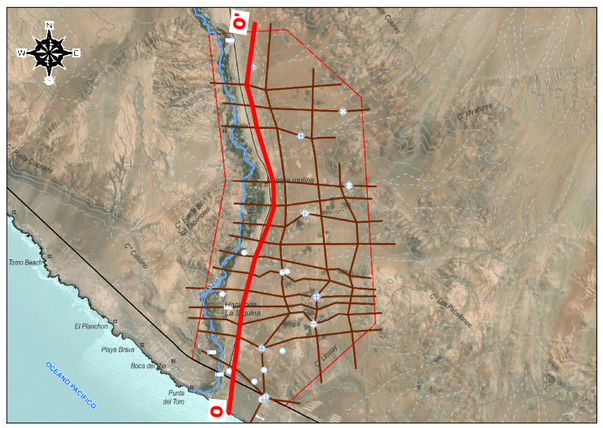
SECTOR PAMPA MOLINA - SAMA LAS YARAS



SECCIÓN O-O'

Escala H. : 1/25,000

Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Sector Siquina - Mita 2024
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP 2024
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Proyecto Wayu Perú - EMAP 2023
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical Fundo Sr. Guillén - EMAP 2017
- **POZO** Pozo de agua subterránea
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, canto rodado, boloneria, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Buena, regular y baja permeabilidad.
- Grava, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Regular, baja y muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

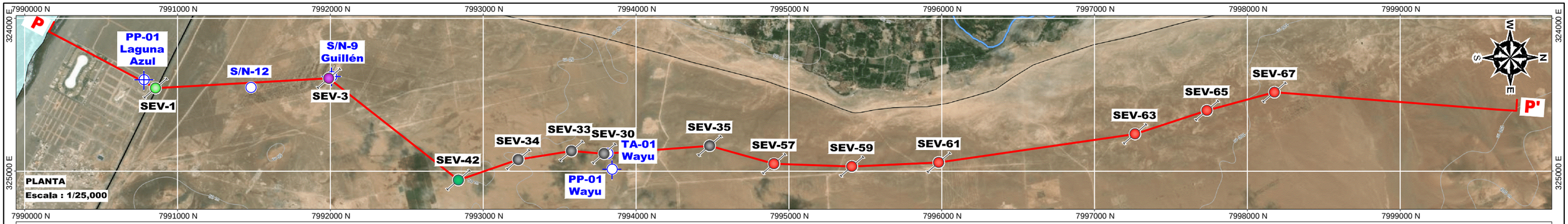
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA O-O'

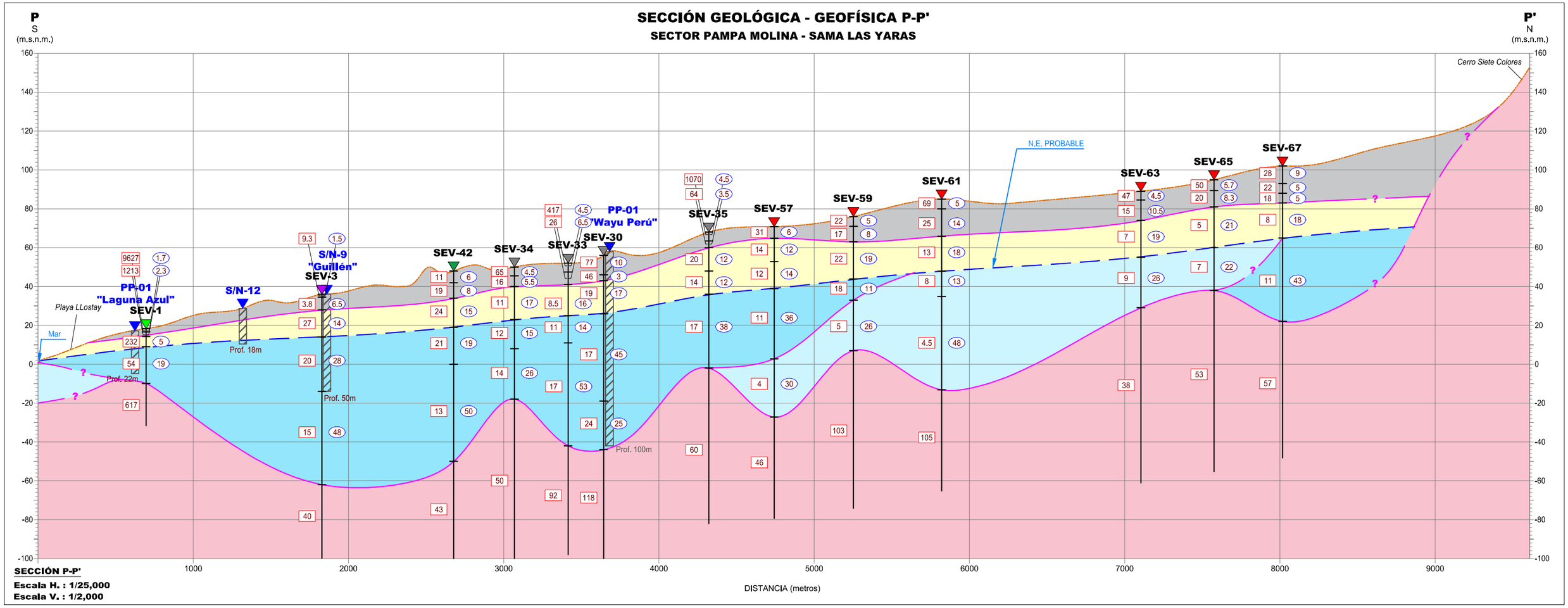
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 29

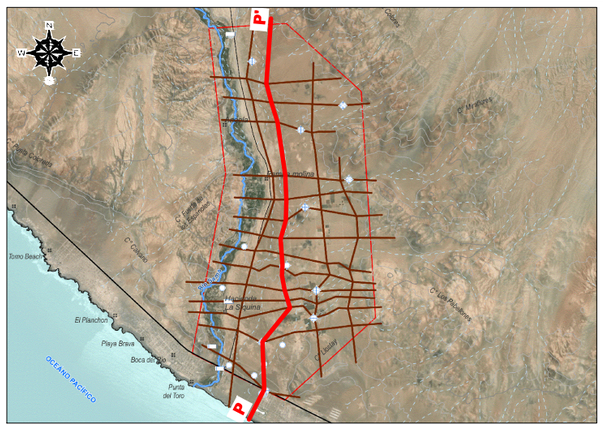
ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA

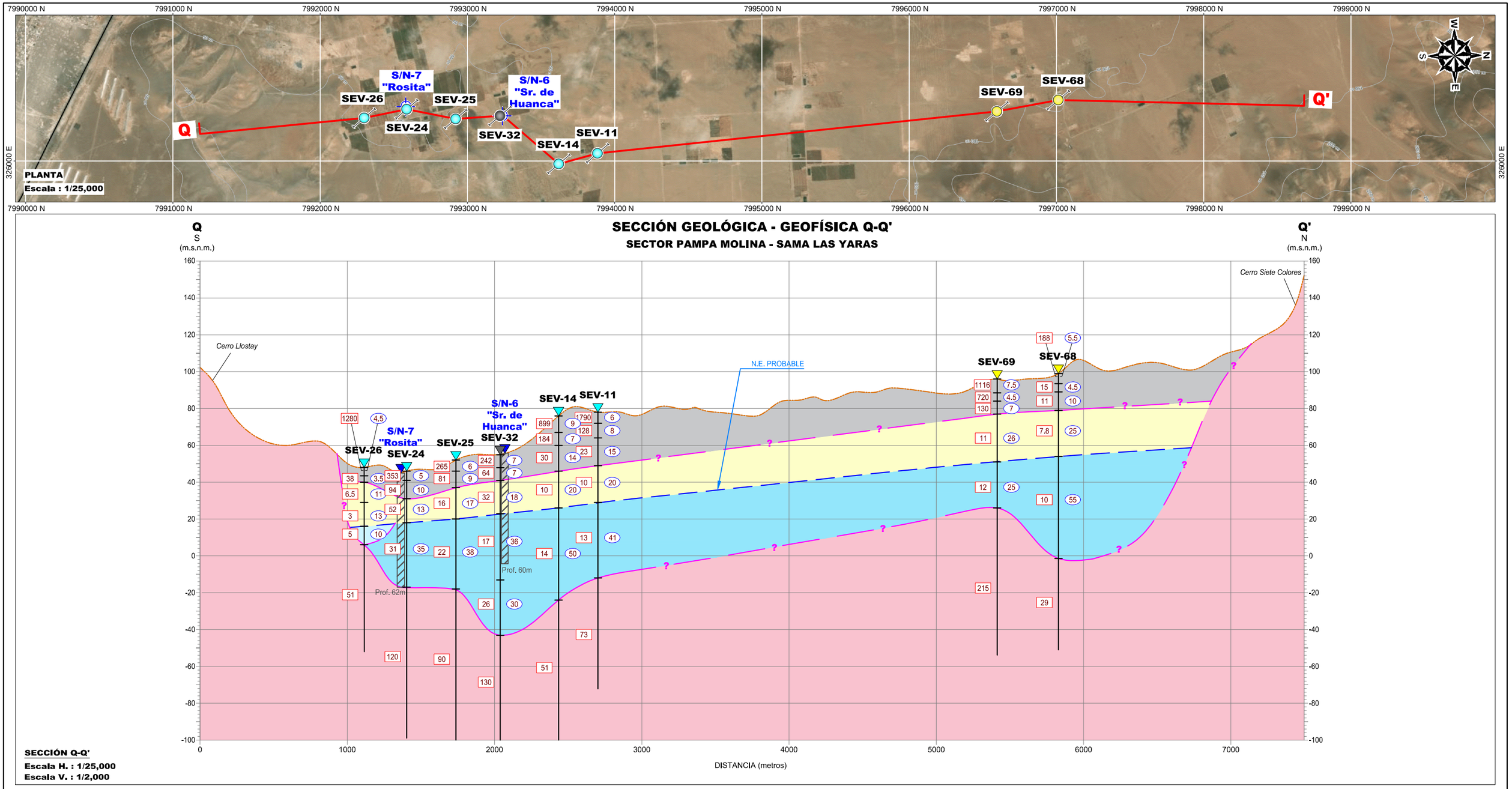


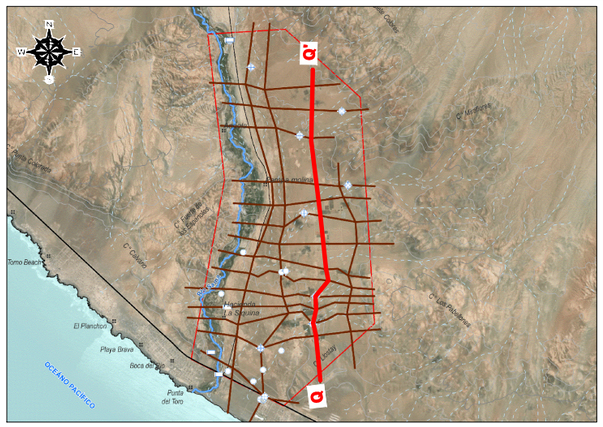
SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA P-P'

SECTOR PAMPA MOLINA - SAMA LAS YARAS




P
P'
N
W
E
Toro Beach
El Planchon
Playa Brava
Boca del Toro
Punta del Toro
OCÉANO PACÍFICO
La Laguna
Quebrada Sama
Quebrada Caplina
Quebrada Uchusuma
Quebrada Los Palos
Quebrada Tacalaya
Quebrada Cinco Esquinas
Quebrada Cruz Verde
Quebrada Cruz Blanca
Quebrada Cruz Roja
Quebrada Cruz Negra
Quebrada Cruz Amarilla
Quebrada Cruz Azul





SIMBOLOGIA

- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical Fundo Paraíso - EMAP 2024
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical Proyecto Wayu Perú - EMAP 2023
- SEV-1 — Sondaje Eléctrico Vertical Asoc. Señor de Huanca - Pacheco 2019
- POZO — Pozo de agua subterránea
- 40 — Resistividad (ohm - m)
- 2 — Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, canto rodado, boloneria, arena y limo, en estado seco. Buena y regular permeabilidad.
- Grava, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Regular, baja y muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

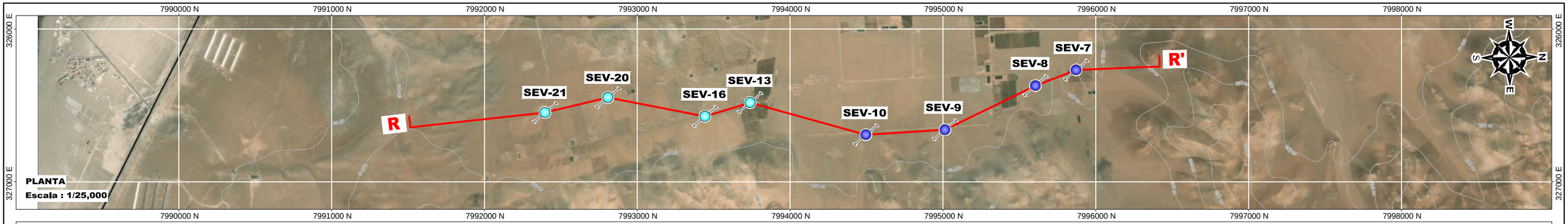
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

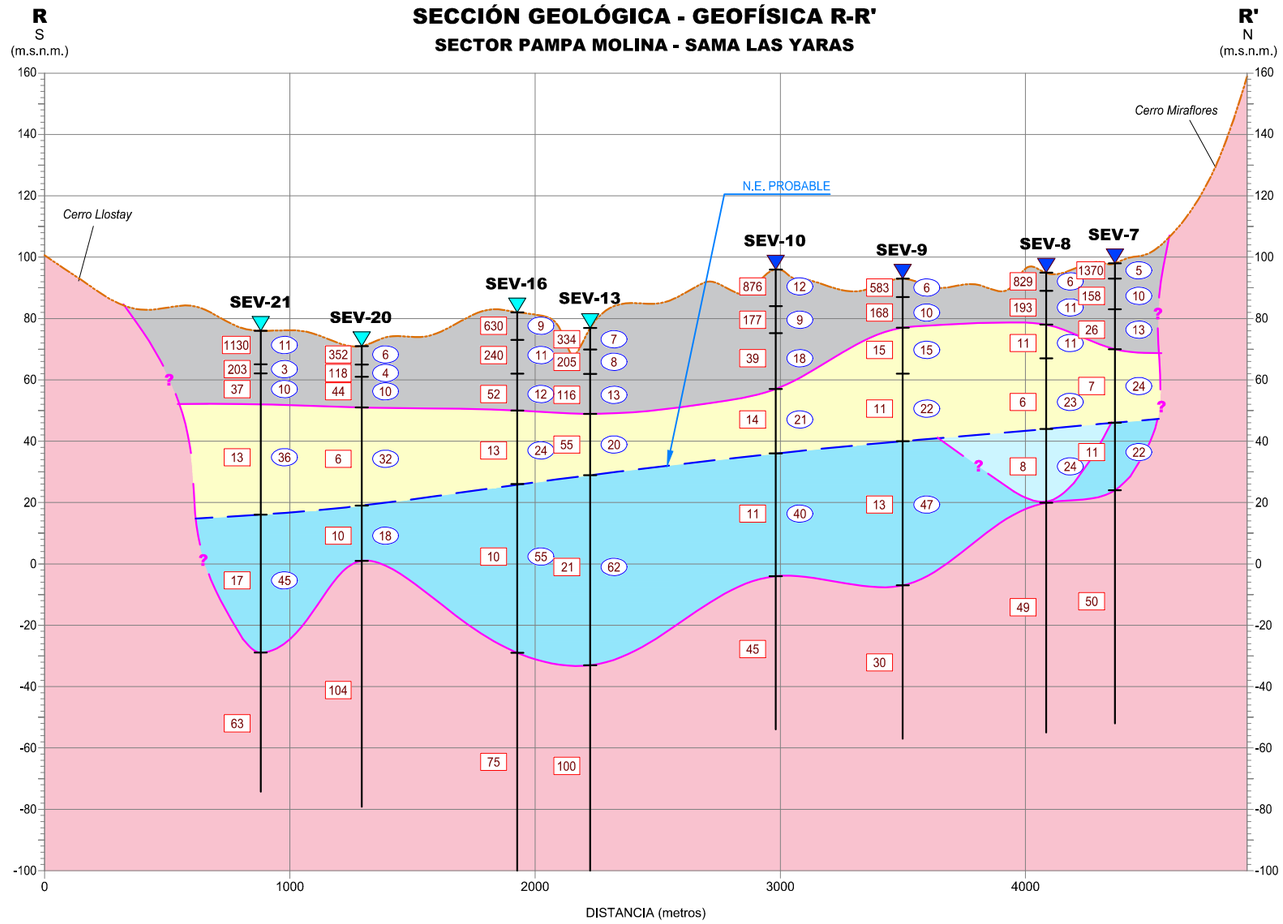
TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA Q-Q'

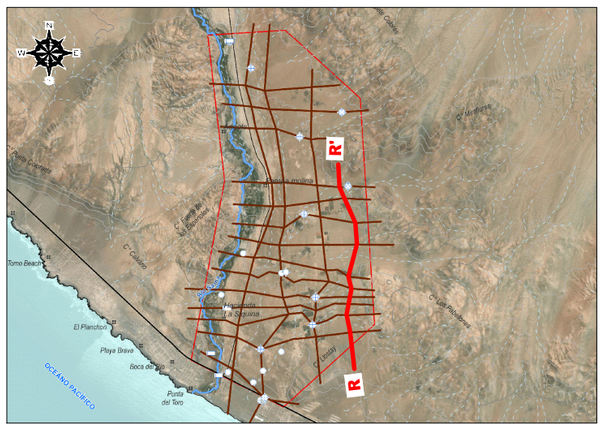
FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 31

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA





SECCIÓN R-R'
Escala H. : 1/25,000
Escala V. : 1/2,000



SIMBOLOGIA

- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical — Asoc. Señor de Huanca - Pacheco 2019
- **SEV-1** Sondaje Eléctrico Vertical — Fundo Sr. Mamani - EMAP 2018
- 40 Resistividad (ohm - m)
- 2 Espesor (m)
- N.E. Probable nivel freático
- Superficie del terreno
- Contacto geoeléctrico
- ? Contacto geoeléctrico inferido

LEYENDA

- Grava, canto rodado, boloneria, arena y limo, en estado seco. Buena y regular permeabilidad.
- Grava, arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado seco. Regular, baja y muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, limo, arcilla y/o estrato salino, en estado saturado. Baja a muy baja permeabilidad.
- ACUÍFERO. Arena, grava y limo, en estado saturado. Regular a baja permeabilidad.
- BASAMENTO. Rocas volcánicas y/o sedimentarias. Impermeable.

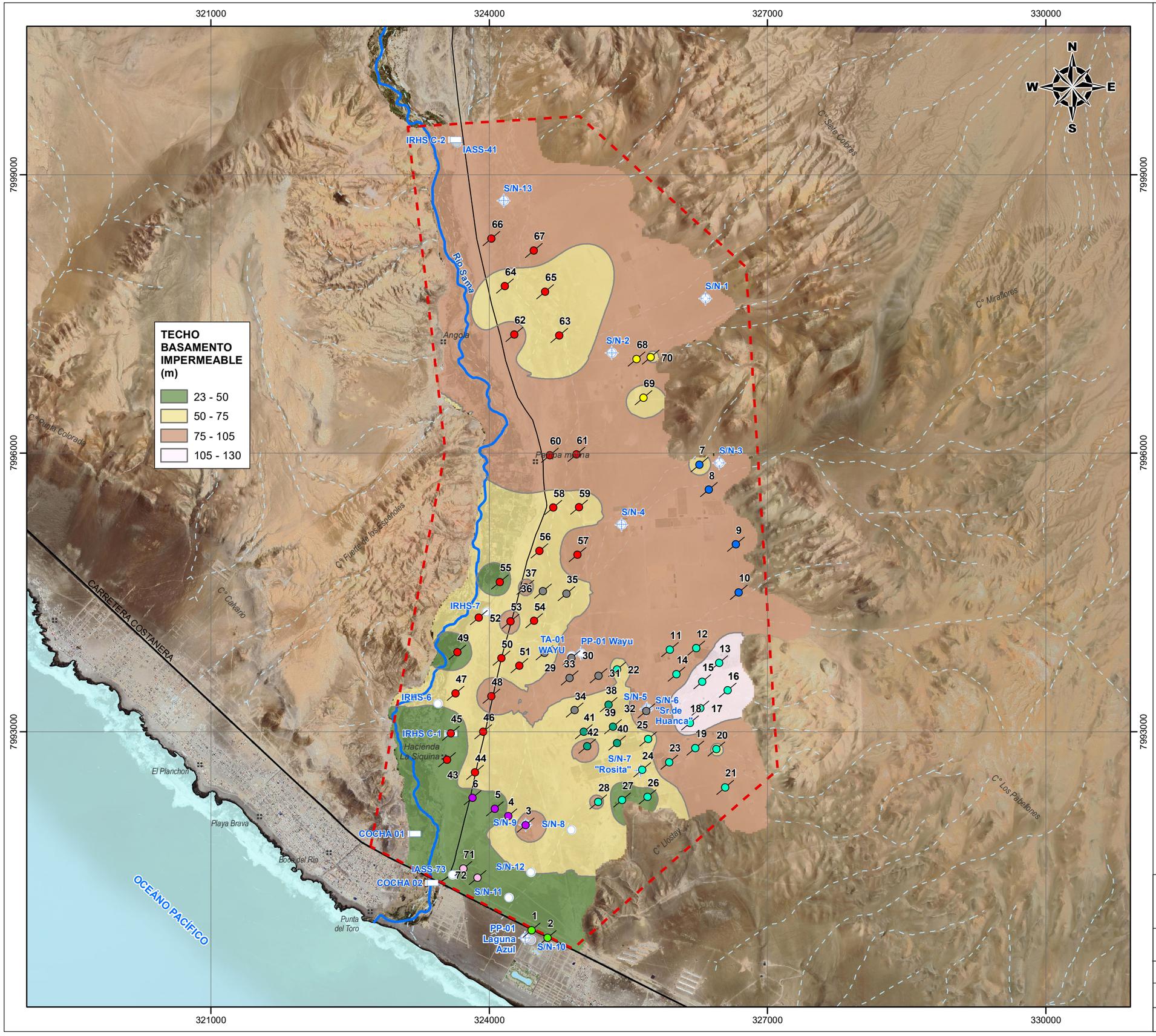
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: SECCIÓN GEOLÓGICA - GEOFÍSICA R-R'

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	INDICADA	NOVIEMBRE 2025	N° 32

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Zona de estudio

Pozos y Fuentes de agua subterránea

- Pozo Mixto Utilizable
- Pozo Mixto Utilizado
- Pozo Tubular Utilizado
- Pozo Tubular Utilizable
- Pozo Tajo Abierto Utilizado
- Pozo Tajo Abierto Utilizable
- Pozo Tajo Abierto No Utilizable
- Cocha

LEYENDA

- Sondajes Eléctricos Verticales Proyecto Laguna Azul - EMAP SAC 2014
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Sr. Guillén - EMAP SAC 2017
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Sr. Mamani - EMAP SAC 2018
- Sondajes Eléctricos Verticales Asoc. Señor de Huanca - Ing. Pacheco 2019 y 2023
- Sondajes Eléctricos Verticales Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2023
- Sondajes Eléctricos Verticales comp. Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Paraiso - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Hda. La Siquina - Ing. Mita 2024
- Isóbatas (m)

Escala Gráfica

0 350 700 1,400 2,100

Metros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

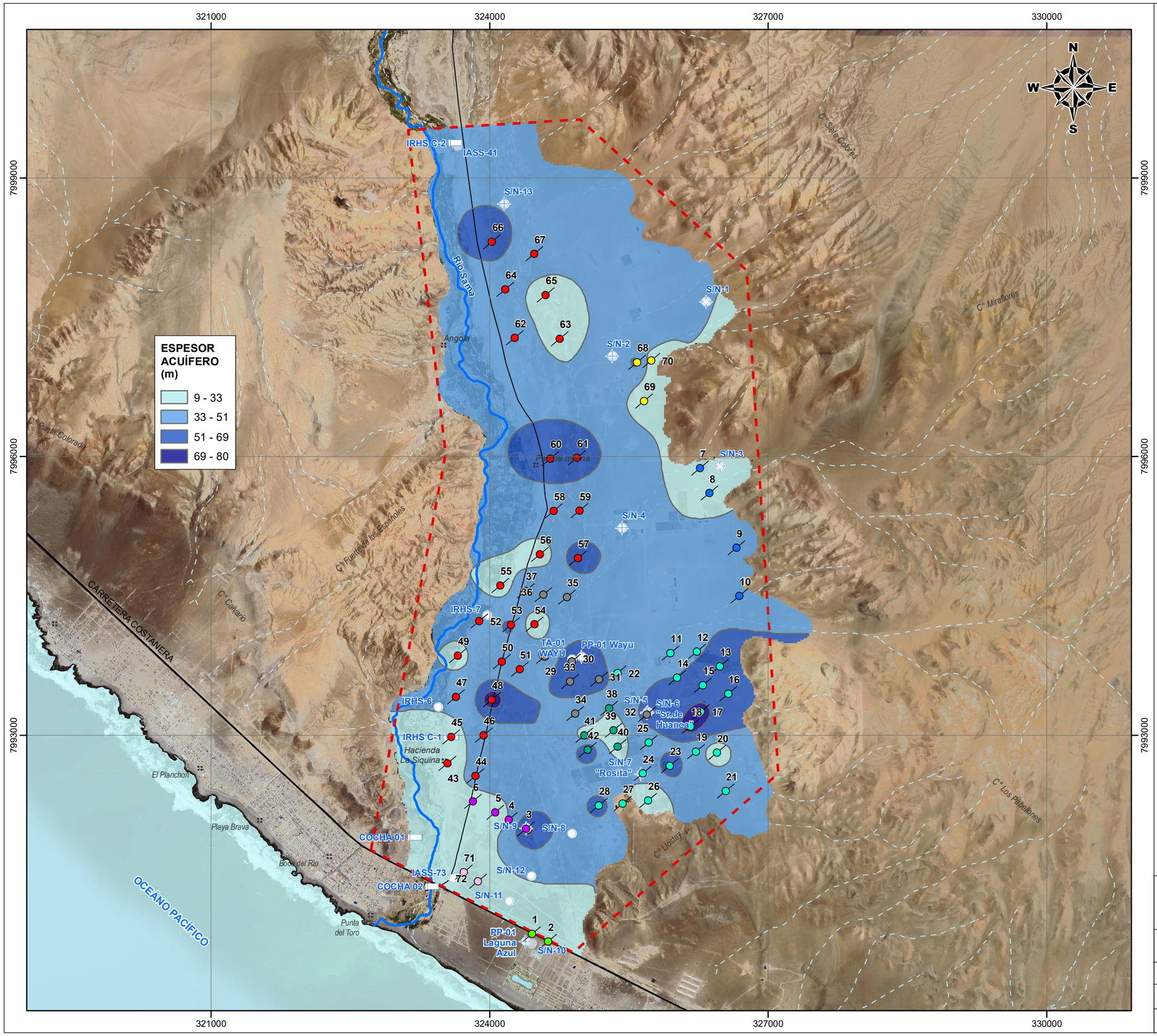
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: TECHO BASAMENTO IMPERMEABLE

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/40,000	NOVIEMBRE 2025	N° 33

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Zona de estudio

Pozos y Fuentes de agua subterránea

- Pozo Mixto Utilizable
- Pozo Mixto Utilizado
- Pozo Tubular Utilizado
- Pozo Tubular Utilizable
- Pozo Tajo Abierto Utilizado
- Pozo Tajo Abierto Utilizable
- Pozo Tajo Abierto No Utilizable
- Cocha

LEYENDA

- Sondajes Eléctricos Verticales Proyecto Laguna Azul - EMAP SAC 2014
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Sr. Guillén - EMAP SAC 2017
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Sr. Mamani - EMAP SAC 2018
- Sondajes Eléctricos Verticales Asoc. Señor de Huanca - Ing. Pacheco 2019 y 2023
- Sondajes Eléctricos Verticales Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2023
- Sondajes Eléctricos Verticales comp. Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Paraiso - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Hda. La Siquina - Ing. Mita 2024
- Isoresistividad (Ohm-m)

Escala Gráfica

0 350 700 1,400 2,100

Metros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

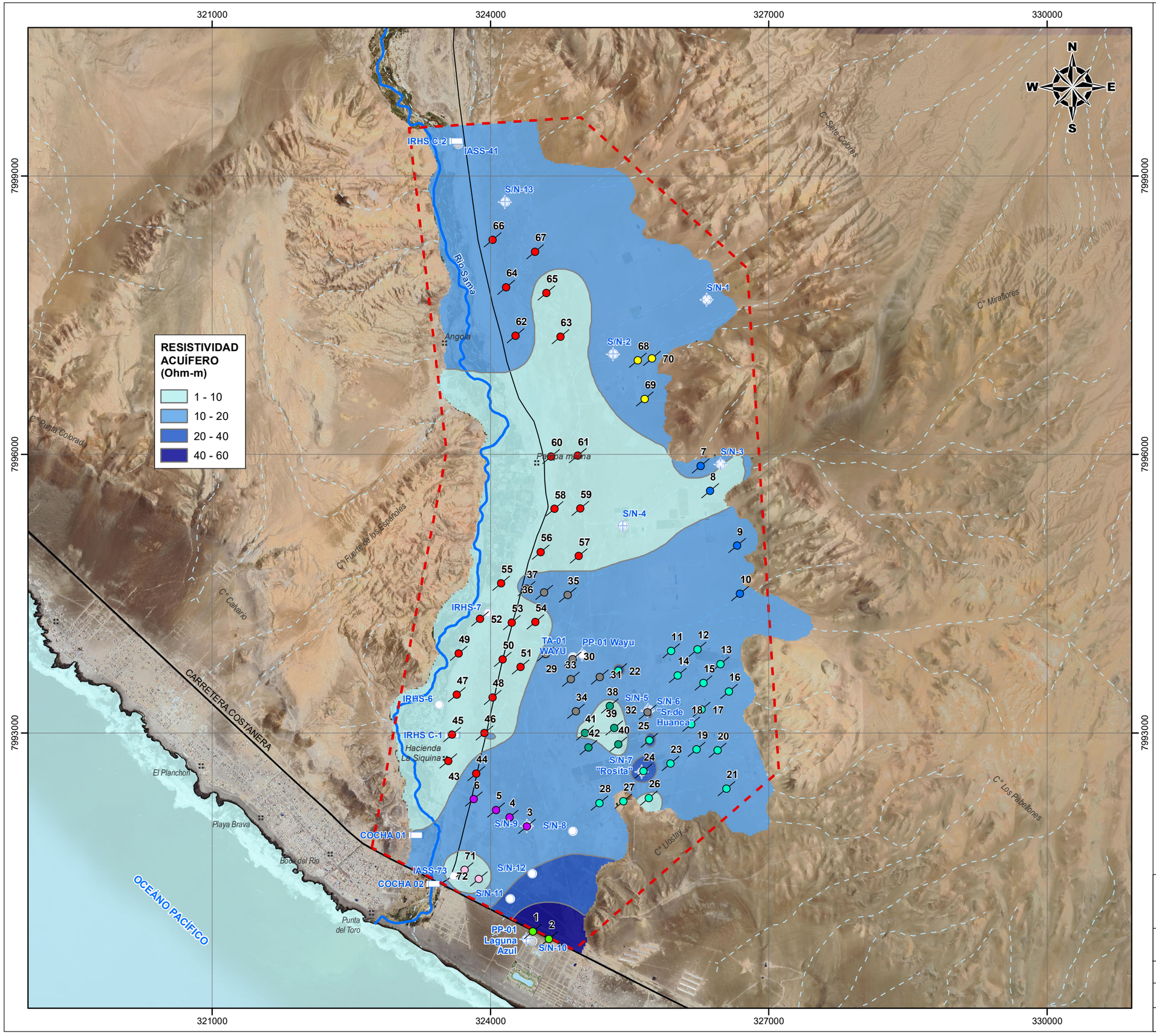
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: ESPESOR HORIZONTE PERMEABLE SATURADO

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/40,000	NOVIEMBRE 2025	N° 34

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Zona de estudio

Pozos y Fuentes de agua subterránea

- Pozo Mixto Utilizable
- Pozo Mixto Utilizado
- Pozo Tubular Utilizado
- Pozo Tubular Utilizable
- Pozo Tajo Abierto Utilizado
- Pozo Tajo Abierto Utilizable
- Pozo Tajo Abierto No Utilizable
- Cocha

LEYENDA

- Sondajes Eléctricos Verticales Proyecto Laguna Azul - EMAP SAC 2014
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Sr. Guillén - EMAP SAC 2017
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Sr. Mamani - EMAP SAC 2018
- Sondajes Eléctricos Verticales Asoc. Señor de Huanca - Ing. Pacheco 2019 y 2023
- Sondajes Eléctricos Verticales Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2023
- Sondajes Eléctricos Verticales comp. Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Paraiso - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Hda. La Siquina - Ing. Mita 2024
- Isoresistividad (Ohm-m)

Escala Gráfica

0 350 700 1,400 2,100

Metros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

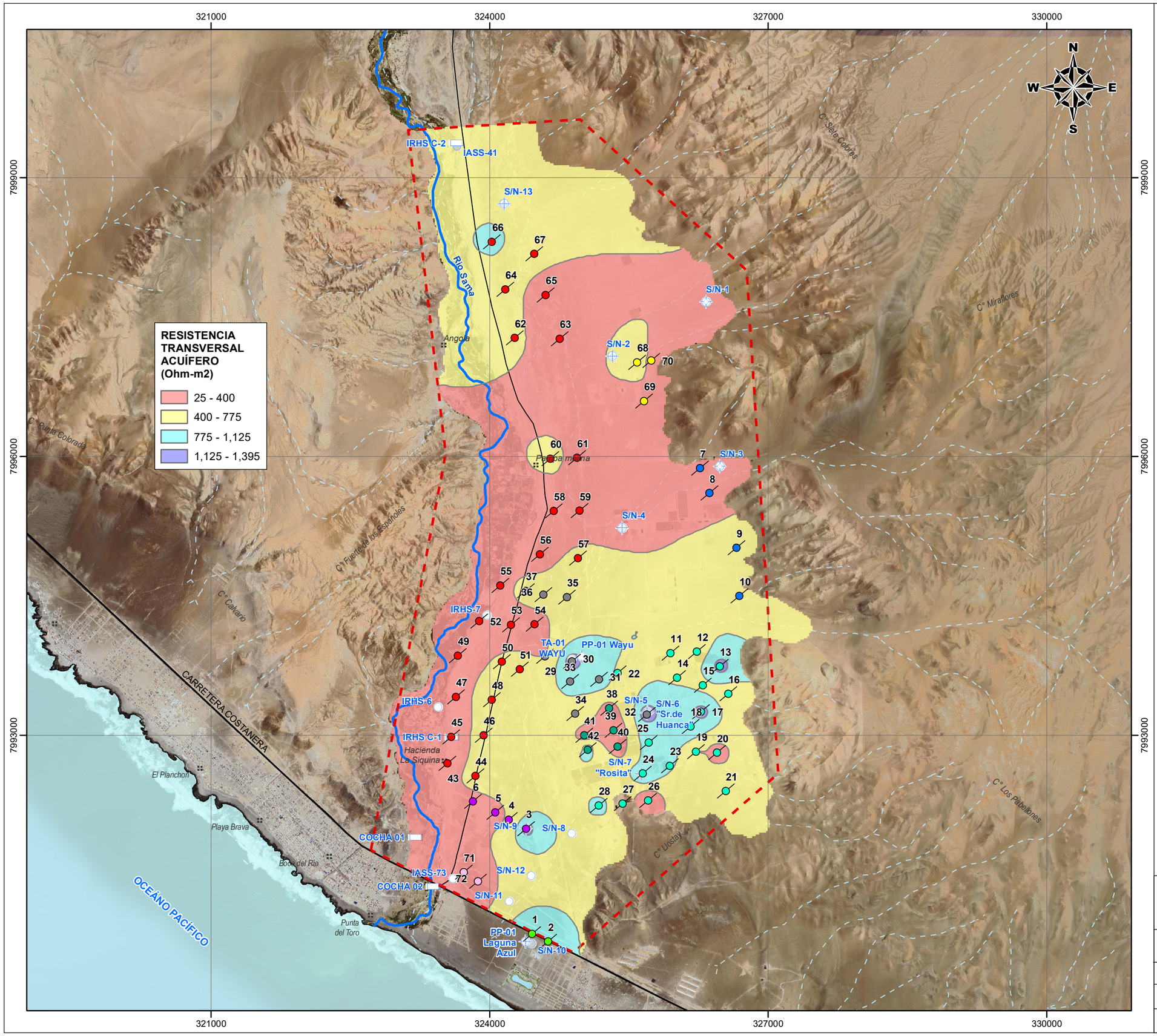
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: RESULTADOS CUANTITATIVOS DEL HORIZONTE SATURADO (RESISTIVIDAD VERDADERA)

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/40,000	NOVIEMBRE 2025	N° 35

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Zona de estudio

Pozos y Fuentes de agua subterránea

- Pozo Mixto Utilizable
- Pozo Mixto Utilizado
- Pozo Tubular Utilizado
- Pozo Tubular Utilizable
- Pozo Tajo Abierto Utilizado
- Pozo Tajo Abierto Utilizable
- Pozo Tajo Abierto No Utilizable
- Cocha

LEYENDA

- Sondajes Eléctricos Verticales Proyecto Laguna Azul - EMAP SAC 2014
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Sr. Guillén - EMAP SAC 2017
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Sr. Mamani - EMAP SAC 2018
- Sondajes Eléctricos Verticales Asoc. Señor de Huanca - Ing. Pacheco 2019 y 2023
- Sondajes Eléctricos Verticales Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2023
- Sondajes Eléctricos Verticales comp. Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Amp. Proyecto Wayu Perú - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Fundo Paraiso - EMAP SAC 2024
- Sondajes Eléctricos Verticales Hda. La Siquina - Ing. Mita 2024
- Isoresistencia Transversal (Ohm-m2)

Escala Gráfica

0 350 700 1,400 2,100

Metros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: RESISTENCIA TRANSVERSAL DEL HORIZONTE SATURADO

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/40,000	NOVIEMBRE 2025	N° 36

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA

CUADRO DE POZOS Y FUENTES DE AGUA INVENTARIADAS

FUENTE DE AGUA	PROPIETARIO	COORDENADAS UTM WGS84, 19		TIPO	ESTADO
		Este	Norte		
IRHS 23/01/05-C-2	SR. APAZA	323,628	7999377	CO	UTILIZADO
IASS-41	PRIVADO	323,648	7999342	TA	NO UTILIZABLE
S/N-1	PRIVADO	326,332	7997668	M	UTILIZABLE
S/N-2	FUNDO PARAÍSO	325,323	7997082	M	UTILIZADO
S/N-3	PRIVADO	326,479	7995896	M	UTILIZABLE
S/N-4	ASOC. DIVINO NIÑO	325,427	7995233	M	UTILIZADO
S/N-5 "SR. DE HUANCA"	ASOC. SR. DE HUANCA	325,701	7993249	M	UTILIZABLE
S/N-6 "SR.DE HUANCA"	ASOC. SR. DE HUANCA	325,694	7993240	T	UTILIZADO
S/N-7 "ROSITA"	ROSITA	325,630	7992583	T	UTILIZADO
S/N-8	NUEVA IMAGEN	324,885	7991943	TA	UTILIZABLE
S/N-9	SR. GUILLEN	324,392	7992001	M	UTILIZADO
S/N-10 "LAGUNA AZUL"	PROMOTORA DAVECO SAC	324,451	7990757	TA	NO UTILIZABLE
PP-01 "LAGUNA AZUL"	PROMOTORA DAVECO SAC	324,386	7990780	T	UTILIZADO
S/N-11	PRIVADO	324,212	7991213	TA	UTILIZABLE
S/N-12	PRIVADO	324,447	7991485	TA	UTILIZABLE
S/N-13	PRIVADO	324,157	7998723	M	UTILIZADO
IRHS-23/01/05-6	PRIVADO	323,445	7993306	TA	UTILIZABLE
IRHS 23/01/05-7	PRIVADO	323,971	7994294	TA	UTILIZABLE
IRHS 23/01/05-C-1	JOSE HUANCA MAMANI	323,585	7992982	CO	UTILIZADO
IASS-73	SR. CABRERA	323,605	7991457	TA	UTILIZABLE
COCHA 01	MUNICIPALIDAD C.P.M. BOCA DEL RIO	323,191	7991902	CO	UTILIZABLE
COCHA 02	PRIVADO	323,382	7991378	CO	UTILIZABLE
TA-01 WAYU PERÚ	WAYU PERÚ S.A.	324,885	7993818	TA	UTILIZABLE
PP-01 WAYU PERÚ	WAYU PERÚ S.A.	324,990	7993845	T	UTILIZABLE

NOTA: T (Tubular), TA (Tajo Abierto), M (Mixto), MA (Manantial), CO (Cocha) y GA (Galeria Filtrante)

SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Zona de estudio

LEYENDA

- Pozo Mixto Utilizado
- Pozo Mixto Utilizable
- Pozo Tubular Utilizado
- Pozo Tubular Utilizable
- Pozo Tajo Abierto Utilizado
- Pozo Tajo Abierto Utilizable
- Pozo Tajo Abierto No Utilizable
- Cocha

Escala Gráfica

0 350 700 1,400 2,100

Metros

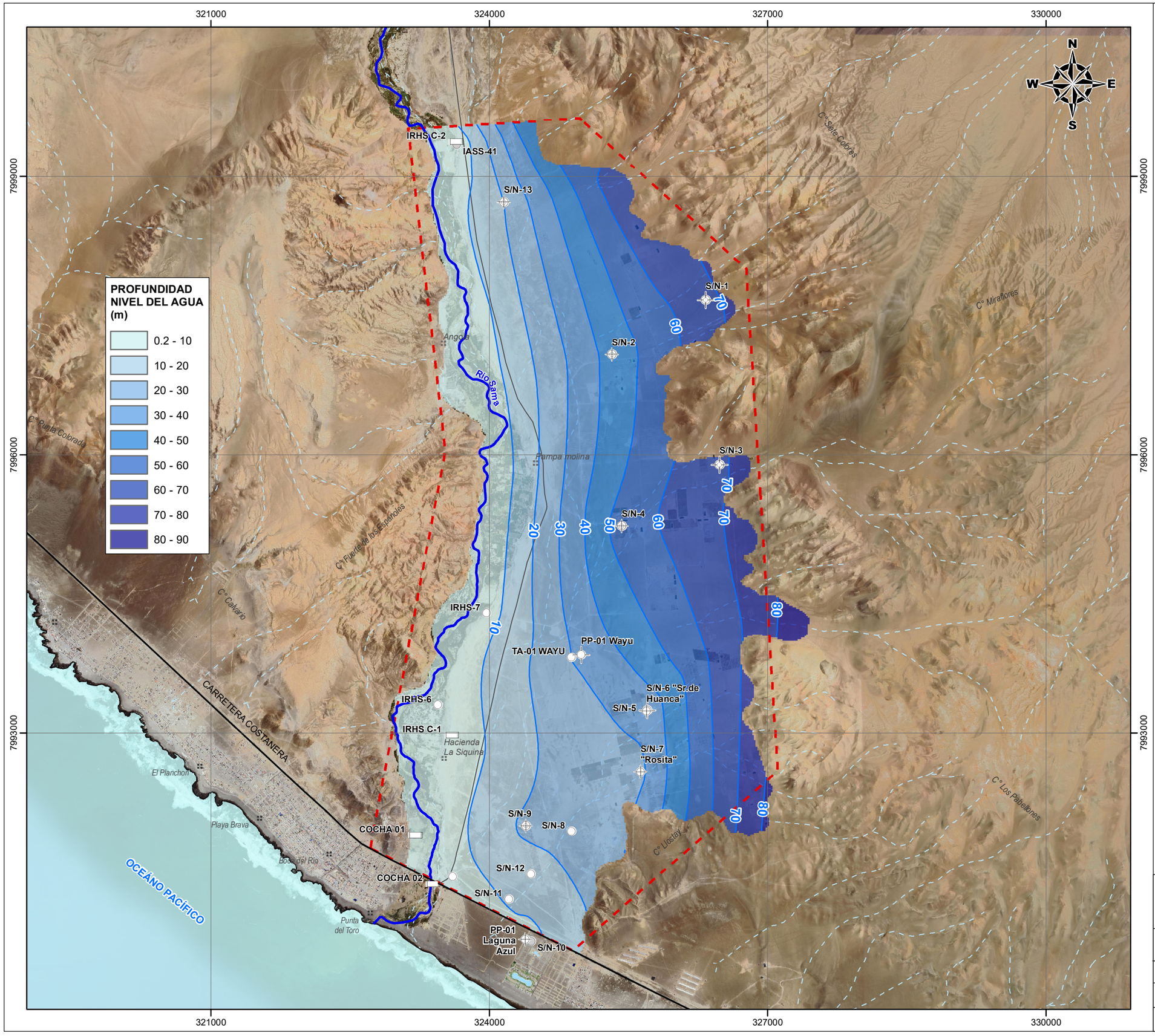
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: **POZOS Y FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA INVENTARIADAS**

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/40,000	NOVIEMBRE 2025	N° 37

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



PROFUNDIDAD DEL NIVEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA
POZOS SECTOR PAMPA MOLINA - PARTE BAJA VALLE SAMA

POZO Y/O FUENTE DE AGUA	PROPIETARIO	PROF. N.E. (m)
IRHS 23/01/05-C-2	SR. APAZA	0.27
IASS-41	PRIVADO	2.20
S/N-1	PRIVADO	66.92
S/N-2	FUNDO PARAÍSO	43.90
S/N-3	PRIVADO	67.58
S/N-4	ASOC. DIVINO NIÑO	55.00
S/N-5 "SR. DE HUANCA"	ASOC. SR. DE HUANCA	33.50
S/N-6 "SR.DE HUANCA"	ASOC. SR. DE HUANCA	33.00
S/N-7 "ROSITA"	ROSITA	27.77
S/N-8	NUEVA IMAGEN	25.00
S/N-9	SR. GUILLEN	22.39
S/N-10 "LAGUNA AZUL"	PROMOTORA DAVECO SAC	8.15
PP-01 "LAGUNA AZUL"	PROMOTORA DAVECO SAC	8.10
S/N-11	PRIVADO	11.40
S/N-12	PRIVADO	14.90
S/N-13	PRIVADO	20.00
IRHS-23/01/05-6	PRIVADO	5.82
IRHS 23/01/05-7	PRIVADO	6.37
IRHS 23/01/05-C-1	JOSE HUANCA MAMANI	0.50
IASS-73	SR. CABRERA	5.40
COCHA 01	MUNICIPALIDAD C.P.M. BOCA DEL RIO	1.00
COCHA 02	PRIVADO	0.50
TA-01 WAYU PERÚ	WAYU PERÚ S.A.	30.30
PP-01 WAYU PERÚ	WAYU PERÚ S.A.	32.10

SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Zona de estudio

LEYENDA

- Pozo Mixto Utilizado
- Pozo Mixto Utilizable
- Pozo Tubular Utilizado
- Pozo Tubular Utilizable
- Pozo Tajo Abierto Utilizado
- Pozo Tajo Abierto Utilizable
- Pozo Tajo Abierto No Utilizable
- Cocha
- Curvas de isoprofundidad (m)

Escala Gráfica

0 350 700 1,400 2,100

Metros

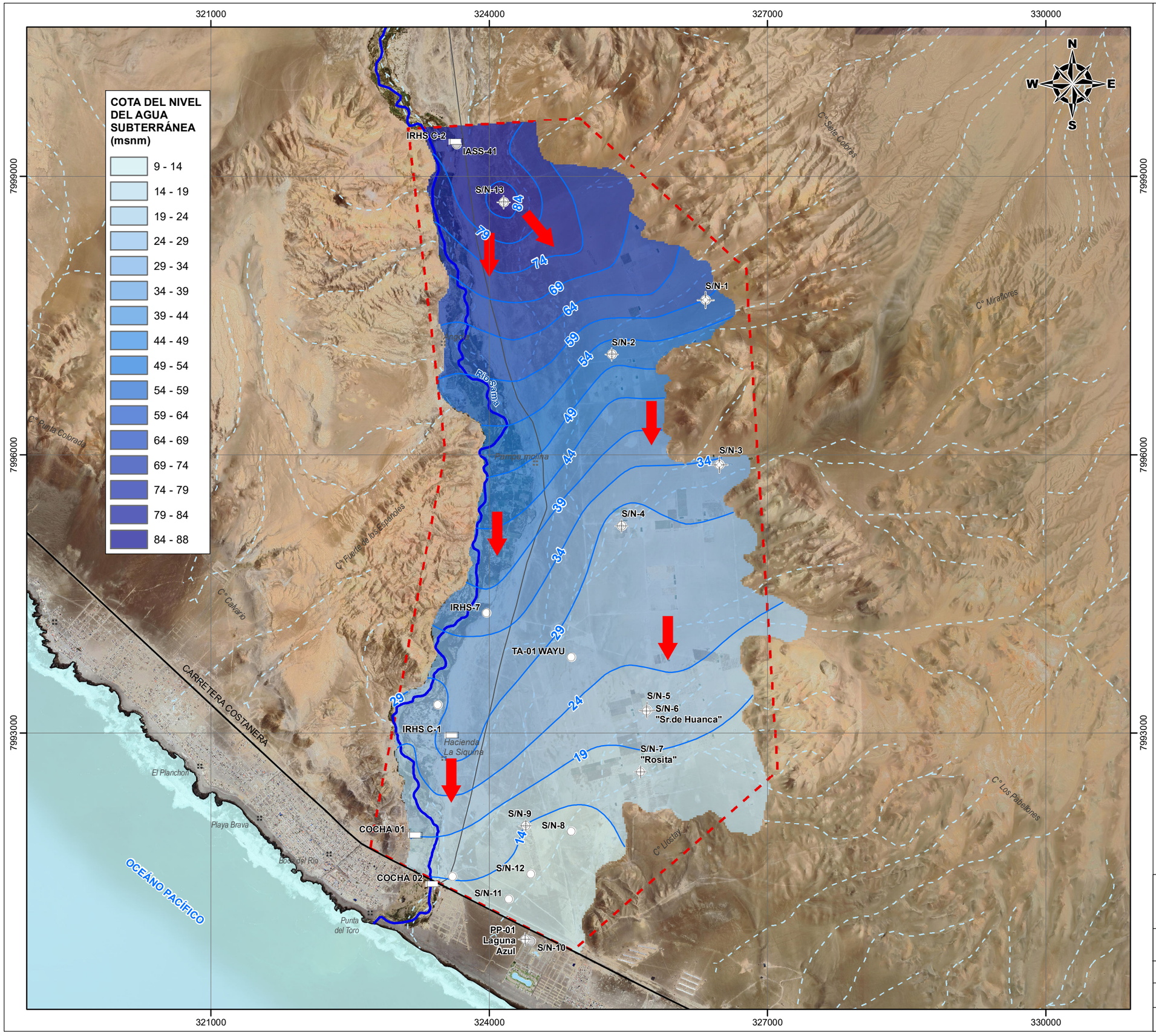
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TÍTULO: ISOPROFUNDIDAD DE LA NAPA

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/40,000	NOVIEMBRE 2025	N° 38

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA



COTA DEL NIVEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA
POZOS SECTOR PAMPA MOLINA - PARTE BAJA VALLE SAMA

POZO Y/O FUENTE DE AGUA	PROPIETARIO	COTA TERRENO (m.s.n.m.	N.E. (m)	COTA N.E. (m.s.n.m.)
IRHS 23/01/05-C-2	SR. APAZA	81	0.27	80.73
IASS-41	PRIVADO	83	2.20	80.80
S/N-1	PRIVADO	126	66.92	59.08
S/N-2	FUNDO PARAÍSO	94	43.90	50.10
S/N-3	PRIVADO	101	67.58	33.42
S/N-4	ASOC. DIVINO NIÑO	80	55.00	25.00
S/N-5 "SR. DE HUANCA"	ASOC. SR. DE HUANCA	56	33.50	22.50
S/N-6 "SR.DE HUANCA"	ASOC. SR. DE HUANCA	56	33.00	23.00
S/N-7 "ROSITA"	ROSITA	45	27.77	17.23
S/N-8	NUEVA IMAGEN	36	25.00	11.00
S/N-9	SR. GUILLEN	36	22.39	13.61
S/N-10 "LAGUNA AZUL"	PROMOTORA DAVECO SAC	18	8.15	9.85
PP-01 "LAGUNA AZUL"	PROMOTORA DAVECO SAC	18	8.10	9.90
S/N-11	PRIVADO	24	11.40	12.60
S/N-12	PRIVADO	29	14.90	14.10
S/N-13	PRIVADO	108	20.00	88.00
IRHS-23/01/05-6	PRIVADO	32	5.82	26.18
IRHS 23/01/05-7	PRIVADO	44	6.37	37.63
IRHS 23/01/05-C-1	JOSE HUANCA MAMANI	36	0.50	35.50
IASS-73	SR. CABRERA	20	5.40	14.60
COCHA 01	MUNICIPALIDAD C.P.M. BOCA DEL RIO	20	1.00	19.00
COCHA 02	PRIVADO	13	0.50	12.50
TA-01 WAYU PERÚ	WAYU PERÚ S.A.	56	30.30	25.70
PP-01 WAYU PERÚ	WAYU PERÚ S.A.	58	32.10	25.90

SIMBOLOGIA

- Carretera Costanera Sur
- Via carrozable TA-611
- Rio Sama
- Quebradas
- Zona de estudio

LEYENDA

- Pozo Mixto Utilizado
- Pozo Mixto Utilizable
- Pozo Tubular Utilizado
- Pozo Tubular Utilizable
- Pozo Tajo Abierto Utilizado
- Pozo Tajo Abierto Utilizable
- Pozo Tajo Abierto No Utilizable
- Cocha
- Curvas de hidroisohipsas (m.s.n.m.)
- Dirección Flujo Agua Subterránea

Escala Gráfica

0 350 700 1,400 2,100

Metros

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA - GEOTECNIA

TESIS: EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL SECTOR PAMPA MOLINA, PARTE BAJA DEL VALLE SAMA - TACNA, PARA LA EXPLOTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

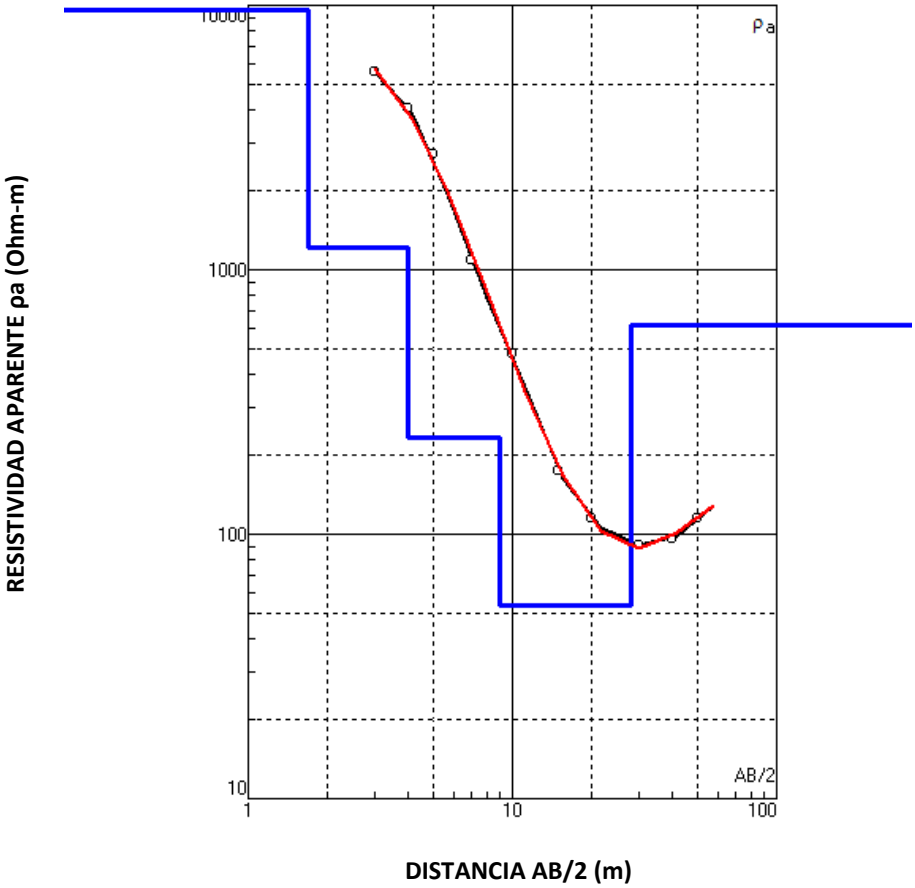
TÍTULO: HIDROISOHIPSAS

FUENTE:	DATUM:	ESCALA:	FECHA:	MAPA:
ELABORACIÓN PROPIA	UTM WGS-84 ZONA 19S	1/40,000	NOVIEMBRE 2025	N° 39

ELABORADO:	REVISADO:	APROBADO:
Bach. REGGIE FLORES TITO	Mgr. Ing. FREDY CABRERA	Mgr. Ing. FREDY CABRERA

Anexo 2. Gráficos de la interpretación cuantitativa de los sondajes eléctricos verticales - SEVs

SEV-1

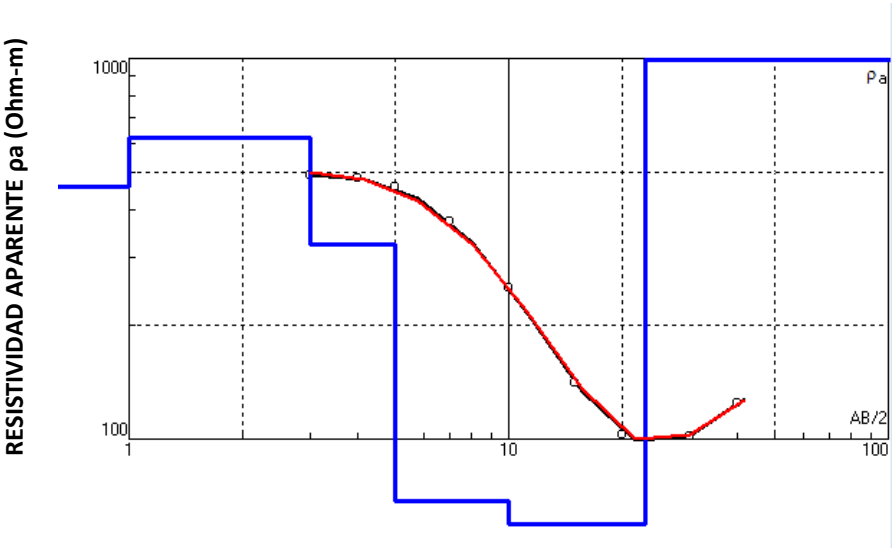


N	ρ	h	d	Alt
1	9627	1.7	1.7	-1.7
2	1213	2.3	4	-4
3	232	5	9	-9
4	54	19	28	-28
5	617			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-2

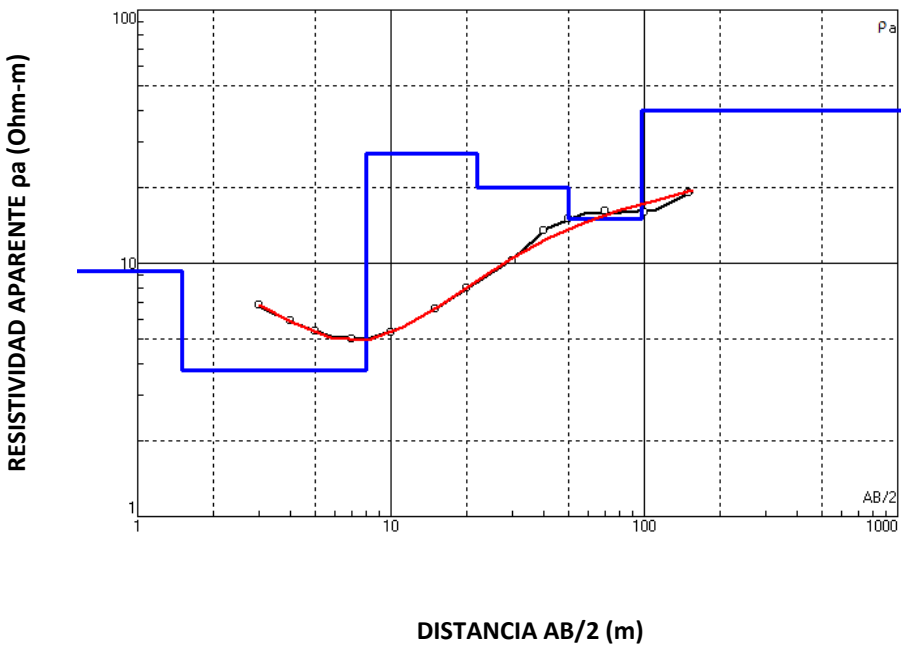


N	ρ	h	d	Alt
1	460	1	1	-1
2	619	2	3	-3
3	325	2	5	-5
4	69	5	10	-10
5	60	13	23	-23
6	995			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-3

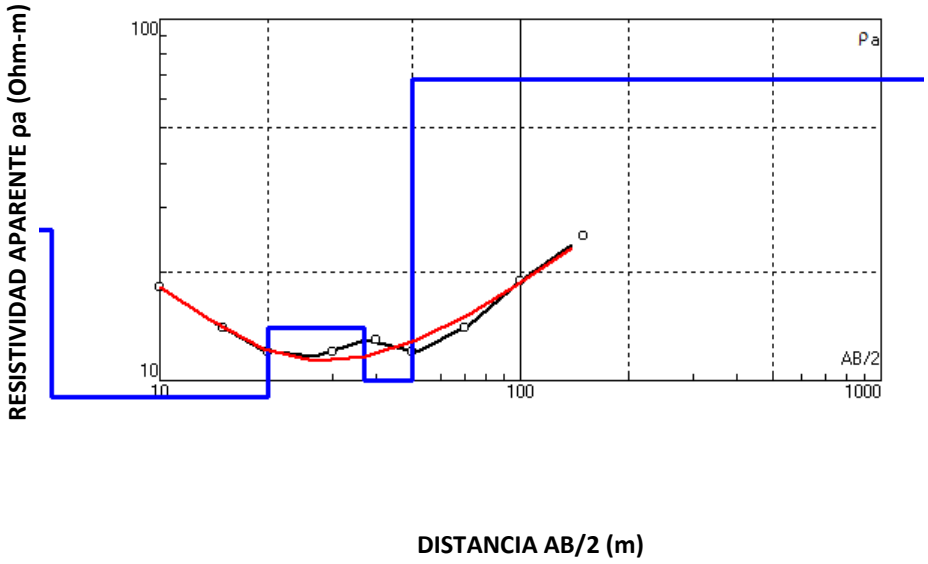


N	ρ	h	d	Alt
1	9.3	1.5	1.5	-1.5
2	3.8	6.5	8	-8
3	27	14	22	-22
4	20	28	50	-50
5	15	48	98	-98
6	40			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-4

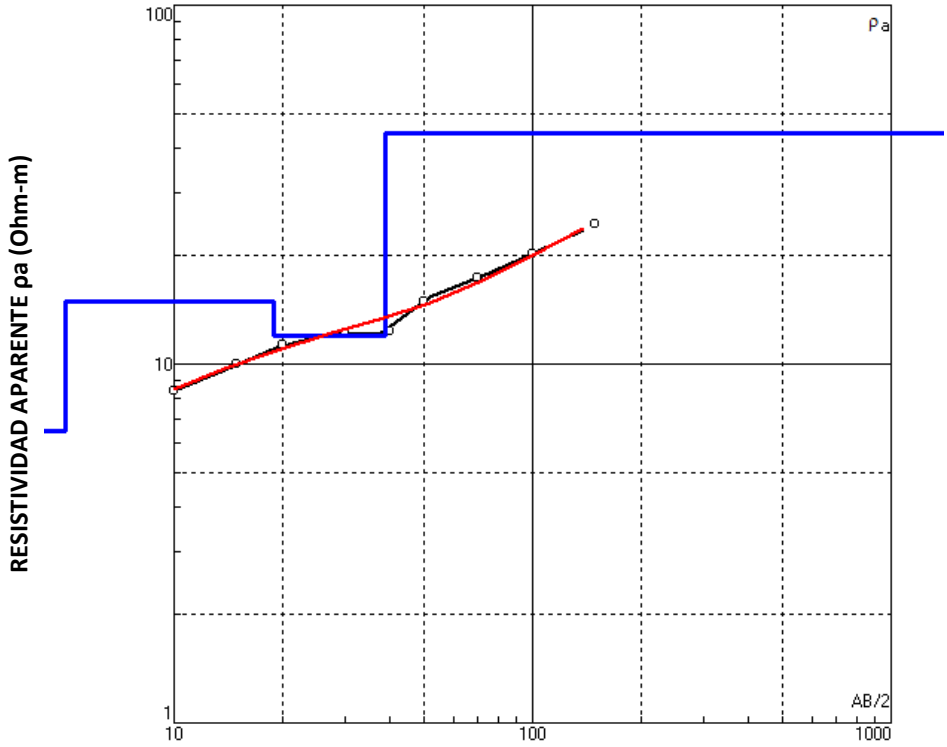


N	ρ	h	d	Alt
1	26	5	5	-5
2	9	15	20	-20
3	14	17	37	-37
4	10	13	50	-50
5	68			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-5

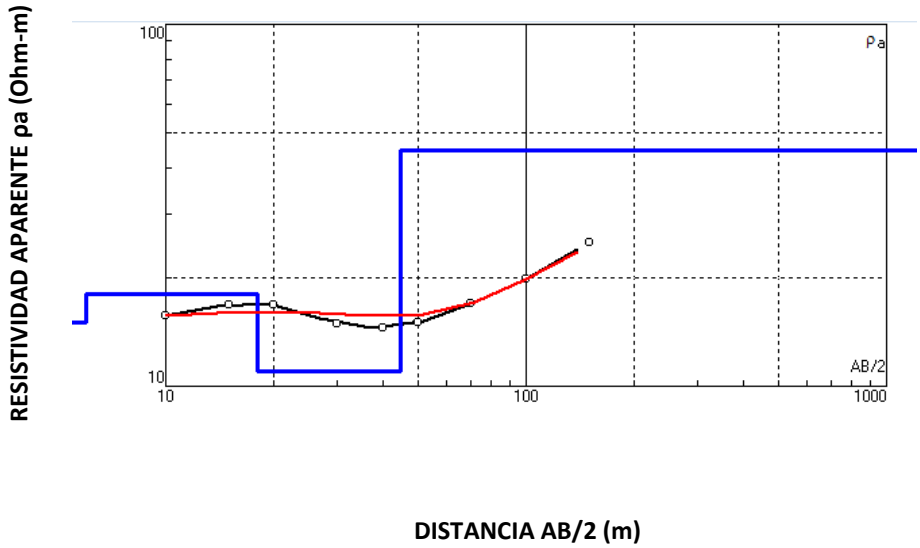


N	ρ	h	d	Alt
1	6.5	5	5	-5
2	15	14	19	-19
3	12	20	39	-39
4	44			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-6

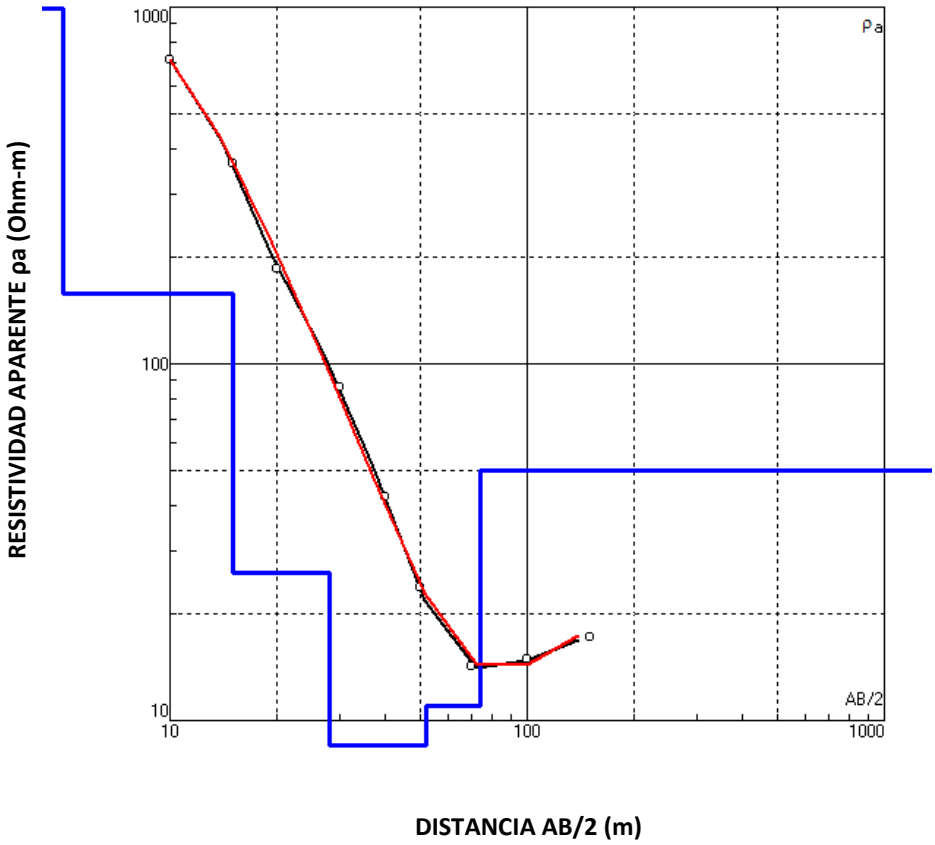


N	ρ	h	d	Alt
1	15	6	6	-6
2	18	12	18	-18
3	11	27	45	-45
4	45			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-7

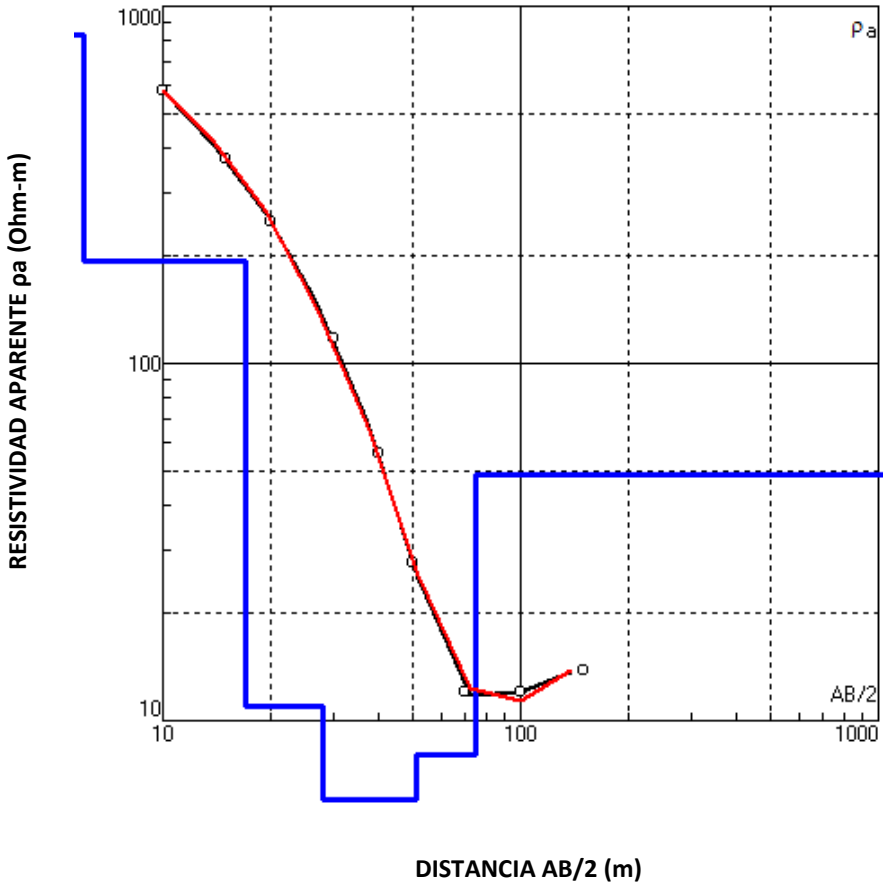


N	ρ	h	d	Alt
1	1370	5	5	-5
2	158	10	15	-15
3	26	13	28	-28
4	7	24	52	-52
5	11	22	74	-74
6	50			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-8

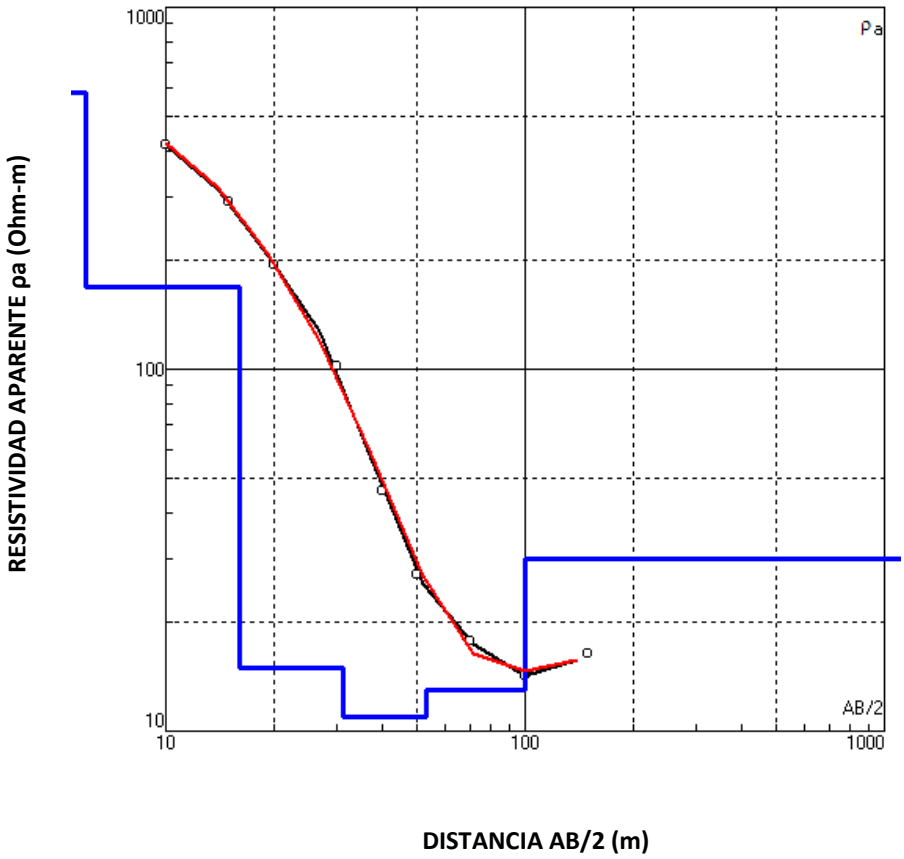


N	ρ	h	d	Alt
1	829	6	6	-6
2	193	11	17	-17
3	11	11	28	-28
4	6	23	51	-51
5	8	24	75	-75
6	49			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-9

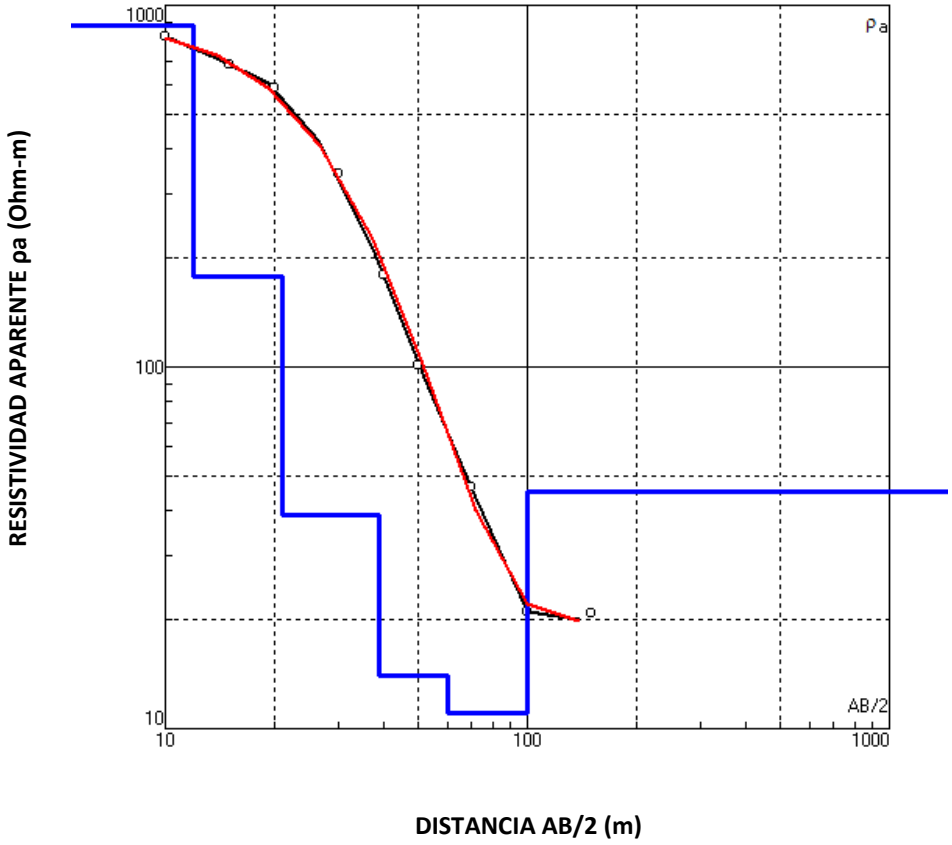


N	ρ	h	d	Alt
1	583	6	6	-6
2	168	10	16	-16
3	15	15	31	-31
4	11	22	53	-53
5	13	47	100	-100
6	30			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-10

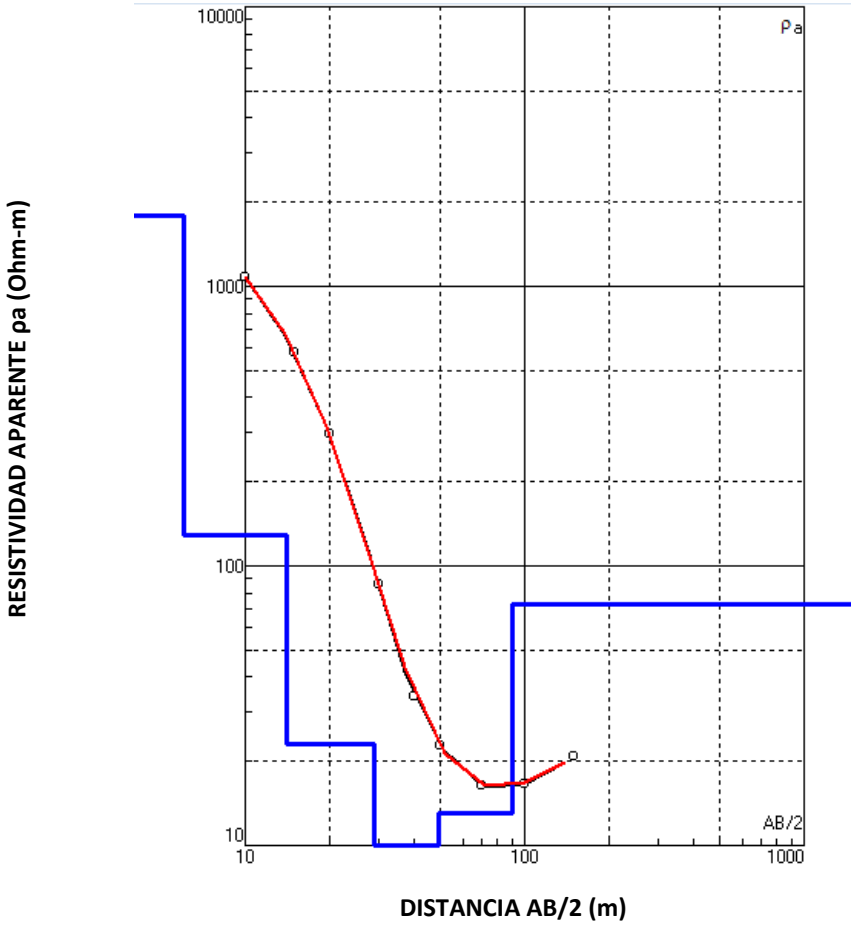


N	ρ	h	d	Alt
1	876	12	12	-12
2	177	9	21	-21
3	39	18	39	-39
4	14	21	60	-60
5	11	40	100	-100
6	45			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-11

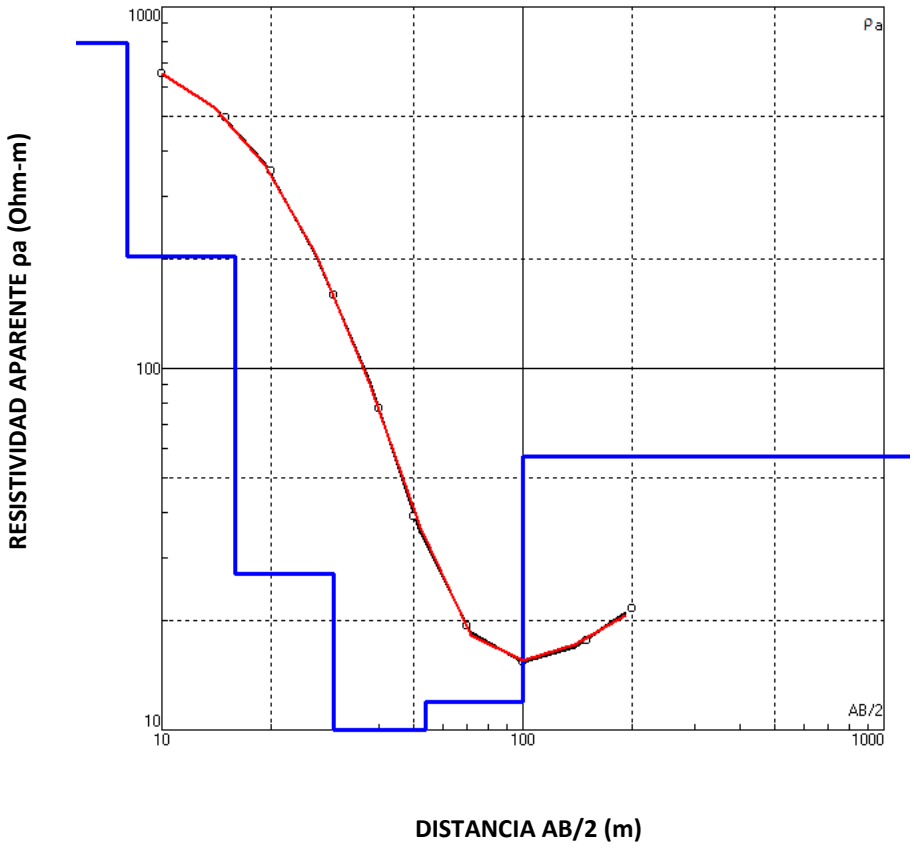


N	ρ	h	d	Alt
1	1790	6	6	-6
2	128	8	14	-14
3	23	15	29	-29
4	10	20	49	-49
5	13	41	90	-90
6	73			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-12

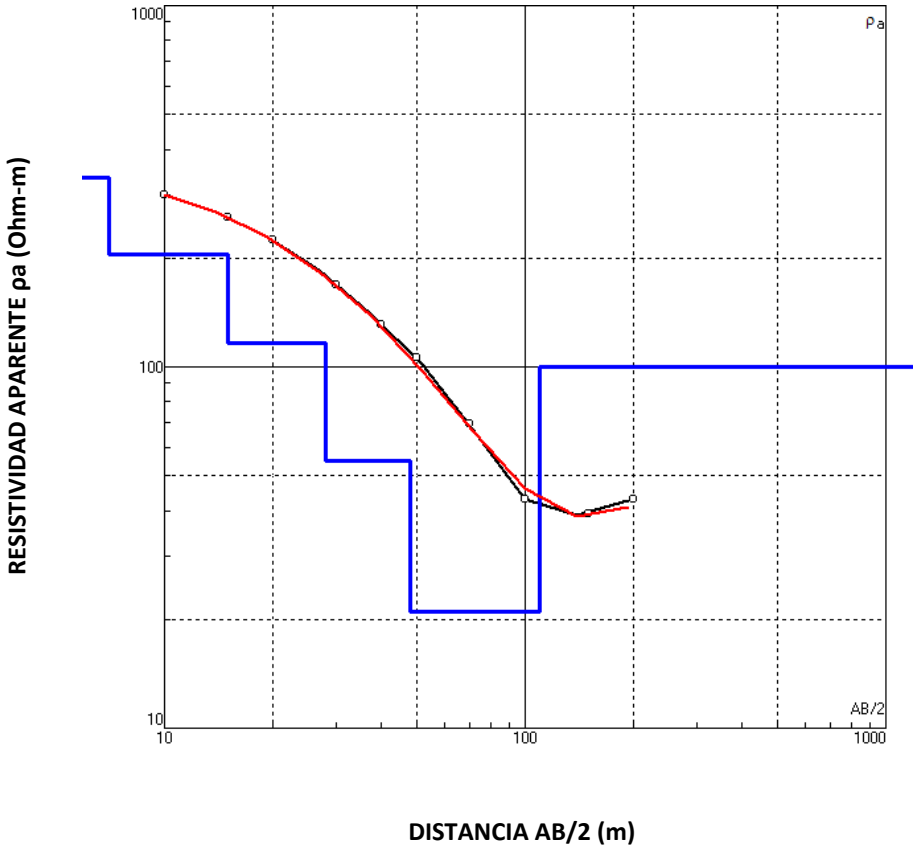


N	ρ	h	d	Alt
1	798	8	8	-8
2	204	8	16	-16
3	27	14	30	-30
4	10	24	54	-54
5	12	46	100	-100
6	57			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-13

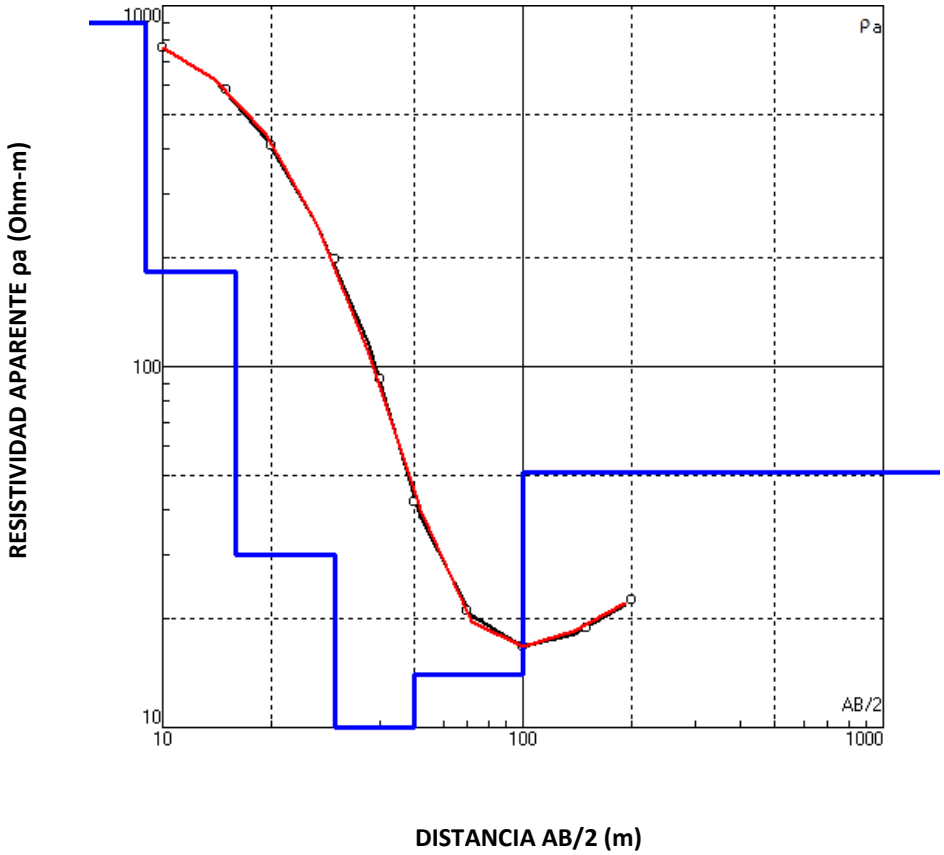


N	ρ	h	d	Alt
1	334	7	7	-7
2	205	8	15	-15
3	116	13	28	-28.04
4	55	20	48	-48
5	21	62	110	-110
6	100			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-14

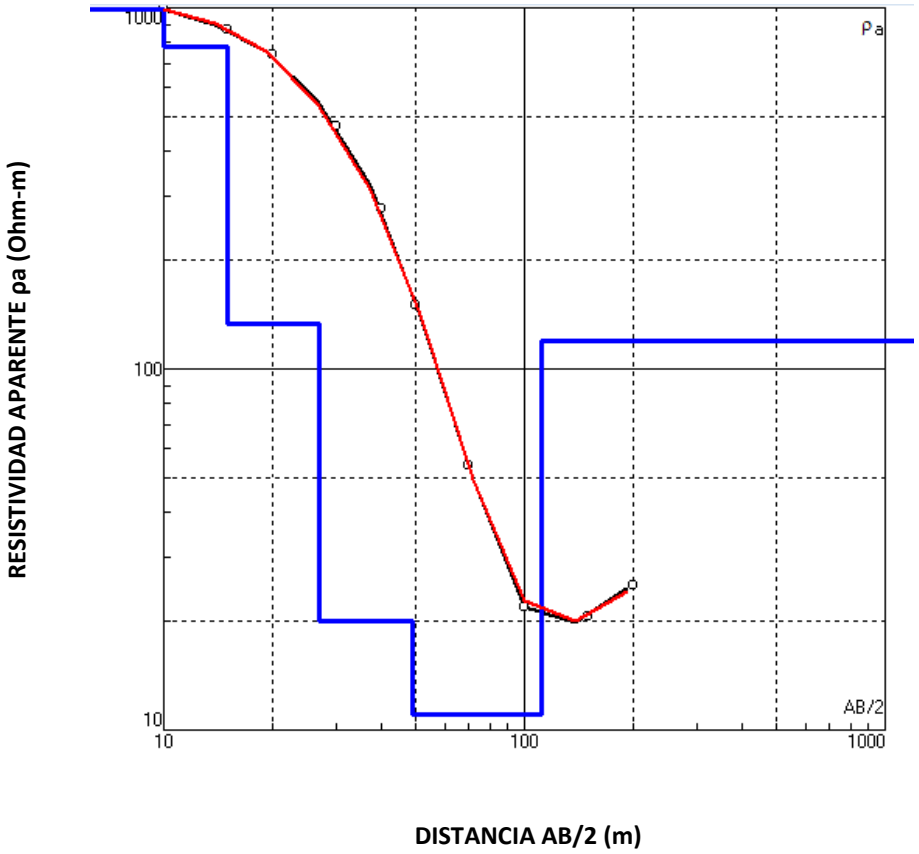


N	ρ	h	d	Alt
1	899	9	9	-9
2	184	7	16	-16
3	30	14	30	-30
4	10	20	50	-50
5	14	50	100	-100
6	51			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-15

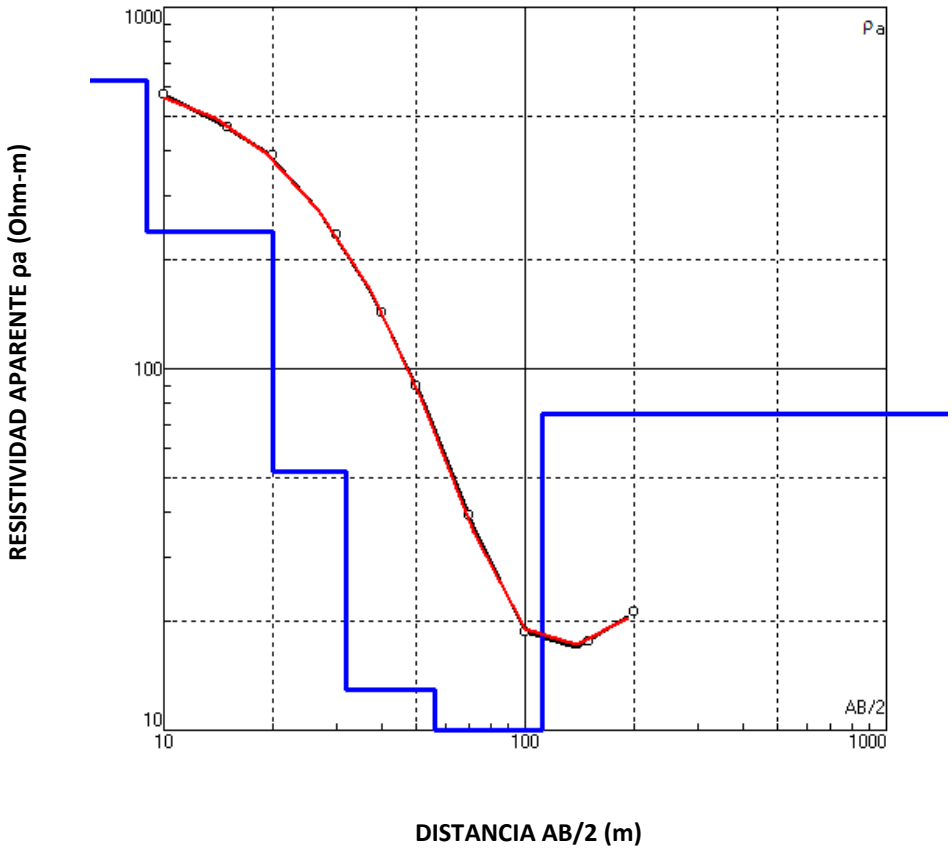


N	ρ	h	d	Alt
1	1060	10	10	-10
2	780	5	15	-15
3	133	12	27	-27
4	20	22	49	-49
5	11	62	111	-111
6	120			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-16

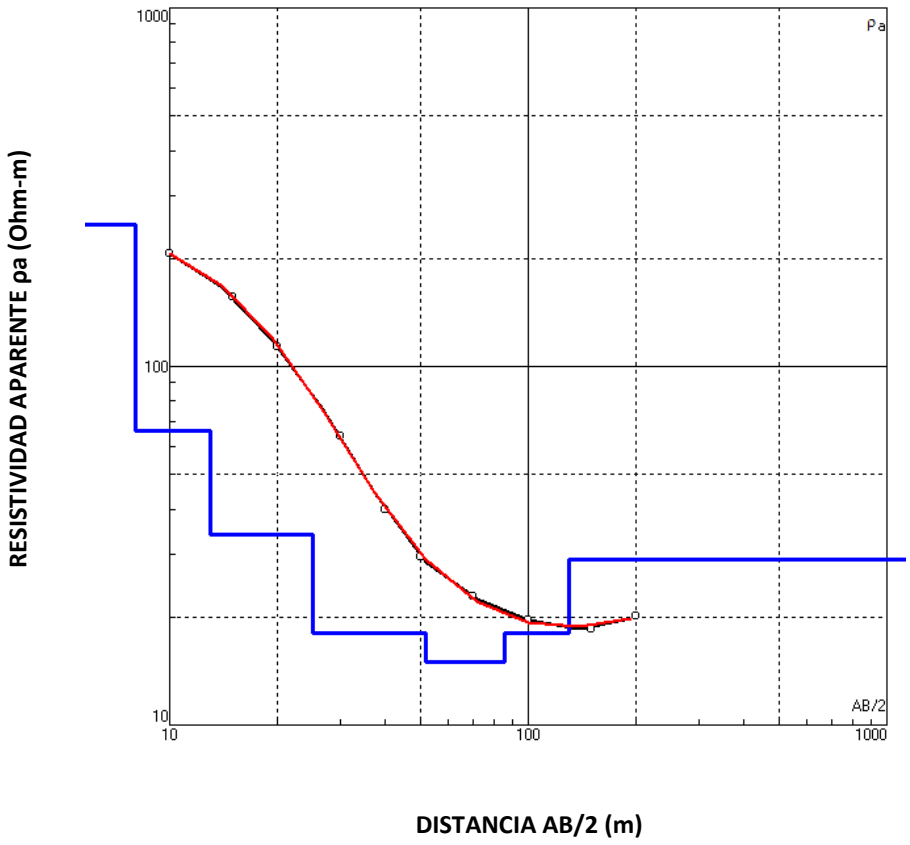


N	ρ	h	d	Alt
1	630	9	9	-9
2	240	11	20	-20
3	52	12	32	-32
4	13	24	56	-56
5	10	55	111	-111
6	75			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-17

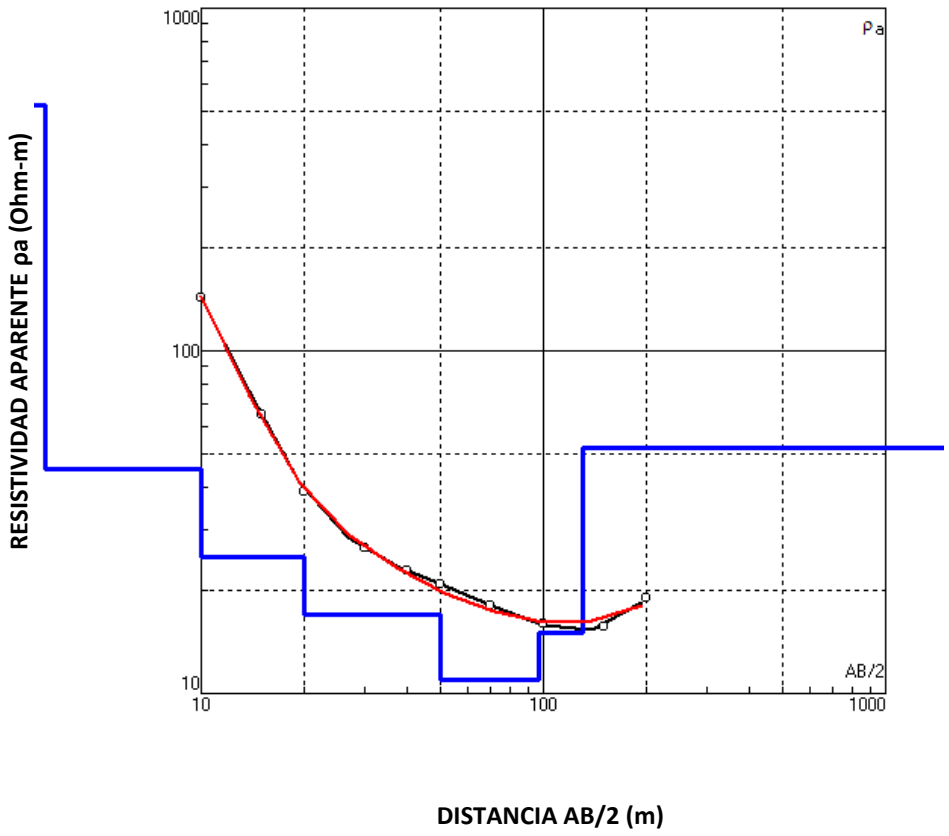


N	ρ	h	d	Alt
1	249	8	8	-8
2	66	5	13	-13
3	34	12	25	-25
4	18	27	52	-52
5	15	34	86	-86
6	18	44	130	-130
7	29			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-18

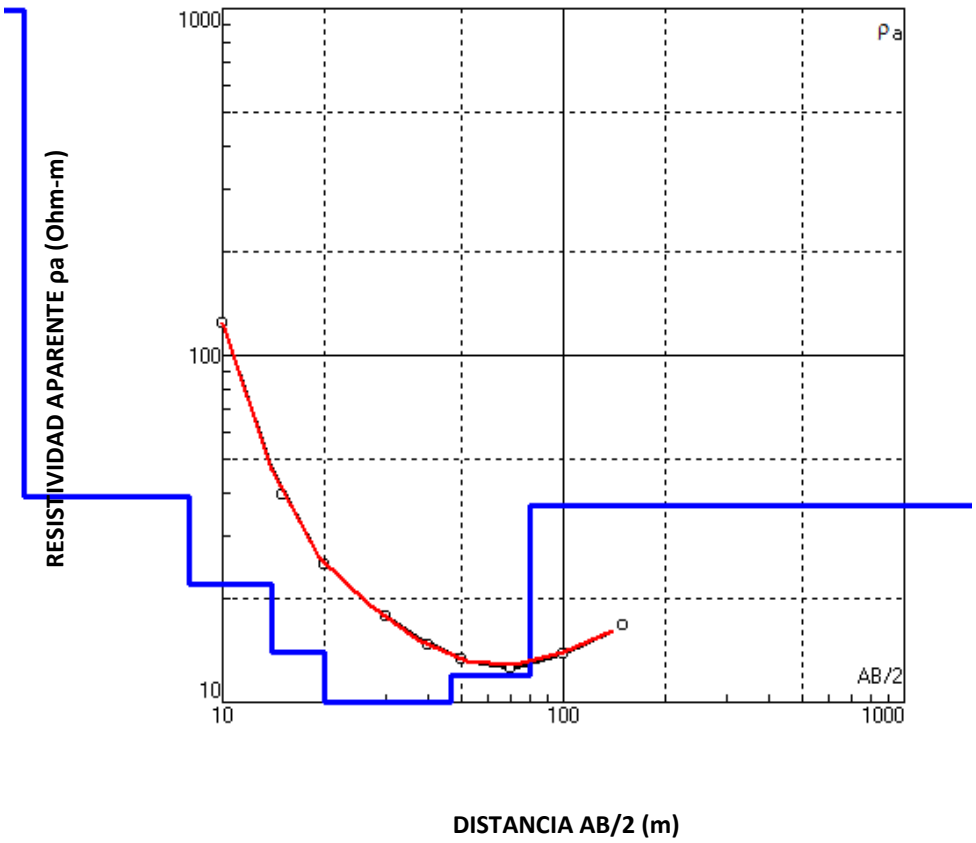


N	ρ	h	d	Alt
1	521	3.5	3.5	-3.5
2	45	6.5	10	-10
3	25	10	20	-20
4	17	30	50	-50
5	11	47	97	-97
6	15	33	130	-130
7	52			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-19

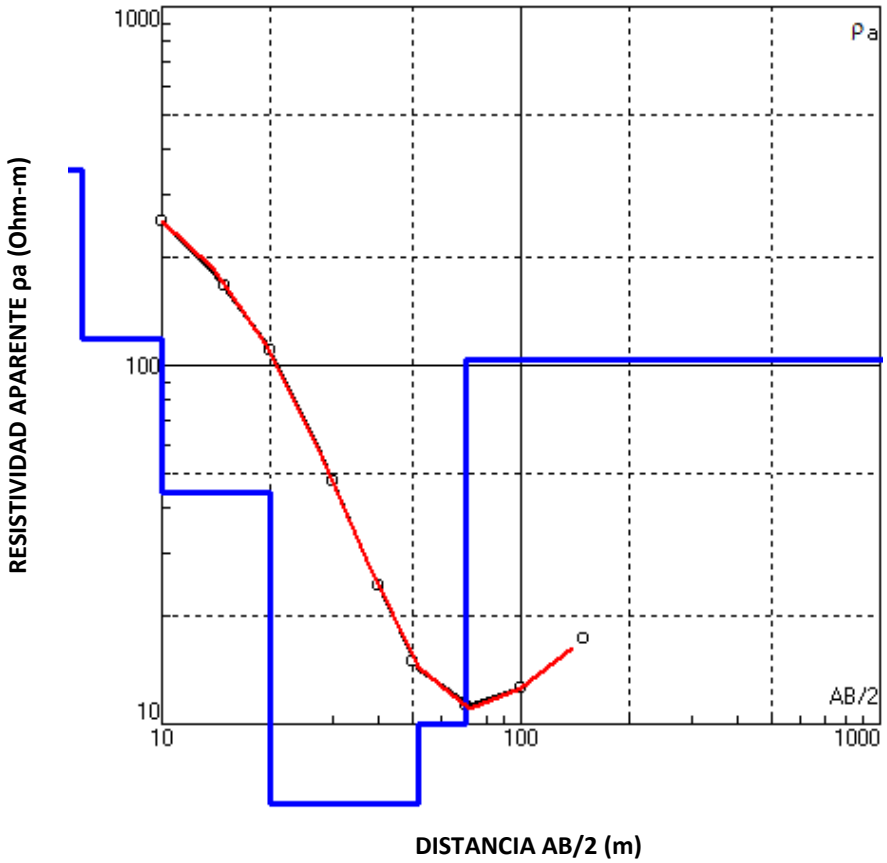


N	ρ	h	d	Alt
1	1370	2.6	2.6	-2.6
2	39	5.4	8	-8
3	22	6	14	-14
4	14	6	20	-20
5	10	27	47	-47
6	12	33	80	-80
7	37			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-20

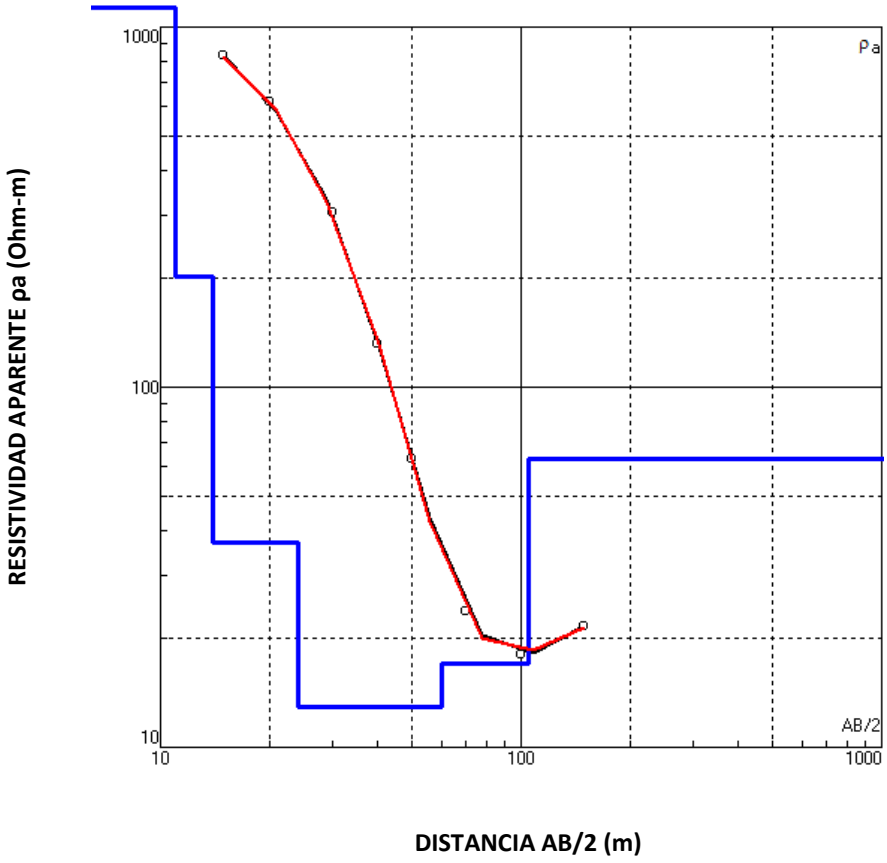


N	ρ	h	d	Alt
1	352	6	6	-6
2	118	4	10	-10
3	44	10	20	-20
4	6	32	52	-52
5	10	18	70	-70
6	104			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-21

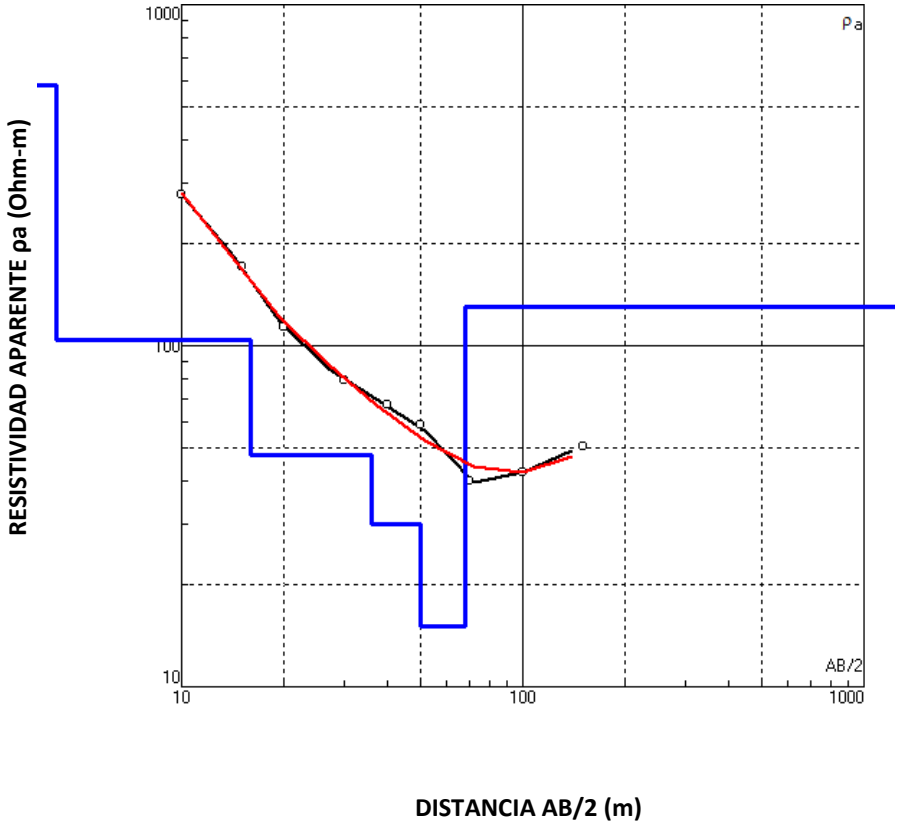


N	ρ	h	d	Alt
1	1130	11	11	-11
2	203	3	14	-14
3	37	10	24	-24
4	13	36	60	-60
5	17	45	105	-105
6	63			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-22

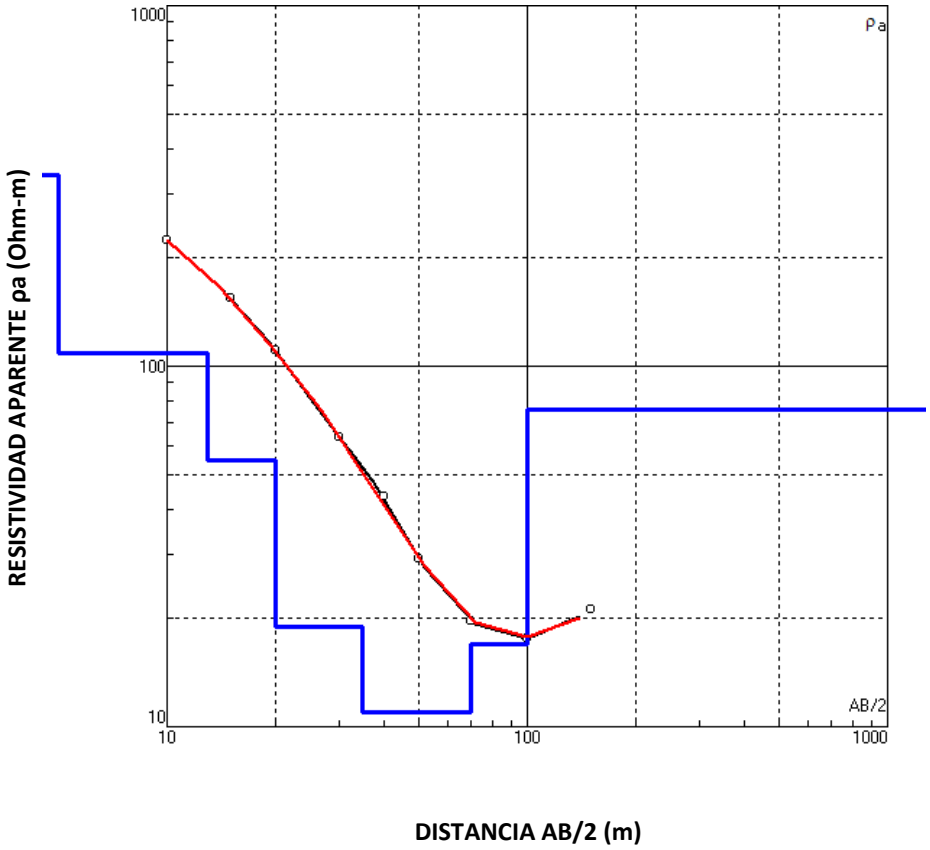


N	ρ	h	d	Alt
1	579	4.3	4.3	-4.3
2	103	11.7	16	-16
3	48	20	36	-36
4	30	14	50	-50
5	15	18	68	-68
6	130			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-23

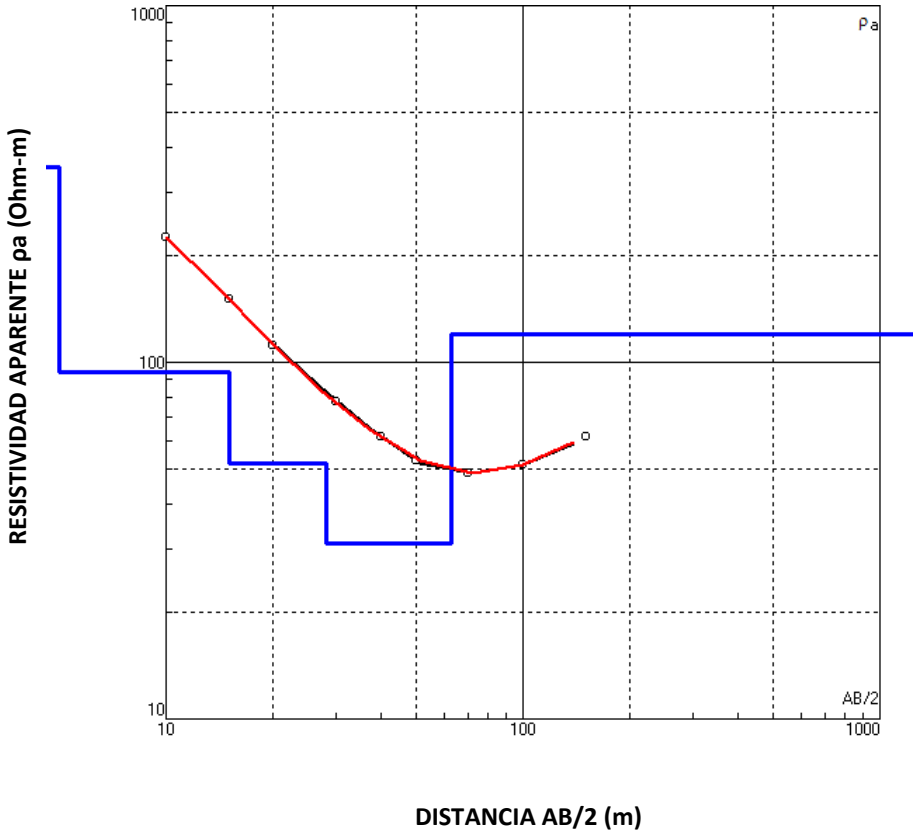


N	ρ	h	d	Alt
1	340	5	5	-5
2	109	8	13	-13
3	55	7	20	-20
4	19	15	35	-35
5	11	35	70	-70
6	17	30	100	-100
7	76			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-24

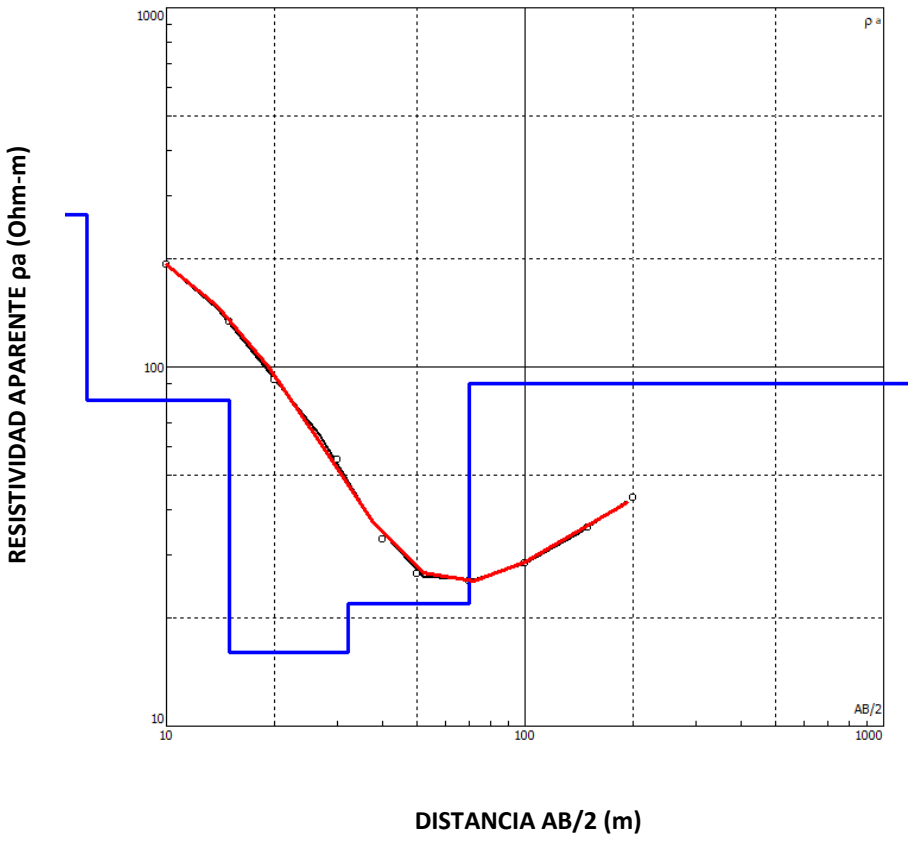


N	ρ	h	d	Alt
1	353	5	5	-5
2	94	10	15	-15
3	52	13	28	-28
4	31	35	63	-63
5	120			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-25

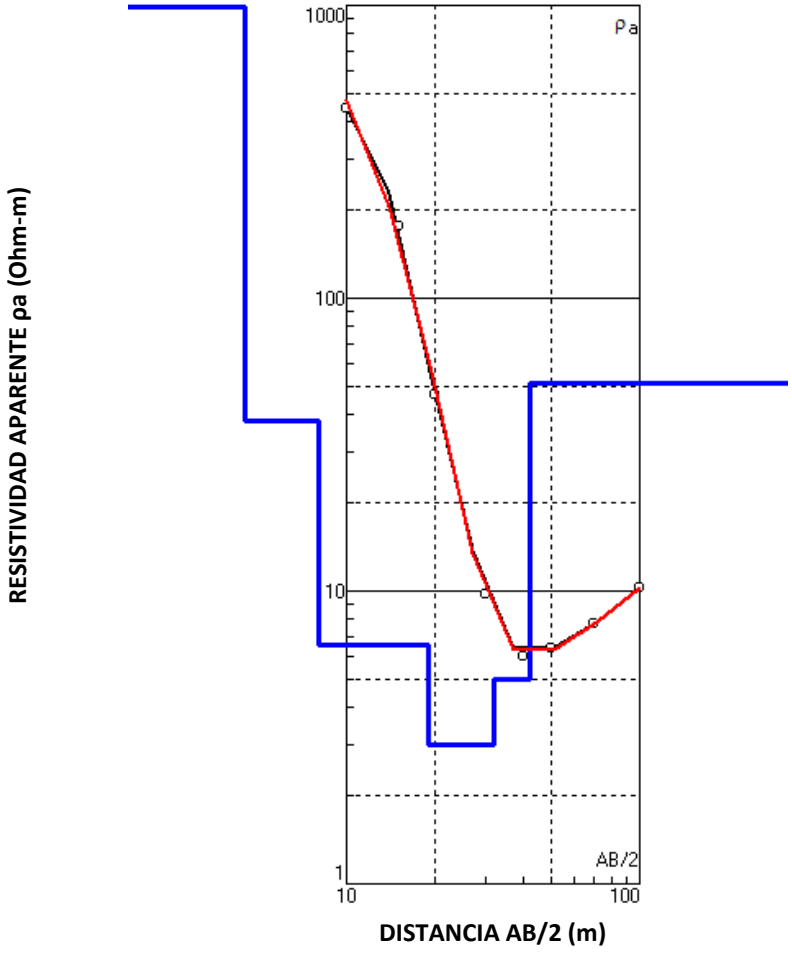


N	ρ	h	d	Alt
1	265	6	6	-6
2	81	9	15	-15
3	16	17	32	-32
4	22	38	70	-70
5	90			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-26

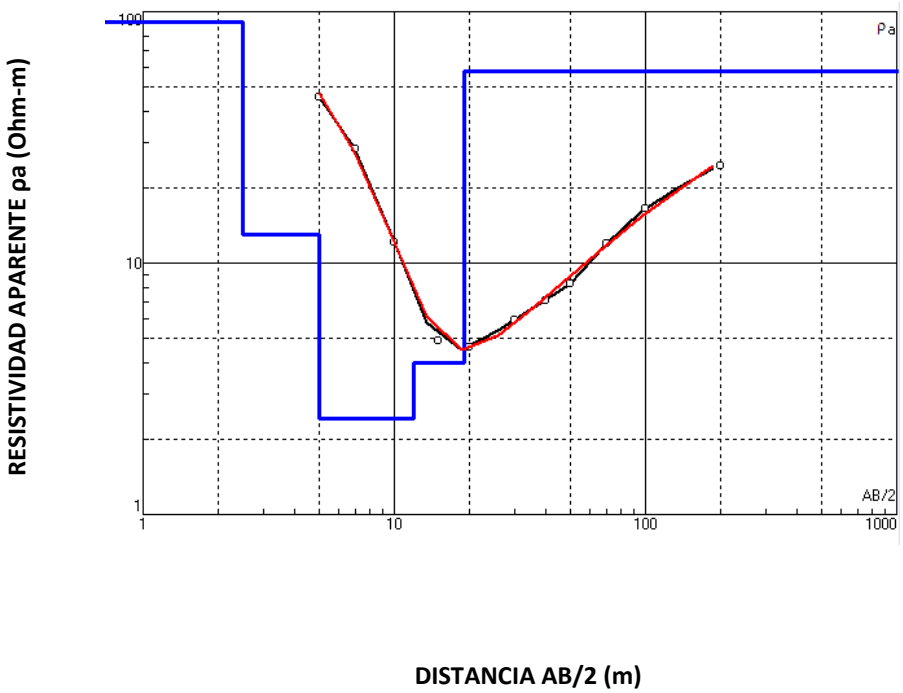


N	ρ	h	d	Alt
1	1280	4.5	4.5	-4.5
2	38	3.5	8	-8
3	6.5	11	19	-19
4	3	13	32	-32
5	5	10	42	-42
6	51			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-27

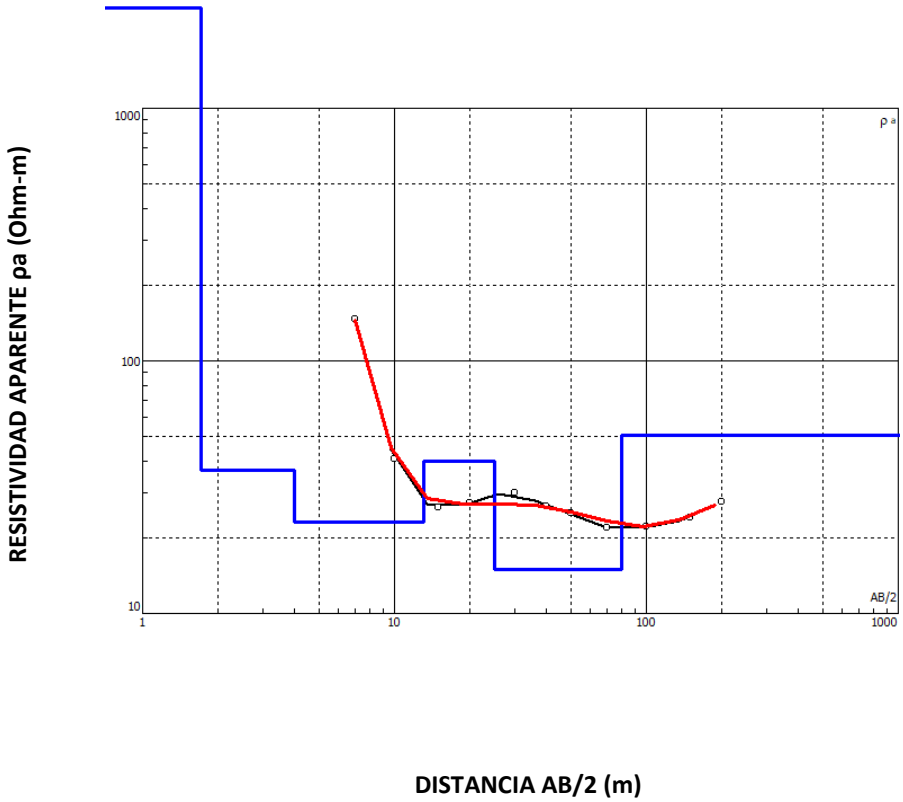


N	ρ	h	d	Alt
1	91	2.5	2.5	-2.5
2	13	2.5	5	-5
3	2.4	7	12	-12
4	4	7	19	-19
5	58			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-28

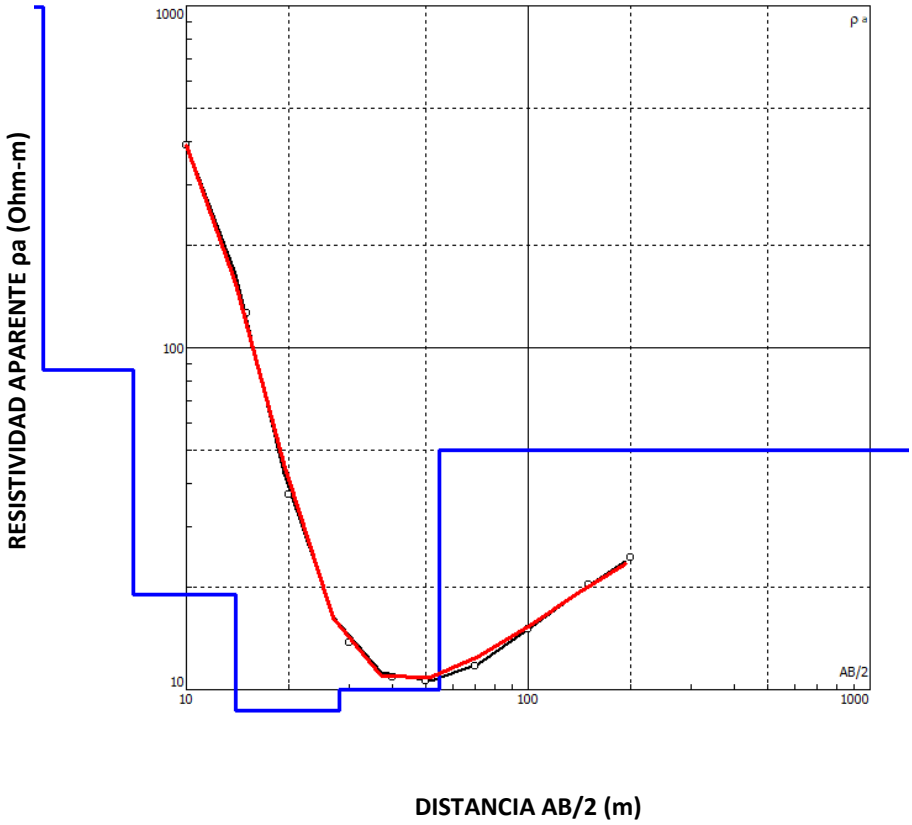


N	ρ	h	d	Alt
1	2490	1.7	1.7	-1.7
2	37	2.3	4	-4
3	23	9	13	-13
4	40	12	25	-25
5	15	55	80	-80
6	51			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-29

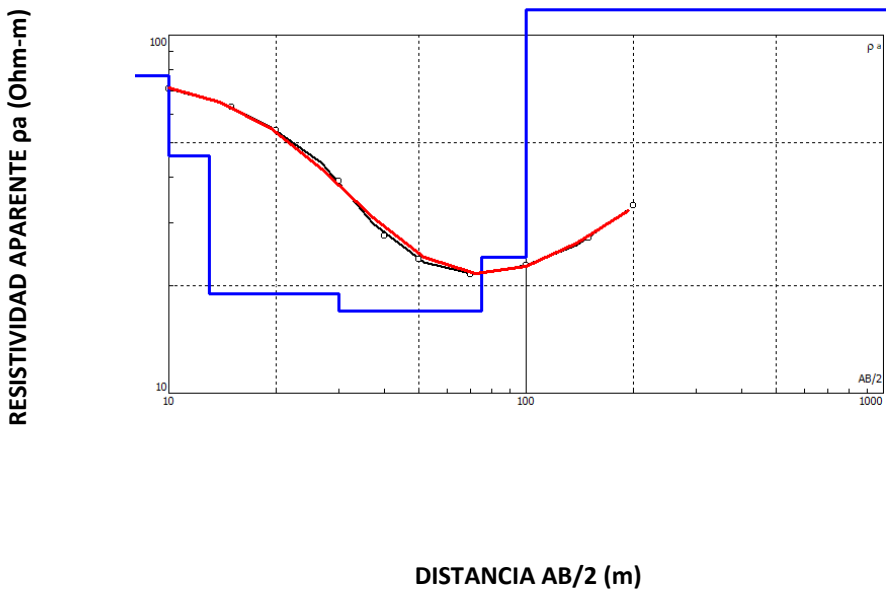


N	ρ	h	d	Alt
1	1420	3.8	3.8	-3.8
2	86	3.2	7	-7
3	19	7	14	-14
4	7	14	28	-28
5	10	27	55	-55
6	50			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-30

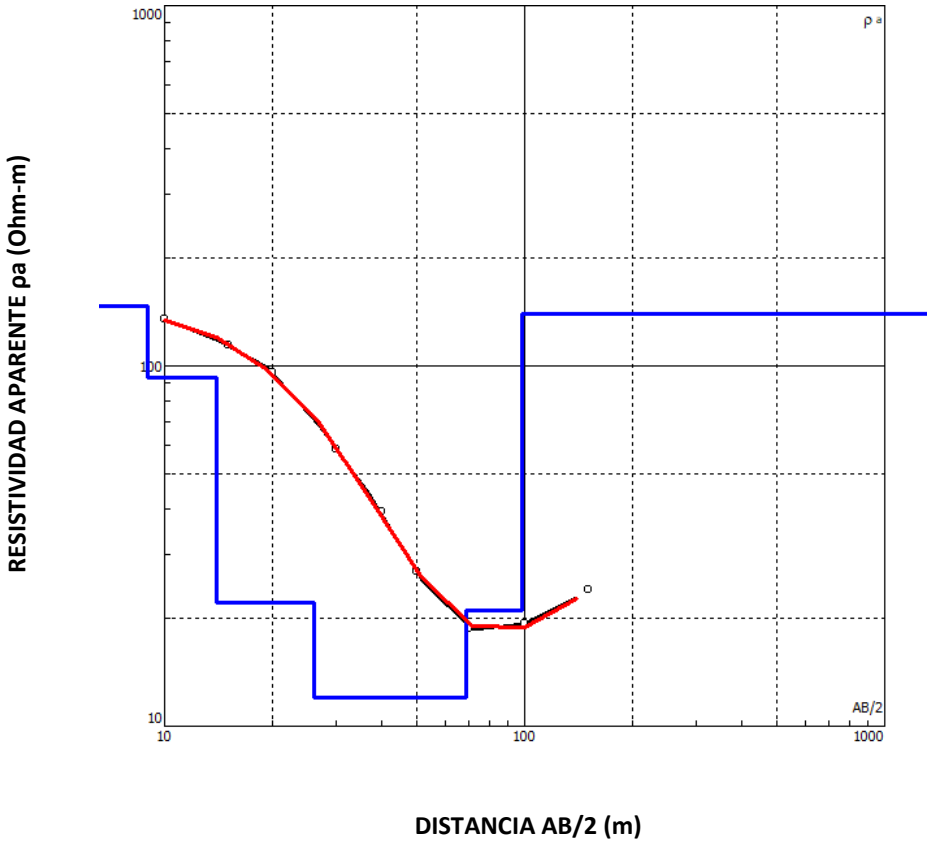


N	ρ	h	d	Alt
1	77	10	10	-10
2	46	3	13	-13
3	19	17	30	-30
4	17	45	75	-75
5	24	25	100	-100
6	118			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-31

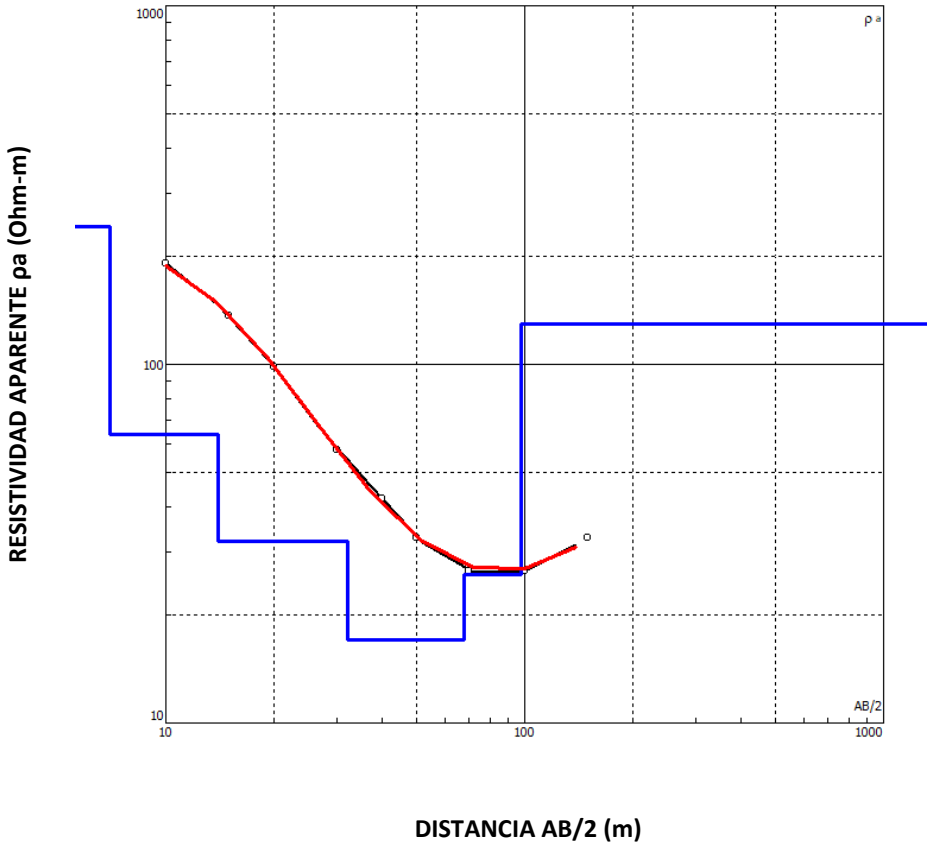


N	ρ	h	d	Alt
1	147	9	9	-9
2	93	5	14	-14
3	22	12	26	-26
4	12	43	69	-69
5	21	29	98	-98
6	140			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-32

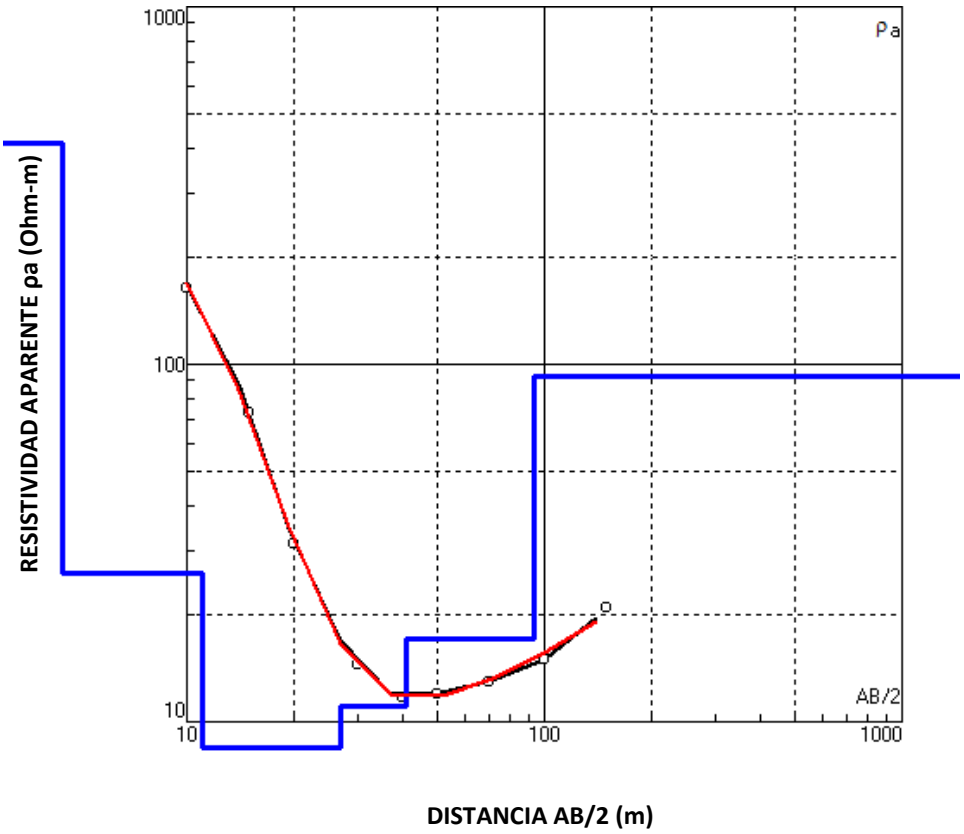


N	ρ	h	d	Alt
1	242	7	7	-7
2	64	7	14	-14
3	32	18	32	-32
4	17	36	68	-68
5	26	30	98	-98
6	130			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-33

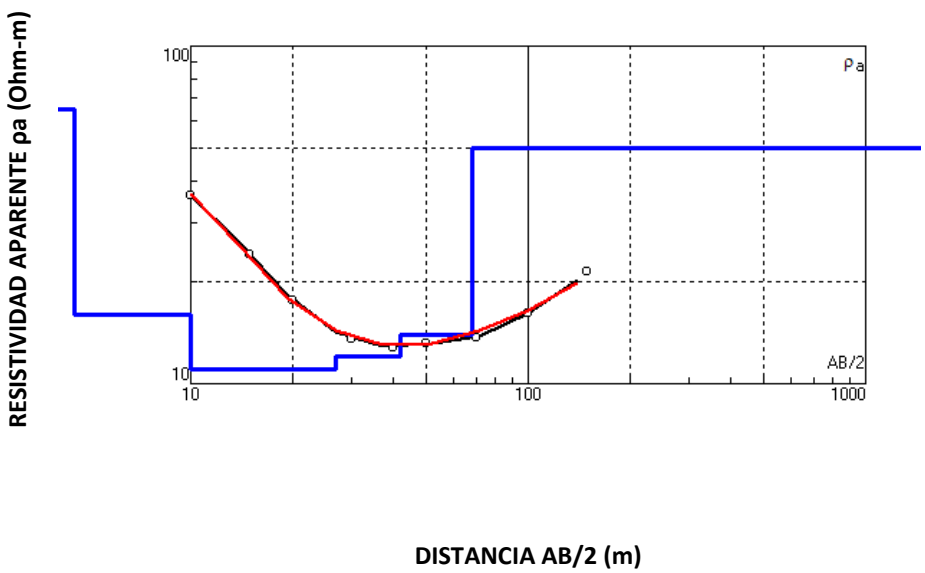


N	ρ	h	d	Alt
1	417	4.5	4.5	-4.5
2	26	6.5	11	-11
3	8.5	16	27	-27
4	11	14	41	-41
5	17	53	94	-94
6	92			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-34

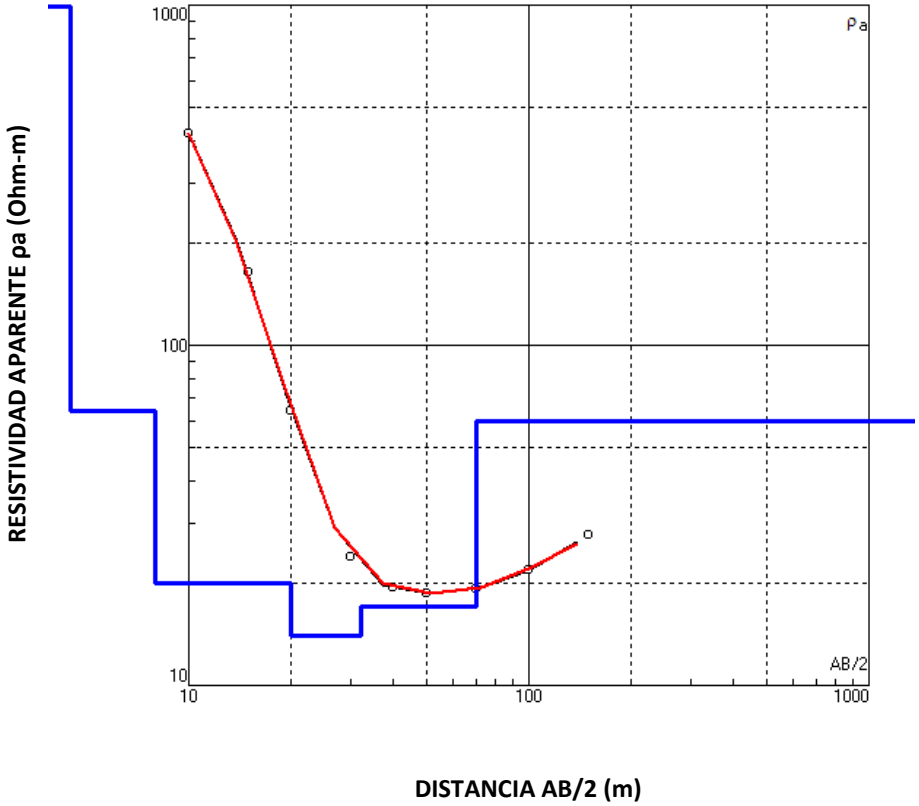


N	ρ	h	d	Alt
1	65	4.5	4.5	-4.5
2	16	5.5	10	-10
3	11	17	27	-27
4	12	15	42	-42
5	14	26	68	-68
6	50			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-35

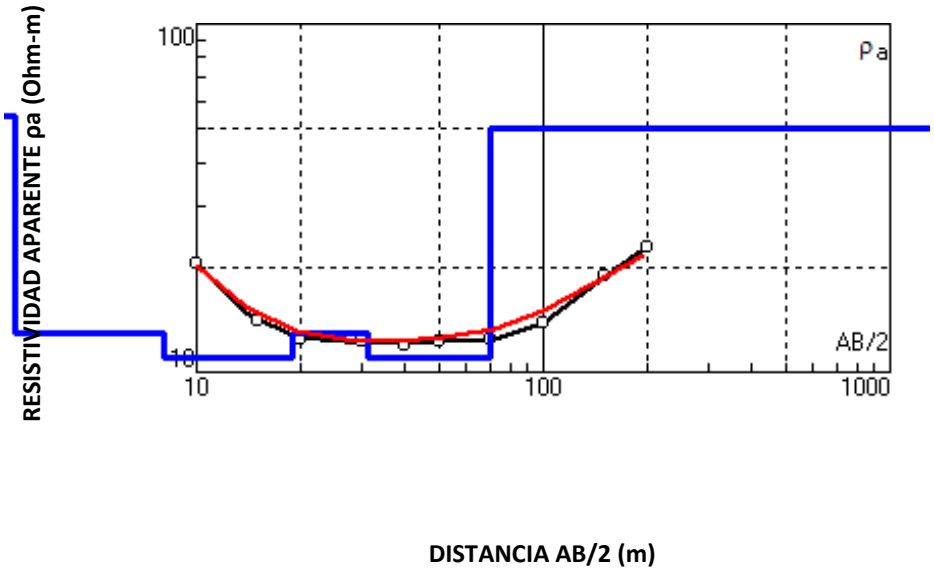


N	ρ	h	d	Alt
1	1070	4.5	4.5	-4.5
2	64	3.5	8	-8
3	20	12	20	-20
4	14	12	32	-32
5	17	38	70	-70
6	60			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-36

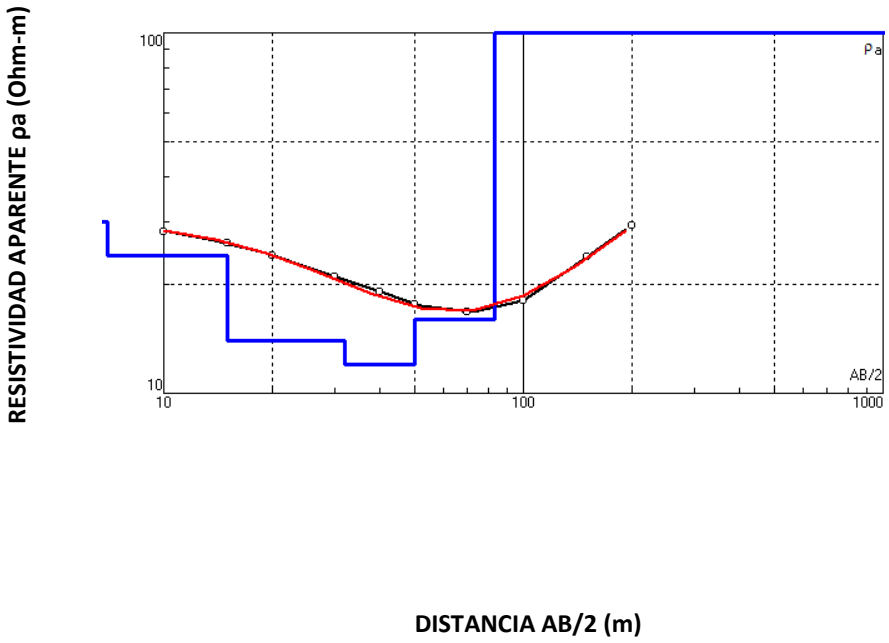


N	ρ	h	d	Alt
1	54	3	3	-3
2	13	5	8	-8
3	11	11	19	-19
4	13	12	31	-31
5	11	39	70	-70
6	50			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-37

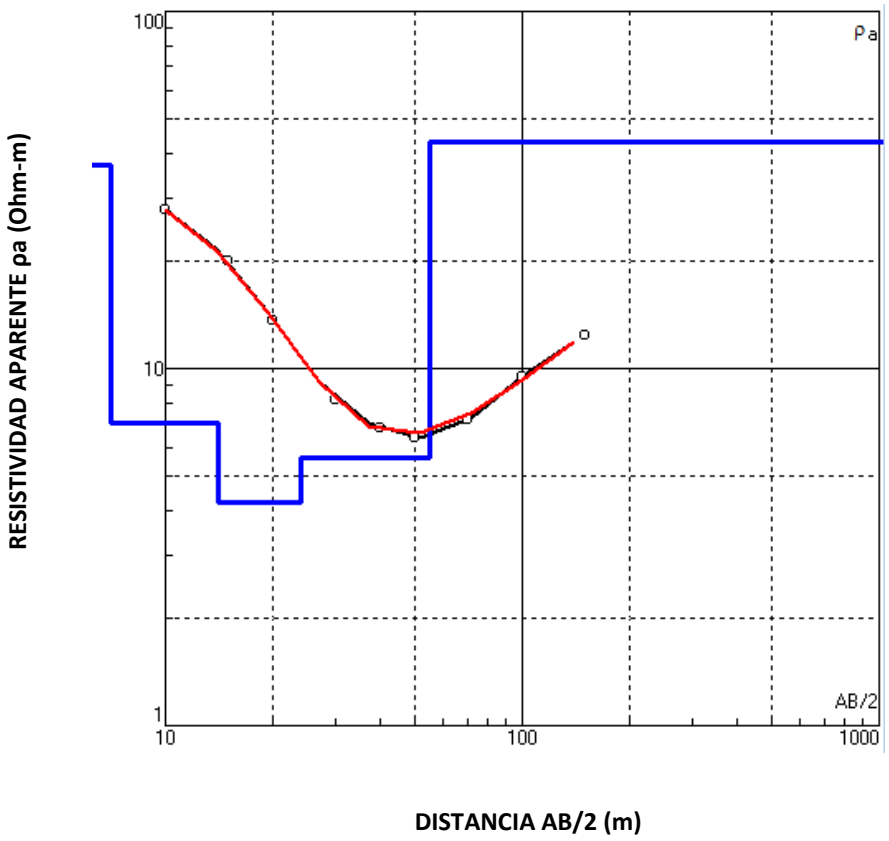


N	ρ	h	d	Alt
1	30	7	7	-7
2	24	8	15	-15
3	14	17	32	-32
4	12	18	50	-50
5	16	33	83	-83
6	100			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-38

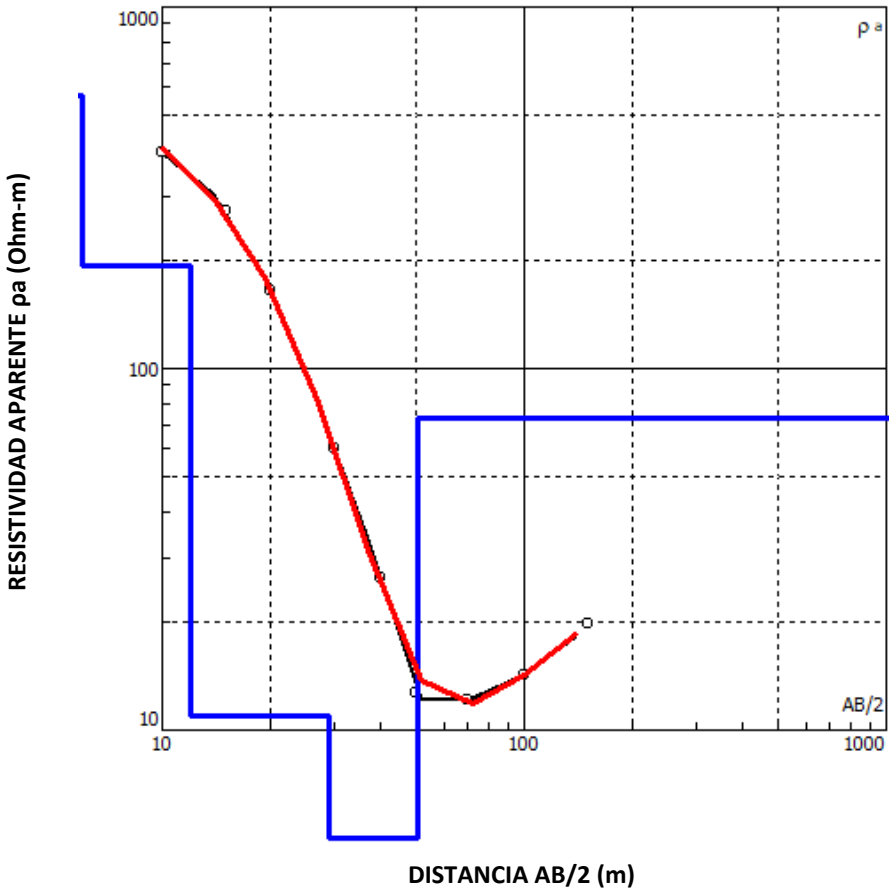


N	ρ	h	d	Alt
1	37	7	7	-7
2	7	7	14	-14
3	4.2	10	24	-24
4	5.6	31	55	-55
5	43			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-39

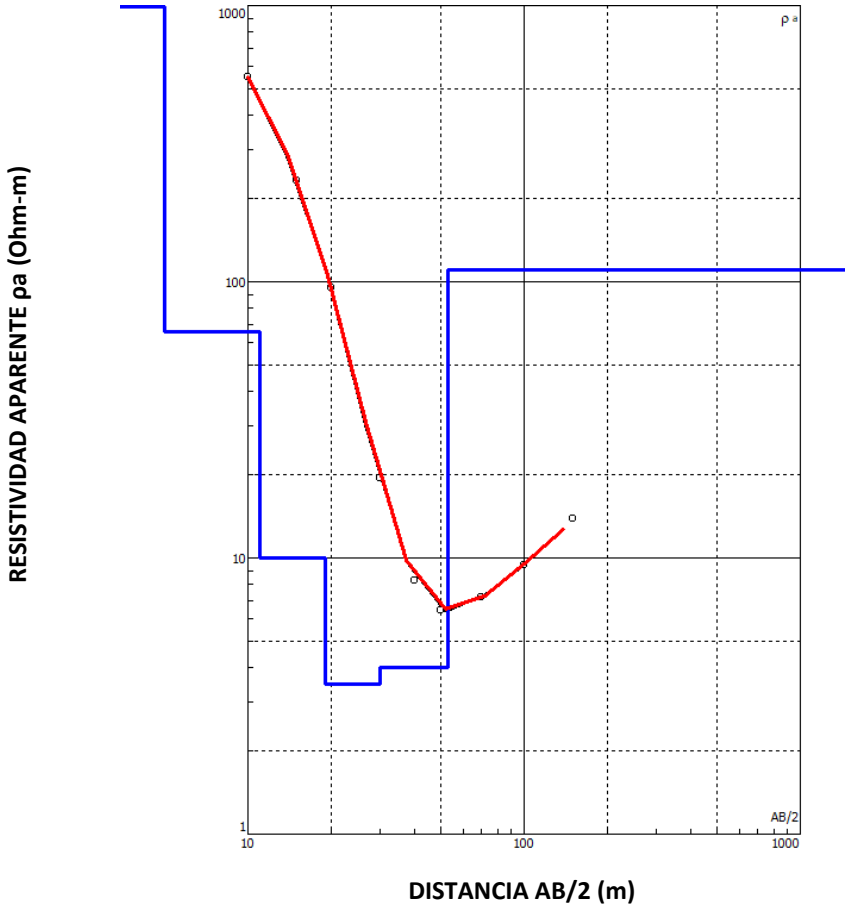


N	ρ	h	d	Alt
1	566	6	6	-6
2	192	6	12	-12
3	11	17	29	-29
4	5	22	51	-51
5	73			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-40

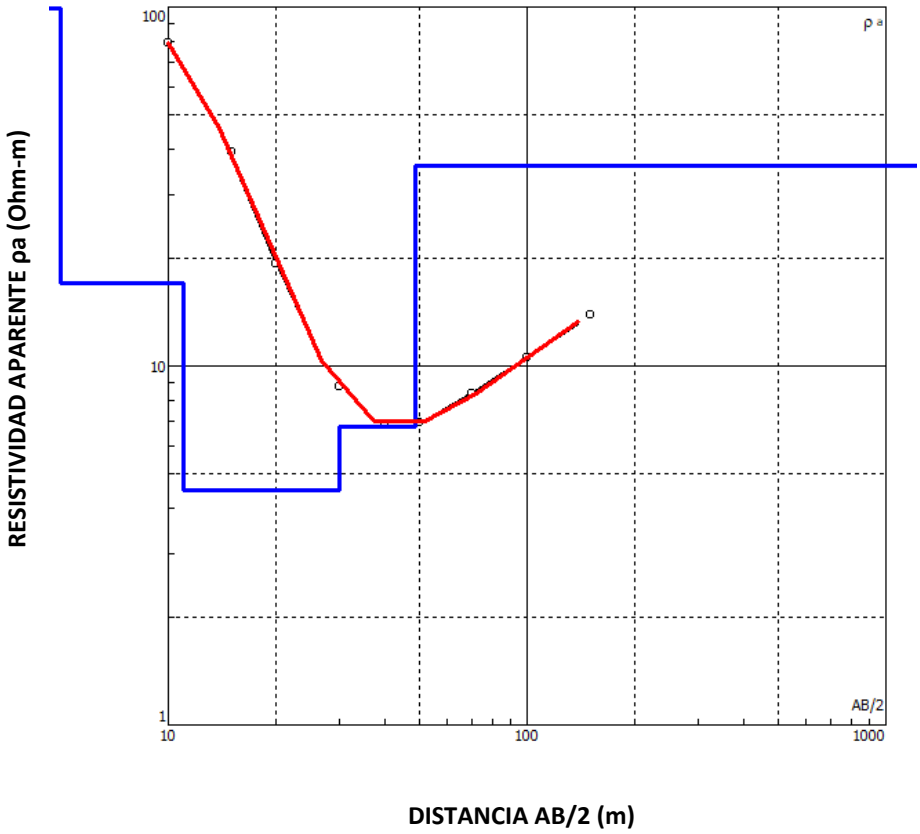


N	ρ	h	d	Alt
1	1185	5	5	-5
2	66	6	11	-11
3	10	8	19	-19
4	3.5	11	30	-30
5	4	23	53	-53
6	110			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-41

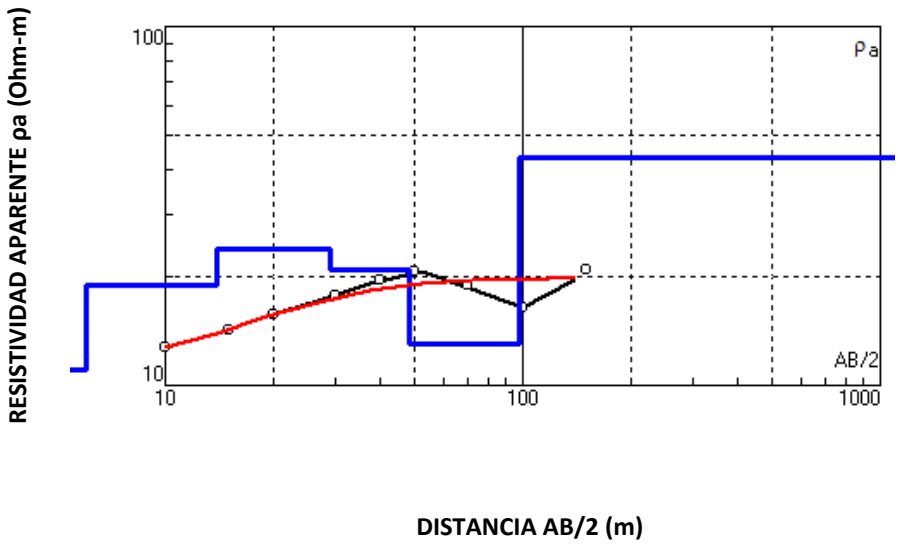


N	ρ	h	d	Alt
1	156	5	5	-5
2	17	6	11	-11
3	4.5	19	30	-30
4	6.8	19	49	-49
5	36			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-42

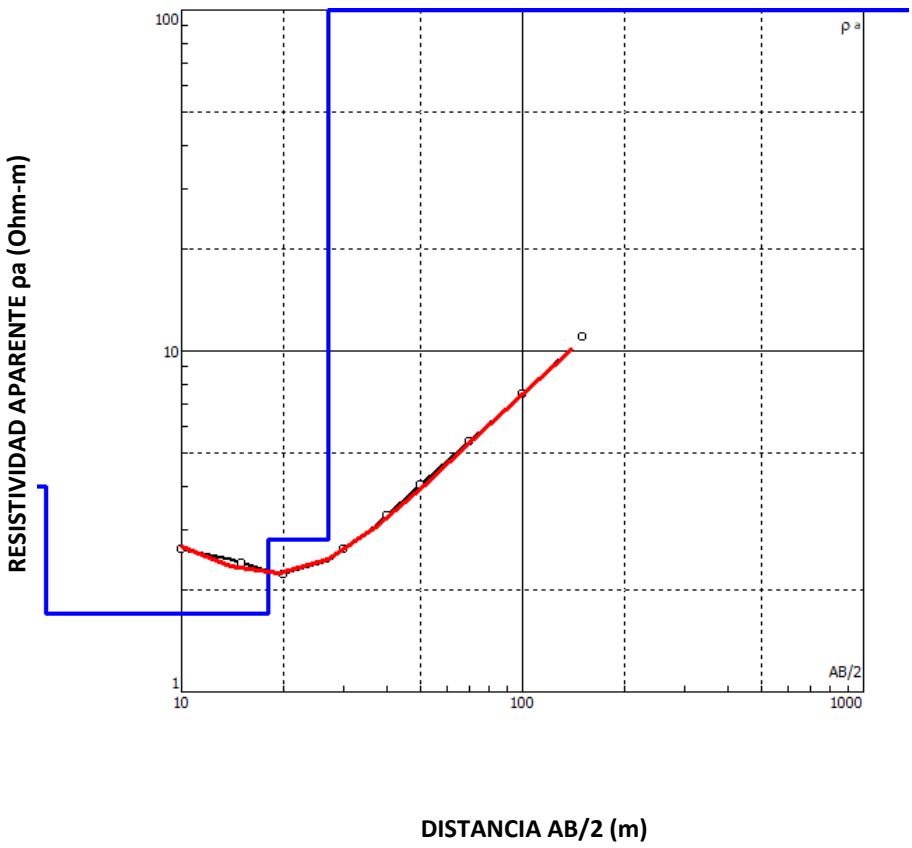


N	ρ	h	d	Alt
1	11	6	6	-6
2	19	8	14	-14
3	24	15	29	-29
4	21	19	48	-48
5	13	50	98	-98
6	43			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-43

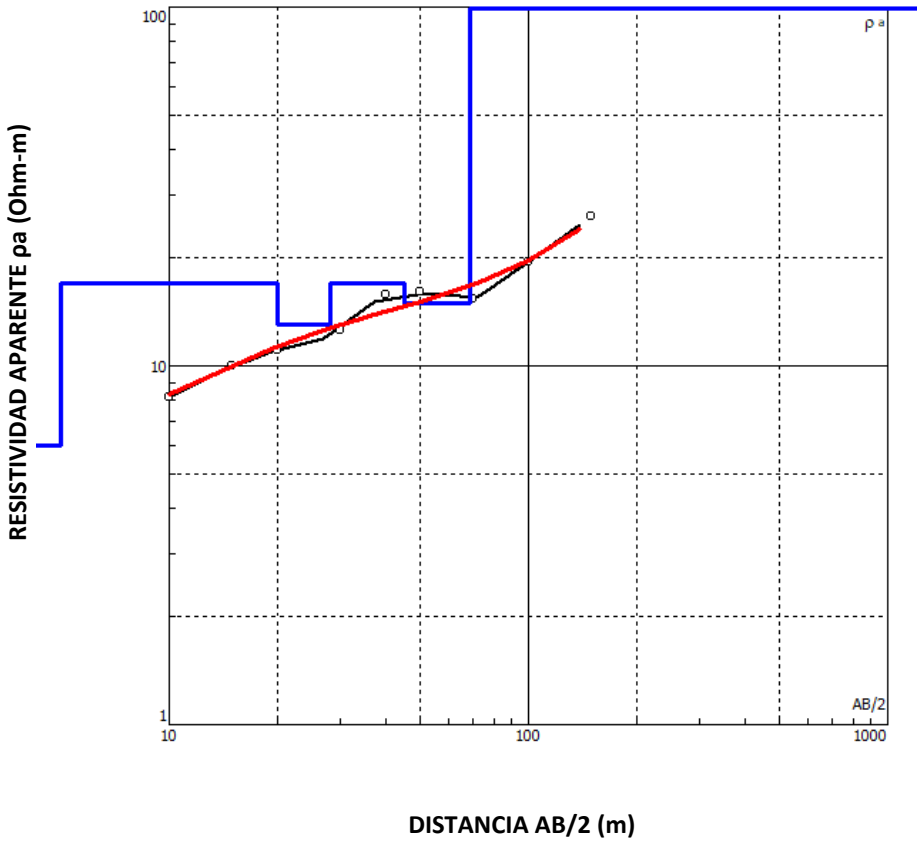


N	ρ	h	d	Alt
1	4	4	4	-4
2	1.7	14	18	-18
3	2.8	9	27	-27
4	100			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-44

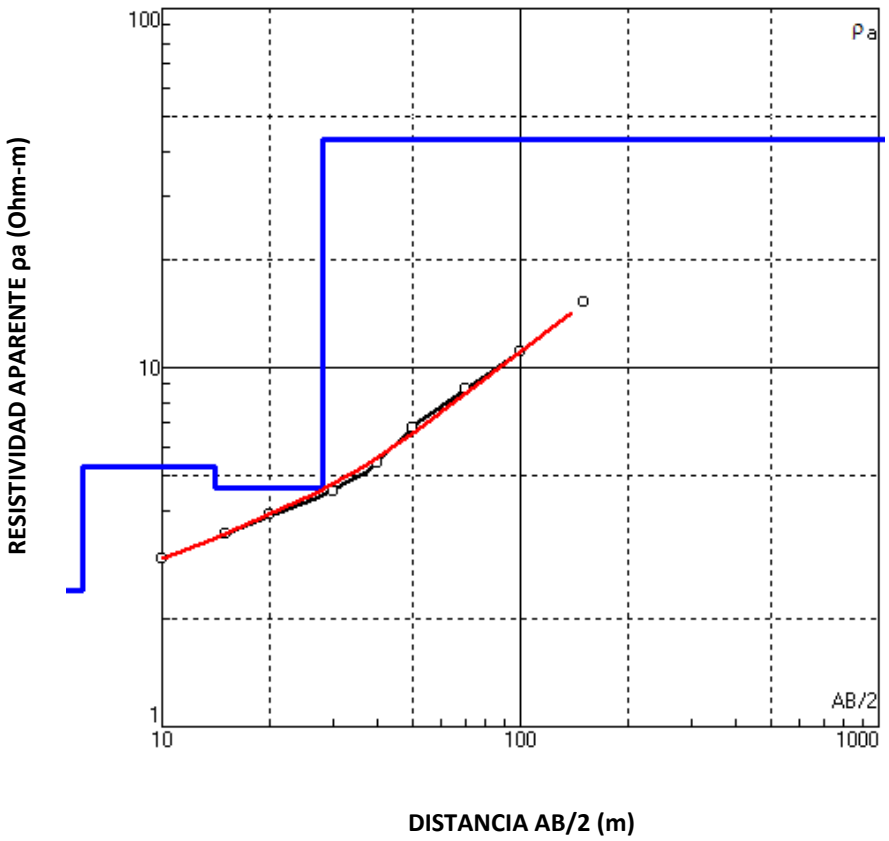


N	ρ	h	d	Alt
1	6	5	5	-5
2	17	15	20	-20
3	13	8	28	-28
4	17	17	45	-45
5	15	24	69	-69
6	105			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-45

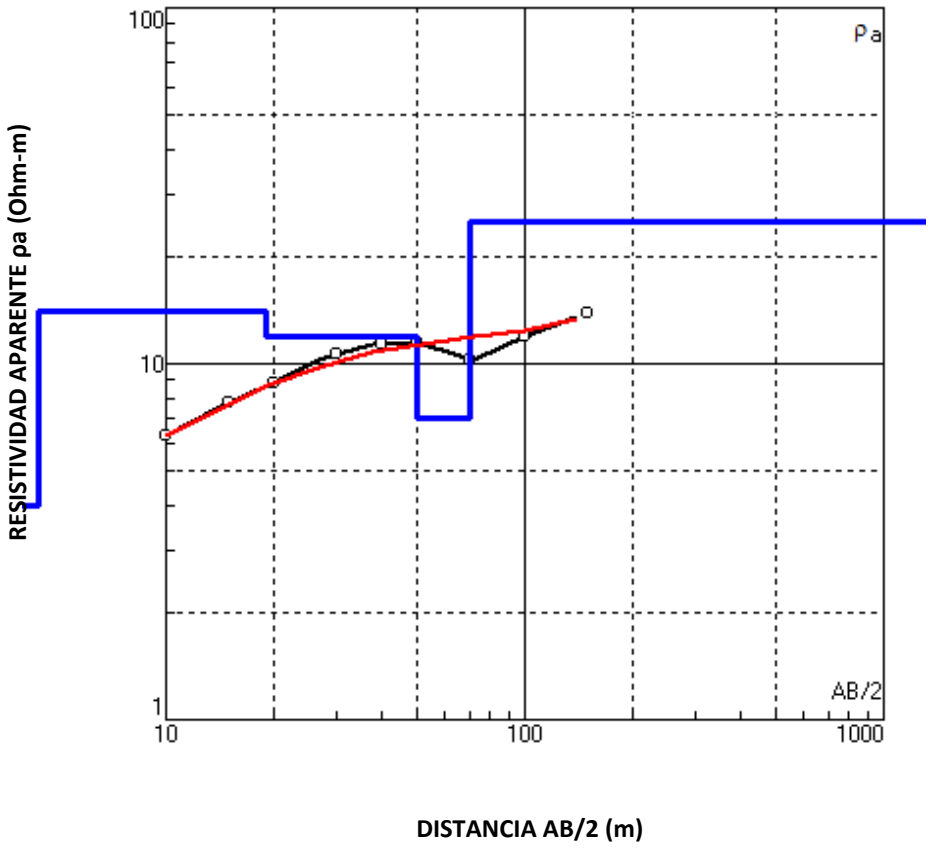


N	ρ	h	d	Alt
1	2.4	6	6	-6
2	5.3	8	14	-14
3	4.6	14	28	-28
4	43			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-46

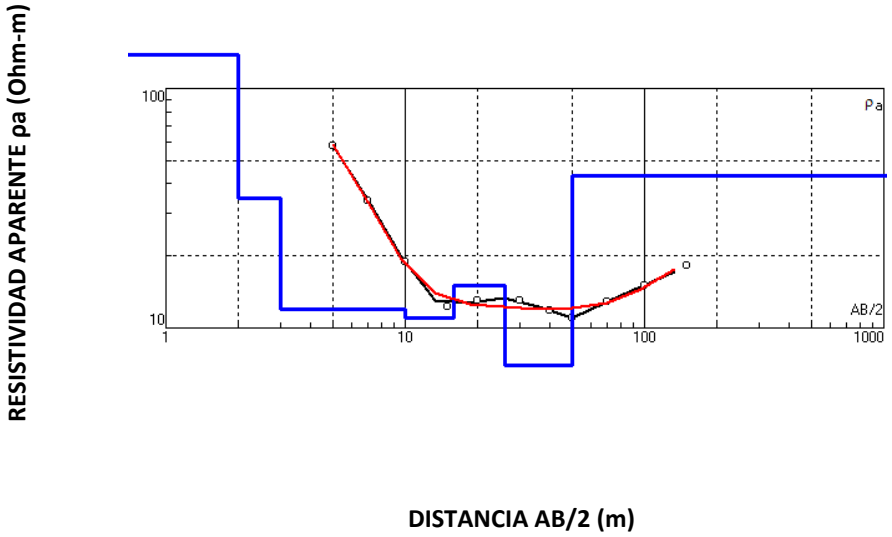


N	ρ	h	d	Alt
1	4	4.4	4.4	-4.4
2	14	14.6	19	-19
3	12	31	50	-50
4	7	20	70	-70
5	25			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-47

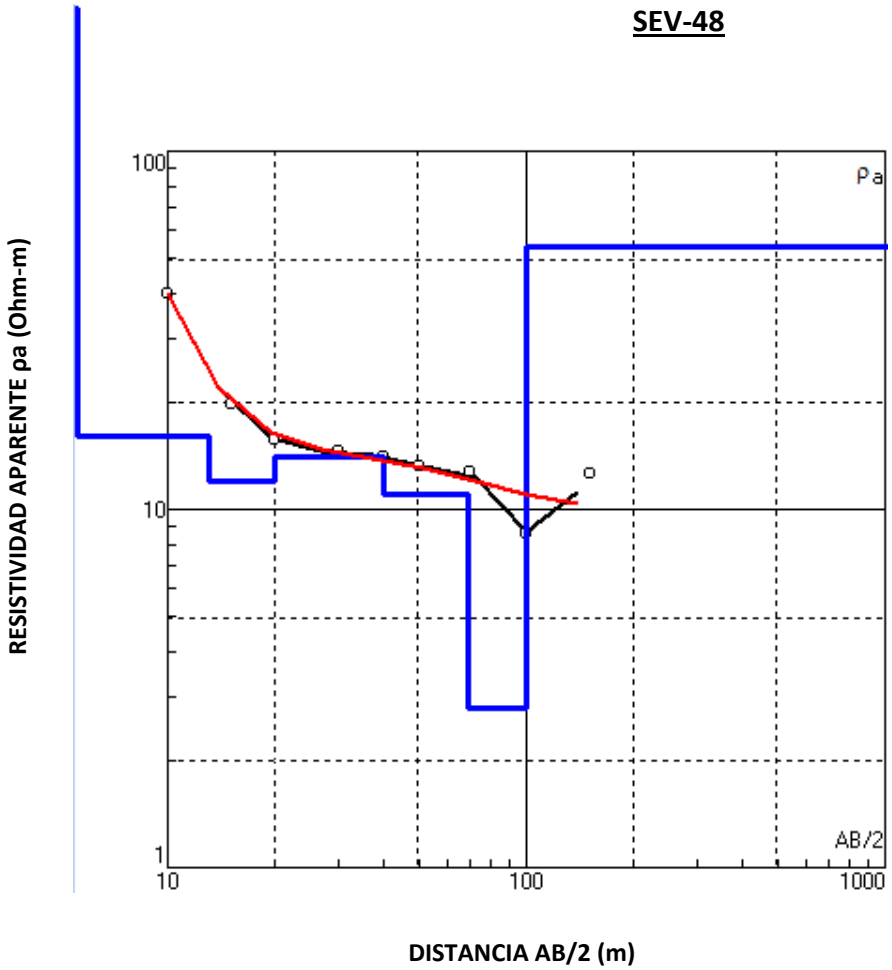


N	ρ	h	d	Alt
1	138	2	2	-2
2	35	1	3	-3
3	12	7	10	-10
4	11	6	16	-16
5	15	10	26	-26
6	7	24	50	-50
7	43			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-48

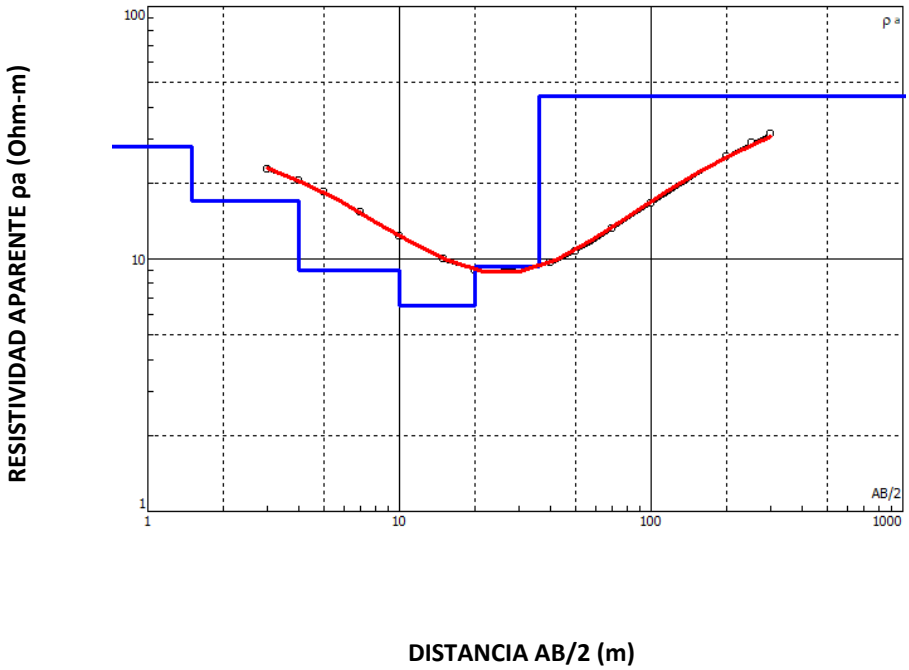


N	ρ	h	d	Alt
1	250	2.8	2.8	-2.8
2	16	10.2	13	-13
3	12	7	20	-20
4	14	20	40	-40
5	11	29	69	-69
6	2.8	31	100	-100
7	54			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-49

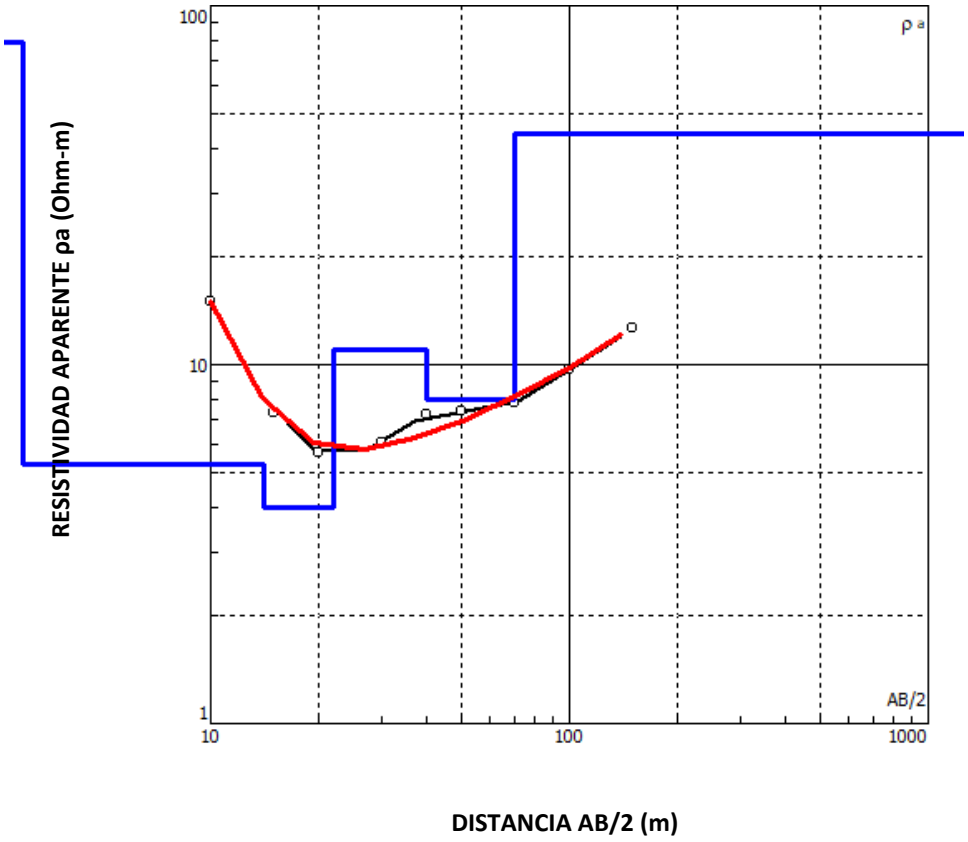


N	ρ	h	d	Alt
1	28	1.5	1.5	-1.5
2	17	2.5	4	-4
3	9	6	10	-10
4	6.5	10	20	-20
5	9.3	16	36	-36
6	44			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-50

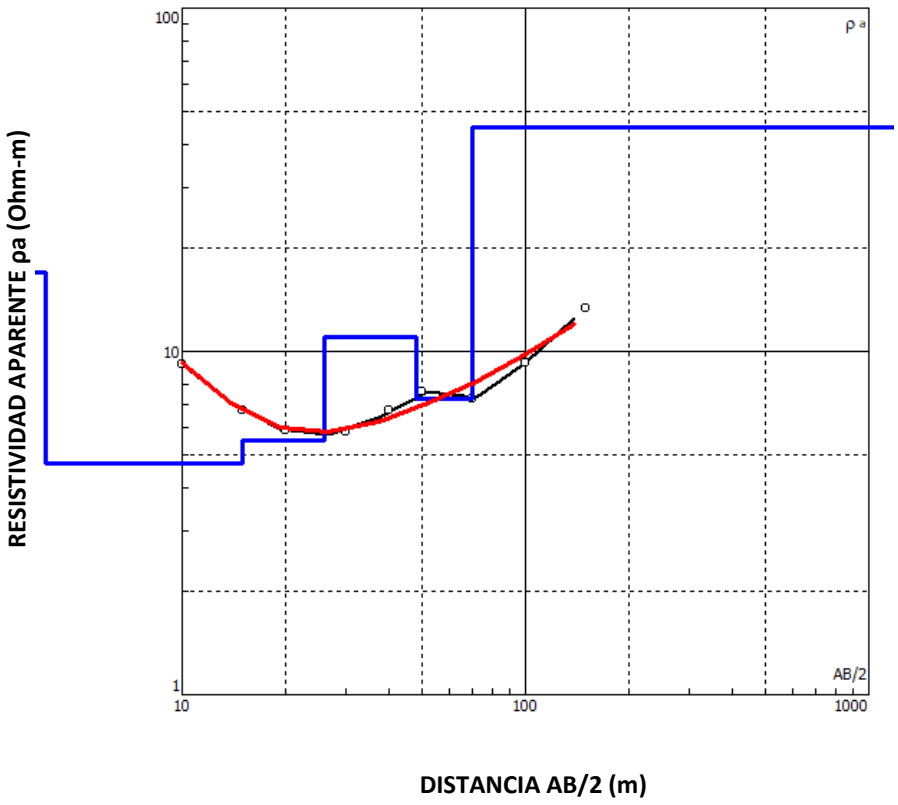


N	ρ	h	d	Alt
1	79	3	3	-3
2	5.3	11	14	-14
3	4	8	22	-22
4	11	18	40	-40
5	8	30	70	-70
6	44			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-51

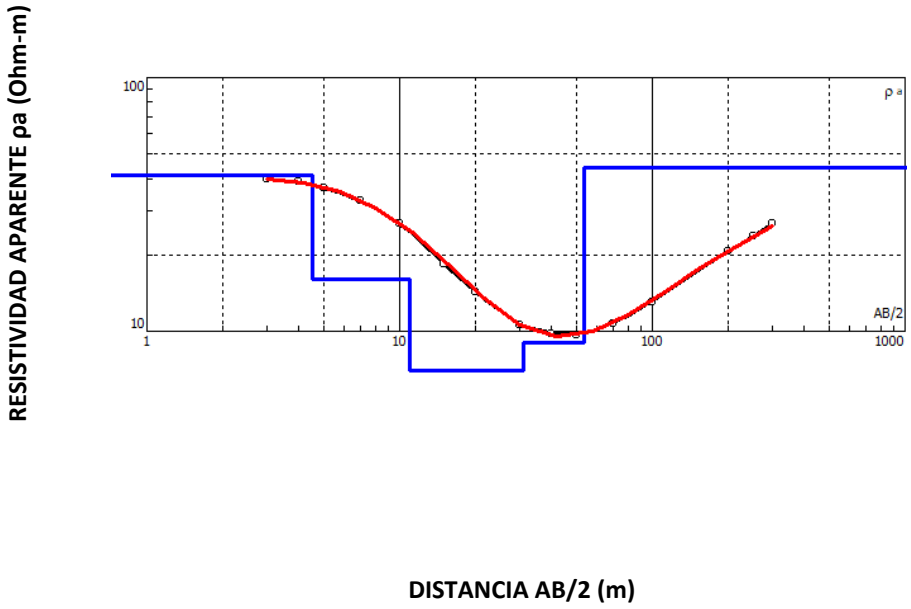


N	ρ	h	d	Alt
1	17	4	4	-4
2	4.7	11	15	-15
3	5.5	11	26	-26
4	11	22	48	-48
5	7.3	22	70	-70
6	45			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-52

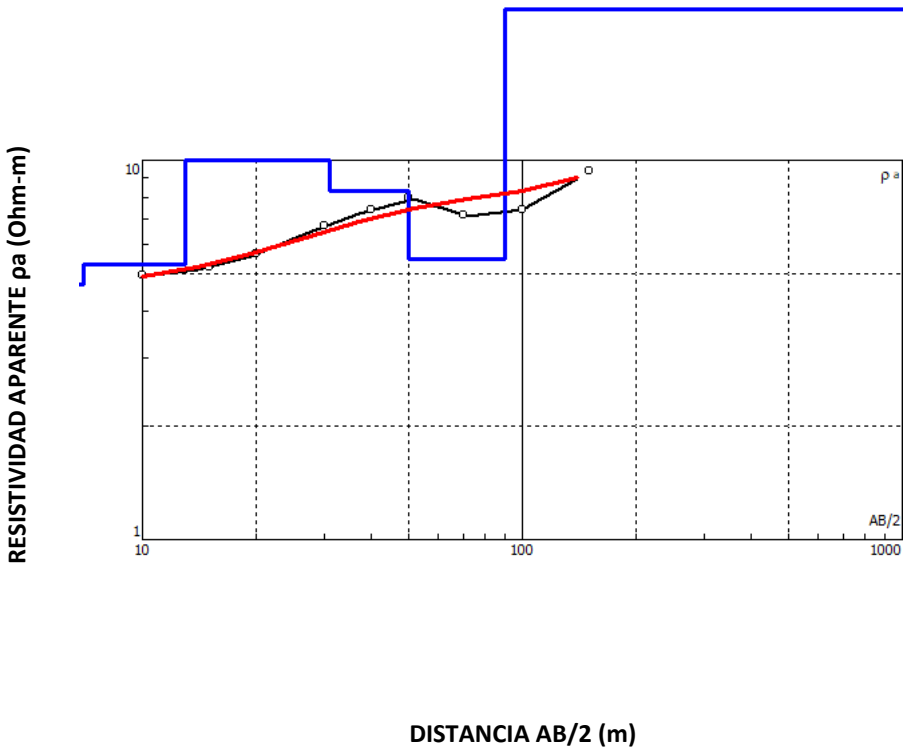


N	ρ	h	d	Alt
1	41	4.5	4.5	-4.5
2	16	6.5	11	-11
3	7	20	31	-31
4	9	23	54	-54
5	44			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-53

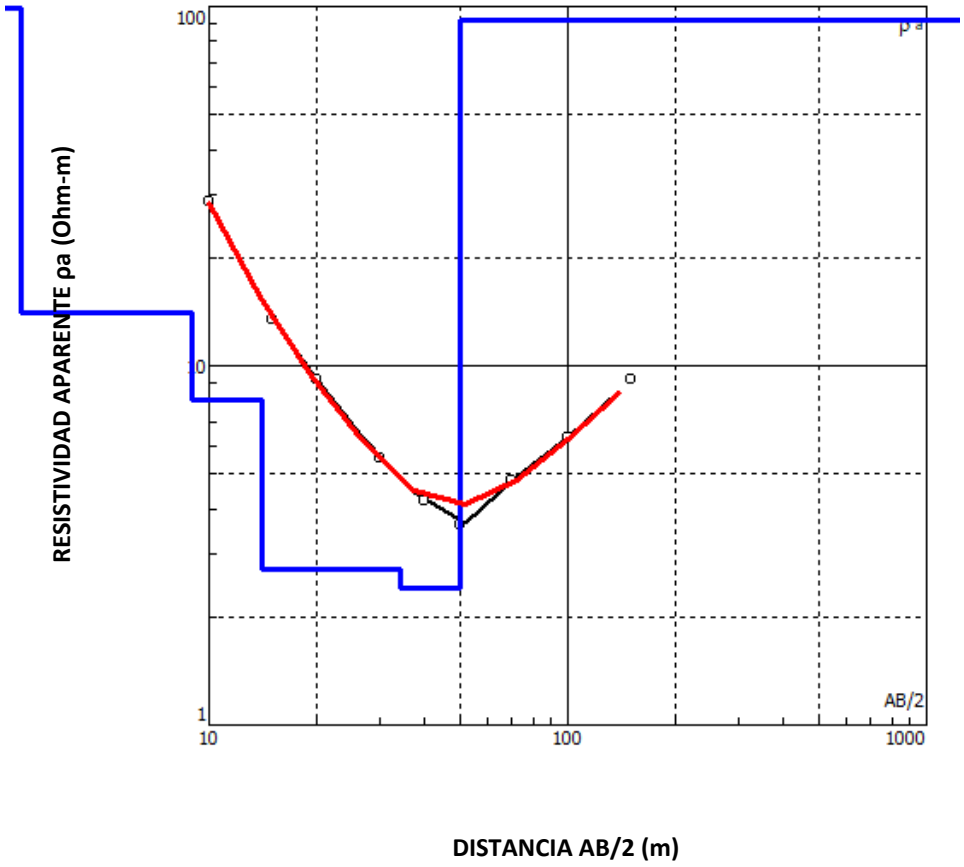


N	ρ	h	d	Alt
1	4.7	7	7	-7
2	5.3	6	13	-13
3	10	18	31	-31
4	8.3	19	50	-50
5	5.5	40	90	-90
6	25			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-54

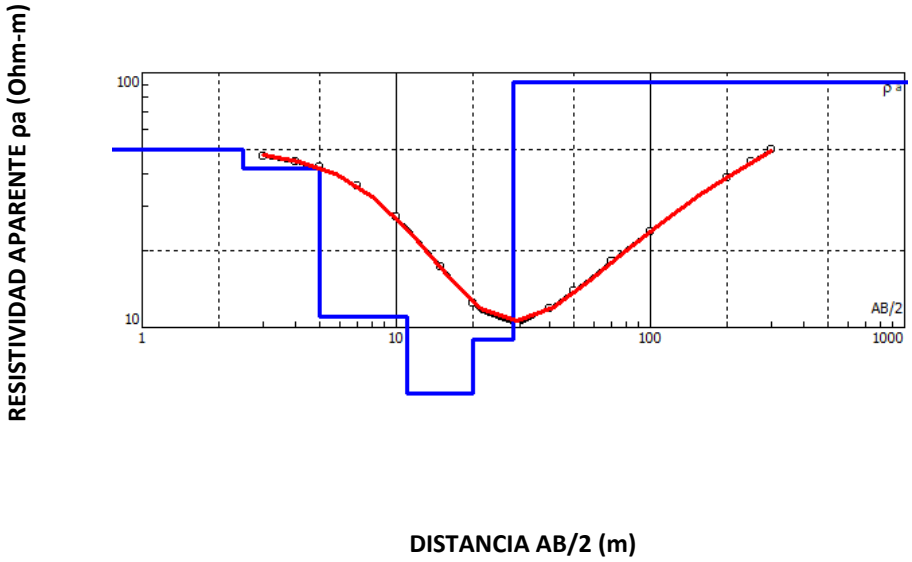


N	ρ	h	d	Alt
1	125	3	3	-3
2	14	6	9	-9
3	8	5	14	-14
4	2.7	20	34	-34
5	2.4	16	50	-50
6	92			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-55

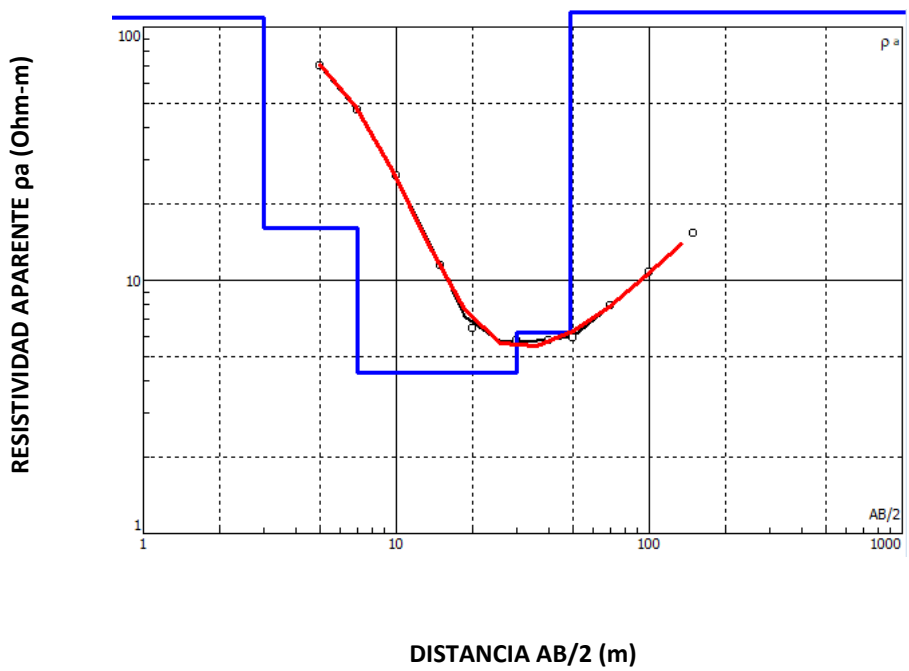


N	ρ	h	d	Alt
1	50	2.5	2.5	-2.5
2	42	2.5	5	-5
3	11	6	11	-11
4	5.5	9	20	-20
5	9	9	29	-29
6	92			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-56

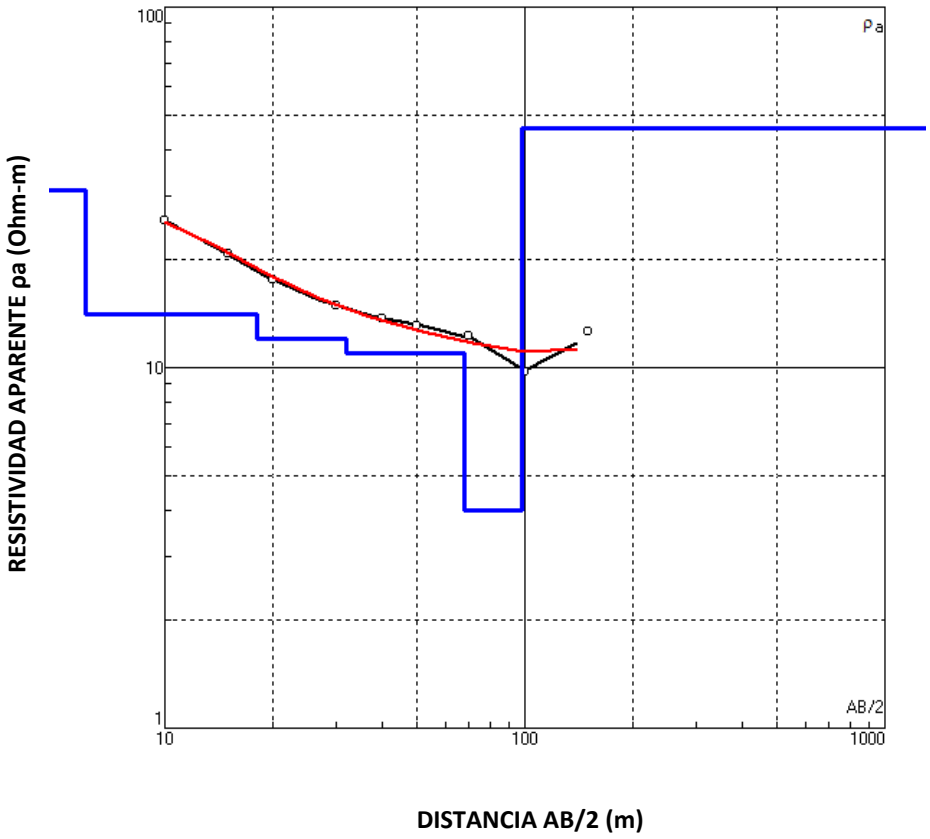


N	ρ	h	d	Alt
1	109	3	3	-3
2	16	4	7	-7
3	4.3	23	30	-30
4	6.2	19	49	-49
5	115			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-57

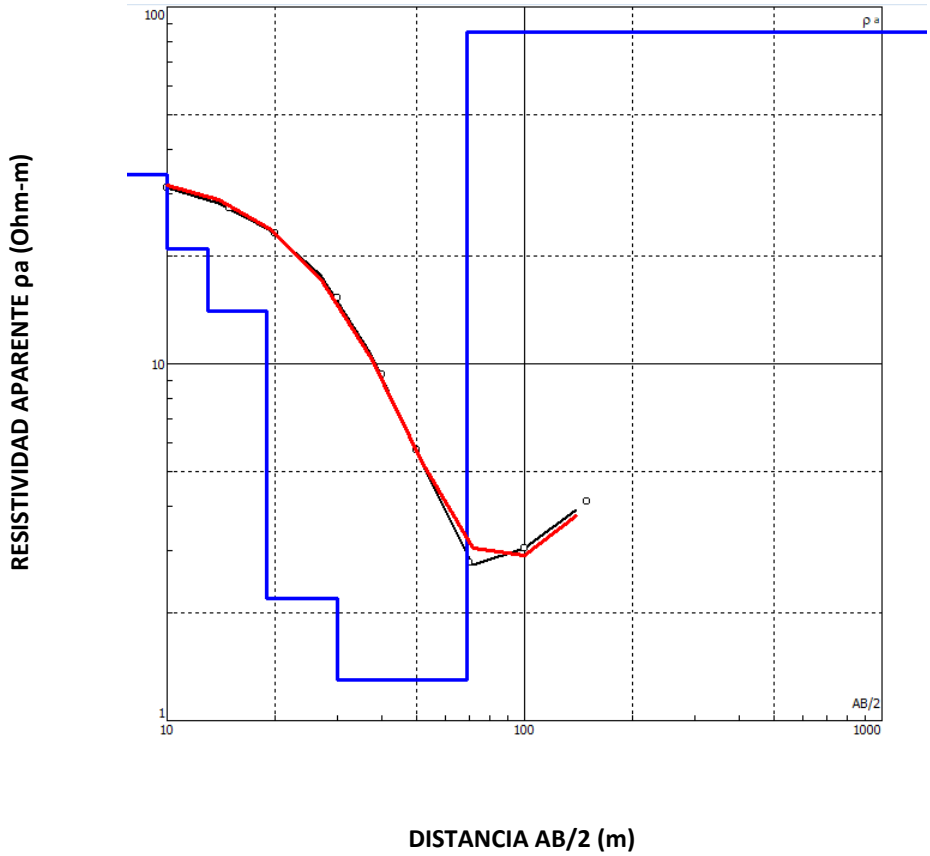


N	ρ	h	d	Alt
1	31	6	6	-6
2	14	12	18	-18
3	12	14	32	-32
4	11	36	68	-68
5	4	30	98	-98
6	46			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-58

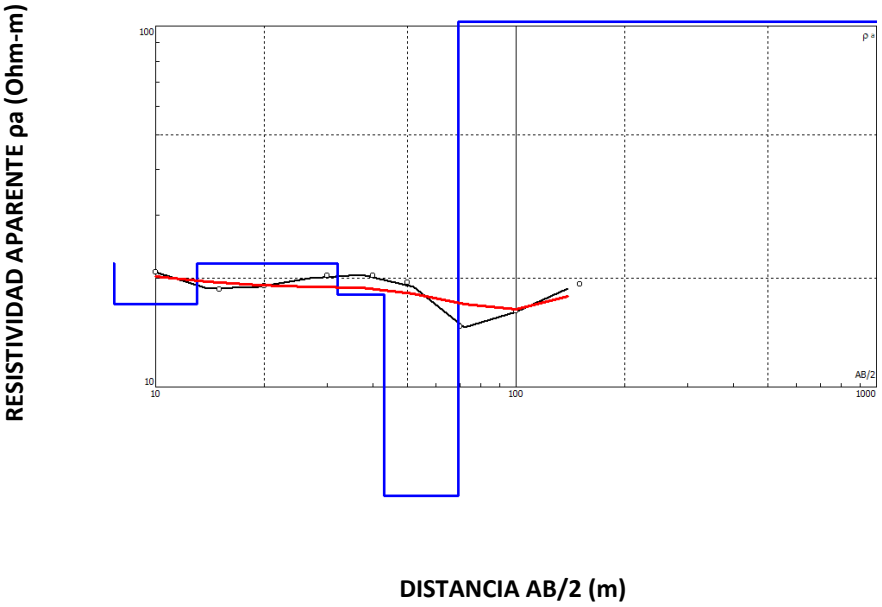


N	ρ	h	d	Alt
1	34	10	10	-10
2	21	3	13	-13
3	14	6	19	-19
4	2.2	11	30	-30
5	1.3	39	69	-69
6	85			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-59

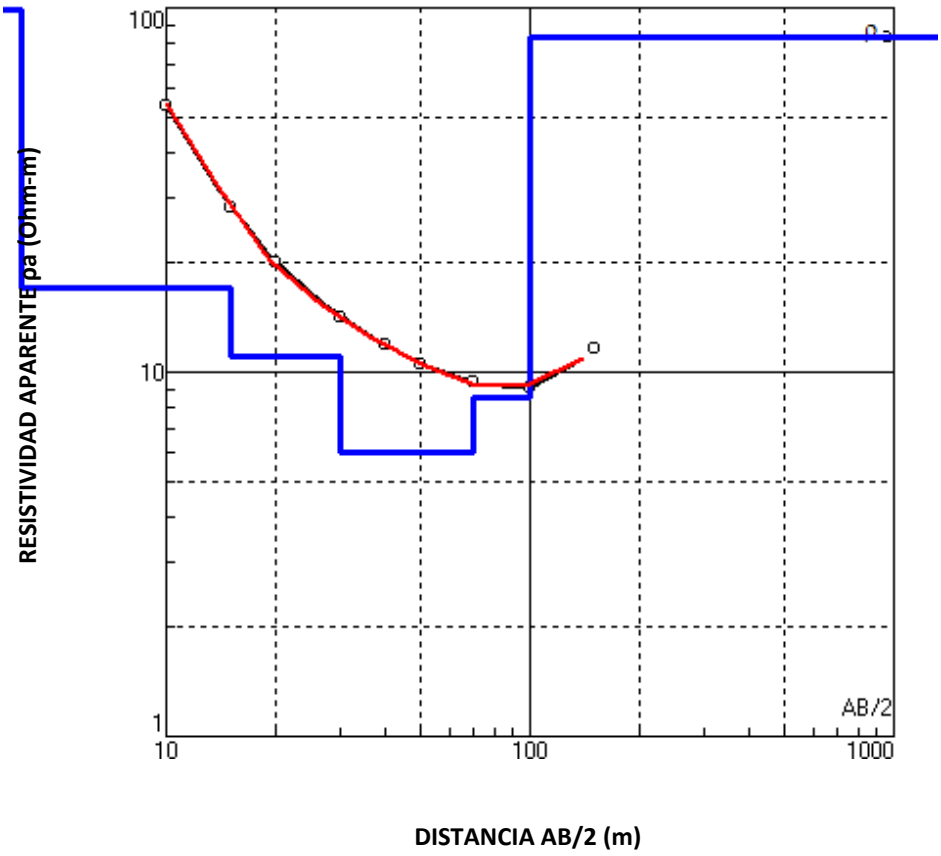


N	ρ	h	d	Alt
1	22	5	5	-5
2	17	8	13	-13
3	22	19	32	-32.04
4	18	11	43	-43
5	5	26	69	-69
6	103			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-60

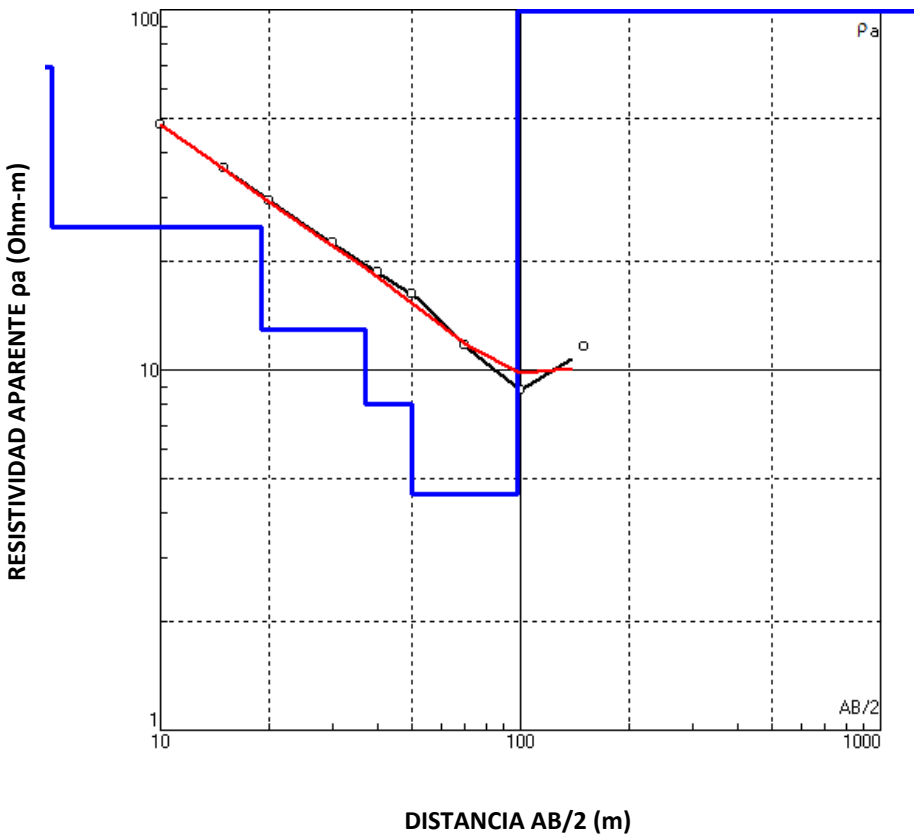


N	ρ	h	d	Alt
1	137	4	4	-4
2	17	11	15	-15
3	11	15	30	-30
4	6	40	70	-70
5	8.5	30	100	-100
6	83			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-61

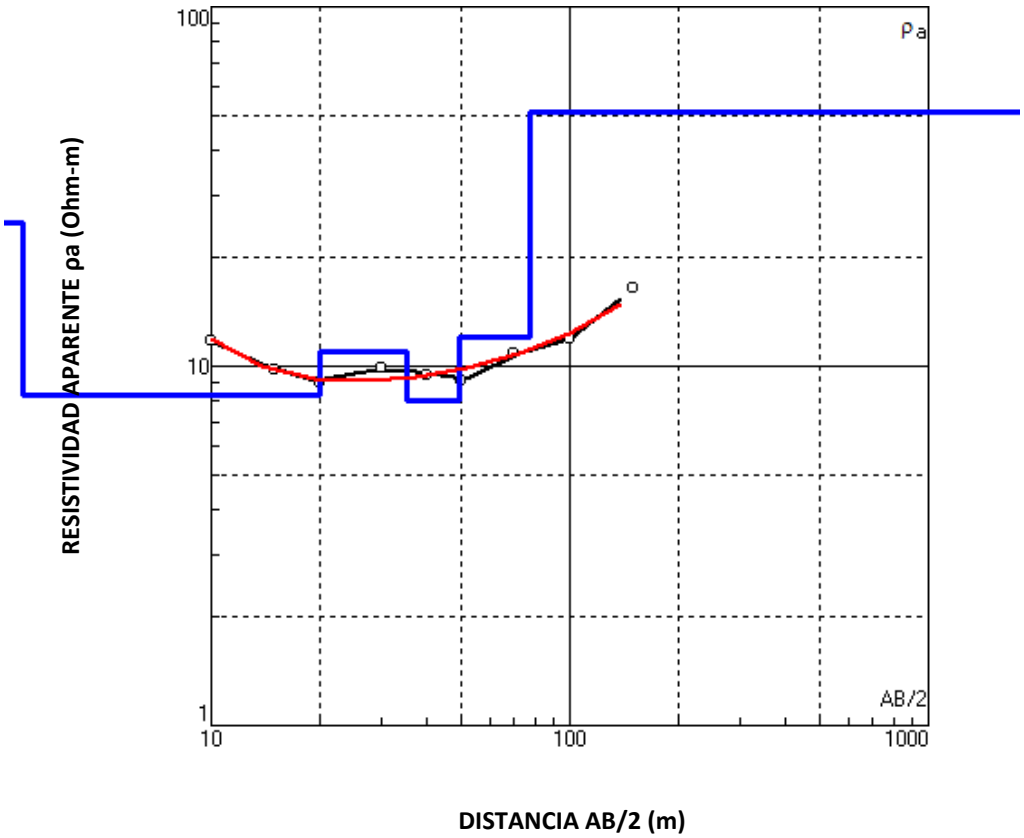


N	ρ	h	d	Alt
1	69	5	5	-5
2	25	14	19	-19
3	13	18	37	-37
4	8	13	50	-50
5	4.5	48	98	-98
6	105			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-62

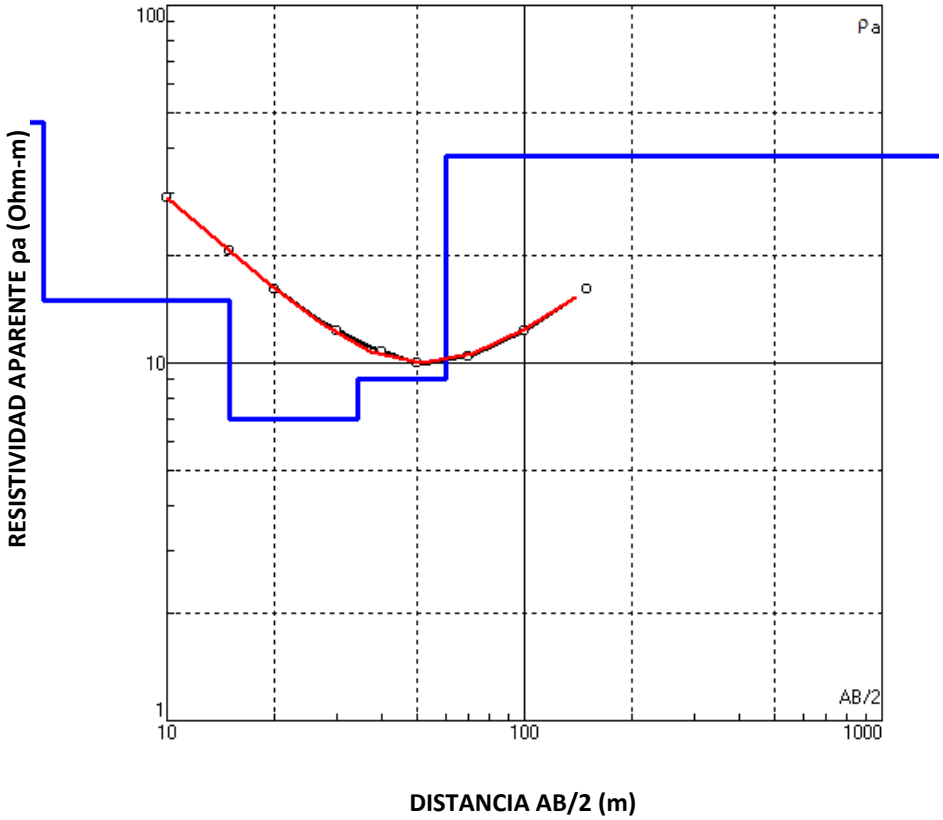


N	ρ	h	d	Alt
1	25	3	3	-3
2	8.3	17	20	-20
3	11	15	35	-35
4	8	14	49	-49
5	12	28	77	-77
6	51			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-63

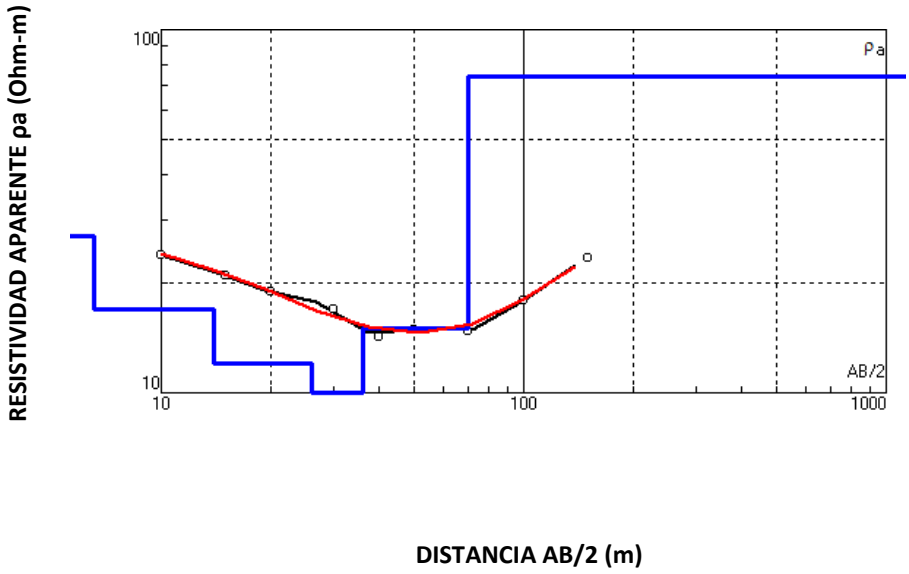


N	ρ	h	d	Alt
1	47	4.5	4.5	-4.5
2	15	10.5	15	-15
3	7	19	34	-34
4	9	26	60	-60
5	38			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-64

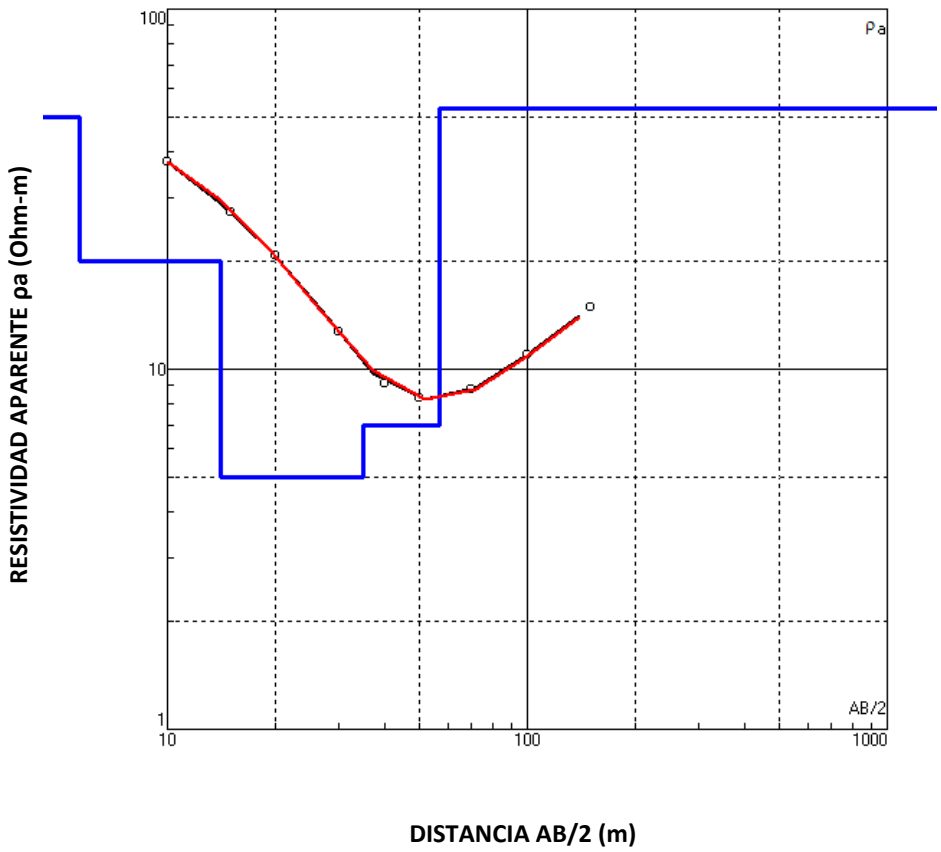


N	ρ	h	d	Alt
1	27	6.5	6.5	-6.5
2	17	7.5	14	-14
3	12	12	26	-26
4	10	10	36	-36
5	15	34	70	-70
6	74			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-65

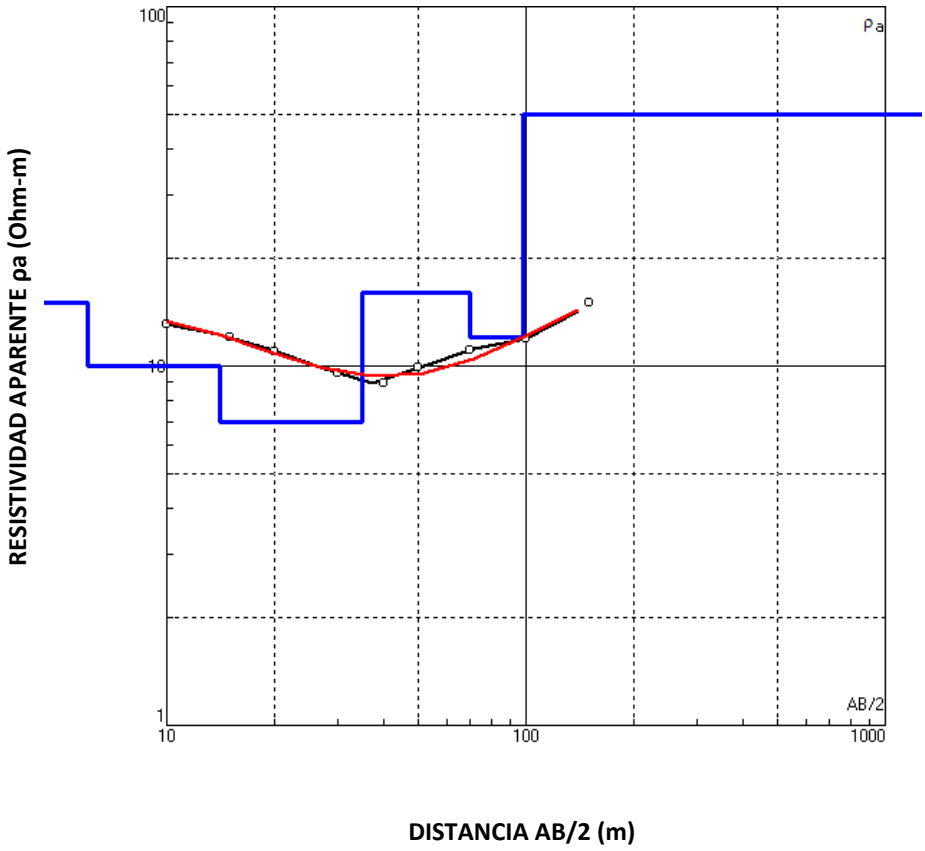


N	ρ	h	d	Alt
1	50	5.7	5.7	-5.7
2	20	8.3	14	-14
3	5	21	35	-35
4	7	22	57	-57
5	53			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-66

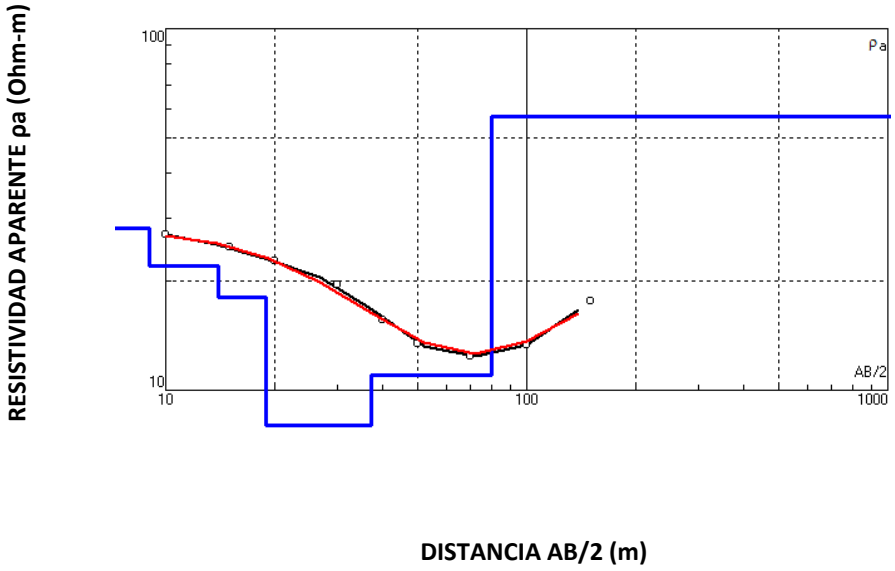


N	ρ	h	d	Alt
1	15	6	6	-6
2	10	8	14	-14
3	7	21	35	-35
4	16	35	70	-70
5	12	28	98	-98
6	50			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-67

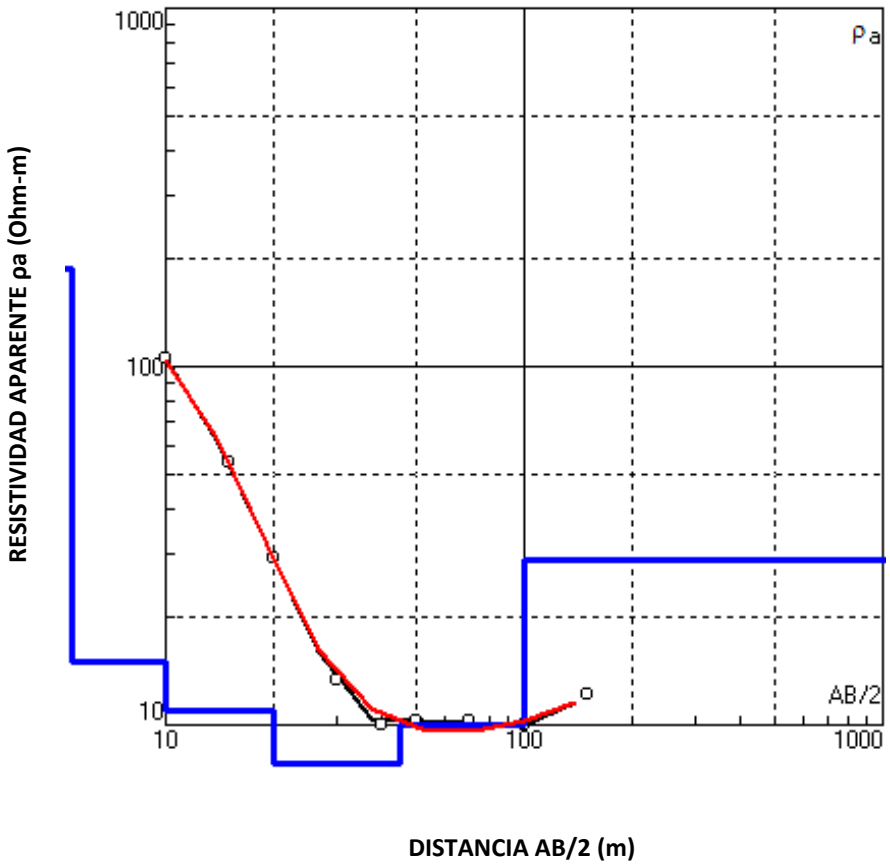


N	ρ	h	d	Alt
1	28	9	9	-9
2	22	5	14	-14
3	18	5	19	-19
4	8	18	37	-37
5	11	43	80	-80
6	57			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-68

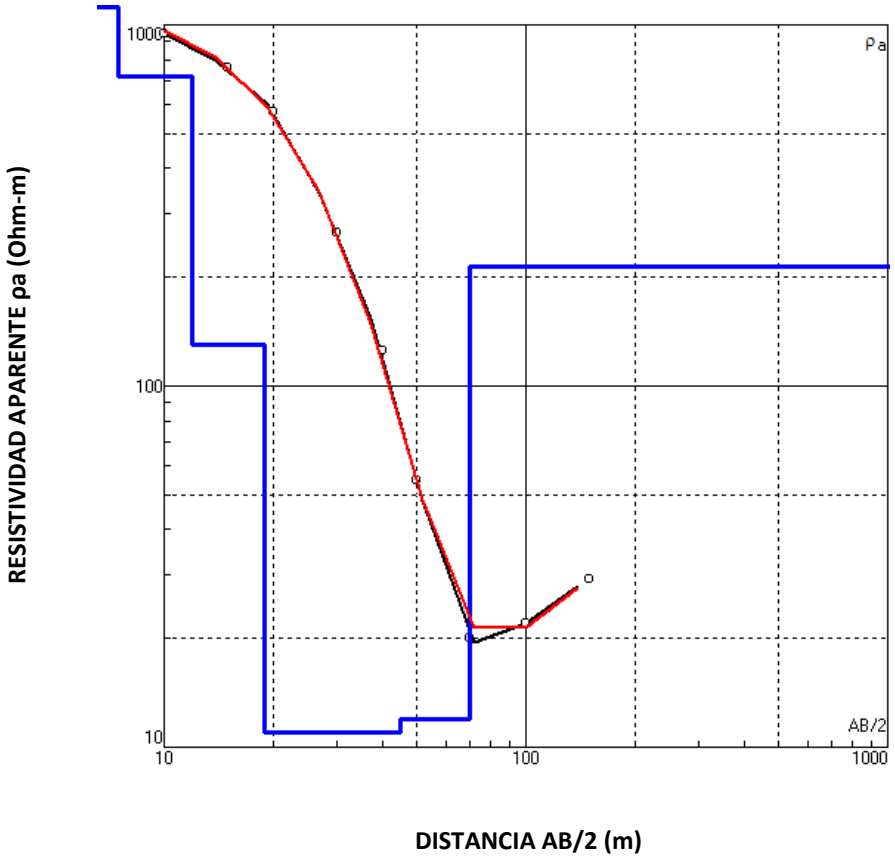


N	ρ	h	d	Alt
1	188	5.5	5.5	-5.5
2	15	4.5	10	-10
3	11	10	20	-20
4	7.8	25	45	-45
5	10	55	100	-100
6	29			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-69

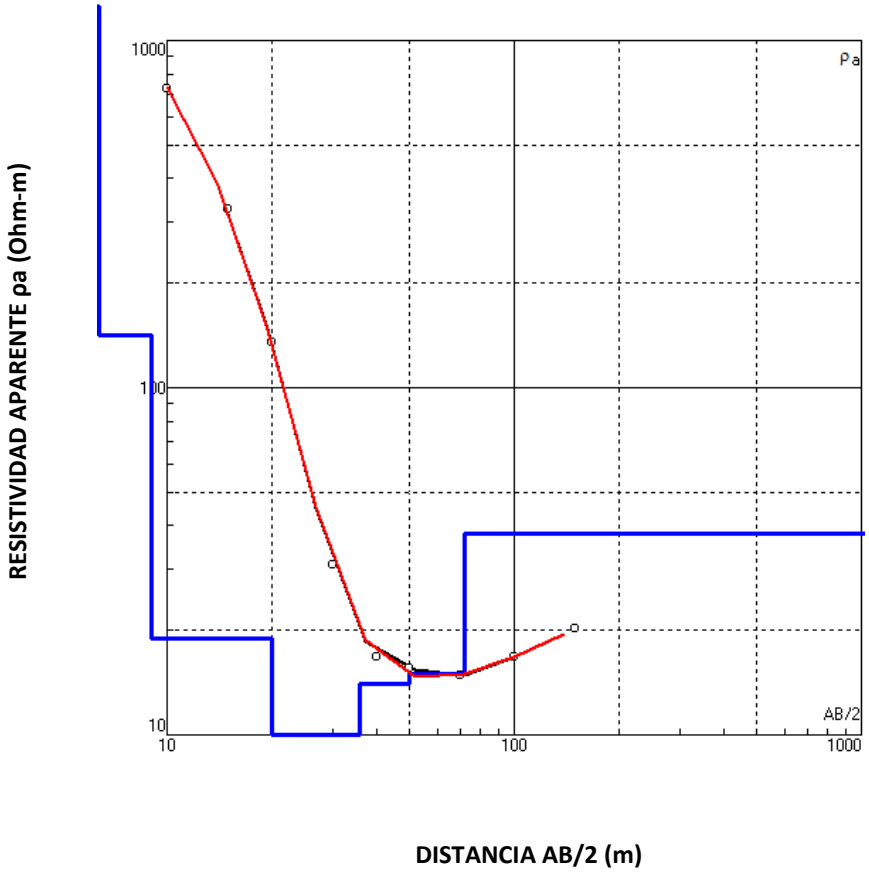


N	ρ	h	d	Alt
1	1116	7.5	7.5	-7.5
2	720	4.5	12	-12
3	130	7	19	-19
4	11	26	45	-45
5	12	25	70	-70
6	215			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-70

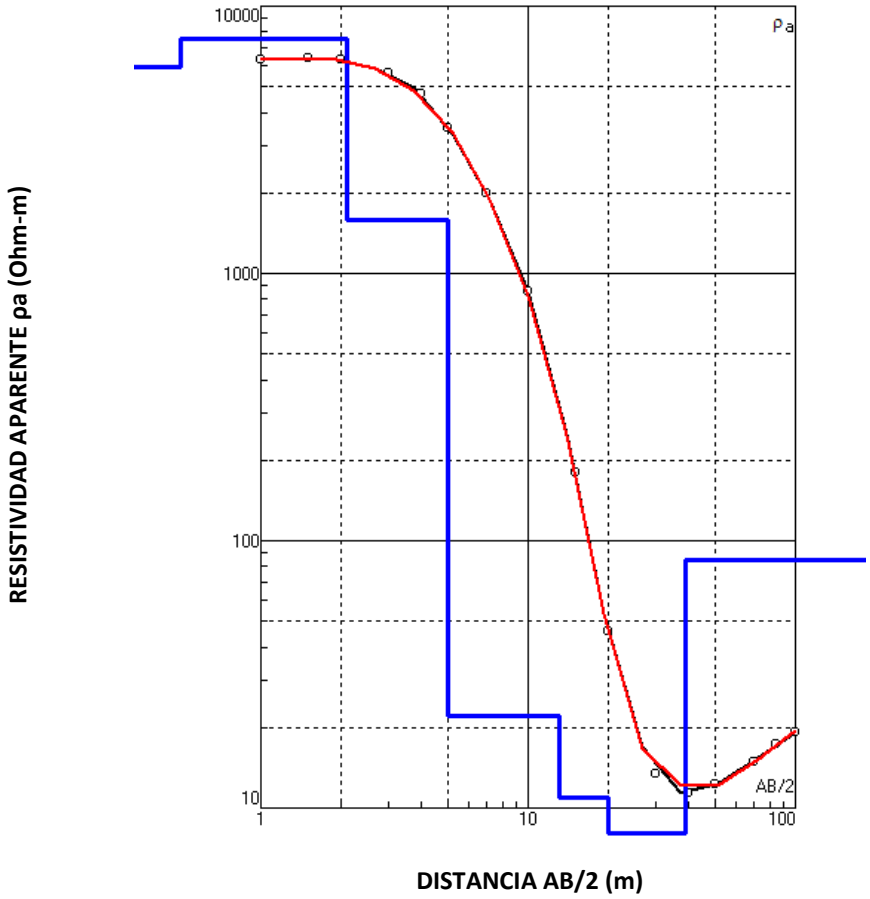


N	ρ	h	d	Alt
1	1528	5	5	-5
2	142	4	9	-9
3	19	11	20	-20
4	10	16	36	-36
5	14	14	50	-50
6	15	22	72	-72
7	38			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-71

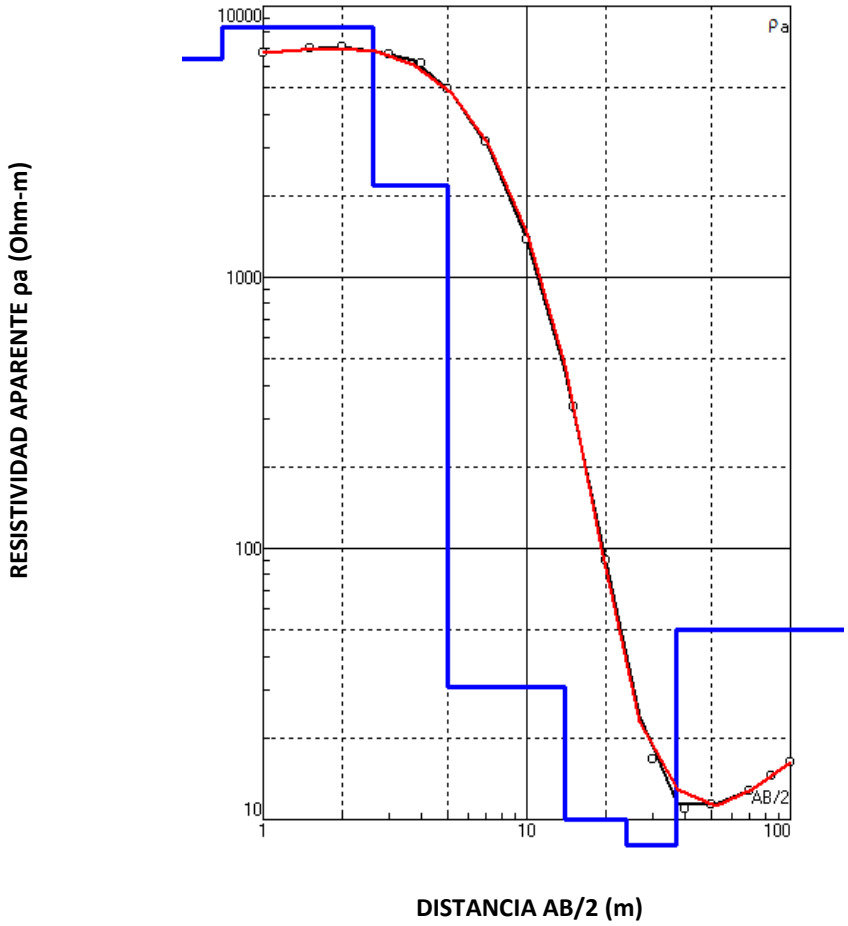


N	ρ	h	d	Alt
1	5900	0.5	0.5	-0.5
2	7507	1.6	2.1	-2.1
3	1593	2.9	5	-5
4	22	8	13	-13
5	11	7	20	-20
6	6	19	39	-39
7	85			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

SEV-72



N	ρ	h	d	Alt
1	6400	0.7	0.7	-0.7
2	8366	1.9	2.6	-2.6
3	2193	2.4	5	-5
4	31	9	14	-14
5	10	10	24	-24
6	4	13	37	-37
7	50			

Leyenda

N: Número de capas
ρ: Resistividad aparente (Ωm)
h: Espesor de capa (m)
d: Profundidad (m)

Anexo 3. Registro de perfiles litológicos de pozos

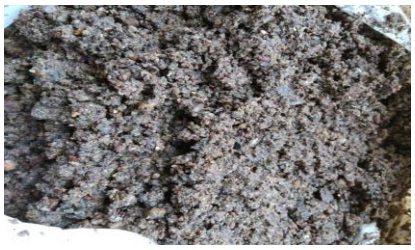
LOGUEO HIDROGEOLÓGICO DE 32M A 100M
POZO WAYU PERÚ

PROYECTO:	SUPERVISIÓN PERFORACION POZO WAYU PERÚ	**COORDENADAS UTM:**	324,990 E - 7'993,845 N
EJCUTADO POR:	EDGAR MANUEL ACOSTA PINTO INGENIEROS SAC	**NIVEL FREÁTICO:**	31m
ACTIVIDAD:	LOGUEO HIDROGEOLÓGICO	**PROF. EJECUTADA:**	100m
UBICACIÓN:	SECTOR PAMPA MOLINA - SAMA LAS YARAS	**EMP. PERFORISTA:**	HIDRO GROUP'S SRL
DIÁMETRO PERF.:	21"	**FECHA INICIO / FIN:**	AGOSTO - OCT 2023

PROF. (m)	ESPESOR (m)	DESCRIPCIÓN	FOTOGRAFÍA
32-33	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
34-35	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
36-37	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
38-39	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
40-41	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
42-43	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
44-45	2m	Grava redondeada y canto rodado en matriz areno-limosa. Regular permeabilidad.	
46-47	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limo-arcillosa. Baja a muy baja permeabilidad.	

48-49	2m	Grava redondeada con arena gruesa en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
50-51	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
52-53	2m	Arena gruesa con grava redondeada y canto rodado en matriz limo-arcillosa . Baja a muy baja permeabilidad.	
54-55	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa . Regular permeabilidad.	
56-57	2m	Grava redondeada en matriz areno- limosa. Regular permeabilidad.	
58-59	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
60-61	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
62-63	2m	Arena gruesa y grava redoneada con canto rodado en matriz limo-arcillosa. Baja a muy baja permeabilidad.	
64-65	2m	Arena gruesa y grava redondeada en matriz limosa . Regular permeabilidad.	
66-67	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limo-arcillosa. Baja a muy baja permeabilidad.	

68-69	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limo-arcillosa. Baja a muy baja permeabilidad.	
70-71	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
72-73	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limo-arcillosa. Baja a muy baja permeabilidad.	
74-75	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
76-77	2m	Arena gruesa con grava redondead en matriz limo-arcillosa. Baja a muy baja permeabilidad.	
78-79	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limo-arcillosa. Baja a muy baja permeabilidad.	
80-81	2m	Arena gruesa con grava redondeada y canto rodadado en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
82-83	2m	Grava redondeada en matriz areno-limosa. Regular permeabilidad. Compacta	

84-85	2m	Grava arenosa en matriz limo-arcillosa. Baja a muy baja permeabilidad.	
86-87	2m	Grava arenosa en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
88-89	2m	Arena gruesa con grava redondeada y canto rodado en matriz limo-arcillosa . Baja a muy baja permeabilidad.	
90-91	2m	Grava redondeada y canto rodado en matriz areno-limosa. Regular permeabilidad.	
92-93	2m	Grava redondeada y canto rodado en matriz areno-limosa.. Regular permeabilidad.	
94-95	2m	Arena gruesa con grava redondeada en matriz limo-arcillosa . Baja a muy baja permeabilidad.	
95-96	2m	Canto rodado y grava en matriz limo-arcillosa. Baja a muy baja permeabilidad.	
96-97	2m	Grava redondeada en matriz areno-limosa. Regular permeabilidad.	

97-98	2m	Grava redondeada en matriz areno-limosa . Buena permeabilidad.	
98-99	2m	Grava y canto rodado con arena gruesa en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
100	-	Canto rodado y grava redondeada en matriz areno-limosa. Regular permeabilidad.	

PERFIL LITOLÓGICO
POZO PP-01 WAYU PERÚ

UBICACIÓN : Pampa Molina - Sama Las Yaras - Tacna

COORDENADAS : 324,990 ESTE - 7'993,845 NORTE

PROFUNDIDAD (m)	PERFIL LITOLÓGICO	NIVEL FREÁTICO	PERMEABILIDAD (BUENA / REGULAR / BAJA / IMPERMEABLE)	DESCRIPCIÓN	FOTOGRAFÍA
00.00 – 13.00				Arena, grava, canto rodado y limo, en estado seco. Regular a buena permeabilidad.	ANTEPOZO
13.00 – 31.00				Arena y limo, en estado seco. Regular a baja permeabilidad.	
31.00 (31 m - N.E.)		N.E. NIVEL FREÁTICO			
31.00 – 46.00				Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
46.00 – 54.00				Arena gruesa con intercalaciones de grava redondeada en matriz limo-arcillosa. Regular a baja permeabilidad.	
54.00 – 62.00				Arena gruesa con grava redondeada en matriz limosa. Regular permeabilidad.	
62.00 – 80.00				Arena gruesa y grava redondeada en matriz limo-arcillosa. Baja permeabilidad.	
80.00 – 84.00				Arena con grava redondeada y canto rodado en matriz limo-arcillosa. Regular permeabilidad.	
84.00 – 95.00				Grava redondeada con arena y canto rodado en matriz limo-arcillosa. Regular permeabilidad.	
95.00 – 100.00				Canto rodado y grava redondeada en matriz limo-arcillosa. Regular permeabilidad.	

ESCALA : 1/500

FUENTE : EDGAR MANUEL ACOSTA PINTO INGENIEROS S.A.C.

PERFIL LITOLÓGICO
POZO S/N-7 "ROSITA"

UBICACIÓN : Pampa Molina - Sama Las Yaras - Tacna

COORDENADAS : 325,630 ESTE - 7'992,583 NORTE

PROFUNDIDAD (m)	PERFIL LITOLÓGICO ENCONTRADO	DESCRIPCIÓN
0 – 5 m.		Arenas eólicas de color beige graduadas con limos en estado suelto, presenta lentes.
5 – 27.77 m - N. E.		Intercalación de arenas finas en matriz limosa de color beige con lentes de arcilla de tono marrón compactos. Media a baja permeabilidad. Lentes de limos. Arcillas compactas de color marrón de baja permeabilidad. Lentes de limos. Arcillas compactas de color marrón de baja permeabilidad. N.E. NIVEL FREÁTICO
27.77 m - N. E. – 62 m.		**ACUÍFERO** Arenas con presencia de granulos y guijarros en una matriz con presencia de lentes de arcillas y limos en forma aislada. Buena permeabilidad. Arenas residuales bien clasificadas de regular permeabilidad graduadas con limos de buena permeabilidad. Arenas mal graduadas con guijas de buena permeabilidad y buena clasificación. Arenas residuales de regular a baja permeabilidad graduadas con fragmentos sub-angulosos de roca volcánica.
62 m. – 70		Roca volcánica de color gris compuesto de secuencias de lavas fracturadas de regular permeabilidad.

ESCALA : 1/500
FUENTE : Edwin Hilario Condori Mamani

PERFIL LITOLÓGICO
POZO PP-01 LAGUNA AZUL

UBICACIÓN : Playa Llostay - Sama Las Yaras - Tacna

COORDENADAS : 324,386 ESTE - 7'990,780 NORTE

PROFUNDIDAD (m)	PERFIL LITOLÓGICO ENCONTRADO	DESCRIPCIÓN
0 – 3 m.		Arena suelta, conchuela, en estado seco. Buena permeabilidad
3 m. – 8 m.		Arena con conchuela algo compacta, en estado seco. Buena permeabilidad.
8 m. – 8.10 m - N. E.		N.E. NIVEL FREÁTICO
8.10 m - N. E. – 13 m.		**ACUÍFERO** Arena suelta y conchuela, en estado saturado. Buena permeabilidad.
13 m. – 17 m.		Arena, gravilla y limo compactada en estado saturado. Regular permeabilidad.
17 m. – 19 m.		Arena y limo saturados. Regular permeabilidad.
19 m. – 22 m.		Arena con grava saturadas. Buena permeabilidad.

ESCALA : 1/200

FUENTE : EDGAR MANUEL ACOSTA PINTO INGENIEROS S.A.C.

Anexo 4. Cuadro de inventario de fuentes de aguas subterráneas

ANEXO 4.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE POZOS Y FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA - SECTOR PAMPA MOLINA Y ALREDEDORES, VALLE SAMA

Nº	POZO	NOMBRE DE POZO / PROPIETARIO	COORDENADAS UTM WGS84, 19 SUR		COTA TERRENO (m.s.n.m.)	PERFORACION					EQUIPO DE BOMBEO					NIVELES DEL AGUA Y CAUDAL							C. E. (mS/cm)	EXPLOTACION					
											MOTOR			BOMBA				N. ESTATICO		CAUDAL (l/seg.)	N. DINAMICO					REGIMEN			VOLUMEN (m^3/año)
			Este	Norte		Año	Tipo	Prof. Inic. (m)	Prof. Act. (m)	Diametro (m)	MARCA	TIPO	HP	MARCA	TIPO	FECHA	P.R. SUELO (m)	PROF. (m)	m.s.n.m		PROF. (m)	m.s.n.m.		ESTADO DEL POZO	USO	h/d	d/m	m/a	
1	IRHS 23/01/05-C-2	SR. APAZA / SECTOR VITUÑA	323628	7999377	81	1998	CO	1.20	1.00	-	WORKTOOL'S	G	5.5	WORKTOOL'S	CS	11/05/2024	-	0.27	80.73	4	-	-	1.78	UTILIZADO	A	3	8	12	4147.20
2	IASS-41	PRIVADO/ SECTOR VITUÑA	323648	7999342	83	-	TA	-	3.50	2.30	-	-	-	-	-	11/05/2024	-	2.20	80.80	-	-	-	-	NO UTILIZABLE	-	-	-	-	-
3	S/N-1	PRIVADO / SECTOR VITUÑA	326332	7997668	126	-	M	-	78.64	-	MITSUBISHI	D	180	PRAXIS	S	11/05/2024	-	66.92	59.08	-	-	-	2.38	UTILIZABLE	A	-	-	-	-
4	S/N-2	PRIVADO / SECTOR VITUÑA	325323	7997082	94	-	M	-	84.95	-	NISSAN	D	180	-	S	11/05/2024	-	43.90	50.10	-	-	-	1.64	UTILIZADO	A	-	-	-	-
5	S/N-3	PRIVADO / SECTOR PAMPA MOLINA	326479	7995896	101	-	M	-	87.00	1.20	VOLVO	D	-	-	TV	11/05/2024	-	67.58	33.42	-	-	-	4.60	UTILIZABLE	A	-	-	-	-
6	S/N-4	ASOC. AGROP. DIVINO NIÑO / SECTOR PAMPA MOLINA	325427	7995233	80	2018	M	95.00	95.00	1.30	VOLVO	D	160	U.S. ELECTRICAL MOTORS	TV	11/05/2024	-	55.00	25.00	-	-	-	1.72	UTILIZADO	A	-	-	-	-
7	S/N-5 "SR. DE HUANCA"	ASOC. AGROP. SR. DE HUANCA / SECTOR PAMPA MOLINA	325701	7993249	56	2016	M	-	60.00	0.38	VOLVO	D	120	JHONSON	TV	10/05/2024	-	33.50	22.50	-	-	-	1.97	UTILIZABLE	A	-	-	-	-
8	S/N-6 "SR.DE HUANCA"	ASOC. AGROP. SR. DE HUANCA / SECTOR PAMPA MOLINA	325694	7993240	56	2021	T	-	70.00	0.38	VOLVO	D	160	HIDROSTAL	TV	10/05/2024	-	33.00	23.00	30	46.00	10.00	1.82	UTILIZADO	A	10	30	12	394200.00
9	S/N-7 "ROSITA"	ROSITA / SECTOR PAMPA MOLINA	325630	7992583	45	2019	T	62.00	58.90	2.29	NISSAN	D	150	GOULDS	TV	10/05/2024	-	27.77	17.23	30.41	40.82	4.18	2.01	UTILIZADO	A	10	30	12	399587.40
10	S/N-8	NUEVA IMAGEN / SECTOR PAMPA MOLINA	324885	7991943	36	2013	TA	-	17.00	1.50	-	-	-	-	-	10/05/2024	-	25.00	11.00	-	-	-	-	UTILIZABLE	A	-	-	-	-
11	S/N-9	SR. GUILLEN / SECTOR PAMPA MOLINA	324392	7992001	36	2012	M	-	50.00	0.38	DOOSAN	D	140	ILEGIBLE	S	10/05/2024	-	22.39	13.61	8	-	-	3.40	UTILIZADO	A	10	30	12	105120.00
12	S/N-10 "LAGUNA AZUL"	PROMOTORA DAVECO SAC / SECTOR PLAYA LLOSTAY	324451	7990757	18	2010	TA	-	8.20	1.10	-	-	-	-	-	10/05/2024	-	8.15	9.85	-	-	-	2.71	NO UTILIZABLE	-	-	-	-	-
13	PP-01 "LAGUNA AZUL"	PROMOTORA DAVECO SAC / SECTOR PLAYA LLOSTAY	324386	7990780	18	2016	T	-	22.00	22.00	PEDROLLO	E	30	PEDROLLO	S	10/05/2024	-	8.10	9.90	20	-	-	2.34	UTILIZADO	O	8.5	30	12	233280.00
14	S/N-11	PRIVADO / SECTOR PAMPA MOLINA	324212	7991213	24	2011	TA	-	15.30	1.20	-	-	-	-	-	10/05/2024	-	11.40	12.60	-	-	-	3.51	UTILIZABLE	-	-	-	-	-
15	S/N-12	PRIVADO / SECTOR PAMPA MOLINA	324447	7991485	29	2011	TA	-	18.40	1.20	-	-	-	-	-	10/05/2024	-	14.90	14.10	-	-	-	2.97	UTILIZABLE	-	-	-	-	-
16	S/N-13	PRIVADO / SECTOR PAMPA MOLINA	324157	7998723	108	-	M	-	-	1.20	WORKTOOL'S	G	6.5	WORKTOOL'S	CS	11/05/2024	-	20.00	88.00	2	-	-	1.46	UTILIZADO	A	3	8	12	2073.60
17	IRHS-23/01/05-6	SECTOR PAMPA MOLINA	323445	7993306	32	-	TA	7.00	6.60	1.40	-	-	-	-	-	10/05/2024	-	5.82	26.18	-	-	-	7.45	UTILIZABLE	-	-	-	-	-
18	IRHS 23/01/05-7	SECTOR PAMPA MOLINA	323971	7994294	44	2000	TA	20.00	15.00	1.78	-	-	-	-	-	10/05/2024	-	6.37	37.63	-	-	-	9.79	UTILIZABLE	-	-	-	-	-
19	IRHS 23/01/05-C-1	JOSE HUANCA MAMANI / SECTOR PAMPA MOLINA	323585	7992982	36	-	CO	-	2.00	-	HONDA	D	-	HONDA	CS	10/05/2024	-	0.50	35.50	-	-	-	5.94	UTILIZADO	A	-	-	-	-
20	IASS-73	SR. CABRERA / PUENTE BOCA DEL RIO	323605	7991457	20	1975	TA	-	9.60	1.70	-	-	-	-	-	10/05/2024	-	5.40	14.60	-	-	-	6.56	UTILIZABLE					
21	COCHA 01	MUNICIPALIDAD C.P.M. BOCA DEL RIO / PUENTE BOCA DEL RIO	323191	7991902	20	1970	CO	4.00	4.00	-	-	-	-	-	-	10/05/2024	-	1.00	19.00	-	-	-	6.08	UTILIZABLE	-	-	-	-	-
22	COCHA 02	PRIVADO / PUENTE BOCA DEL RIO	323382	7991378	13	2013	CO	1.00	1.00	-	-	-	-	-	-	10/05/2024	-	0.50	12.50	-	-	-	3.07	UTILIZABLE	-	-	-	-	-
23	TA-01 WAYU PERÚ	WAYU PERÚ / SECTOR PAMPA MOLINA	324885	7993818	56	-	TA	-	44.00	1.50	-	-	-	-	-	10/05/2024	-	30.30	25.70	-	-	-	4.92	UTILIZABLE	A	-	-	-	-
24	PP-01 WAYU PERÚ	WAYU PERÚ / SECTOR PAMPA MOLINA	324990	7993845	58	2023	T	100.00	100.00	0.53	-	-	-	-	-	10/05/2024	-	32.10	25.90	22	-	-	3.21	UTILIZABLE	A	-	-	-	-
							(1)					(2)			(3)		(4)			(5)			(6)	(7)	(8)	Volumen Total m3			1,138,408.20

(1) Tipo de perforación: T (Tubular), TA (Tajo Abierto), M (Mixto), P (Piezómetro), MA (Manantial), CO (Cocha) y GA (Galeria Filtrante)
(2) Tipo de motor: E (Eléctrico), D (Diesel), G (Gasolinero) y GE (Generador Eléctrico)
(3) Tipo de bomba: TV (Turbina Vertical), S (Sumergible) y CS (Centrifuga de Succión)
(4) Punto de referencia del suelo
(5) Caudal de aforo en l/seg
(6) C. E.: Conductividad Electrica
(7) Estado del pozo: Utilizado, Utilizable, No Utilizable
(8) Uso:A (Agricola), P (Poblacional), I (Industrial), PE (Pecuario), M (Mineria) y (O) Otros Usos

T	4
TA	9
M	7
PZ	0
MA	0
CO	4
GA	0
TOTAL	24

UTILIZADO	9
UTILIZABLE	13
NO UTILIZABLE	2
TOTAL POZOS	24

Anexo 5. Pruebas de bombeo

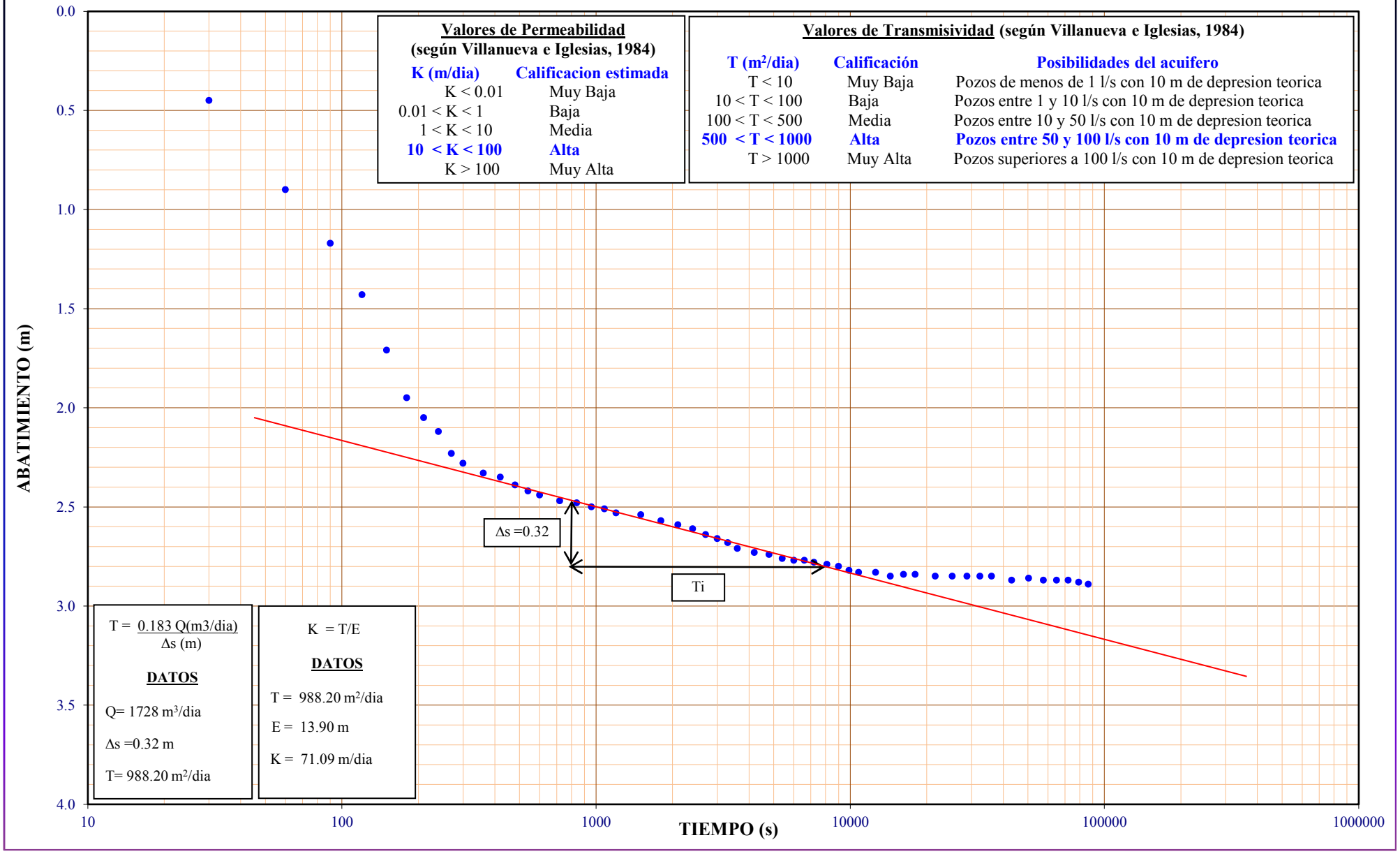
Resultados de interpretación en planilla excel

PRUEBA DE BOMBEO - FASE DESCENSO
POZO PP-01 "LAGUNA AZUL"

Lugar	Playa Llostay	**Motor**	VOLVO Diessel 400 HP	**Ejecutado por:**	Edgar Acosta Pinto
Distrito	Sama - Las Yaras	**Bomba**	Jhonson 12 GH - 2 Impulsores	**Interpretado por:**	Reggie Flores Tito
Provincia	Tacna	**Inicio**	05/04/2017 (7:10 am)	**Tiempo Bombeo**	24 horas
Departamento	Tacna	**N.E.**	8.10 m.	**Caudal (l/s):**	20
Profundidad	22.00 m.	**N.D.**	10.99 m.	**Caudal (m3/dia):**	1728
Espesor	13.90 m.	**Abatimiento**	2.89 m.		

FECHA	Tiempo			Tiempo (SEG)	Nivel	Abatimiento	Caudal		Cuba	RPM	CE	Observaciones
	H	M	S	Acumulado	Dinámico	(metros)	T/seg	Q/L/seg	Litros		(mmhos/cm)	
'05/04/2017			30	30	8.55	0.45						
		1	60	60	9.00	0.90						
			90	90	9.27	1.17						
		2	120	120	9.53	1.43						
			150	150	9.81	1.71						
		3	180	180	10.05	1.95						
			210	210	10.15	2.05						
		4	240	240	10.22	2.12						
			270	270	10.33	2.23						
		5	300	300	10.38	2.28						
		6		360	10.43	2.33						
		7		420	10.45	2.35						
		8		480	10.49	2.39						
		9		540	10.52	2.42						
		10		600	10.54	2.44					4.30	Agua poca turbia
		12		720	10.57	2.47	5.15	20.00	103			
		14		840	10.58	2.48						
		16		960	10.60	2.50						
		18		1080	10.61	2.51						
		20		1200	10.63	2.53						
		25		1500	10.64	2.54						
		30		1800	10.67	2.57						
		35		2100	10.69	2.59					4.30	
		40		2400	10.71	2.61						
		45		2700	10.74	2.64						
		50		3000	10.76	2.66						
		55		3300	10.78	2.68						
	1	60		3600	10.81	2.71					4.20	
		10		4200	10.83	2.73						
		20		4800	10.84	2.74						
		30		5400	10.86	2.76						
		40		6000	10.87	2.77						
		50		6600	10.87	2.77						
	2	60		7200	10.88	2.78						
		15		8100	10.89	2.79						
		30		9000	10.90	2.80						
		45		9900	10.92	2.82						
	3	60		10800	10.93	2.83						
		30		12600	10.93	2.83						
	4	60		14400	10.95	2.85						
		30		16200	10.94	2.84						
	5	60		18000	10.94	2.84						
	6			21600	10.95	2.85						
	7			25200	10.95	2.85					3.92	
	8			28800	10.95	2.85						
	9			32400	10.95	2.85						
	10			36000	10.95	2.85						
	12			43200	10.97	2.87						
	14			50400	10.96	2.86						Agua clara
	16			57600	10.97	2.87						con poco sedimento
	18			64800	10.97	2.87						
	20			72000	10.97	2.87						
	22			79200	10.98	2.88						
'06/04/2017	24			86400	10.99	2.89						
	26			93600								
	28			100800								
	30			108000								

PRUEBA DE BOMBEO - FASE DE DESCENSO
POZO PP-01 "LAGUNA AZUL"
(05/04/2017)



Valores de Permeabilidad
(según Villanueva e Iglesias, 1984)

K (m/dia)	Calificacion estimada
K < 0.01	Muy Baja
0.01 < K < 1	Baja
1 < K < 10	Media
10 < K < 100	**Alta**
K > 100	Muy Alta

Valores de Transmisividad (según Villanueva e Iglesias, 1984)

T (m^2/dia)	Calificación	Posibilidades del acuifero
T < 10	Muy Baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresion teorica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresion teorica
100 < T < 500	Media	Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresion teorica
500 < T < 1000	**Alta**	**Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresion teorica**
T > 1000	Muy Alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresion teorica

$$T = \frac{0.183\ Q(m3/dia)}{\Delta s\ (m)}$$

DATOS

Q= 1728 m^3/dia

Δs =0.32 m

T= 988.20 m^2/dia

K = T/E

DATOS

T = 988.20 m^2/dia

E = 13.90 m

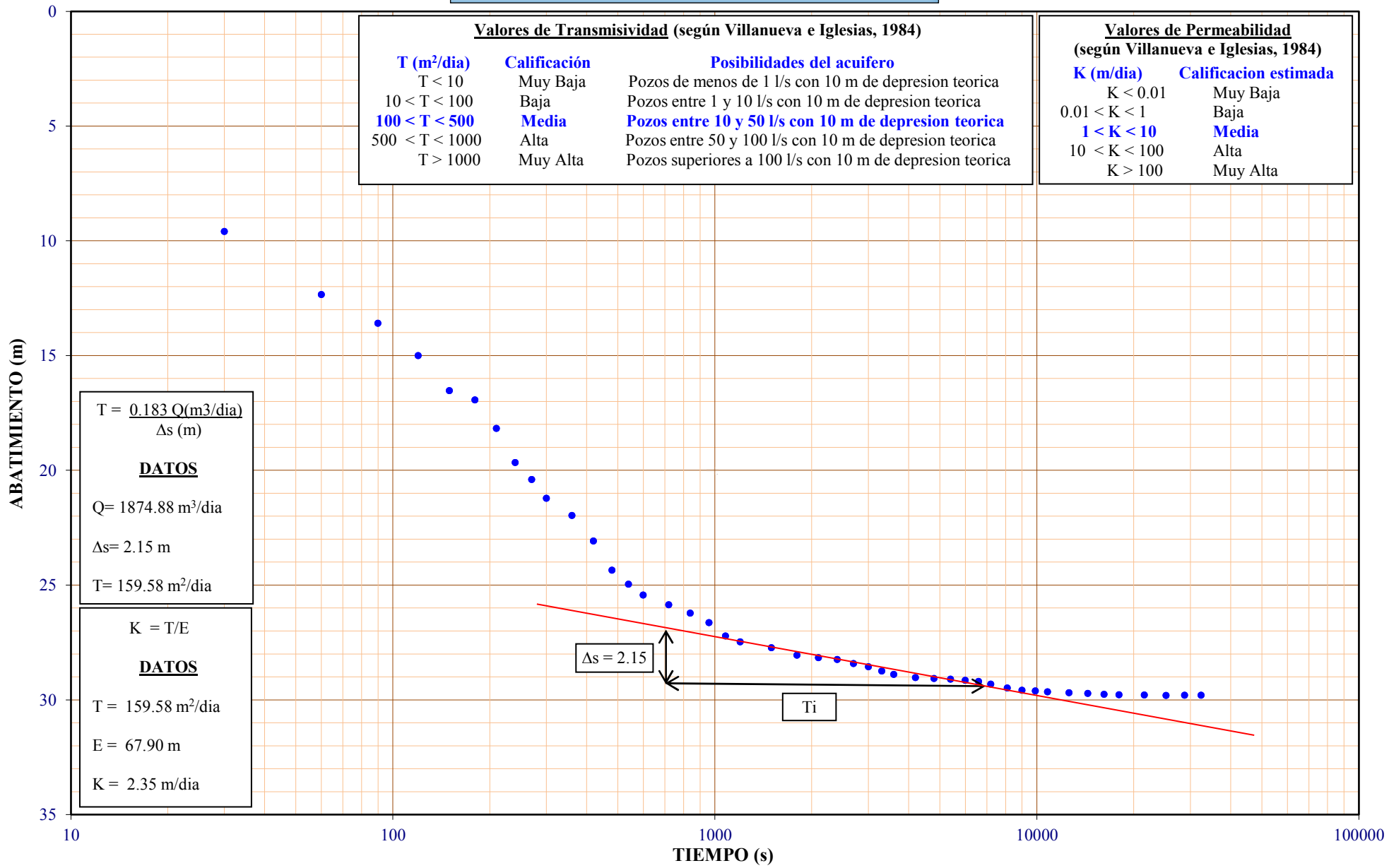
K = 71.09 m/dia

PRUEBA DE BOMBEO - FASE DESCENSO
POZO PP-01 WAYU PERÚ

Lugar	Pampa Molina	**Motor**	Petrolero c/acople cardan			**Ejecutado por:**	Edgar Acosta Pinto
Distrito	Sama - Las Yaras	**Bomba**	Turbina Vertical 10 GH 7 impulsores			**Interpretado por:**	Reggie Flores Tito
Provincia	Tacna	**Inicio**	16/10/2023 (7:05 am)			**Tiempo Bombeo**	9 horas
Departamento	Tacna	**N.E.**	32.10	m.		**Caudal (l/s):**	21.70
Profundidad	100 m.	**N.D.**	61.90	m.		**Caudal (m3/dia):**	1874.88
Espesor	67.90 m.	**Abatimiento**	29.80	m.			

FECHA	Tiempo			Tiempo (SEG)	Nivel	Abatimiento	Caudal		Cuba	RPM	CE	Observaciones
	H	M	S	Acumulado	Dinámico	(metros)	T/seg	Q/L/seg	Litros		(mmhos/cm)	
16/10/2023			30	30	41.70	9.60						Agua ligeramente turbia
		1	60	60	44.45	12.35						
			90	90	45.70	13.60						
		2	120	120	47.11	15.01						
			150	150	48.63	16.53						
		3	180	180	49.04	16.94						
			210	210	50.28	18.18						
		4	240	240	51.77	19.67						
			270	270	52.50	20.40						
		5	300	300	53.32	21.22						
		6		360	54.07	21.97						
		7		420	55.18	23.08						
		8		480	56.45	24.35						
		9		540	57.07	24.97						
		10		600	57.54	25.44						
		12		720	57.96	25.86						
		14		840	58.33	26.23						
		16		960	58.74	26.64						
		18		1080	59.32	27.22						
		20		1200	59.58	27.48						
		25		1500	59.83	27.73						
		30		1800	60.16	28.06						
		35		2100	60.27	28.17						
		40		2400	60.35	28.25						
		45		2700	60.52	28.42						
		50		3000	60.66	28.56						
		55		3300	60.85	28.75						
	1	60		3600	61.00	28.90	4.66	22.10	103			
		10		4200	61.13	29.03						
		20		4800	61.17	29.07						
		30		5400	61.20	29.10						
		40		6000	61.25	29.15						
		50		6600	61.30	29.20						
	2	60		7200	61.42	29.32						
		15		8100	61.59	29.49						
		30		9000	61.69	29.59						
		45		9900	61.72	29.62						
	3	60		10800	61.76	29.66						
		30		12600	61.79	29.69						
	4	60		14400	61.82	29.72						
		30		16200	61.86	29.76						
	5	60		18000	61.88	29.78						
	6			21600	61.89	29.79						
	7			25200	61.91	29.81					3.21	Agua limpia y transparente
	8			28800	61.90	29.80	4.75	21.70	103			
16/10/2023	9			32400	61.90	29.80						
	10			36000								
	12			43200								
	14			50400								
	16			57600								
	18			64800								
	20			72000								
	22			79200								
	24			86400								
	26			93600								
	28			100800								
	30			108000								

PRUEBA DE BOMBEO - FASE DE DESCENSO
POZO PP-01 WAYU PERÙ
(16/10/2023)



Valores de Transmisividad (según Villanueva e Iglesias, 1984)

T (m^2/dia)	Calificación	Posibilidades del acuifero
T < 10	Muy Baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresion teorica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresion teorica
100 < T < 500	**Media**	**Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresion teorica**
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresion teorica
T > 1000	Muy Alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresion teorica

Valores de Permeabilidad
(según Villanueva e Iglesias, 1984)

K (m/dia)	Calificacion estimada
K < 0.01	Muy Baja
0.01 < K < 1	Baja
1 < K < 10	**Media**
10 < K < 100	Alta
K > 100	Muy Alta

$$T = \frac{0.183\ Q(m3/dia)}{\Delta s\ (m)}$$

DATOS

Q= 1874.88 m^3/dia

Δs= 2.15 m

T= 159.58 m^2/dia

K = T/E

DATOS

T = 159.58 m^2/dia

E = 67.90 m

K = 2.35 m/dia

PRUEBA DE BOMBEO - FASE DESCENSO
POZO S/N-7 "ROSITA"

Lugar	Pampa Molina	**Motor**	Diesel marca Nissan 150 HP	**Ejecutado por:**	Edgar Acosta Pinto
Distrito	Sama - Las Yaras	**Bomba**	Turbina Vertical GOULDS 6"	**Interpretado por:**	Reggie Flores Tito
Provincia	Tacna	**Inicio**	15/01/2023 (8:30am)	**Tiempo Bombeo**	6 horas
Departamento	Tacna	**N.E.**	27.77 m.	**Caudal (l/s):**	30.41
Profundidad	62 m.	**N.D.**	40.66 m.	**Caudal (m3/dia):**	2627.42
Espesor	34.23 m.	**Abatimiento**	12.89 m.		

FECHA	Tiempo			Tiempo (SEG)	Nivel	Abatimiento	Caudal		Cuba	RPM	CE	Observaciones
	H	M	S	Acumulado	Dinámico	(metros)	T/seg	Q/L/seg	Litros		(mmhos/cm)	
15/01/2023			30	30	34.57	6.80				1535		
		1	60	60	36.95	9.18						
			90	90	37.72	9.95						
		2	120	120	38.19	10.42						
			150	150	38.50	10.73						
		3	180	180	38.75	10.98						
			210	210	38.90	11.13						
		4	240	240	39.00	11.23						
			270	270	39.13	11.36						
		5	300	300	39.20	11.43						
		6		360	39.32	11.55						
		7		420	39.42	11.65						
		8		480	39.50	11.73						
		9		540	39.55	11.78						
		10		600	39.62	11.85						
		12		720	39.73	11.96						
		14		840	39.80	12.03						
		16		960	39.85	12.08						
		18		1080	39.90	12.13						
		20		1200	39.92	12.15				1540	1.98	
		25		1500	40.07	12.30						
		30		1800	40.17	12.40						
		35		2100	40.31	12.54						
		40		2400	40.35	12.58						
		45		2700	40.41	12.64						
		50		3000	40.44	12.67						
		55		3300	40.46	12.69						
	1	60		3600	40.48	12.71						
		10		4200	40.51	12.74						
		20		4800	40.51	12.74						
		30		5400	40.52	12.75						
		40		6000	40.53	12.76						
		50		6600	40.54	12.77						
	2	60		7200	40.55	12.78	3.43	30.00	103			
		15		8100	40.56	12.79						
		30		9000	40.57	12.80						
		45		9900	40.58	12.81						
	3	60		10800	40.59	12.82				1530	2.1	
		30		12600	40.61	12.84						
	4	60		14400	40.63	12.86						
		30		16200	40.65	12.88	3.39	30.38	103			
	5	60		18000	40.66	12.89	3.39	30.41	103			
15/01/2023	6			21600	40.66	12.89						
	7			25200								
	8			28800								
	9			32400								
	10			36000								
	12			43200								
	14			50400								
	16			57600								
	18			64800								
	20			72000								
	22			79200								
	24			86400								
	26			93600								
	28			100800								
	30			108000								

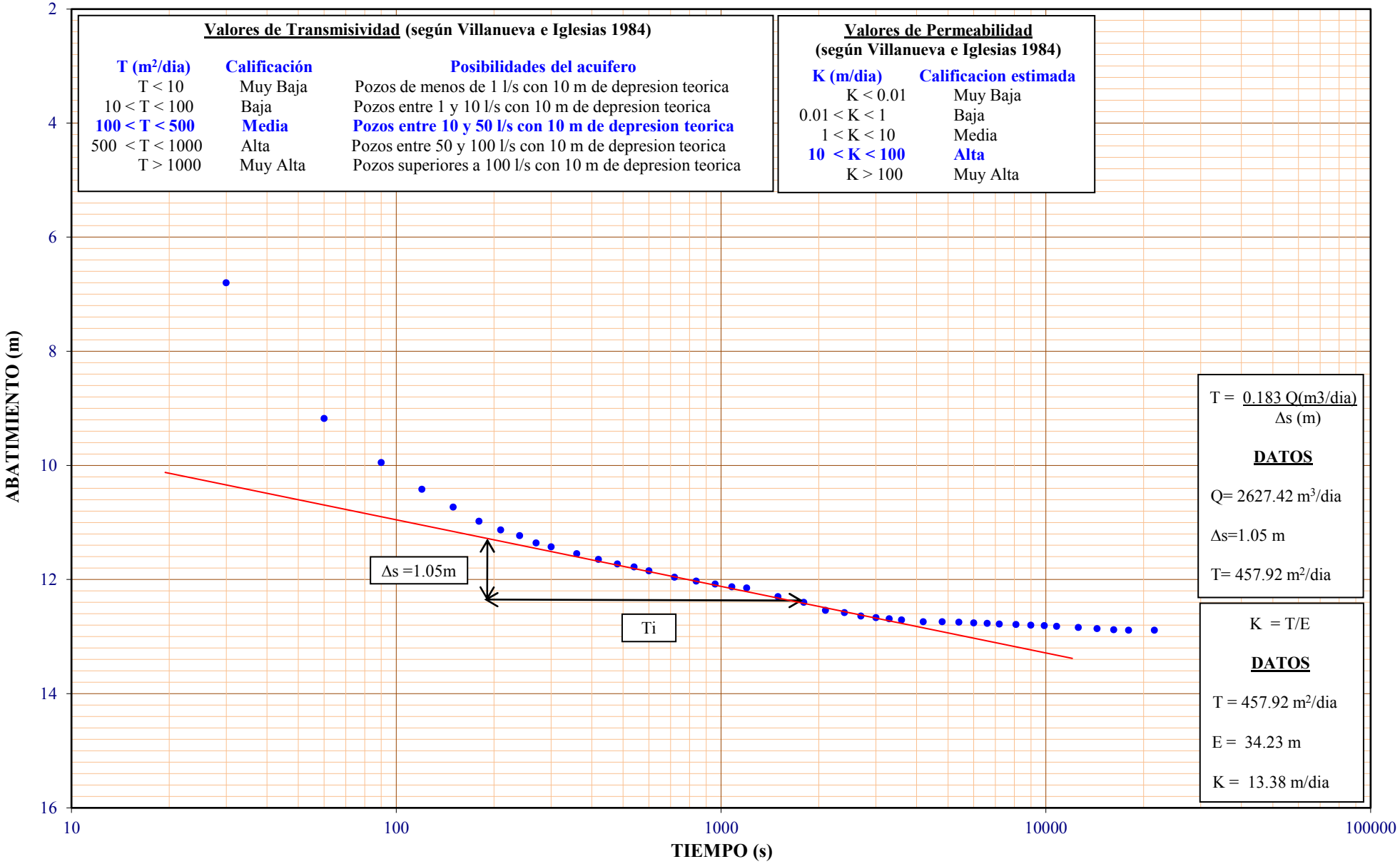
PRUEBA DE BOMBEO - FASE DE DESCENSO
POZO S/N-7 " ROSITA"
(15/01/2023)

Valores de Transmisividad (según Villanueva e Iglesias 1984)

T (m^2/dia)	Calificación	Posibilidades del acuifero
T < 10	Muy Baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresion teorica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresion teorica
100 < T < 500	**Media**	**Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresion teorica**
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresion teorica
T > 1000	Muy Alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresion teorica

Valores de Permeabilidad
(según Villanueva e Iglesias 1984)

K (m/dia)	Calificacion estimada
K < 0.01	Muy Baja
0.01 < K < 1	Baja
1 < K < 10	Media
10 < K < 100	**Alta**
K > 100	Muy Alta



$$T = \frac{0.183\ Q(m3/dia)}{\Delta s\ (m)}$$

DATOS

Q= 2627.42 m^3/dia

Δs=1.05 m

T= 457.92 m^2/dia

K = T/E

DATOS

T = 457.92 m^2/dia

E = 34.23 m

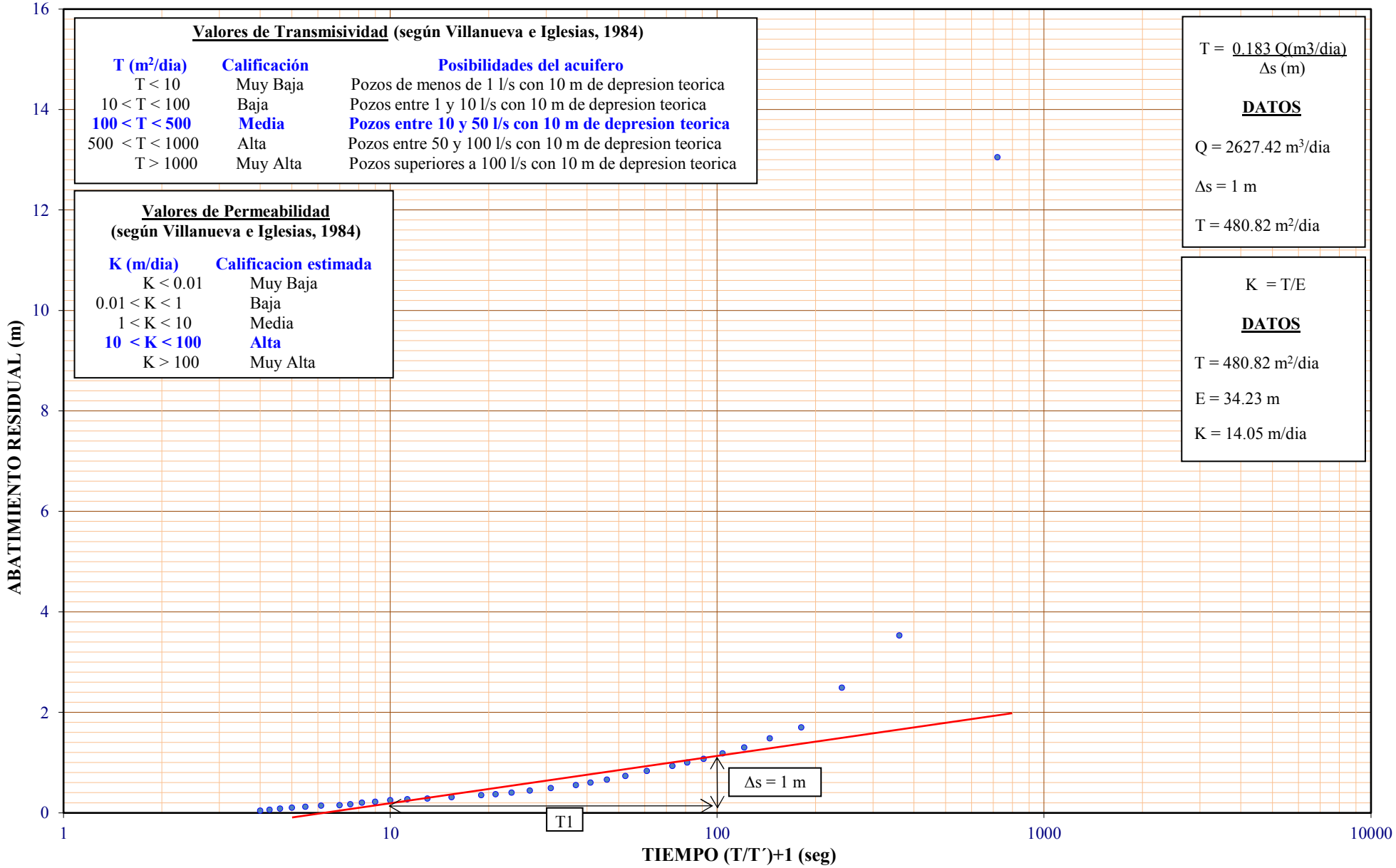
K = 13.38 m/dia

PRUEBA DE BOMBEO - FASE RECUPERACIÓN
POZO S/N-7 "ROSITA"

Lugar	Pampa Molina	**Motor**	Diesel marca Nissan 150 HP	**Ejecutado por:**	Edgar Acosta Pinto
Distrito	Sama - Las Yaras	**Bomba**	Turbina Vertical GOULDS 6"	**Interpretado por:**	Reggie Flores Tito
Provincia	Tacna	**Inicio**	15/01/2023 (14:30pm)	**Tiempo Bombeo (hrs)**	6
Departamento	Tacna	**N.E.**	27.77 m.	**Caudal (l/s):**	30.41
Profundidad	62 m.	**N.D.**	40.66 m.	**Caudal (m3/dia):**	2627.42
Espesor	34.23 m.	**Abatimiento**	12.89 m.		

FECHA	Tiempo			Tiempo (s)	Nivel	(To/T)+1	Abatimiento	Observaciones
	H	M	S	Acumulado	Dinámico		(metros)	
15/01/2023			30	30	40.82	721.00	13.05	
		1	60	60	31.30	361.00	3.53	
			90	90	30.26	241.00	2.49	
		2	120	120	29.47	181.00	1.70	
			150	150	29.25	145.00	1.48	
		3	180	180	29.07	121.00	1.30	
			210	210	28.95	103.86	1.18	
		4	240	240	28.84	91.00	1.07	
			270	270	28.77	81.00	1.00	
		5	300	300	28.70	73.00	0.93	
		6		360	28.60	61.00	0.83	
		7		420	28.50	52.43	0.73	
		8		480	28.43	46.00	0.66	
		9		540	28.37	41.00	0.60	
		10		600	28.32	37.00	0.55	
		12		720	28.26	31.00	0.49	
		14		840	28.21	26.71	0.44	
		16		960	28.17	23.50	0.40	
		18		1080	28.14	21.00	0.37	
		20		1200	28.12	19.00	0.35	
		25		1500	28.08	15.40	0.31	
		30		1800	28.05	13.00	0.28	
		35		2100	28.04	11.29	0.27	
		40		2400	28.02	10.00	0.25	
		45		2700	27.99	9.00	0.22	
		50		3000	27.97	8.20	0.20	
		55		3300	27.94	7.55	0.17	
	1	60		3600	27.92	7.00	0.15	
		10		4200	27.91	6.14	0.14	
		20		4800	27.89	5.50	0.12	
		30		5400	27.87	5.00	0.10	
		40		6000	27.85	4.60	0.08	
		50		6600	27.83	4.27	0.06	
15/01/2023	2	60		7200	27.81	4.00	0.04	
		15						
		30						
		45						
	3	60						
		30						
	4	60						
		30						
	5	60						
	6							
	7							
	8							
	9							
	10							
	12							
	14							
	16							
	18							
	20							
	22							
	24							
	26							
	28							
	30							

PRUEBA DE BOMBEO - FASE DE RECUPERACIÓN
POZO S/N-7 "ROSITA"
(15/01/2023)



Valores de Transmisividad (según Villanueva e Iglesias, 1984)

T (m^2/dia)	Calificación	Posibilidades del acuifero
T < 10	Muy Baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresion teorica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresion teorica
100 < T < 500	**Media**	**Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresion teorica**
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresion teorica
T > 1000	Muy Alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresion teorica

Valores de Permeabilidad
(según Villanueva e Iglesias, 1984)

K (m/dia)	Calificacion estimada
K < 0.01	Muy Baja
0.01 < K < 1	Baja
1 < K < 10	Media
10 < K < 100	**Alta**
K > 100	Muy Alta

$$T = \frac{0.183\ Q(m3/dia)}{\Delta s\ (m)}$$

DATOS

Q = 2627.42 m^3/dia

Δs = 1 m

T = 480.82 m^2/dia

K = T/E

DATOS

T = 480.82 m^2/dia

E = 34.23 m

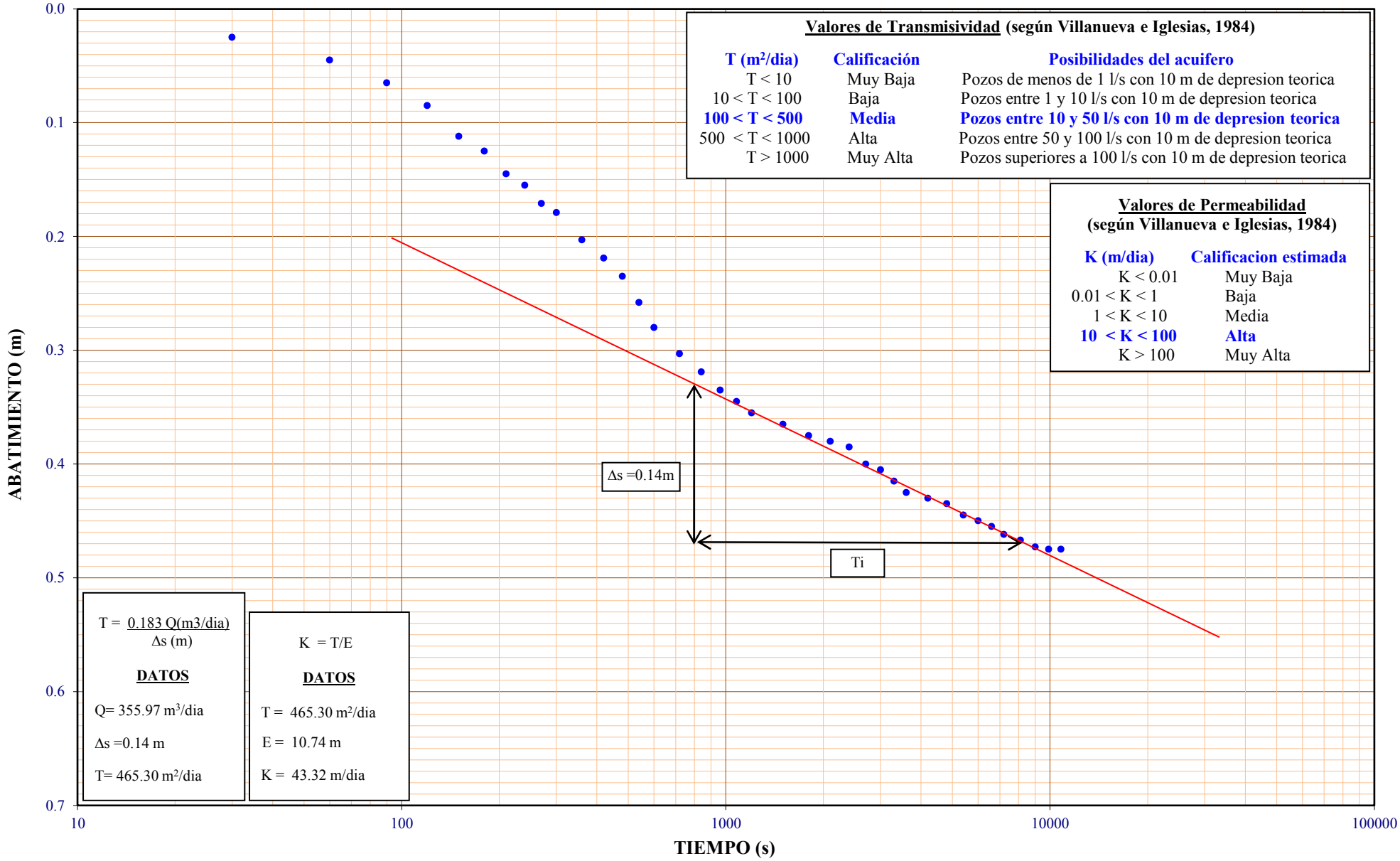
K = 14.05 m/dia

PRUEBA DE BOMBEO - FASE DESCENSO
IRHS 23/01/05-C-2 "APAZA"

Lugar	Sector La Vituña	**Motor**	Worktool's			**Ejecutado por:**	Edgar Acosta Pinto
Distrito	Sama - Las Yaras	**Bomba**	Worktool's			**Interpretado por:**	Reggie Flores Tito
Provincia	Tacna	**Inicio**	13/10/2017 (7:45am)			**Tiempo Bombeo**	3 horas
Departamento	Tacna	**N.E.**	0.27	m.		**Caudal (l/s):**	4.12
Profundidad	11.00 m.	**N.D.**	0.74	m.		**Caudal (m3/dia):**	355.97
Espesor	10.74 m.	**Abatimiento**	0.48	m.			

FECHA	Tiempo			Tiempo (SEG)	Nivel	Abatimiento	Caudal		Cuba	RPM	CE	Observaciones
	H	M	S	Acumulado	Dinámico	(metros)	T/seg	Q/L/seg	Litros		(mmhos/cm)	
13/10/2017			30	30	0.290	0.03						
		1	60	60	0.310	0.05						
			90	90	0.330	0.07						
		2	120	120	0.350	0.09						
			150	150	0.377	0.11						
		3	180	180	0.390	0.13						
			210	210	0.410	0.15						
		4	240	240	0.420	0.16						
			270	270	0.436	0.17						
		5	300	300	0.444	0.18						
		6		360	0.468	0.20						
		7		420	0.484	0.22						
		8		480	0.500	0.24						
		9		540	0.523	0.26						
		10		600	0.545	0.28						
		12		720	0.568	0.30						
		14		840	0.584	0.32						
		16		960	0.600	0.34						
		18		1080	0.610	0.35						
		20		1200	0.620	0.36						
		25		1500	0.630	0.37						
		30		1800	0.640	0.38						
		35		2100	0.645	0.38						
		40		2400	0.650	0.39						
		45		2700	0.665	0.40						
		50		3000	0.670	0.41						
		55		3300	0.680	0.42						
	1	60		3600	0.690	0.43						
		10		4200	0.695	0.43						
		20		4800	0.700	0.44						
		30		5400	0.710	0.45						
		40		6000	0.715	0.45						
		50		6600	0.720	0.46						
	2	60		7200	0.727	0.46						
		15		8100	0.732	0.47						
		30		9000	0.738	0.47	25.30	4.07	103			
		45		9900	0.740	0.48	25.00	4.12	103			
13/10/2017	3	60		10800	0.740	0.48						
		30		12600								
	4	60		14400								
		30		16200								
	5	60		18000								
	6			21600								
	7			25200								
	8			28800								
	9			32400								
	10			36000								
	12			43200								
	14			50400								
	16			57600								
	18			64800								
	20			72000								
	22			79200								
	24			86400								
	26			93600								
	28			100800								
	30			108000								

PRUEBA DE BOMBEO - FASE DE DESCENSO
IRHS 23/01/05-C-2 "APAZA"
(13/10/2017)



Valores de Transmisividad (según Villanueva e Iglesias, 1984)

T (m²/dia)	Calificación	Posibilidades del acuifero
T < 10	Muy Baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresion teorica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresion teorica
100 < T < 500	**Media**	**Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresion teorica**
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresion teorica
T > 1000	Muy Alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresion teorica

Valores de Permeabilidad
(según Villanueva e Iglesias, 1984)

K (m/dia)	Calificacion estimada
K < 0.01	Muy Baja
0.01 < K < 1	Baja
1 < K < 10	Media
10 < K < 100	**Alta**
K > 100	Muy Alta

$$T = \frac{0.183\ Q(m3/dia)}{\Delta s\ (m)}$$

DATOS

Q= 355.97 m³/dia

Δs =0.14 m

T= 465.30 m²/dia

K = T/E

DATOS

T = 465.30 m²/dia

E = 10.74 m

K = 43.32 m/dia

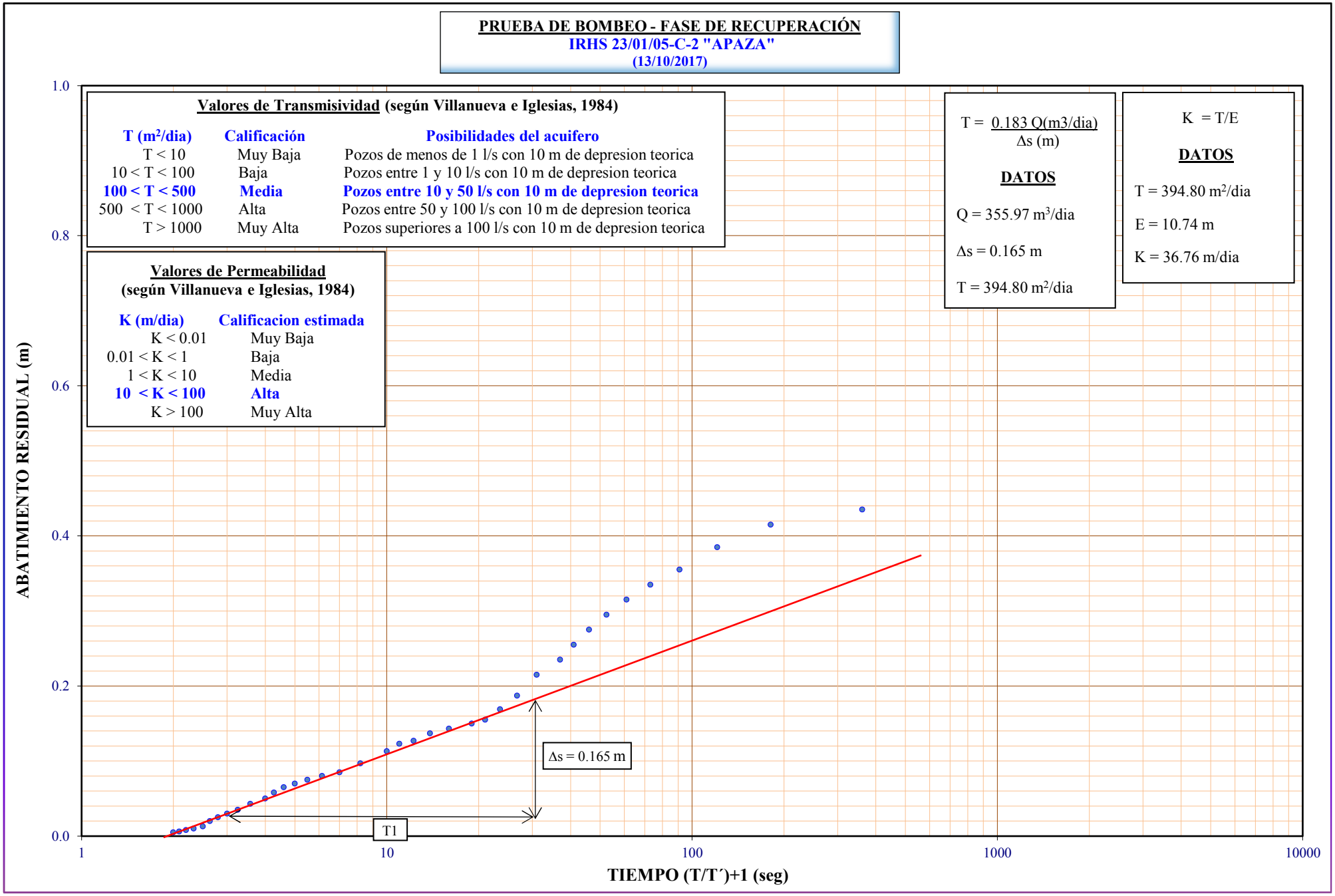
PRUEBA DE BOMBEO - FASE RECUPERACIÓN

IRHS 23/01/05-C-2 "APAZA"

Lugar	Sector La Vituña	**Motor**	Worktool's	**Ejecutado por:**	Edgar Acosta Pinto
Distrito	Sama - Las Yaras	**Bomba**	Worktool's	**Interpretado por:**	Reggie Flores Tito
Provincia	Tacna	**Inicio**	13/10/2017 (10:45 am)	**Tiempo Bombeo (hrs)**	3
Departamento	Tacna	**N.E.**	0.27 m.	**Caudal (l/s):**	4.12
Profundidad	11.00 m.	**N.D.**	0.74 m.	**Caudal (m3/dia):**	355.97
Espesor	10.74 m.	**Abatimiento**	0.48 m.		

FECHA	Tiempo			Tiempo (s)	Nivel	(To/T)+1	Abatimiento	Observaciones
	H	M	S	Acumulado	Dinámico		(metros)	
13/10/2017			30	30	0.700	361.00	0.435	
		1	60	60	0.680	181.00	0.415	
			90	90	0.650	121.00	0.385	
		2	120	120	0.620	91.00	0.355	
			150	150	0.600	73.00	0.335	
		3	180	180	0.580	61.00	0.315	
			210	210	0.560	52.43	0.295	
		4	240	240	0.540	46.00	0.275	
			270	270	0.520	41.00	0.255	
		5	300	300	0.500	37.00	0.235	
		6		360	0.480	31.00	0.215	
		7		420	0.452	26.71	0.187	
		8		480	0.434	23.50	0.169	
		9		540	0.420	21.00	0.155	
		10		600	0.415	19.00	0.150	
		12		720	0.408	16.00	0.143	
		14		840	0.402	13.86	0.137	
		16		960	0.392	12.25	0.127	
		18		1080	0.388	11.00	0.123	
		20		1200	0.378	10.00	0.113	
		25		1500	0.362	8.20	0.097	
		30		1800	0.350	7.00	0.085	
		35		2100	0.345	6.14	0.080	
		40		2400	0.340	5.50	0.075	
		45		2700	0.335	5.00	0.070	
		50		3000	0.330	4.60	0.065	
		55		3300	0.323	4.27	0.058	
	1	60		3600	0.315	4.00	0.050	
		10		4200	0.308	3.57	0.043	
		20		4800	0.300	3.25	0.035	
		30		5400	0.295	3.00	0.030	
		40		6000	0.290	2.80	0.025	
		50		6600	0.285	2.64	0.020	
	2	60		7200	0.278	2.50	0.013	
		15		8100	0.275	2.33	0.010	
		30		9000	0.273	2.20	0.008	
		45		9900	0.271	2.09	0.006	
13/10/2017	3	60		10800	0.270	2.00	0.005	
		30		12600				
	4	60		14400				
		30		16200				
	5	60		18000				
	6			21600				
	7			25200				
	8			28800				
	9			32400				
	10			36000				
	12			43200				
	14			50400				
	16			57600				
	18			64800				
	20			72000				
	22			79200				
	24			86400				
	26			93600				
	28			100800				
	30			108000				

PRUEBA DE BOMBEO - FASE DE RECUPERACIÓN
IRHS 23/01/05-C-2 "APAZA"
(13/10/2017)



Valores de Transmisividad (según Villanueva e Iglesias, 1984)

T (m²/dia)	Calificación	Posibilidades del acuifero
T < 10	Muy Baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresion teorica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresion teorica
100 < T < 500	**Media**	**Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresion teorica**
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresion teorica
T > 1000	Muy Alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresion teorica

Valores de Permeabilidad
(según Villanueva e Iglesias, 1984)

K (m/dia)	Calificacion estimada
K < 0.01	Muy Baja
0.01 < K < 1	Baja
1 < K < 10	Media
10 < K < 100	**Alta**
K > 100	Muy Alta

$$T = \frac{0.183\ Q(m3/dia)}{\Delta s\ (m)}$$

DATOS

Q = 355.97 m³/dia

Δs = 0.165 m

T = 394.80 m²/dia

K = T/E

DATOS

T = 394.80 m²/dia

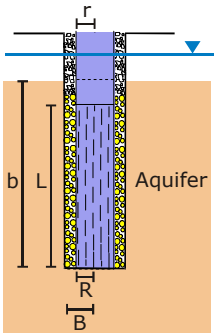
E = 10.74 m

K = 36.76 m/dia

Resultados de interpretación en software Aquifer Test

Waterloo HYDROGEOLOGIC	**Contact Info** **Address** **Company Name** **City, State/Province**	**Pumping Test Analysis Report**
		Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama
		Number: 01
		Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito

Location: Sama Las Yaras - Tacna



	Name	X [m]	Y [m]
1	PP-01 Laguna Azul	324386	7990780

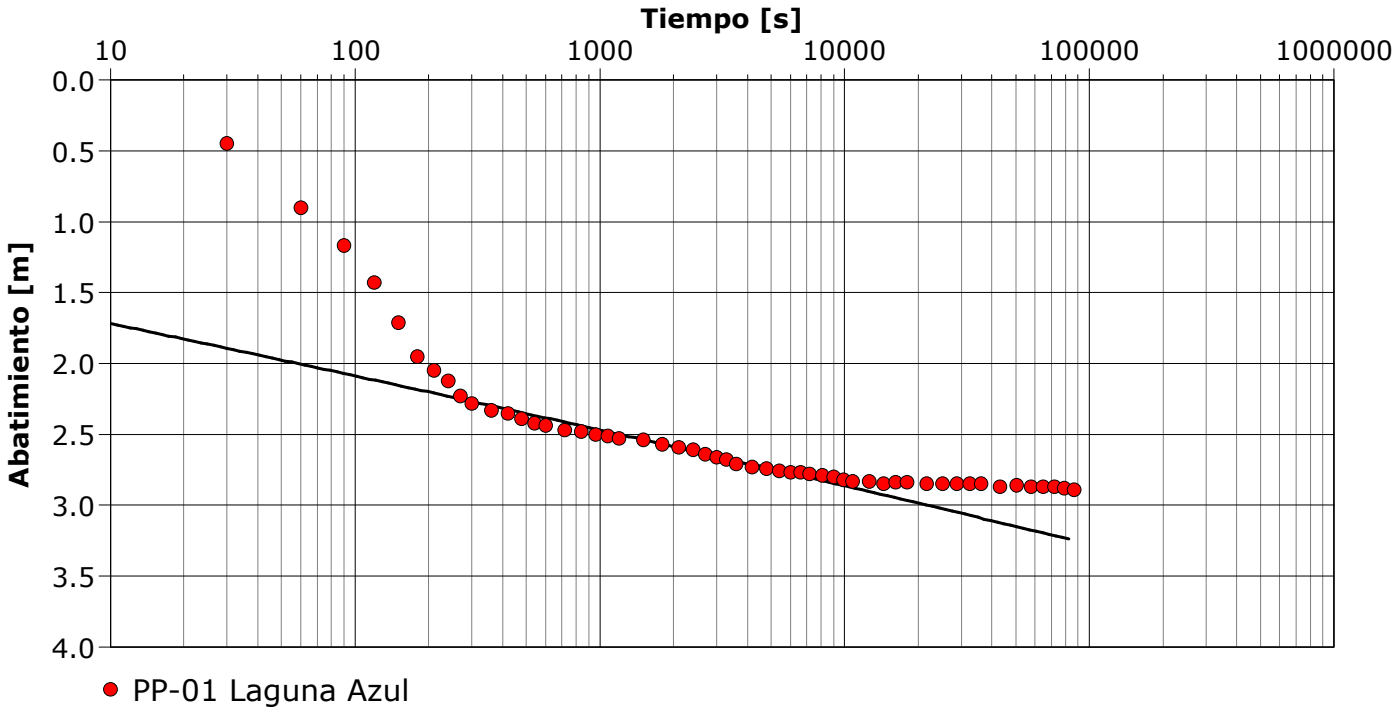
Contact Info Address Company Name City, State/Province	**Pumping Test - Water Level Data**	Page 1 of 1
	Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama	
	Number: 01	
	Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito	

Location: Sama Las Yaras - Tacna	Pumping Test: Descenso Pozo Laguna Azul	Pumping Well: PP-01 Laguna Azul
Test Conducted by: EMAP Ingenieros SAC	Test Date: 05/04/2017	Discharge Rate: 20 [l/s]
Observation Well: PP-01 Laguna Azul	Static Water Level [m]: 8.10	Radial Distance to PW [m]: -

	Time [s]	Water Level [m]	Drawdown [m]
1	0	8.10	0.00
2	30	8.55	0.45
3	60	9.00	0.90
4	90	9.27	1.17
5	120	9.53	1.43
6	150	9.81	1.71
7	180	10.05	1.95
8	210	10.15	2.05
9	240	10.22	2.12
10	270	10.33	2.23
11	300	10.38	2.28
12	360	10.43	2.33
13	420	10.45	2.35
14	480	10.49	2.39
15	540	10.52	2.42
16	600	10.54	2.44
17	720	10.57	2.47
18	840	10.58	2.48
19	960	10.60	2.50
20	1080	10.61	2.51
21	1200	10.63	2.53
22	1500	10.64	2.54
23	1800	10.67	2.57
24	2100	10.69	2.59
25	2400	10.71	2.61
26	2700	10.74	2.64
27	3000	10.76	2.66
28	3300	10.78	2.68
29	3600	10.81	2.71
30	4200	10.83	2.73
31	4800	10.84	2.74
32	5400	10.86	2.76
33	6000	10.87	2.77
34	6600	10.87	2.77
35	7200	10.88	2.78
36	8100	10.89	2.79
37	9000	10.90	2.80
38	9900	10.92	2.82
39	10800	10.93	2.83
40	12600	10.93	2.83
41	14400	10.95	2.85
42	16200	10.94	2.84
43	18000	10.94	2.84
44	21600	10.95	2.85
45	25200	10.95	2.85
46	28800	10.95	2.85
47	32400	10.95	2.85
48	36000	10.95	2.85
49	43200	10.97	2.87
50	50400	10.96	2.86
51	57600	10.97	2.87
52	64800	10.97	2.87
53	72000	10.97	2.87
54	79200	10.98	2.88
55	86400	10.99	2.89

Waterloo HYDROGEOLOGIC	**Contact Info** **Address** **Company Name** **City, State/Province**	**Pumping Test Analysis Report**
		Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama
		Number: 01
		Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito

Location: Sama Las Yaras - Tacna	Pumping Test: Descenso Pozo Laguna Azul	Pumping Well: PP-01 Laguna Azul
Test Conducted by: EMAP Ingenieros SAC		Test Date: 05/04/2017
Analysis Performed by: Reggie Flores Tito		Analysis Date: 03/10/2025
Aquifer Thickness: 13.90 m	Discharge Rate: 20 [l/s]	

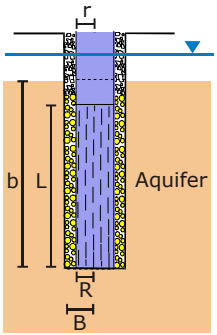


Calculation using Theis with Jacob Correction

Observation Well	Transmissivity [m²/d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
PP-01 Laguna Azul	992.90	71.43			

Waterloo HYDROGEOLOGIC	**Contact Info** **Address** **Company Name** **City, State/Province**	**Pumping Test Analysis Report**
		Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama
		Number: 01
		Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito

Location: Sama Las Yaras - Tacna



	Name	X [m]	Y [m]
1	PP-01 Wayu Perú	324990	7993845

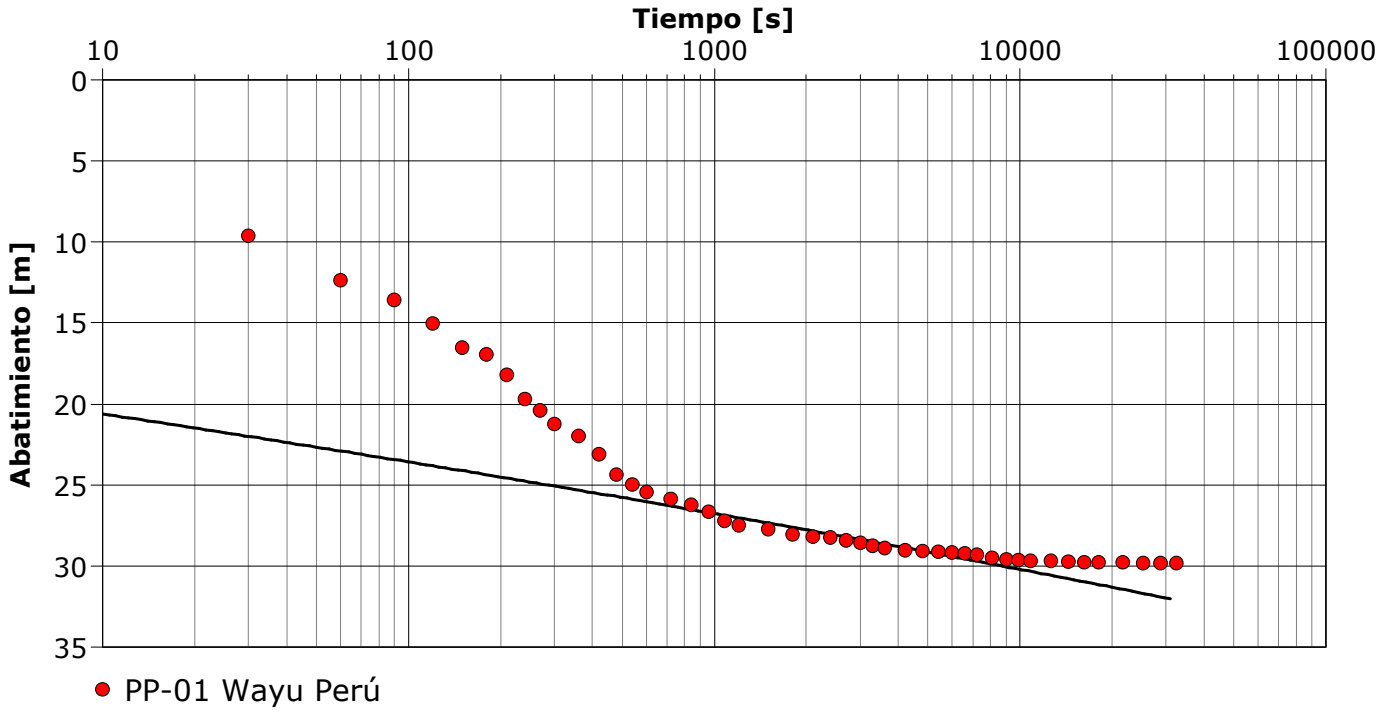
Contact Info Address Company Name City, State/Province	**Pumping Test - Water Level Data**	Page 1 of 1
	Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama	
	Number: 01	
	Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito	

Location: Sama Las Yaras - Tacna	Pumping Test: Descenso Pozo Wayu	Pumping Well: PP-01 Wayu Perú
Test Conducted by: EMAP Ingenieros SAC	Test Date: 16/10/2023	Discharge Rate: 21.7 [l/s]
Observation Well: PP-01 Wayu Perú	Static Water Level [m]: 32.10	Radial Distance to PW [m]: -

	Time [s]	Water Level [m]	Drawdown [m]
1	0	32.10	0.00
2	30	41.70	9.60
3	60	44.45	12.35
4	90	45.70	13.60
5	120	47.11	15.01
6	150	48.63	16.53
7	180	49.04	16.94
8	210	50.28	18.18
9	240	51.77	19.67
10	270	52.50	20.40
11	300	53.32	21.22
12	360	54.07	21.97
13	420	55.18	23.08
14	480	56.45	24.35
15	540	57.07	24.97
16	600	57.54	25.44
17	720	57.96	25.86
18	840	58.33	26.23
19	960	58.74	26.64
20	1080	59.32	27.22
21	1200	59.58	27.48
22	1500	59.83	27.73
23	1800	60.16	28.06
24	2100	60.27	28.17
25	2400	60.35	28.25
26	2700	60.52	28.42
27	3000	60.66	28.56
28	3300	60.85	28.75
29	3600	61.00	28.90
30	4200	61.13	29.03
31	4800	61.17	29.07
32	5400	61.20	29.10
33	6000	61.25	29.15
34	6600	61.30	29.20
35	7200	61.42	29.32
36	8100	61.59	29.49
37	9000	61.69	29.59
38	9900	61.72	29.62
39	10800	61.76	29.66
40	12600	61.79	29.69
41	14400	61.82	29.72
42	16200	61.86	29.76
43	18000	61.88	29.78
44	21600	61.89	29.79
45	25200	61.91	29.81
46	28800	61.90	29.80
47	32400	61.90	29.80

Contact Info Address Company Name City, State/Province	**Pumping Test Analysis Report**
	Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama
	Number: 01
	Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito

Location: Sama Las Yaras - Tacna	Pumping Test: Descenso Pozo Wayu	Pumping Well: PP-01 Wayu Perú
Test Conducted by: EMAP Ingenieros SAC		Test Date: 16/10/2023
Analysis Performed by: Reggie Flores Tito		Analysis Date: 03/10/2025
Aquifer Thickness: 67.90 m	Discharge Rate: 21.7 [l/s]	

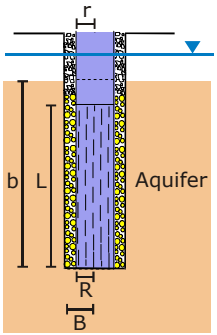


Calculation using Theis with Jacob Correction

Observation Well	Transmissivity [m²/d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
PP-01 Wayu Perú	171.52	2.53			

Waterloo HYDROGEOLOGIC	**Contact Info** **Address** **Company Name** **City, State/Province**	**Pumping Test Analysis Report**
		Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama
		Number: 01
		Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito

Location: Sama Las Yaras - Tacna



	Name	X [m]	Y [m]
1	S/N-7 Rosita	325630	7992583

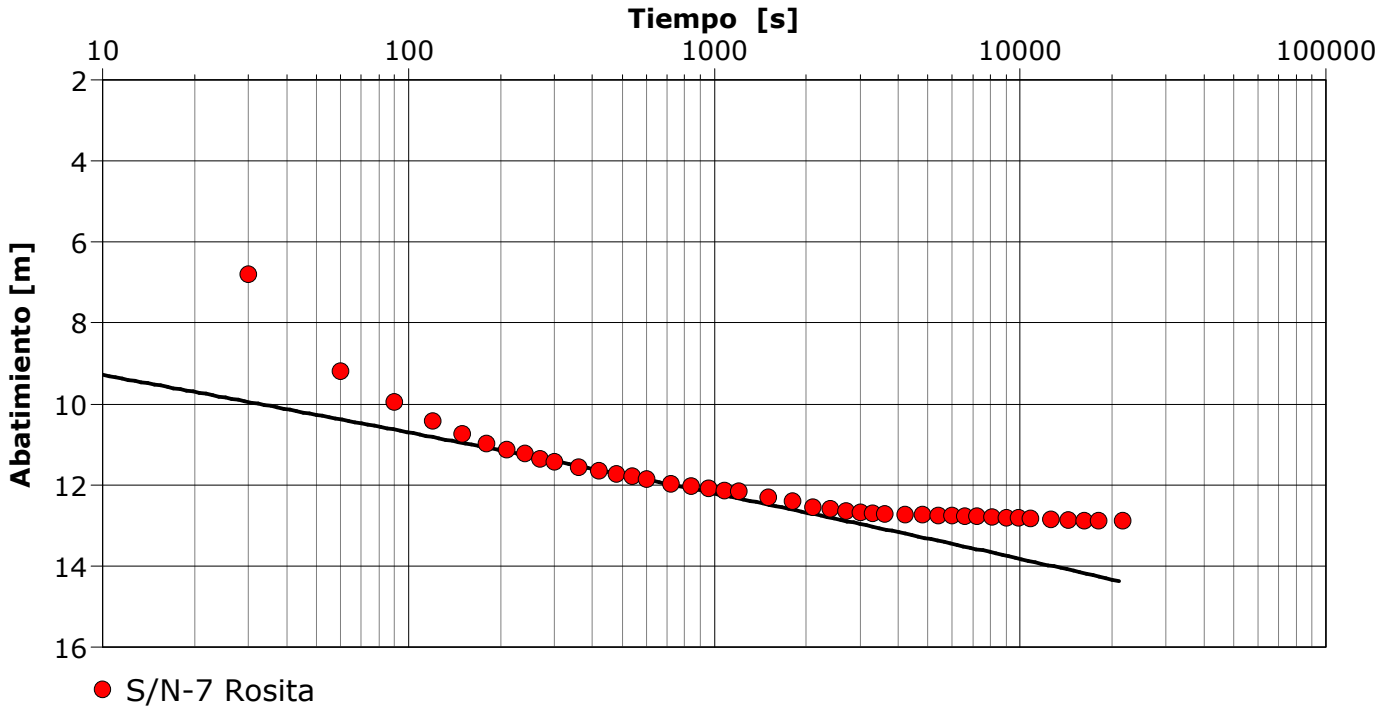
Contact Info Address Company Name City, State/Province	**Pumping Test - Water Level Data**	Page 1 of 1
	Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama	
	Number: 01	
	Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito	

Location: Sama Las Yaras - Tacna	Pumping Test: Descenso Pozo ROSITA	Pumping Well: S/N-7 Rosita
Test Conducted by: EMAP Ingenieros SAC	Test Date: 15/01/2023	Discharge Rate: 30.41 [l/s]
Observation Well: S/N-7 Rosita	Static Water Level [m]: 27.77	Radial Distance to PW [m]: -

	Time [s]	Water Level [m]	Drawdown [m]
1	0	27.77	0.00
2	30	34.57	6.80
3	60	36.95	9.18
4	90	37.72	9.95
5	120	38.19	10.42
6	150	38.50	10.73
7	180	38.75	10.98
8	210	38.90	11.13
9	240	39.00	11.23
10	270	39.13	11.36
11	300	39.20	11.43
12	360	39.32	11.55
13	420	39.42	11.65
14	480	39.50	11.73
15	540	39.55	11.78
16	600	39.62	11.85
17	720	39.73	11.96
18	840	39.80	12.03
19	960	39.85	12.08
20	1080	39.90	12.13
21	1200	39.92	12.15
22	1500	40.07	12.30
23	1800	40.17	12.40
24	2100	40.31	12.54
25	2400	40.35	12.58
26	2700	40.41	12.64
27	3000	40.44	12.67
28	3300	40.46	12.69
29	3600	40.48	12.71
30	4200	40.51	12.74
31	4800	40.51	12.74
32	5400	40.52	12.75
33	6000	40.53	12.76
34	6600	40.54	12.77
35	7200	40.55	12.78
36	8100	40.56	12.79
37	9000	40.57	12.80
38	9900	40.58	12.81
39	10800	40.59	12.82
40	12600	40.61	12.84
41	14400	40.63	12.86
42	16200	40.65	12.88
43	18000	40.66	12.89
44	21600	40.66	12.89

Waterloo HYDROGEOLOGIC	**Contact Info** **Address** **Company Name** **City, State/Province**	**Pumping Test Analysis Report**
		Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama
		Number: 01
		Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito

Location: Sama Las Yaras - Tacna	Pumping Test: Descenso Pozo ROSITA	Pumping Well: S/N-7 Rosita
Test Conducted by: EMAP Ingenieros SAC		Test Date: 15/01/2023
Analysis Performed by: Reggie Flores Tito		Analysis Date: 03/10/2025
Aquifer Thickness: 34.23 m	Discharge Rate: 30.41 [l/s]	



Calculation using Theis with Jacob Correction

Observation Well	Transmissivity [m²/d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
S/N-7 Rosita	480.50	14.04			

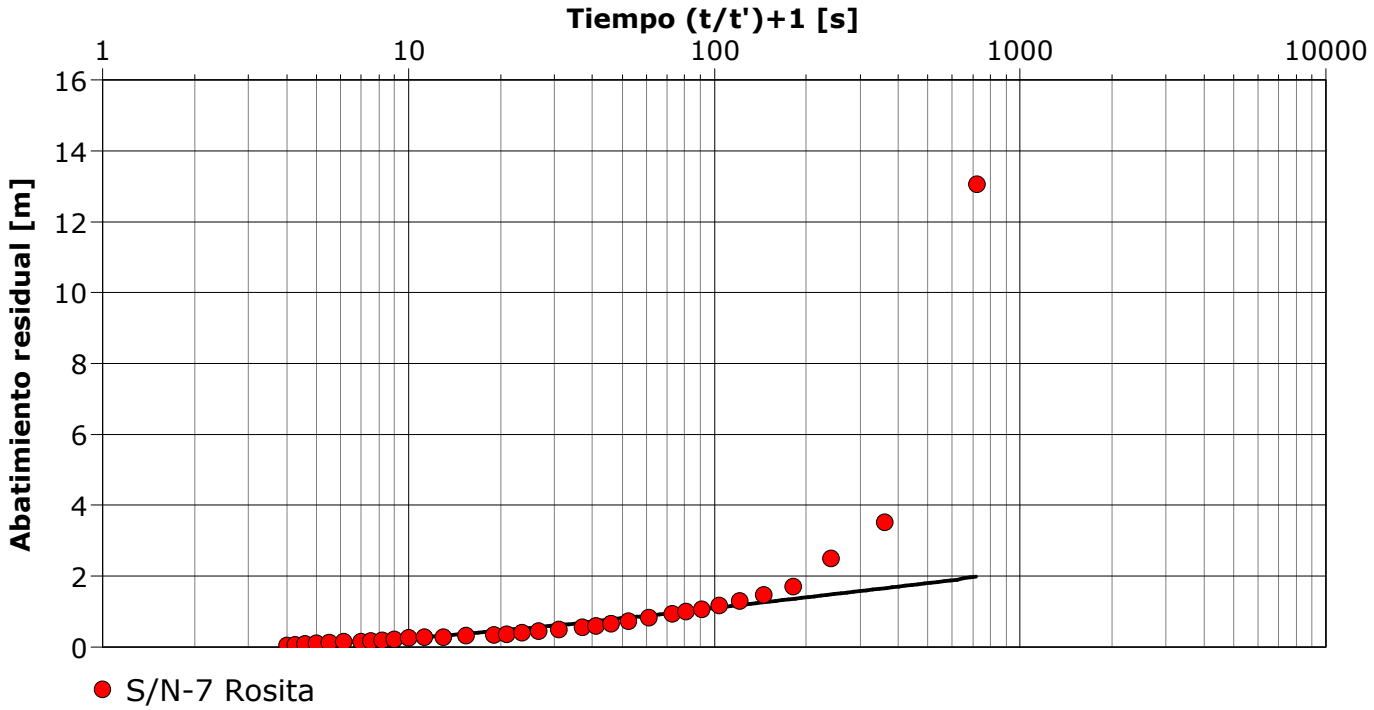
Contact Info Address Company Name City, State/Province	**Pumping Test Analysis Report**	Page 1 of 1
	Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama	
	Number: 01	
	Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito	

Location: Sama Las Yaras - Tacna	Pumping Test: Recuperación Pozo Rosita	Pumping Well: S/N-7 Rosita
Test Conducted by: EMAP Ingenieros SAC	Test Date: 15/01/2023	Discharge Rate: 30.41 [l/s]
Observation Well: S/N-7 Rosita	Static Water Level [m]: 27.77	Radial Distance to PW [m]: -

	Time [s]	Water Level [m]	Drawdown [m]
1	4	27.81	0.04
2	4.2727	27.83	0.06
3	4.6	27.85	0.08
4	5	27.87	0.10
5	5.5	27.89	0.12
6	6.1429	27.91	0.14
7	7	27.92	0.15
8	7.5455	27.94	0.17
9	8.2	27.97	0.20
10	9	27.99	0.22
11	10	28.02	0.25
12	11.2857	28.04	0.27
13	13	28.05	0.28
14	15.4	28.08	0.31
15	19	28.12	0.35
16	21	28.14	0.37
17	23.5	28.17	0.40
18	26.7143	28.21	0.44
19	31	28.26	0.49
20	37	28.32	0.55
21	41	28.37	0.60
22	46	28.43	0.66
23	52.4286	28.50	0.73
24	61	28.60	0.83
25	73	28.70	0.93
26	81	28.77	1.00
27	91	28.84	1.07
28	103.8571	28.95	1.18
29	121	29.07	1.30
30	145	29.25	1.48
31	181	29.47	1.70
32	241	30.26	2.49
33	361	31.30	3.53
34	721	40.82	13.05

Waterloo HYDROGEOLOGIC	**Contact Info** **Address** **Company Name** **City, State/Province**	**Pumping Test Analysis Report**
		Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama
		Number: 01
		Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito

Location: Sama Las Yaras - Tacna	Pumping Test: Recuperación Pozo Rosita	Pumping Well: S/N-7 Rosita
Test Conducted by: EMAP Ingenieros SAC		Test Date: 15/01/2023
Analysis Performed by: Reggie Flores Tito		Analysis Date: 04/10/2025
Aquifer Thickness: 34.23 m	Discharge Rate: 30.41 [l/s]	

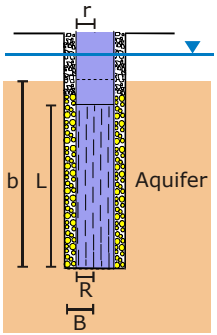


Calculation using Theis with Jacob Correction

Observation Well	Transmissivity [m²/d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
S/N-7 Rosita	481.30	14.06			

Waterloo HYDROGEOLOGIC	**Contact Info** **Address** **Company Name** **City, State/Province**	**Pumping Test Analysis Report**
		Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama
		Number: 01
		Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito

Location: Sama Las Yaras - Tacna



	Name	X [m]	Y [m]
1	IRHS-C-2	323628	7999377

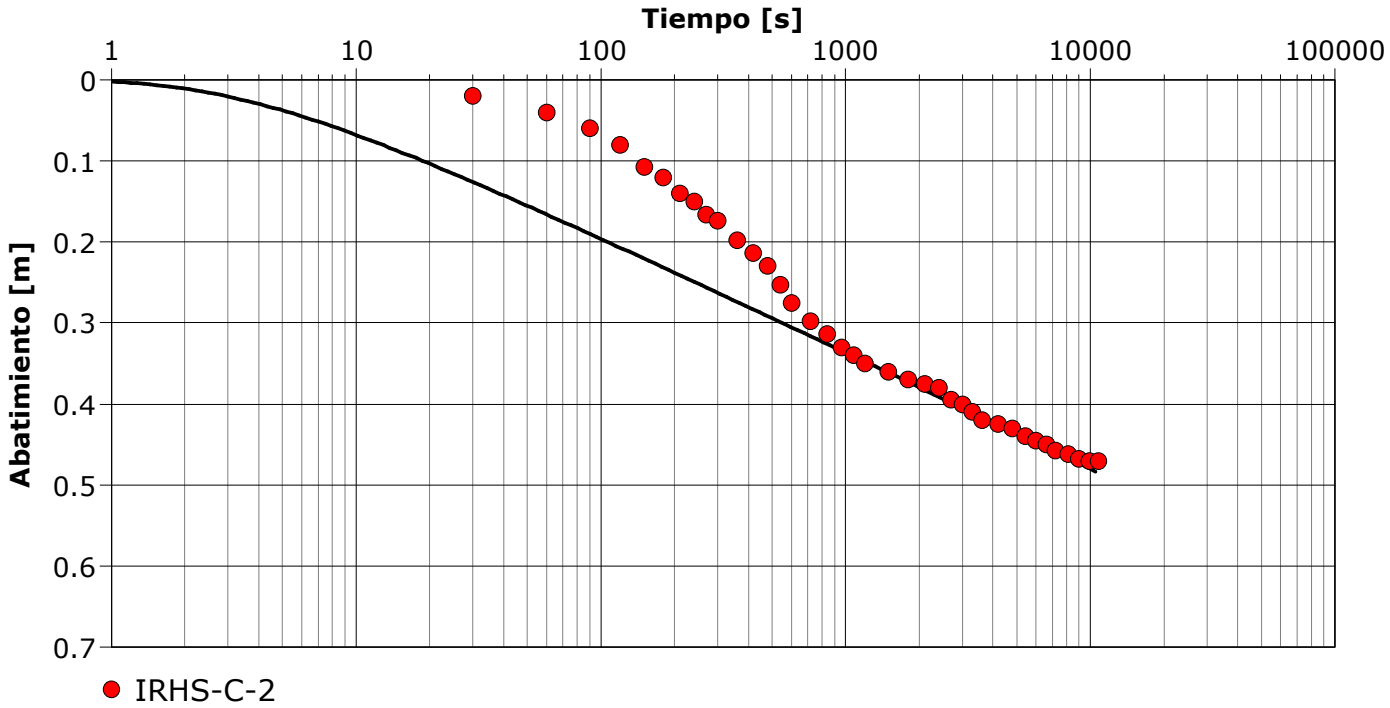
Contact Info Address Company Name City, State/Province	**Pumping Test - Water Level Data**	Page 1 of 1
	Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama	
	Number: 01	
	Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito	

Location: Sama Las Yaras - Tacna	Pumping Test: Descenso Pozo Apaza	Pumping Well: IRHS-C-2
Test Conducted by: EMAP Ingenieros SAC	Test Date: 13/10/2017	Discharge Rate: 4.12 [l/s]
Observation Well: IRHS-C-2	Static Water Level [m]: 0.27	Radial Distance to PW [m]: -

	Time [s]	Water Level [m]	Drawdown [m]
1	0	0.27	0.00
2	30	0.29	0.02
3	60	0.31	0.04
4	90	0.33	0.06
5	120	0.35	0.08
6	150	0.377	0.107
7	180	0.39	0.12
8	210	0.41	0.14
9	240	0.42	0.15
10	270	0.436	0.166
11	300	0.444	0.174
12	360	0.468	0.198
13	420	0.484	0.214
14	480	0.50	0.23
15	540	0.523	0.253
16	600	0.545	0.275
17	720	0.568	0.298
18	840	0.584	0.314
19	960	0.60	0.33
20	1080	0.61	0.34
21	1200	0.62	0.35
22	1500	0.63	0.36
23	1800	0.64	0.37
24	2100	0.645	0.375
25	2400	0.65	0.38
26	2700	0.665	0.395
27	3000	0.67	0.40
28	3300	0.68	0.41
29	3600	0.69	0.42
30	4200	0.695	0.425
31	4800	0.70	0.43
32	5400	0.71	0.44
33	6000	0.715	0.445
34	6600	0.72	0.45
35	7200	0.727	0.457
36	8100	0.732	0.462
37	9000	0.738	0.468
38	9900	0.74	0.47
39	10800	0.74	0.47

Contact Info Address Company Name City, State/Province	**Pumping Test Analysis Report**
	Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama
	Number: 01
	Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito

Location: Sama Las Yaras - Tacna	Pumping Test: Descenso Pozo Apaza	Pumping Well: IRHS-C-2
Test Conducted by: EMAP Ingenieros SAC		Test Date: 13/10/2017
Analysis Performed by: Reggie Flores Tito		Analysis Date: 04/10/2025
Aquifer Thickness: 10.74 m	Discharge Rate: 4.12 [l/s]	



Calculation using Theis with Jacob Correction

Observation Well	Transmissivity [m²/d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
IRHS-C-2	472.50	43.99			

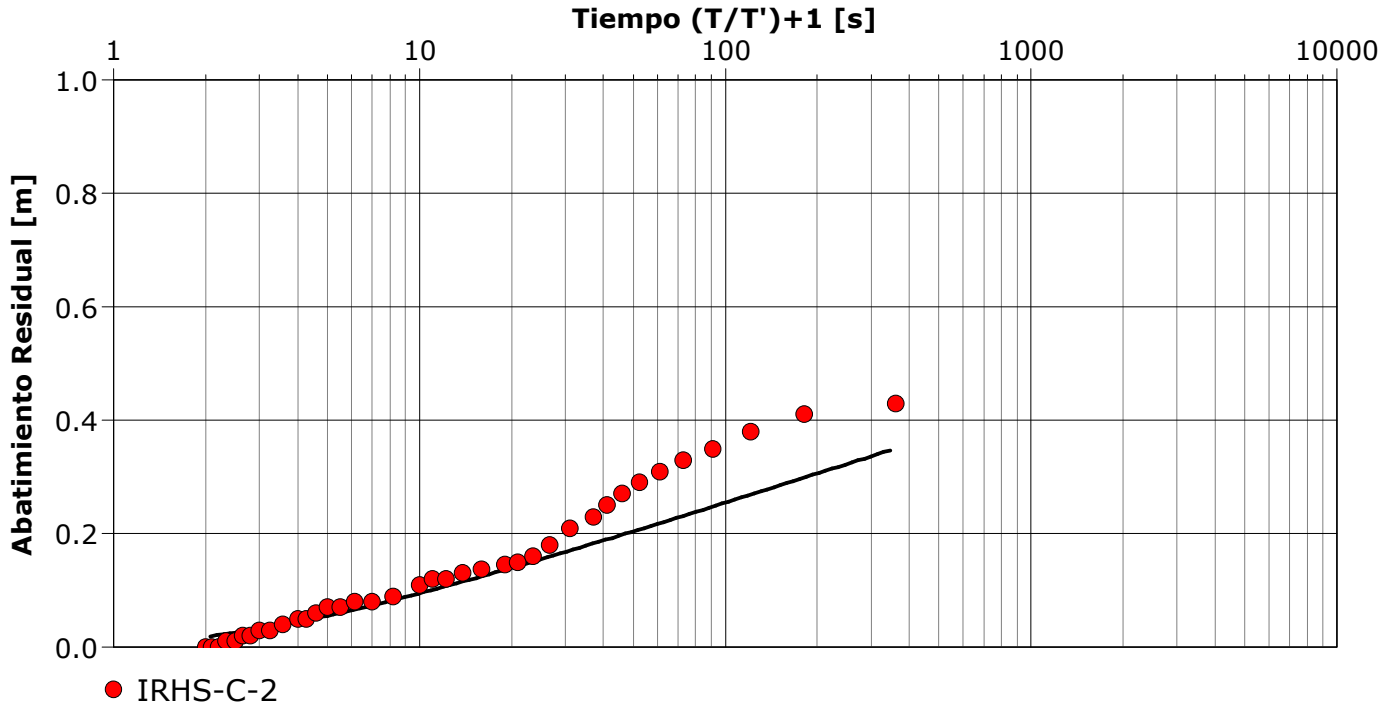
Contact Info Address Company Name City, State/Province	**Pumping Test - Water Level Data**	Page 1 of 1
	Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama	
	Number: 01	
	Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito	

Location: Sama Las Yaras - Tacna	Pumping Test: Recuperación Pozo Apaza	Pumping Well: IRHS-C-2
Test Conducted by: EMAP Ingenieros SAC	Test Date: 13/10/2017	Discharge Rate: 4.12 [l/s]
Observation Well: IRHS-C-2	Static Water Level [m]: 0.27	Radial Distance to PW [m]: -

	Time [s]	Water Level [m]	Drawdown [m]
1	2	0.27	0.00
2	2.09	0.27	0.00
3	2.2	0.27	0.00
4	2.33	0.28	0.01
5	2.5	0.28	0.01
6	2.64	0.29	0.02
7	2.8	0.29	0.02
8	3	0.30	0.03
9	3.25	0.30	0.03
10	3.57	0.31	0.04
11	4	0.32	0.05
12	4.27	0.32	0.05
13	4.6	0.33	0.06
14	5	0.34	0.07
15	5.5	0.34	0.07
16	6.14	0.35	0.08
17	7	0.35	0.08
18	8.2	0.36	0.09
19	10	0.38	0.11
20	11	0.39	0.12
21	12.25	0.39	0.12
22	13.86	0.40	0.13
23	16	0.408	0.138
24	19	0.415	0.145
25	21	0.42	0.15
26	23.5	0.43	0.16
27	26.71	0.45	0.18
28	31	0.48	0.21
29	37	0.50	0.23
30	41	0.52	0.25
31	46	0.54	0.27
32	52.43	0.56	0.29
33	61	0.58	0.31
34	73	0.60	0.33
35	91	0.62	0.35
36	121	0.65	0.38
37	181	0.68	0.41
38	361	0.70	0.43

Contact Info Address Company Name City, State/Province	**Pumping Test Analysis Report**
	Project: Evaluación Hidrogeológica Acuífero Pampa Molina-Sama
	Number: 01
	Client: Bach. Reggie Kathleen Flores Tito

Location: Sama Las Yaras - Tacna	Pumping Test: Recuperación Pozo Apaza	Pumping Well: IRHS-C-2
Test Conducted by: EMAP Ingenieros SAC		Test Date: 13/10/2017
Analysis Performed by: Reggie Flores Tito		Analysis Date: 05/10/2025
Aquifer Thickness: 10.74 m	Discharge Rate: 4.12 [l/s]	



Calculation using Theis with Jacob Correction

Observation Well	Transmissivity [m²/d]	Hydraulic Conductivity [m/d]	Storage coefficient	Radial Distance to PW [m]	
IRHS-C-2	386.00	35.94			

Anexo 6. Resultados análisis fisico-quimicos

ANEXO 6.1. RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS POZOS DE AGUA SUBTERRÁNEA SECTOR PAMPA MOLINA Y ALREDEDORES - PARTE BAJA VALLE SAMA

Nº	POZO	NOMBRE DE POZO / PROPIETARIO	SECTOR	COORDENADAS UTM WGS84, 19S		FECHA	PARÁMETROS FISICO-QUIMICOS												RAS	APTITUD DE RIEGO	FACIE HIDROGEOQUIMICA (TIPO DE AGUA)	FAMILIA QUIMICA	POTABILIDAD
				Este	Norte		pH (Unid)	C.E. (mS/cm)	TDS (mg/l)	Dureza CaCo3 (mg/l)	Calcio (mg/l)	Magnesio (mg/l)	Sodio (mg/l)	Potasio (mg/l)	Cloruros (mg/l)	Sulfatos (mg/l)	Bicarbonatos (mg/l)	Nitratos (mg/l)					
1	IRHS C-2	SR. APAZA	LA VITUÑA	323628	7999377	13/10/2017	8.20	1.87	-	370.27	107.56	17.11	249.10	19.26	229.57	345.26	102.47	< 0.3	5.89	C3-S2	Na-Ca-SO4-Cl	SULFATADA CLORURADA SÓDICA	ACEPTABLE A MEDIOCRE
2	S/N-1	PRIVADO	PAMPA MOLINA	326332	7997668	25/03/2022	7.97	2.34	1382	224.95 (*)	62.31	16.84	382.98	9.97	469.05	371.64	105.00	3.77	11.11	C4-S3	Na-Cl-SO4	CLORURADA SÓDICA	MEDIOCRE
3	S/N-4	ASOC. AGROP. DIVINO NIÑO	PAMPA MOLINA	325427	7995233	23/03/2022	7.95	1.69	962	198.51 (*)	58.54	12.71	267.71	10.92	264.63	292.42	91.10	1.87	8.27	C3-S2	Na-Cl-SO4	CLORURADA SULFATADA SÓDICA	ACEPTABLE A MEDIOCRE
4	S/N-6 "SR.DE HUANCA"	ASOC. AGROP.SR.DE HUANCA	PAMPA MOLINA	325694	7993240	02/02/2023	7.69	1.82	-	290.93	88.68	17.53	291.83	14.81	340.89	350.74	107.05	2.73	7.41	C3-S2	Na-Ca-Cl-SO4	CLORURADA SÓDICA	MEDIOCRE
5	S/N-7 "ROSITA"	ROSITA	PAMPA MOLINA	325630	7992583	22/03/2022	7.93	1.99	1242	238.29 (*)	70.16	15.32	337.17	12.20	362.72	355.23	109.40	2.31	9.50	C3-S2	Na-Cl-SO4	CLORURADA SÓDICA	MEDIOCRE
6	PP-01 LAGUNA AZUL	PROMOTORA DAVECO SAC	PLAYA LLOSTAY	324386	7990780	19/04/2017	7.80	2.34	-	344.54	97.73	22.08	350.50	15.06	468.40	336.46	125.93	0.90	8.33	C4-S2	Na-Ca-Cl-SO4	CLORURADA SÓDICA	MEDIOCRE
7	IRHS-7	PRIVADO	PAMPA MOLINA	323971	7994294	22/03/2022	6.93	9.78	6784	2103.71 (*)	647.02	118.53	1365.33	57.11	2377.28	2114.02	346.70	<0.06	12.95	C4-S4	Na-Ca-Cl-SO4	CLORURADA SÓDICA	MUY MALA

Nota: (*) Dureza total del agua calculada en base a las concentraciones de los iones de calcio y magnesio, con la fórmula $CaCO3 = 2.497$ [Ca, mg/L] + 4.118 [Mg, mg/L]

ANEXO 6.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS CON LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE LOS ECA DEL D.S. N° 004-2017-MINAM

PARÁMETRO	UND	POZOS Y FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA														LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES ECA 1-A1 MINAM CONSUMO HUMANO
		IRHS C-2		S/N-1		S/N-4		S/N-6 "SR.DE HUANCA"		S/N-7 "ROSITA"		PP-01 LAGUNA AZUL		IRHS-7		
pH	Und	8.20	APTO	7.97	APTO	7.95	APTO	7.69	APTO	7.93	APTO	7.80	APTO	6.93	APTO	**6.5 – 8.5**
C.E.	mS/cm	1.87	NO APTO	2.34	NO APTO	1.69	NO APTO	1.82	NO APTO	1.99	NO APTO	2.34	NO APTO	9.78	NO APTO	**1.50**
TDS	mg/l	-	-	1382.00	NO APTO	962.00	APTO	-	-	1242.00	NO APTO	-	-	6784.00	NO APTO	**1000**
Dureza (CaCo3)	mg/l	370.27	APTO	224.95 (*)	APTO	198.51 (*)	APTO	290.93	APTO	238.29 (*)	APTO	344.54	APTO	2103.71 (*)	NO APTO	**500**
Calcio (Ca)	mg/l	107.56	-	62.31	-	58.54	-	88.68	-	70.16	-	97.73	-	647.02	-	**-**
Magnesio (Mg)	mg/l	17.11	-	16.84	-	12.71	-	17.53	-	15.32	-	22.08	-	118.53	-	**-**
Sodio (Na)	mg/l	249.10	-	382.98	-	267.71	-	291.83	-	337.17	-	350.50	-	1365.33	-	**-**
Potasio (K)	mg/l	19.26	-	9.97	-	10.92	-	14.81	-	12.20	-	15.06	-	57.11	-	**-**
Cloruros (Cl)	mg/l	229.57	APTO	469.05	NO APTO	264.63	NO APTO	340.89	NO APTO	362.72	NO APTO	468.40	NO APTO	2377.28	NO APTO	**250**
Sulfatos (SO4)	mg/l	345.26	NO APTO	371.64	NO APTO	292.42	NO APTO	350.74	NO APTO	355.23	NO APTO	336.46	NO APTO	2114.02	NO APTO	**250**
Nitratos (NO3)	mg/l	<0.30	APTO	3.77	APTO	1.87	APTO	2.73	APTO	2.31	APTO	0.90	APTO	<0.06	APTO	**50**
Bicarbonatos (HCO3)	mg/l	102.47	-	105.00	-	91.10	-	107.05	-	109.40	-	125.93	-	346.70	-	**-**

Nota: (*) Dureza total del agua calculada en base a las concentraciones de los iones de calcio y magnesio, con la fórmula CaCO3 = 2.497 [Ca, mg/l] + 4.118 [Mg, mg/l]

PARÁMETRO	UND	POZOS Y FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA														LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES ECA 3-D1 MINAM RIEGO DE CULTIVOS
		IRHS C-2		S/N-1		S/N-4		S/N-6 "SR.DE HUANCA"		S/N-7 "ROSITA"		PP-01 LAGUNA AZUL		IRHS-7		
pH	Und	8.20	APTO	7.97	APTO	7.95	APTO	7.69	APTO	7.93	APTO	7.80	APTO	6.93	APTO	**6.5 – 8.5**
C.E.	mS/cm	1.87	APTO	2.34	APTO	1.69	APTO	1.82	APTO	1.99	APTO	2.34	APTO	9.78	NO APTO	**2.50**
TDS	mg/l	-	-	1382.00	-	962.00	-	-	-	1242.00	-	-	-	6784.00	-	**-**
Dureza (CaCo3)	mg/l	370.27	-	224.95 (*)	-	198.51 (*)	-	290.93	-	238.29 (*)	-	344.54	-	2103.71 (*)	-	**-**
Calcio (Ca)	mg/l	107.56	-	62.31	-	58.54	-	88.68	-	70.16	-	97.73	-	647.02	-	**-**
Magnesio (Mg)	mg/l	17.11	-	16.84	-	12.71	-	17.53	-	15.32	-	22.08	-	118.53	-	**-**
Sodio (Na)	mg/l	249.10	-	382.98	-	267.71	-	291.83	-	337.17	-	350.50	-	1365.33	-	**-**
Potasio (K)	mg/l	19.26	-	9.97	-	10.92	-	14.81	-	12.20	-	15.06	-	57.11	-	**-**
Cloruros (Cl)	mg/l	229.57	APTO	469.05	APTO	264.63	APTO	340.89	APTO	362.72	APTO	468.40	APTO	2377.28	NO APTO	**500**
Sulfatos (SO4)	mg/l	345.26	APTO	371.64	APTO	292.42	APTO	350.74	APTO	355.23	APTO	336.46	APTO	2114.02	NO APTO	**1000**
Nitratos (NO3)	mg/l	<0.30	-	3.77	-	1.87	-	2.73	-	2.31	-	0.90	-	<0.06	-	**-**
Bicarbonatos (HCO3)	mg/l	102.47	APTO	105.00	APTO	91.10	APTO	107.05	APTO	109.40	APTO	125.93	APTO	346.70	APTO	**518**

Nota: (*) Dureza total del agua calculada en base a las concentraciones de los iones de calcio y magnesio, con la fórmula CaCO3 = 2.497 [Ca, mg/l] + 4.118 [Mg, mg/l]

Anexo 7. Panel fotográfico

Foto 1. Ejecución de SEV-1 (coordenadas UTM WGS-84: 324457 Este-7990862 Norte) en Playa Llostay, cerca a la Carretera Costanera; orientado en dirección W-E. Se observa la instalación del equipo de resistividad eléctrica.	**Foto 2.** Ejecución de SEV-8 (coordenadas UTM WGS-84: 326369 Este-7995607 Norte) en terrenos del Sr. Eleuterio Mamani; orientado en dirección NW-SE. Se observa la instalación del equipo de resistividad eléctrica para la toma de datos.
Foto 3. Ejecución de SEV-30 (coordenadas UTM WGS-84: 324888 Este-7993794 Norte) en terrenos del Proyecto Wayu Perú; orientado en dirección NW-SE. Se observa al ingeniero hidrogeólogo en la estación de medición, previo a la toma de lectura.	**Foto 4.** Ejecución de SEV-40 (coordenadas UTM WGS-84: 325381 Este-7992877 Norte) en terrenos del Proyecto Wayu Perú; orientado en dirección NW-SE. Se observa al ingeniero a cargo operando el equipo.
Foto 5. Ejecución de SEV-45 (coordenadas UTM WGS-84: 323586 Este-7992984 Norte) en terrenos del Proyecto Wayu Perú; orientado en dirección NE-SW. Se observa al ingeniero a cargo y ayudantes en la conexión de electrodos.	**Foto 6.** Ejecución de SEV-56 (coordenadas UTM WGS-84: 324542 Este-7994949 Norte) en terrenos del Proyecto Wayu Perú; orientado en dirección NE-SW. Se observa al ingeniero a cargo operando el equipo para la toma de datos.

Foto 7. Ejecución de SEV-65 (coordenadas UTM WGS-84: 324603 Este-7997740 Norte) en terrenos del Proyecto Wayu Perú; orientado en dirección NE-SW. Se observa al ingeniero a cargo revisando las conexiones de cables MN previo a la toma de datos.	**Foto 8.** Ejecución de SEV-70 (coordenadas UTM WGS-84: 325742 Este-7997035 Norte) en el Fundo Paraíso; orientado en dirección NW-SE. Se observa al ingeniero a cargo operando el equipo.
Foto 9. Medición de conductividad eléctrica in situ en Cocha 01 (coordenadas UTM WGS-84: 323191 Este – 7991902 Norte), de propiedad de la Municipalidad C.P. Boca del Río, ubicada en el cauce del rio Sama, a 520m al NW del puente Boca de Rio.	**Foto 10.** Vista panorámica del Pozo IASS-73 (coordenadas UTM WGS-84: 323605 Este-7991457 Norte), ubicado en terrenos del Sr. Cabrera, sector Pampa Molina, a 220m al NE del puente Boca de Rio. Actualmente no cuenta con equipo de bombeo.
Foto 11. Medición de caudal por el método volumétrico en la Cocha IRHS-C-2 (coordenadas UTM WGS-84: 323628 Este – 7999377 Norte), mediante el uso de un cilindro calibrado y un cronómetro.	**Foto 12.** Medición de conductividad eléctrica in situ en Cocha IRHS-C-2, ubicada en terrenos del Sr. Apaza - sector la Vituña.

Foto 13. Toma de muestra de agua del Pozo S/N-6 “Sr. de Huanca” (coordenadas UTM WGS-84: 325694 Este – 7993240 Norte), para análisis físico-químico en laboratorio	**Foto 14.** Medición del nivel del agua durante prueba de bombeo en el Pozo S/N-7 “Rosita” (coordenadas UTM WGS-84: 325630 Este-7992583 Norte).
Foto 15. Vista panorámica del Pozo S/N-13 (coordenadas UTM WGS-84: 324157 Este-7998723 Norte). Actualmente utilizado con fines agrícolas. Caudal 2 l/s.	**Foto 16.** Medición de conductividad eléctrica in situ en Pozo S/N-13 de propiedad de privado, ubicado en el sector Pampa Molina, cerca al sector la Vituña.
Foto 17. Medición de caudal por el método volumétrico en el Pozo PP-01 “Laguna Azul” (coordenadas UTM WGS-84: 324386 Este – 7990780 Norte), sector Llostay, mediante el uso de un cilindro calibrado y un cronómetro.	**Foto 18.** Toma de muestra de agua del Pozo PP-01 “Laguna Azul” para medición de la conductividad eléctrica in situ.

Foto 19. Medición del nivel del agua en el Pozo TA-01 Wayu Perú (coordenadas UTM WGS-84: 324884 Este-7993818 Norte).	**Foto 20.** Medición de conductividad eléctrica in situ en Pozo TA-01 Wayu Perú.
Foto 21. Medición de caudal por el método volumétrico en el Pozo PP-01 Wayu Perú (coordenadas UTM WGS-84: 324990 Este – 7993845 Norte), mediante el uso de un cilindro calibrado y un cronómetro.	**Foto 22.** Medición de conductividad eléctrica in situ en Pozo PP-01 Wayu Perú.