



# INFORME FINAL ACTUALIZACIÓN MODELO NUMÉRICO PAMPA PUNO – SAPUNTA

---

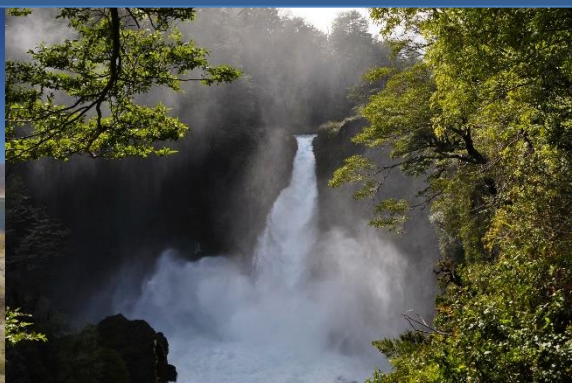
**RevB**

**Preparado para**



**30 Marzo 2015**

Preparado por  
HIDROMAS LTDA



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Aspectos Generales.....	1
1.2 Objetivos del Estudio.....	1
1.3 Metodología de Trabajo.....	2
1.3.1 <i>Análisis de los Compromisos Adquiridos por CODELCO</i> .....	2
1.3.2 <i>Revisión y Análisis de Información Histórica Disponible</i> .....	2
1.3.3 <i>Revisión y Análisis de Estudios Previos</i> .....	2
1.3.4 <i>Actualización del Modelo de Flujo</i> .....	2
<b>2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES.....</b>	<b>4</b>
2.1 Aspectos Generales.....	4
2.2 Resultados Relevantes Revisión de Antecedentes.....	4
<b>3. CARACTERIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>7</b>
3.1 Aspectos Generales.....	7
3.2 Caracterización Climática.....	7
3.2.1 <i>Clima</i> .....	7
3.2.2 <i>Temperatura y Evaporación</i> .....	7
3.2.3 <i>Precipitaciones</i> .....	8
3.3 Geología y Geomorfología.....	10
3.3.1 <i>Geomorfología</i> .....	10
3.3.2 <i>Geología Local</i> .....	12
3.3.3 <i>Conexión Vega Sapunta – Pampa Puno</i> .....	15
3.4 Catastro de Sondeos.....	15
3.5 Geofísica.....	17
3.6 Hidrogeología.....	19
3.6.1 <i>Unidades Hidrogeológicas</i> .....	19
3.6.2 <i>Geometría del Acuífero</i> .....	24
3.6.3 <i>Pruebas Hidráulicas</i> .....	25
3.7 Hidroquímica.....	26
3.7.1 <i>Aspectos Generales</i> .....	26
3.7.2 <i>Conductividad Específica</i> .....	26
3.7.3 <i>pH</i> .....	27
3.7.4 <i>Cationes y Aniones Mayores</i> .....	27

3.8	Conexión Vega Sapunta – Pampa Puno .....	29
3.9	Niveles Piezométricos .....	29
3.9.1	Aspectos Generales.....	29
3.9.2	Efectos del Bombeo en Pampa Puno sobre Pozos de Monitoreo en Sapunta .....	30
3.10	Parámetros Hidrogeológicos .....	33
3.10.1	Conductividad Hidráulica.....	33
3.10.2	Coeficiente de Almacenamiento .....	35
3.11	Recargas y Descargas .....	36
3.11.1	Recargas por Precipitaciones.....	36
3.11.2	Descargas por Bombeo .....	38
3.11.3	Descargas Naturales.....	39
<b>4.</b>	<b>MODELO CONCEPTUAL.....</b>	<b>41</b>
4.1	Aspectos Generales.....	41
4.2	Extensión Areal del Sistema Acuífero a Estudiar.....	41
4.3	Esquema General del Funcionamiento Hidráulico del Sistema Subterráneo .....	42
4.3.1	Balance Hídrico .....	42
4.3.2	Recargas .....	42
4.3.3	Descargas.....	43
4.4	Propiedades Hidrogeológicas.....	43
4.4.1	Permeabilidad.....	43
4.4.2	Coeficiente de Almacenamiento .....	43
4.4.3	Volumen Almacenado.....	43
<b>5.</b>	<b>MODELO NUMÉRICO DE FLUJO.....</b>	<b>45</b>
5.1	Aspectos Generales.....	45
5.2	Idealización Sistema Físico Hidrogeológico.....	45
5.2.1	Área de Modelación.....	45
5.2.2	Discretización Espacial.....	46
5.2.3	Discretización Temporal.....	46
5.2.4	Propiedades Hidrogeológicas .....	46
5.2.5	Condiciones de Borde.....	47
5.2.6	Acciones Externas .....	47
5.3	Calibración y Validación .....	48
5.3.1	Régimen Permanente .....	48
5.3.2	Régimen Transiente .....	50
5.4	Balance Hídrico.....	52

<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>53</b>
6.1	Conclusiones.....	53
6.2	Recomendaciones .....	54
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>55</b>

## ANEXOS

<b>ANEXO A</b>	REGISTROS PLUVIOMÉTRICOS
<b>ANEXO B</b>	ESTRATIGRAFÍA DE LOS SONDAJES
<b>ANEXO C</b>	CARTILLA RESUMEN DE POZOS
<b>ANEXO D</b>	GEOFÍSICA SONDAJES DIAMANTINA GEODATOS
<b>ANEXO E</b>	PERFILES HIDROGEOLÓGICOS
<b>ANEXO F</b>	HIDROQUÍMICA
<b>ANEXO G</b>	NIVELES FREÁTICOS
<b>ANEXO H</b>	RESULTADOS CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DESCENSOS
<b>ANEXO I</b>	RESULTADOS CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN NIVELES



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Aspectos Generales

La Dirección Exploración e Hidrogeología Distrital (DEHD) de la Gerencia Desarrollo Distrito Norte de CODELCO (DNC), solicitó a HIDROMAS efectuar el servicio de “Actualización Modelo Numérico Pampa Puno - Sapunta”. El presente servicio tiene por objetivo desarrollar un modelo de simulación hidrogeológico preparado para el sector de Pampa Puno – Vega Sapunta, lo que incluye su calibración en régimen estacionario y transitorio, con miras a su presentación a la autoridad (DGA y SEA) en el marco de compromisos sectoriales y ambientales de CODELCO en el área de Pampa Puno (RCA N°2603/2005 de Pampa Puno).

En base a la información generada por el monitoreo en operación del campo de pozos de bombeo de Pampa Puno (Diciembre de 2013 hasta Noviembre de 2014) se abordará la actualización y calibración del modelo hidrogeológico, el que tiene como base los estudios realizados por INGEOREC el año 2001, así como estudios posteriores realizados por SWS (2010 y 2012).

El sector de Pampa Puno corresponde a una altiplanicie elevada, ubicada a 130 km al norte de la ciudad de Calama, en la Provincia del Loa, cercano al límite político administrativo de la I y II Región. Se desarrolla entre las cotas 4.000 y 4.550 msnm, siendo su altura media de 4.100 msnm. La ubicación general, se ilustra en la Figura 1.1.

El acuífero Pampa Puno es una fuente de abastecimiento de agua fresca y corresponde a un graben tectónico de dirección Norte-Sur emplazado en la parte alta de la cuenca del río Loa.

La zona de Pampa Puno comprende dos cuencas hidrográficas con drenajes exorreicos: Quebrada Sapunta y Quebrada Yocas-Tolasito. En ambas cuencas el escurrimiento superficial en las quebradas es esporádico, con eventos que se asocian a precipitaciones características del invierno altiplánico.

### 1.2 Objetivos del Estudio

Tal como se ha indicado previamente, el objetivo principal del presente estudio es actualizar el modelo numérico del acuífero de Pampa Puno.

Para esta actualización se consideró toda la información generada por el monitoreo de los pozos de observación durante los primeros meses de explotación del campo de pozos Pampa Puno, junto con la utilización de la información disponible para la etapa previa al inicio del bombeo, lo que permitió caracterizar la situación de estado estacionario o en equilibrio.

De acuerdo a las necesidades que involucran la actualización del modelo hidrogeológico del acuífero de Pampa Puno, se tienen los siguientes objetivos específicos:

- Revisión y análisis de información histórica disponible.
- Revisión y análisis del modelo numérico INGEOREC (2001).
- Actualización del modelo numérico.

### 1.3 Metodología de Trabajo

Para la actualización del modelo numérico de aguas subterráneas de Pampa Puno se siguió el siguiente plan de trabajo, el que pone énfasis en los siguientes puntos:

#### 1.3.1 Análisis de los Compromisos Adquiridos por CODELCO

Se llevó a cabo un análisis de los compromisos adquiridos por CODELCO en el marco de la RCA N°2603/2005, asociado al uso del acuífero de Pampa Puno como fuente de abastecimiento. Con base en este análisis, se elaboró una estrategia de trabajo interna para la preparación del modelo hidrogeológico comprometido en dicha instancia de evaluación ambiental.

#### 1.3.2 Revisión y Análisis de Información Histórica Disponible

Se revisaron y evaluaron los antecedentes disponibles para la actualización del modelo numérico de aguas subterráneas de flujo del acuífero de Pampa Puno (Modelo Hidrogeológico). Se revisaron informes previos realizados en la zona, los cuales incluyen información sobre geología, hidrogeología, geofísica, parámetros hidráulicos de los acuíferos, inventario de captaciones, mediciones de niveles estáticos y dinámicos del agua subterránea, entre otros. Además se revisó la base de datos de niveles piezométricos de DNC.

#### 1.3.3 Revisión y Análisis de Estudios Previos

Se realizó una revisión y evaluación de los estudios previos realizados para el acuífero de Pampa Puno:

- Hidrogeología y Modelo de Simulación Pampa Puno, INGEOREC LTDA. (2001) – *Modelo Conceptual y Numérico*
- Hidrogeología de Pampa Puno, Actualización Modelo Conceptual y Modelo Numérico, Schlumberger Water Services (2010) - *Modelo Conceptual y Numérico*
- Informe Hidrogeológico del Acuífero Pampa Puno, Schlumberger Water Services (2012) - *Modelo Conceptual*

A partir de la revisión de los estudios previos en el área de Pampa Puno se definieron los elementos necesarios para la actualización del modelo de simulación de flujo presentado el año 2001 como parte de la evaluación ambiental del proyecto.

#### 1.3.4 Actualización del Modelo de Flujo

La actualización de los niveles de agua subterránea y caudales de bombeo, hasta Noviembre de 2014 del modelo de flujo de aguas subterráneas, se realizó a partir de información recabada en la base de datos de niveles piezométricos de DNC y los caudales de bombeo fueron proporcionados por DNC.

Cabe mencionar que en el caso de los niveles de agua subterránea, sólo se incluyeron en la calibración y validación del régimen transiente los niveles estáticos de los pozos de bombeo y monitoreo. En el caso de los pozos de bombeo no se consideró la información de niveles de agua subterránea debido a que

ellos corresponden a una situación de tipo dinámica, la que refleja las características del pozo y de su operación, más que el comportamiento temporal del acuífero. Se actualizó la geometría (incluyendo la estructura inferida que separa los sectores de Pampa Puno y Vega Sapunta), así como la recarga del acuífero en base a la nueva información generada en el área de estudio.

Se procedió a la calibración, en régimen permanente y transiente (Junio 2013 a Noviembre 2014), del modelo numérico de flujo de aguas subterráneas, realizando el ajuste de los parámetros hidráulicos para que los resultados del modelo reproduzcan las mediciones de niveles de aguas subterráneas realizadas en terreno. Se realizó tanto en régimen permanente (para ajustar transmisividad o conductividad hidráulica) como transiente (para también ajustar el coeficiente de almacenamiento).

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

### 2.1 Aspectos Generales

Se llevó a cabo una revisión y evaluación de los antecedentes disponibles para caracterizar el área de estudio, con el objetivo de actualizar el modelo conceptual y posteriormente el modelo numérico de aguas subterráneas del acuífero de Pampa Puno.

Se revisaron informes previos realizados en la zona, los cuales incluyen hidrología, geología, parámetros hidráulicos de los acuíferos, inventario de captaciones, mediciones de niveles estáticos y dinámicos, entre otros. Además se revisó la base de datos de niveles piezométricos y calidad de agua de agua subterránea de DNC.

### 2.2 Resultados Relevantes Revisión de Antecedentes

A continuación se presenta una breve descripción de la información más relevante utilizada en la elaboración del presente informe y su respectiva fuente:

- **Hidrogeología y Modelo de Simulación Pampa Puno, INGEOREC LTDA. (2001)**

Este informe contiene estudios e investigaciones hidrogeológicas realizadas en el sector de Pampa Puno, con el objetivo principal de evaluar la factibilidad de explotación de los pozos existentes en la zona. A partir de un modelo de simulación hidrogeológico se evalúa los efectos en los niveles de agua subterránea producto de la explotación del acuífero. Con este modelo numérico se cuantifica el comportamiento del sistema sometido a diferentes escenarios de explotación.

El estudio abarca los principales aspectos de un modelo conceptual, considerando geología, hidrología (precipitaciones y evaporación) e hidrogeología (unidades hidrogeológicas, geometría del acuífero, niveles, flujos y parámetros elásticos).

Los resultados relevantes del estudio son los siguientes:

- Se definieron tres unidades hidrogeológicas: Ignimbrítica, Sedimentaria y Roca Basamento.
- La potencia del relleno en la cuenca Pampa Puno es variable. En la parte central de la cuenca la potencia máxima del relleno es de aproximadamente 700 m. Sin embargo, hacia los bordes de la cuenca los valores decrecen al orden de 100 m. En la salida de la Quebrada Sapunta, el basamento presenta una fuerte disminución de su potencia, alcanzando valores aproximados de 30 m.
- Se analizaron pruebas de bombeo de 9 pozos, determinándose un valor de transmisividad en la zona central del acuífero de 200 a 1000 m<sup>2</sup>/día. En el sector Oeste, en la zona próxima a los cerros Añaguaya y Mesón, la transmisividad es del orden de 7 m<sup>2</sup>/día.
- A partir de información de niveles estáticos de los pozos de Pampa Puno, se estableció que el acuífero presentaba una clara condición de equilibrio.
- Se determinó que el flujo subterráneo se desarrolla principalmente de sur a norte y la descarga se realiza por el sector de la Pampa Yocas hacia el norponiente.

- El modelo numérico consta de una malla de 855 celdas, 45 filas y 19 columnas. Las dimensiones de las celdas son de 500 m x 500 m.
  - La recarga estimada media, corresponde a un 26% de la precipitación efectiva, 124 l/s en términos de caudal continuo.
  - Con un bombeo continuo de 300 l/s el nivel de agua subterránea descendería en el área donde se ubican los pozos entre 15 y 50 m al cabo de 25 años de explotación. Si el bombeo se prolongará hasta 50 años, el descenso final se estima entre 20 y 70 m.
- **Hidrogeología de Pampa Puno, Actualización Modelo Conceptual y Modelo Numérico, Schlumberger Water Services (2010)**

Este informe contiene estudios hidrogeológicos realizados en el sector de Pampa Puno, con el objetivo principal de actualizar el modelo conceptual y numérico, y así disponer de mejores estimaciones del caudal de aguas subterráneas posible de explotar. A partir del modelo numérico se evaluaron diferentes escenarios de bombeo desde la zona de pozos.

El estudio abarca la realización de un control geológico, seguimiento e interpretación de ensayos hidráulicos, hidrología (precipitación), hidroquímica e hidrogeología (unidades hidrogeológicas, geometría del acuífero, niveles, flujos y parámetros elásticos).

Los resultados relevantes del estudio son los siguientes:

- A partir de un gradiente de precipitación anual-elevación obtenido de las estaciones pluviométricas en la proximidad de la zona, se generó la precipitación anual media en Pampa Puno, que corresponde a 131,7 mm/año.
- La cuenca hidrogeológica está limitada por sistemas de fallas Norte-Sur en sus márgenes Este y Oeste.
- Los rasgos fisiográficos y/o geomorfológicos del área de estudio se definieron por 3 zonas longitudinales NS con características geológicas distintivas: Sierra del Medio, Franja Occidental y Porción Central - Cuenca Puno y Yocas. El principal componente estructural corresponde a un sistema extensional de bloques alzados y deprimidos denominados “horst-graben”.
- Se determinó la existencia de dos unidades acuíferas principales: la primera de alta permeabilidad asociada a unidades sedimentarias no consolidadas y la segunda de moderada permeabilidad, asociada a depósitos semi-consolidados.
- Se definieron cuatro unidades hidrogeológicas.
- A partir de un análisis estadístico, se realizaron correlaciones entre la permeabilidad y la unidad hidrogeológica, así se definieron tres rangos de permeabilidades.
- El flujo subterráneo es preferentemente desde la zona sur/poniente hacia el sector de la Quebrada Yocas, existiendo también una descarga hacia el sector de la Quebrada Sapunta.
- La recarga se estimó en 120 l/s, y corresponde a un 20% de la precipitación efectiva.
- Los niveles de agua en la zona Pampa Puno y Yocas se observan bastante estables en el tiempo.
- El coeficiente de almacenamiento estimado fluctúa entre un 2% y 10%. Se evaluó la relación entre la Quebrada Sapunta, Vega Sapunta y la cuenca de Pampa Puno. La alimentación de la Vega Sapunta se realiza por aportes de aguas superficiales/sub-superficiales, asociadas a eventos de precipitación en la cuenca.

- El modelo numérico consta de una malla con aproximadamente 20.000 celdas activas en cada capa, con 320 filas y 200 columnas. Las dimensiones de las celdas son de 100 m x 100 m, la cual se refino gradualmente hacia el sector de quebrada Sapunta, donde el tamaño es de 25 m x 25 m.
  - Con un bombeo continuo de 300 l/s durante 25 años, se analizaron tres escenarios cuya principal diferencia radica en la distribución espacial del bombeo en el acuífero. Los resultados indicaron que el caudal bombeado corresponde casi exclusivamente al volumen almacenado en el canal central.
- **Informe Hidrogeológico del Acuífero Pampa Puno, Schlumberger Water Services (2012)**

Este informe contiene estudios hidrogeológicos realizados en el sector de Pampa Puno, con el objetivo principal de desarrollar un modelo conceptual hidrogeológico del sector Pampa Puno, a partir del análisis e integración de toda la información de las campañas de perforación. El análisis se realizó mediante diversos ensayos de laboratorio a partir de muestras de sondajes DDH (Diamantina).

Los resultados relevantes de este estudio son los siguientes:

    - Se reconocen 3 unidades para la Formación Papajoy en el área de estudio, las cuales corresponden a: *Unidad A*: Depósitos asociados a ambientes lacustres, compactos y consolidados ubicados en el sector Oeste de la cuenca, *Unidad B*: Secuencia sedimentaria consolidada distribuida en profundidad bajo las zonas centro y oriental de la cuenca; y *Unidad C*: Secuencia de depósitos aluviales semiconsolidados, distribuidos en todo el sector Este de la cuenca sobre los depósitos de la Unidad B.
    - Los sondajes DDH perforados permitieron establecer que la Unidad C es la que presenta las mejores condiciones hidrogeológicas y constituiría el acuífero principal. Esta unidad se extendería a profundidades mayores de 600 m en el sector centro y sur de la cuenca.
    - La instalación de 4 sondajes con sensores de cuerda vibrante a diferentes profundidades permitieron establecer que el acuífero de Pampa Puno corresponde a un acuífero libre, descartando la posibilidad de un confinamiento.
  - **Base de Datos de Niveles Piezométricos, DNC (2014)**

La base de datos de niveles piezométricos de DNC contiene información de niveles de agua subterránea de los pozos de observación ubicados en el acuífero de Pampa Puno pertenecientes a Codelco. La base de datos cuenta con datos de niveles piezométricos hasta Noviembre de 2014.
  - **Base de Datos de Calidad de Agua Subterránea, DNC (2014)**

La base de datos de calidad de agua subterránea de DNC contiene información de calidad de agua de los pozos de observación ubicados en el acuífero de Pampa Puno pertenecientes a Codelco. La base de datos cuenta con datos de calidad de agua hasta Noviembre de 2014.

### 3. CARACTERIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1 Aspectos Generales

En el presente capítulo se busca caracterizar el área de interés en lo referente a recursos hídricos y suelo, incluyendo descripciones e información más detallada en los siguientes temas: clima, precipitación, geología, hidrogeología e hidroquímica.

#### 3.2 Caracterización Climática

##### 3.2.1 Clima

En una escala regional, el área de estudio exhibe los siguientes tipos de clima:

- **Clima Desértico Interior**  
Este tipo climático se localiza en la pampa, por sobre los 1.000 msnm y sin influencia costera. Se caracteriza por una masa de aire estable y seco, que origina extrema aridez, donde las precipitaciones anuales son de 0 mm, la humedad relativa en promedio es de 50% y las temperaturas medias alcanzan 18°C. Los días con cielos despejados y alta luminosidad son característicos de este clima.
- **Clima Desértico Marginal de Altura**  
Este tipo climático se presenta por sobre los 2.000 msnm, debido a ello las temperaturas son frías, presentando una media anual de 10°C. En este subtipo aparecen precipitaciones que fluctúan entre 50 y 100 mm anuales, éstas ocurren en los meses de verano producto del invierno altiplánico.
- **Clima de Estepa de Altura**  
Predomina en el Altiplano, por sobre los 3.000 msnm. Se caracteriza por precipitaciones que alcanzan hasta 300 mm anuales, de carácter principalmente convectivo y origen tropical, las que ocurren durante el verano concentradas en los meses de Enero y Febrero, fenómeno conocido como invierno altiplánico. Las precipitaciones de invierno son bajas y mayoritariamente sólidas.

En una escala local, en el sector de Pampa Puno se desarrolla un clima desértico marginal de altura o de estepa de altura. Por sobre los 2.500 msnm se produce un descenso de la temperatura media anual, traducándose en un aumento de la frecuencia de heladas durante el año. Las precipitaciones anuales pueden alcanzar valores de hasta 300 mm en años lluviosos, caracterizadas por gran intensidad y corta duración, la ocurrencia de las precipitaciones se concentran en los meses de verano. La humedad relativa presenta variaciones considerables, con valores medios mensuales en verano que superan el 70% y en invierno se encuentran por debajo del 20%.

##### 3.2.2 Temperatura y Evaporación

Con respecto a las temperaturas, los valores mensuales medios en verano oscilan entre 5°C y 7°C, con temperaturas máximas que alcanzan hasta los 19°C. Durante los meses de invierno, las temperaturas mensuales medias varían entre -4°C y 0°C, con temperaturas máximas diarias que a menudo se encuentran por encima de los 0°C. Los valores mínimos mensuales son de -15°C y -5°C, para los meses de invierno y verano, respectivamente.

La evaporación potencial en la zona, presenta una variación estacional, en donde los mayores valores se presentan en los meses de verano (150 mm/mes), mientras que en invierno las magnitudes son inferiores a los 95 mm/mes. El promedio anual de evaporación alcanza 3,8 mm diarios, lo cual es coherente con observaciones en otras estaciones altiplánicas.

### 3.2.3 Precipitaciones

#### 3.2.3.1 Aspectos Generales

El análisis de precipitaciones se realizó utilizando la información de 4 estaciones pluviométricas pertenecientes a la DGA, ubicadas en el entorno de Pampa Puno, el registro de éstas se encuentra disponible en el Anexo A. En la Tabla 3.1 se presentan las principales características de las estaciones y en la Figura 3.1 su ubicación.

Mediante el análisis del comportamiento de la precipitación media anual de las estaciones, se determinó el perfil de Precipitación – Elevación, el que permitió caracterizar la precipitación histórica de Pampa Puno. La recarga del acuífero se estimó mediante el desarrollo de un balance de aguas.

**Tabla 3.1**  
**Estaciones Pluviométricas Sector Pampa Puno (Datum PSAD 56)**

N°	Nombre	Código BNA	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Elevación (msnm)	Período de Datos	N° Años Completos	Pp Media (mm/año)
1	Guatacondo	02113050-8	495.262	7.685.876	2.460	1977-2014	34	23
2	Lequena	02112051-0	535.065	7.605.259	3.320	1973-2014	38	85
3	Ollague	02000050-3	577.892	7.652.920	3.700	1972-2014	22	73
4	Ujina	01080050-1	538.722	7.680.944	4.300	1974-2014	23	168

Fuente: Elaboración Propia a Partir de DGA (2014)

#### 3.2.3.2 Precipitación Media Mensual Móvil

De la estadística de las estaciones de la Tabla 3.1, se generaron series de los valores medios mensuales, considerando el promedio de los últimos 12 meses con información. De esta manera, se observa el comportamiento general del sistema, pudiendo así identificar que períodos son más secos o húmedos. En las Figuras 3.2 a 3.5 se presentan las series de medias móviles de las estaciones Guatacondo, Lequena, Ollague y Ujina, respectivamente.

#### 3.2.3.3 Precipitación Media Anual

A partir de la información de las estaciones de la Tabla 3.1, se determinó una relación entre la precipitación media anual y la elevación, la cual se muestra a continuación.

$$\text{Precipitación Anual Media (mm)} = 0,073 \text{ Altitud (msnm)} - 163,2$$



En la Figura 3.6 se presenta la relación anterior, y a partir de ésta se determinó una precipitación media anual de 137,8 mm para la banda entre 4.000 y 4.250 msnm. Para la banda entre los 4.250 y 4.500 msnm se estimó una precipitación media anual de 156 mm. Con la información anterior, se determinó una precipitación media anual en la cuenca de 140 mm.

### 3.2.3.4 Análisis de Frecuencia

Se realizó un análisis de frecuencia de la estadística de la precipitación anual para cada estación. En este análisis se han ajustado una serie de distribuciones y seleccionado aquellas que estadísticamente cumplieron con los test de mejor ajuste.

Para la selección de las distribuciones, se utilizó el test Chi-cuadrado, comparando las relaciones entre el valor Chi-cuadrado calculado y el valor Chi-límite, seleccionando así aquellos que presentaban los menores valores.

En la Tabla 3.2 se resumen los resultados obtenidos para cada probabilidad de excedencia o período de retorno, además de especificar la distribución de probabilidades que mejor se ajusta a los datos.

**Tabla 3.2**  
**Precipitaciones Anuales (mm) en Función de la Probabilidad de Ocurrencia**

Prescripciones Anuales (mm/a) en Función de la Probabilidad de Excedencia													
Estación		Pp (%)	Período de Retorno o Probabilidad de Excedencia										Distribución
			1,05	1,1	1,18	2	4	10	50	100	500	1000	Mejor
			95%	90%	85%	50%	25%	10%	2%	1%	0,20%	0,10%	Ajuste
1	Guatacondo	91%	0,0	0,0	0,0	16,7	41,2	68,6	113,3	132,1	175,7	194,4	Gumbel
2	Lequena	97%	4,2	7,9	11,3	42,9	98,2	205,5	523,5	727,8	1417,2	1830,6	Log-Normal
3	Ollague	90%	0,0	0,0	13,2	58,1	103,0	167,6	306,6	378,6	579,3	681,9	Log-Normal
4	Ujina	100%	38,1	50,1	60,2	131,3	218,1	344,3	615,5	755,5	1144,1	1341,9	Log-Normal

Fuente: Elaboración propia

Con los valores de precipitación anual para distintas probabilidades de excedencia, se determinaron curvas de precipitación v/s elevación, ajustando relaciones matemáticas para cada probabilidad de excedencia. La Figura 3.7 presenta las relaciones de precipitación v/s altura según las probabilidades de excedencia que se detallan a continuación:

<b>Precipitación Anual Pexec. 85% (mm)=0,030xAltitud(msnm)-82,2</b>	<b>R<sup>2</sup>=0,75</b>
<b>Precipitación Anual Pexec. 50% (mm)=0,059xAltitud(msnm)-141,4</b>	<b>R<sup>2</sup>=0,86</b>
<b>Precipitación Anual Pexec. 25% (mm)=0,090xAltitud(msnm)-194,0</b>	<b>R<sup>2</sup>=0,87</b>
<b>Precipitación Anual Pexec. 10% (mm)=0,137xAltitud(msnm)-275,0</b>	<b>R<sup>2</sup>=0,85</b>

Con las expresiones anteriores, se determinaron las precipitaciones para las bandas de cotas 4.000 - 4.250 msnm (Banda 1) y 4.250 - 4.500 msnm (Banda 2). En la Tabla 3.3 se presentan las precipitaciones en las bandas características de Pampa Puno.

**Tabla 3.3**  
**Precipitaciones Anuales (mm) Según Bandas de Elevación en Función de la Probabilidad de Ocurrencia, Pampa Puno**

Bandas	Rango Elevación	Distr. Área (%)	PP (mm/año)			
			P exec. 85%	P exec. 50%	P exec. 25%	P exec. 10%
Banda 1	4.000-4.250	87,8	41,6	102,5	176,2	289,6
Banda 2	4.250-4.500	12,2	49,1	117,2	198,6	323,8

Fuente: Elaboración propia

A partir de las relaciones anteriores, se determinó la distribución de precipitación de Pampa Puno, en función de la probabilidad de excedencia, obteniéndose que para el 50%, la precipitación es de 104,2 mm/año.

### 3.3 Geología y Geomorfología

#### 3.3.1 Geomorfología

Los análisis y estudios de la geología y geomorfología de la zona de interés fueron realizados por SWS (2010) y SWS (2012). En estos documentos se define que el área de estudio corresponde a una altiplanicie ubicada en la Precordillera Andina, entre los cordones montañosos de la Sierra Moreno y Sierra del Medio; presenta una morfología alargada en sentido N-S, con dimensiones aproximadas de 20.000 m en su eje principal, 8.000 m perpendicular a éste y una altura media de 4.100 msnm.

Los rasgos fisiográficos y/o geomorfológicos del área de estudio se definen por tres zonas longitudinales NS con características geológicas y estructurales distintivas. El rasgo estructural principal corresponde a un sistema extensional de bloques alzados y deprimidos denominados “horst- graben” que individualizan dos cinturones de afloramientos, cada uno de los cuales conforma un relieve positivo, los que se encuentran separados por una depresión rellena con depósitos volcanoclásticos, coluviales, aluviales y fluviales. Los tres rasgos geomorfológicos se describen a continuación:

- **Franja Oriental: reconocida como Sierra del Medio**

En esta franja con altura media de 4.300 msnm corresponde a un bloque alzado de edad carbonífero-Pérmico (unidades más antiguas), correspondientes a rocas volcánicas de composición andesítica, riolítica y dacítica, las que se correlacionan con la Formación Collahuasi- como parte del Grupo Choyoi- el que queda representado por un intenso volcanismo bimodal que se desarrolló en el borde occidental del supercontinente Gondwana. La abundancia de rocas silíceas sugiere fusión parcial de la corteza debido a movimientos extensivos.

Se encuentra cortada por discretos cuerpos intrusivos de edad permo triásicos y en contacto por falla hacia el poniente con unidades estratificadas (sedimentarias y volcano sedimentarias) jóvenes a través del Sistema de Falla Oeste de orientación NS y NE-SW.

Finalmente, se encuentran pequeños afloramientos de secuencias tobáceas en dos quebradas situadas hacia el norte de Pampa Carcanal (al sur de Pampa Puno), conformadas por tobas de lapilli, que se disponen en la base de la secuencia, sobreyacidas en forma concordante por tobas cristalinas de color marrón, correlacionables con la Ignimbrita dacítica de la Pampa Carcanal de Chara, de edad Triásico Medio, definida por Sernageomin (1999).

- **Franja Occidental**

Se dispone configurando un cinturón elongado de dirección Norte Sur, y está representado por plegamiento y gran deformación, aflorando una secuencia de rocas sedimentarias (areniscas gruesas y subordinadamente conglomerados gruesos) del Cretácico Superior- Paleoceno, correspondientes a Formación Tolar y de manera concordante con la Formación Cerro Empexa de la misma edad, cuyo Miembro Superior está constituido por andesitas, brechas y conglomerados tobáceos y el Miembro Inferior de conglomerados y areniscas verdes. Estas litologías evidencian el inicio de la depositación continental de tipo aluvial con aportes de la actual Sierra de Moreno es un sistema compresivo con vergencia hacia el Oeste (Cretácico Medio).

Sobreyaciendo y en forma concordante en la parte alta de Fm. Tolar se encuentran las rocas andesíticas de la Formación Icanche representando un volcanismo subaéreo de edad Eoceno Inferior a Medio, junto a domos dacíticos y stock plutónicos de diversas composiciones. Esto representa la posición espacial del Arco magmático desarrollado durante este período.

Durante el Eoceno Medio-Oligoceno Temprano la deformación y acortamiento en la corteza continental genera movimientos transcurrentes paralelo al margen dando origen al Sistema de Falla Oeste, cuya cinemática es de alta complejidad. En discordancia angular y no conformidad a las formaciones anteriormente nombradas aflora una secuencia de conglomerados, areniscas y lutitas, de origen continental correspondientes a la Formación Papajoy, de edad Oligoceno.

- **Porción Central-Cuenca Puno y Yocas**

Esta planicie central corresponde a un bloque tipo “graben” de orientación NS, limitado al Oeste por Falla Chocal y hacia el Este por el Sistema de Falla Oeste. La Falla Puno subdivide la depresión, creando 2 subcuencas (Cuenca de Puno Oriental y Occidental). Debido a la acción de Falla Oeste y Falla Puno, se depositaron flujos aluviales y lacustres cuyos aportes provendrían de los cordones oriental y occidental del área (Formación Papajoy). Esta formación representaría el relleno de cuenca en un régimen transtensional sintectónico con respecto a Falla Oeste.

La Cuenca de Puno Occidental representa un ambiente deltaico con facies lacustres con predominio de material fino, limitado lateralmente por el relieve producido por abanicos aluviales, al Oeste por Falla Chocal y al Este por Falla Puno.

En la Cuenca de Puno Oriental, debido a la tectónica imperante presupone la presencia de altos topográficos al Este de Falla Puno en sus primeros estadios, con depositación sintectónica en ambientes de alto gradiente de energía (facies medias y proximales de abanicos aluviales), constituidos por rocas de la Fm. Collahuasi, granitoides paleozoicos, pórfidos monzodioríticos y rocas alteradas hidrotermalmente. Este efecto señala secuencias sedimentarias más jóvenes.

En discordancia angular a depósitos de la Fm. Papajoy sobreyace la Ignimbrita Carcote (Mioceno Superior) la cual engrana con depósitos sedimentarios gravosos polimícticos (Mioceno- Plioceno). Estos rellenan el paleo-relieve de la cuenca y provienen de la denudación de relieves positivos situados en ambos márgenes de la depresión. El relleno consiste en depósitos no consolidados de origen coluvial y aluvial, correlacionados a los depósitos de piedemonte, debido a sucesivas acumulaciones de flujos de detritos y corrientes de barro que depositan sus materiales en la parte media y distal de los abanicos aluviales a lo largo de toda la zona de estudio.

Los depósitos coluviales recientes (neógenos) ocupan faldas de cerros y bordes de quebradas subyaciendo a depósitos aluviales recientes, constituidos principalmente por arenas y limos, emplazados en extensiones de varios kilómetros de largo, cuya potencia no supera el metro de profundidad.

La Figura 3.8 muestra la evolución durante el Cenozoico de la Cuenca Puno y Yocas.

### 3.3.2 Geología Local

A continuación se describen las unidades geológicas presentes en el área de Pampa Puno y Yocas. Para ello se utilizó información proveniente del mapeo de superficie, de los pozos de observación de la campaña 2009 y de los sondeos previos. En la Figura 3.9 se presenta el mapa geológico del sector de Pampa Puno y Yocas, el cual tiene como fuente el estudio realizado por GP Consultores en 2009, que proporciona un marco geológico mejorado, presentándolo a través de planchetas escala 1:5.000.

- **Formación Collahuasi (Carbonífero – Pérmico)**

Parte del Grupo Choiyoi, corresponde a la unidad más antigua del sector y constituye el basamento del área de estudio. Está definida como una secuencia volcánica cuya composición abarca desde andesitas y basaltos hasta dacitas y riolitas, en la definición formal además se encuentran incorporados niveles sedimentarios esporádicos.

En el área de estudio la unidad está representada por rocas volcánicas de composición riolítica, de color pardo rojizo y textura porfídica, con presencia de “ojos de cuarzo”, plagioclasa y minerales máficos en menor medida.

Se reconoce a partir de 10 a 20 m de profundidad hasta el fondo de los pozos de observación PSAP-1, PSAP-2 y PSAP-3 (50 m) y PUNO-15B, ubicados en la parte oriental y Sur del sector, al Este del Sistema de Falla Oeste.

- **Intrusivos Paleozoicos (Pérmico – Triásico)**

Ubicados al Este del Sistema de Falla Oeste, corresponden a cuerpos intrusivos de composición principalmente monzonítica y granítica, con granodiorita subordinada, textura equigranular media a gruesa, y localmente porfídica.

Estos cuerpos cortan a las rocas de la Formación Collahuasi, tal como se observa en los pozos AR-490 y AR-484. Además, se reconoce en los pozos AR-489, AR-513 y AR-597.

- **Formación Icanche (Eoceno inferior – Eoceno medio)**

La Formación Icanche ha sido definida como una secuencia de rocas volcánicas andesíticas porfídicas y afaníticas, y en menor medida por lavas andesíticas brechosas, tobas y depósitos de bloques y cenizas. Se incluyen además stocks de sus equivalentes intrusivos y subvolcánicos.

En el pozo de observación YOC-3 ubicado en el extremo noroccidental de la cuenca se encuentra una columna dada por 250 m de ignimbritas de color pardo rojizo, afaníticas y compactas, las cuales pueden ser atribuidas en parte a la Formación Icanche (desde los 50 m de profundidad) debido a su espesor y posición al Oeste de la Falla Chocal.

- **Intrusivos Cenozoicos (Eoceno)**

En la parte central de la cuenca, al Oeste de la Falla Puno, existen sondajes previos donde se encontraron rocas intrusivas en profundidad, cuya composición varía desde diorita hasta granito, de textura porfídica principalmente, que podrían correlacionarse litológicamente con los cuerpos intrusivos y subvolcánicos asociados a la Formación Icanche.

Los sondajes donde se reconocen estos cuerpos son; AR-312, AR-314, AR-315, AR-318, AR-337, ARDD-333, DD-1471 y DD-1477.

- **Formación Papajoy (Oligoceno – Mioceno inferior)**

Es la unidad más representativa dentro del área de trabajo y representa la mayor parte del relleno de la cuenca de Puno y Yocas (hasta 700 m de potencia). Ha sido definida como una secuencia de conglomerados, areniscas y lutitas de origen continental, color rojizo a anaranjado, mal seleccionados y con moderado a bajo grado de consolidación, presentándose subordinadamente algunos niveles calcáreos.

A partir de la información de sondajes se ha determinado que existe una intercalación de sedimentos gruesos y finos que se correlacionan por su litología y posición estratigráfica con Formación Papajoy. En la base de la secuencia se observan gravas limosas y arcillosas, además de limos y arcillas gravosas, con un mayor grado de consolidación, con clastos polimícticos de composición andesítica y riolítica, cuyo predominio de finos como matriz se encuentran en un 60 a 70% (Pozos de observación: PUNO-14, 15 y 16; YOCA-08 y 10).

A continuación se encuentra un nivel de gravas arenosas y arcillosas con algunas intercalaciones de arenas gruesas a medias, de color rojizo, clasto soportado, cuyo contenido de finos en la matriz

disminuye considerablemente en comparación al nivel inferior. Presentan clastos de composición andesítica, riolítica y cuarzo.

Interdigitados con la secuencia antes descrita se depositaron niveles más finos compuestos por intercalaciones de gravas arcillosas y limosas con niveles de arena fina, limo y arcilla. Presenta fuertes variaciones laterales tanto en sus litofacies como en su espesor, asociándose con ambientes deltaicos y aluviales en su parte más distal.

Esta unidad aparece representada casi en su totalidad en los pozos referidos en este estudio.

- **Ignimbrita Carcote (Mioceno – Plioceno)**

Definida como un extenso flujo piroclástico de composición dacítica a riolítica y textura fragmental, de color rosado a gris con tonos claros, y con un escaso contenido de piroclastos de plagioclasa y biotita.

Esta unidad se encuentra distribuida ampliamente en la superficie del área de trabajo, encontrándose como tobas de color gris claro a blanco, con textura vesicular cuya matriz contiene biotita, 5% líticos (dacita), cuarzo y en menor proporción vidrio. Hacia la base aumenta su grado de consolidación, y en algunos casos se encuentra lixiviada, adquiriendo un color pardo rojizo.

En los pozos de observación PSAP-1 y PSAP-2, ubicados en la parte centro-oriental de la cuenca, se detectó mineralización de óxidos de cobre para esta unidad, cuyo espesor es de 6 m, el que aumenta entre 35 a 40 m a medida que se aproxima al centro de la cuenca (pozos de observación: PUNO-13, 18, 19, 20 y 21; y pozos de bombeo PUNO-02B, 04B, 06B, 07B y 08B) y llegando a un máximo de 79 m en los sondeos PUNO-10B y 11B. En el extremo noroccidental de la cuenca se localizan los pozos de observación YOCA-09 y YOCA-10, observándose un aumento del espesor hasta 120 m, con un paso gradual desde tobas a ignimbritas soldadas en profundidad.

- **Depósitos Aluviales y Coluviales Modernos (Cuaternario)**

Corresponden a una unidad informal que agrupa los sedimentos de origen aluvial y coluvial no consolidados recientes, que cubren de manera discordante a las demás unidades, sus clastos son de diversa composición aunque predominan los de origen volcánico (andesita y riolita).

Su potencia varía desde 0 a 10 m, donde los pozos ubicados en la parte sur de la cuenca (pozos de observación PUNO-14, 15, 15B, 16 y 17) muestran mayores espesores (4 a 10 m) en relación a la zona central (pozo de bombeo PUNO-06B y pozos de observación PSAP-1, PSAP-2 y PSAP-3).

La Figura 3.10 corresponde a la columna estratigráfica de la cuenca y sus alrededores, donde se puede observar la relación existente entre las diversas unidades geológicas descritas en este informe.

### 3.3.3 Conexión Vega Sapunta – Pampa Puno

La Vega Sapunta se ubica geomorfológicamente en la franja oriental del sistema de horst y graven que caracteriza a la cuenca de Pampa Puno. La quebrada que aloja a la Vega Sapunta nace en el sector sur de la cuenca con una orientación Norte-Sur siguiendo los principales lineamientos estructurales que definen al graven central. En el sector central de la cuenca Pampa Puno, esta quebrada toma una dirección Este-Oeste y es en este sector donde se encuentra la vega.

Geológicamente, la quebrada se desarrolla sobre ignimbritas de la formación Carcote, que sobreyacen a rocas intrusivas y/o volcánicas de la formación Collahuasi. La vega se desarrolla sobre sedimentos modernos depositados sobre las ignimbritas.

En el sector de la Vega Sapunta, la información de sondajes y geofísica evidencian la existencia de una estructura con dirección N-S; N-NW, que en superficie sólo se manifiesta como un lineamiento. Esta estructura está separando un ambiente al oriente, donde se desarrolla la vega, observándose ignimbritas (Carcote) sobreyaciendo a la roca volcánica (Collahuasi) en los piezómetros PSAP-1, PSAP-2 y PSAP-3; y el sector occidental a la estructura donde se encuentran las mismas ignimbritas, pero sobreyaciendo a gravas arenosas (Papajoy), pozo PUNO-13. En la Figura 3.11 se presenta una sección geológica del sector anteriormente nombrado.

## 3.4 Catastro de Sondajes

A partir de la información de SWS (2012), se establece que en total, se han perforado 46 sondajes hidrogeológicos en Pampa Puno, en tres campañas diferentes. En la Figura 3.12 se ilustra la ubicación de estos sondajes. La primera campaña tuvo lugar entre 1998 y 1999, llevando a cabo 20 perforaciones con el método de aire reverso, 9 de las cuales corresponden a los pozos de bombeo sobre los cuales se otorgaron los derechos de aprovechamiento. Posteriormente, entre los años 2009 y 2010, se perforaron 19 pozos más, también con la metodología de aire reverso, de los cuales dos corresponden a pozos de bombeo (PUNO-15B y Puno-19B).

Los pozos PUNO-3, YOC-3, YOC-8 y YOC-9 que se encontraban tapados (colapsados por derrumbe), han sido reemplazados y construidos nuevamente durante la campaña de perforación de 2010, con los nombres de PUNO-3EA, YOCA-03, YOCA-08 y YOCA-09.

Finalmente, entre 2011 y 2012 se realizó una nueva campaña, construyendo 7 nuevos sondajes, todos ellos perforados con método diamantina. La Tabla 3.4 presenta la totalidad de los pozos perforados, su ubicación, profundidad y año de perforación.

Respecto de los pozos de la tercera campaña, cinco de ellos fueron habilitados con sensores de cuerda vibrante, mientras que los otros dos (DDH-P03 y DDH-P04) fueron habilitados como pozos abiertos. Por ello, sólo los niveles observados en los últimos son comparables de forma absoluta con los niveles monitoreados en los pozos de las primeras campañas. Los demás deben analizarse en forma separada. Por otra parte, al tratarse de sondajes perforados recientemente, aún no es posible evaluar el comportamiento de sus niveles en el tiempo.



**Tabla 3.4**  
**Pozos Perforados, Datum PSAD 56**

Pozo	Tipo	UTM Norte	UTM Este	Cota (msnm)	Profundidad (m)	Año Perforación
YOC-3	Monitoreo	7.654.640	518.300	-	-	1996
YOCA-03	Monitoreo	7.654.291	516.126	3.987	250	2010
YOC-8	Monitoreo	7.652.000	518.000	3.985	-	1996
YOCA-08	Monitoreo	7.647.854	518.955	4.138	218	2010
YOC-9	Monitoreo	7.652.785	516.979	4.047	-	1996
YOCA-09	Monitoreo	7.652.777	516.984	4.047	200	2010
YOC-10	Monitoreo	7.652.893	517.932	4.046	-	2002
YOCA-10	Monitoreo	7.650.598	518.146	4.091	212	2010
PSAP-1	Monitoreo	7.645.554	523.715	4.030	50	2010
PSAP-2	Monitoreo	7.645.504	523.653	4.031	50	2010
PSAP-3	Monitoreo	7.645.365	523.470	4.033	50	2010
PUNO-1E	Monitoreo	7.641.129	519.747	4.141	276	1999
PUNO-2B	Bombeo	7.641.380	521.010	4.119	250	1999
PUNO-2E	Monitoreo	7.641.390	520.951	4.120	268	1999
PUNO-3E	Monitoreo	7.641.251	522.105	4.090	116	1999
PUNO-3EA	Monitoreo	7.641.335	522.099	4.091	132	2010
PUNO-4B	Bombeo	7.646.467	521.521	4.099	250	1999
PUNO-4E	Monitoreo	7.646.516	521.496	4.102	100	1999
PUNO-5E	Monitoreo	7.646.431	519.036	4.147	181	1999
PUNO-06B	Bombeo	7.644.155	521.203	4.099	250	1999
PUNO-07B	Bombeo	7.642.803	521.003	4.102	206	1999
PUNO-08B	Bombeo	7.645.237	521.932	4.080	206	1999
PUNO-09B	Bombeo	7.648.159	521.001	4.144	230	1999
PUNO-10B	Bombeo	7.647.243	521.909	4.103	223	2000
PUNO-10E	Monitoreo	7.647.213	521.954	4.100	300	2000
PUNO-11B	Bombeo	7.646.202	520.443	4.122	223	2000
PUNO-11E	Monitoreo	7.646.161	520.412	4.123	300	2000
PUNO-13	Monitoreo	7.645.375	522.911	4.061	126	2010
PUNO-14	Monitoreo	7.634.451	519.883	4.157	286	2010
PUNO-15	Monitoreo	7.637.650	520.877	4.137	288	2010
PUNO-15B	Bombeo	7.637.651	520.847	4.138	226	2010
PUNO-16	Monitoreo	7.636.022	520.178	4.166	300	2010
PUNO-17	Monitoreo	7.638.948	521.261	4.107	270	2010
PUNO-18	Monitoreo	7.640.022	521.094	4.110	270	2010

Fuente: Elaboración Propia



**Tabla 3.4**  
**Pozos Perforados, Datum PSAD 56**

Pozo	Tipo	UTM Norte	UTM Este	Cota (msnm)	Profundidad (m)	Año Perforación
PUNO-19	Monitoreo	7.644.022	519.991	4.129	260	2010
PUNO-19B	Bombeo	7.644.006	519.997	4.131	230	2011
PUNO-20	Monitoreo	7.642.013	520.478	4.125	280	2010
PUNO-21	Monitoreo	7.642.985	519.525	4.144	172	2010
PUNO-314B	Bombeo	7.641.279	518.454	4.201	156	1999
DDH-P01	-	7.650.646	518.506	4.097	301	2011
DDH-P02	-	7.645.392	520.524	4.121	645	2011
DDH-P03	-	7.645.380	523.191	4.061	103	2011
DDH-P04	-	7.645.393	518.873	4.162	216	2012
DDH-P05	-	7.645.414	522.403	4.070	302	2012
DDH-P06	-	7.641.200	520.023	4.140	532	2011
DDH-P07	-	7.650.615	519.525	4.158	461	2012

Fuente: Elaboración Propia

En el Anexo B se presenta la información estratigráfica de las perforaciones realizadas en el área de estudio.

### 3.5 Geofísica

La reinterpretación de los perfiles Magneto Telúricos (MT) del informe “Estudio Audio Magneto Telúrico AMT Pampa Puno” realizados por Geodatos en el 2009 aportó valiosa información respecto a la ubicación y disposición de las estructuras regionales; adicionalmente, mediante la contrastación de unidades resistivas profundas con los testigos obtenidos desde la perforación diamantina, se ha definido una nueva geometría del basamento (SWS, 2012).

Adicionalmente se contó con información obtenida desde el perfilaje geofísico de los pozos DDH – P05, DDH – P06 y DDH – P07, en donde se usaron las sondas Gamma Natural, Densidad Gamma y Porosidad Neutrón. Las sondas por motivos de seguridad fueron ingresadas al pozo por el interior de las barras de perforación.

Por el hecho de perfilar por el interior de las barras de perforación, las unidades de densidad, gamma natural y porosidad deben considerarse como relativas, ya que no se ha corregido el efecto del acero de las barras. Los resultados de los perfilajes se muestran en las Cartillas Resumen de Pozo, presentadas en el Anexo C, mientras que el informe elaborado por Geodatos se adjunta en el Anexo D.

A continuación se presentan las comparaciones entre las descripciones litológicas de los testigos con los perfiles geofísicos:

- **DDH-P05:**

- De 0 a 36 m: Ignimbrita, sin presencia de agua y baja porosidad.
- De 36 a 110 m: Depósitos coluviales principalmente gravosos. Las gravas presentan registros de Porosidad y Natural Gamma medias, no obstante el registro de Natural aumenta considerablemente hacia la base, atribuido a depósitos oligomícticos riolíticos, lo cual aumentaría la cantidad de permeabilidad del paquete. Cerca de los 60 m aparece un nivel con alta porosidad, la que se atribuye a un nivel de arenas limpias, coherente con los bajos registros del Natural Gamma (sin arcillas).
- De 110 a 235 m: Secuencia de areniscas, con niveles de arcillolitas e intercalaciones de conglomerados, dividido en 3 paquetes; el superior (110 – 145 m) conformado por intercalación de areniscas finas y arcillolitas con baja laminación, presentando altos registros de porosidad e intercalaciones de altos y medios registros de Natural Gamma. El intermedio (145 – 190 m) conformado por areniscas finas y menor arcillolitas sin laminación, presentando registros medios-altos de Porosidad y algunos peak para Natural Gamma (niveles arcillosos). El paquete inferior (190 – 235 m) presenta un notable aumento en los registros de Densidad, una disminución gradual en la porosidad y valores medios constantes para Natural Gamma correspondiendo a una secuencia de areniscas e intercalaciones de conglomerados hacia la base.
- De 235 a 300 m: Secuencia de conglomerados polimícticos con intercalaciones de areniscas rojizas; no presenta variación en los registros de Natural Gamma, disminución gradual en la porosidad y dos paquetes según Densidad. El aumento de Densidad probablemente debido por aumento de clasto tipo bolones; Natural Gamma y Porosidad debido a matriz areno limosa.

- **DDH-P06**

- De 0 a 32 m: Ignimbrita seca.
- De 32 a 94 m: Gravas secas, escasa información.
- De 94 a 288 m: Gravas Arenosas polimícticas; presenta registros de Porosidad media asociado a matriz areno-limosa; registros bajos de Natural Gamma, asociado a escasas de arcilla y clastos principalmente sedimentarios. Presenta variaciones de Densidad lo que puede ser atribuible a un cambio en las compactaciones de los niveles y zonas más o menos cementadas.
- De 288 a 480 m: Gravas Arenosas oligomícticas con intercalaciones en la base de Arenas Gravasas Oligomícticas. Presentan un aumento en los registros de Natural Gamma y se mantiene la Densidad y la Porosidad, esto se atribuye a la composición riolítica de los clastos (aumento de K). Bajo los 420 m se evidencia una pequeña disminución de la porosidad por un aumento en la compactación.

- **DDH-P07**

- De 0 a 140 m: Depósitos coluviales; gravas oligomícticas secas.
- De 140 a 180 m: Secuencia de Arenas Gravasas y Limos arenosos de baja consolidación. Disminuyen los registros de Natural Gamma por la diversidad de los clastos; la Porosidad presenta registros medios y variabilidad en la densidad.
- De 180 a 360 m: Arenas Gravasas a Gravas Arenosas polimícticas. Registros constantes: Porosidad media y Natural Gamma Bajo debido a matriz arenolimosa y clastos de diversas composiciones.

- De 360 a 375 m: Intercalaciones de arcillolitas, areniscas y conglomerados. Presenta registros con alta Porosidad y Natural Gamma debido al contenido en arcillas.
- De 375 a 400 m: Secuencia de conglomerados y areniscas. Baja Densidad y Natural Gamma; Porosidad media.

### 3.6 Hidrogeología

#### 3.6.1 Unidades Hidrogeológicas

##### 3.6.1.1 Descripción de Unidades Hidrogeológicas

De acuerdo con la información de la geología superficial, perfiles gravimétricos, perfiles TEM y la información de sondeos antiguos realizados en el área de estudio, es que se definen cuatro unidades hidrogeológicas principales.

- **Unidad Hidrogeológica 0, o cubierta superior no saturada**

Se compone de las siguientes unidades geológicas: Depósitos Aluviales y Coluviales Modernos, Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos y la Ignimbrita Carcote. Aunque generalmente no se encuentra saturada en ninguno de los afloramientos y secciones analizadas, ésta constituye una buena vía de tránsito para la recarga, producto de la infiltración de las precipitaciones.

Se distribuye sobre gran parte de la Porción Central y en laderas de las Franjas Oriental y Occidental. Representa una capa superficial de espesor variable; su mínimo se observa en la cercanía de la Vega Sapunta, presentando 5 a 10 m de espesor, pudiendo alcanzar espesores de hasta 50 m (por ejemplo, sección hidrogeológica E-E').

Esta unidad presenta principalmente permeabilidad secundaria constituida por fracturamiento post deposicional relacionado a enfriamiento. En los escasos afloramientos que esta unidad presenta (Quebrada Sapunta) se muestra un fracturamiento principalmente vertical asociado a enfriamiento.

- **Unidad Hidrogeológica 1, o unidad acuífera principal**

Esta es la principal unidad acuífera del sistema en término de sus características hidrogeológicas. Sin embargo, no es la más importante respecto de su extensión superficial. Esta unidad se distribuye a lo largo de toda la cuenca, presentando mayor potencia en el sector central y sur en donde alcanza espesores mayores a los 100 m (ver pozo PUNO-08B en sección hidrogeológica E-E'). Usualmente se dispone bajo los depósitos ignimbríticos y aluviales de la Unidad 0.

Lateralmente se ve influenciada por los sistemas estructurales presentes en el área de estudio, poniéndola en contacto con las otras unidades hidrogeológicas. A grandes rasgos, la Falla Oeste demarca su límite occidental, mientras que la Falla Puno controla su límite oriental.

Esta unidad está compuesta por depósitos sedimentarios no consolidados, principalmente gravas polimícticas y gravas con importantes aportes de materiales riolíticas. Estas gravas se caracterizan por los bajos contenidos de materiales de granulometría fina, sólo localmente ocurren unidades de

limos y arcillas de limitada extensión y de tipo lentiforme. Su permeabilidad es de tipo primario. Se estima un almacenamiento alto. A pesar de la gran extensión areal de esta unidad, ésta sólo se encuentra saturada en el sector central y oriental de la cuenca.

En base a las pruebas de bombeo de los pozos que cuentan con derechos constituidos, así como a información bibliográfica, se ha estimado una permeabilidad del orden de 0,1 a 25 m/d para la porción superior de esta unidad; el análisis de las pruebas de permeabilidad efectuadas en los testigos de suelo, permiten extender estos valores en profundidad. Se estima un coeficiente de almacenamiento (Sy) alto del orden de 10 a 15%, en base a la estratigrafía y a las pruebas de retención de humedad. Si bien la geofísica de pozo mostró una disminución en la porosidad con la profundidad, esto no se reflejó en la disminución del Sy en las pruebas de laboratorio.

- **Unidad Hidrogeológica 2, o unidad acuitardo**

Esta unidad corresponde principalmente a depósitos que desarrollan acuíferos de muy baja permeabilidad (acuitardo) y en algunos sectores se comporta como una unidad semiconfinante. Presenta una ocurrencia irregular ya que no en todas las secciones está representada y tiene espesores altamente variables.

Esta unidad está compuesta por arcillas gravosas, gravas con contenidos de arcilla superior al 40% y secuencias de gravas arcillosas con arcillas y limos (Formación Papajoy). Sus espesores varían desde 0 (sección hidrogeológica H-H') a 80 m (en sección hidrogeológica M-M'). En algunos de los pozos, como en el PUNO-19 (sección hidrogeológica F-F'), esta unidad actuaba como unidad semiconfinante. Presenta una permeabilidad primaria condicionada por el porcentaje de ocurrencia de arcillas y limos (típicamente entre 40 y 80%).

Estratigráficamente se dispone bajo la Unidad 1, sin embargo, por efectos tectónicos, hacia el Centro y Sur de la cuenca, esta unidad se ve limitada por la Falla Puno hacia el Este, situándola en contacto lateral con Unidad 1. Por otro lado, la Falla Chocal demarcaría su extensión Oeste y Sur. Su límite Norte aún se desconoce.

En base a las pruebas de bombeo anteriores, se ha estimado una permeabilidad de 0,0001 a 0,001 m/d. Según el modelo geológico, los sedimentos que componen la base de esta unidad serían principalmente finos, mientras que la zona superior estaría conformada por depósitos más gruesos, permitiendo separar conceptualmente esta unidad, asignándole mejores permeabilidades a la porción superior.

Si bien los ensayos de laboratorio muestran coeficientes de almacenamiento del orden de 10 a 15%, se estima que estos valores pueden estar sobreestimados dado que la muestra ensayada corresponde a una muestra reconstituida en donde resulta imposible representar fielmente las condiciones de consolidación originales del suelo. No obstante, estos ensayos entregan información que analizada en términos referenciales resulta válida. En este caso, se asumen valores de almacenamiento para la Unidad 2, entre 0,5 y 5%.

- **Unidad Hidrogeológica 3, o riolita fracturada**

Esta unidad corresponde principalmente a rocas consolidadas a semi-consolidadas que desarrollan acuíferos con permeabilidad primaria y secundaria. Presenta una gran extensión areal, sin embargo aflora sólo en el sector occidental y sur del área de estudio. En la mayor parte del área esta unidad se encuentra bajo los depósitos de la Unidad 1 o Unidad 2.

Esta unidad está compuesta principalmente por gravas y conglomerados con contenidos variables de materiales finos (Formaciones Tolar y Papajoy). En general se desarrollan secuencias alternadas materiales con predominio de matriz fina con materiales de predominio de matriz gruesa. La permeabilidad de esta unidad es principalmente primaria, sin embargo, localmente se ha evidenciado (en cuttings y en testigos de roca) la presencia de una importante ocurrencia de fracturas.

No se tienen interpretaciones de pruebas hidráulicas para esta unidad, sin embargo por estimación visual de testigo se ha considerado una permeabilidad de  $8,64E-2$  a  $8,64E-1$  m/d, con almacenamiento menor a 2%.

- **Unidad Hidrogeológica 4, o basamento rocoso**

Esta es una unidad hidrogeológica de muy baja a nula permeabilidad y que define la base del acuífero (considerado como basamento impermeable). Dado el fuerte control estructural de la cuenca, esta unidad aflora principalmente adyacente a estructuras de carácter regional, levantando y exponiendo estas unidades más impermeables.

Esta unidad está constituida principalmente por rocas consolidadas del tipo arcillositas, conglomerados arcillosos y volcanitas de las formaciones Tolar e Icanche, volcanitas del Eoceno de la formación Icanche, y por unidades volcánicas e intrusivas paleozoicas de la Formación Collahuasí. Se incluyen también dentro de esta unidad, intrusivos Eocenos que afloran hacia el sector Sur. El alto contenido de arcillas de algunas de las rocas de esta unidad, la masividad y escaso fracturamiento de otras, dan cuenta de una muy baja a nula permeabilidad para esta unidad. Se estima que algunos de los sectores adyacentes a las fallas regionales más importantes pudieran presentar algún grado de fracturamiento que desarrolle localmente una unidad acuífera.

La cuenca generalmente posee inclinaciones hacia el Norte. Hay una ubicación en el Centro de la cuenca, donde las profundidades del basamento fluctúan entre 3.800 y 3.850 metros. Este punto es un bajo aislado en la estructura general del graben, relacionándose a la superficie de la Unidad hidrogeológica 4.

Como punto de clarificación, cabe mencionar que esta superficie no es la base del graben estructural mayor que subyace la totalidad de Pampa Puno, Pampa Yocas y Pampa Chocal. Este graben estructural mayor y más profundo podría estar cientos o tal vez miles de metros más profundo que el sistema definido en este estudio.

### 3.6.1.2 Descripción de Secciones Hidrogeológicas

Las Unidades Hidrogeológicas (UH) definidas en el acápite anterior, se detallan por medio de las 14 secciones hidrogeológicas definidas a lo largo y ancho del acuífero del área de estudio. La ubicación en planta de las secciones hidrogeológicas se presenta en la Figura 3.13. En las Figuras 3.14 y 3.15 se presentan las secciones hidrogeológicas de interés en la zona de Sapunta (E-E') y la sección longitudinal orientada NS (N-N'), respectivamente. En el Anexo E se presentan todos los perfiles hidrogeológicos del acuífero de Pampa Puno.

- **Sección A-A'**

Esta es la sección más septentrional de la serie y corresponde a la zona de transición entre Pampa Puno y Pampa Yocas. En esta se ilustra claramente que el graben es mucho más estrecho y asimétrico. Los pozos YOC-9 y AR-558 sirven para ajustar de manera óptima la definición del subsuelo en esta parte del graben.

- **Sección B-B'**

Esta sección se encuentra a unos 3 km al Sur de la sección A-A'. Es posible observar en esta sección que el graben es claramente asimétrico, agudizándose hacia el Oeste. El pozo YOC-10 permite ajustar el centro de la graben en esta área.

- **Sección C-C'**

Esta sección se encuentra a un poco más de 1 km al Norte de la sección D-D', teniendo muy limitada fuente de información de pozos de control para ayudar a interpretar la estructura del graben en esta área, de esta manera su interpretación corresponde a una interpolación entre la sección D-D' y la sección B-B'.

- **Sección D-D'**

Esta Sección EW está situada en una de las más amplias zonas de la cuenca, siendo representativa del sistema "horst- graben", limitado en ambos márgenes por una serie de fallas normales. La Falla Oeste aparece con dos bloques caídos en su porción Centro oriental del graben. La UH 1 aparece con espesores importantes en esta sección y está cortada por fallas de orientación NS en varios sectores. El cerro Yocas Uruma (4.307 msnm) se encuentra más allá del límite occidental de esta sección.

- **Sección E-E'**

Esta sección se encuentra a más de 2 km al Norte de la sección F-F' y corresponde a la ubicación donde la Quebrada Sapunta descarga sus aguas hacia el Este. Esta sección EW tiene una pequeña curva hacia el SE en su extremo oriental a modo de orientarse con el eje de la Quebrada Sapunta. El graben claramente puede ser visto como una serie de bloques caídos limitados en sus márgenes EW por fallas normales. La Falla Oeste puede ser vista como una Zona de Fallas, más que como una superficie con fallas discretas. La superficie de agua se observa en UH 3 a lo largo de su margen occidental, no obstante en la parte central de la cuenca se presenta en la UH 1. Al igual que la mayoría de las secciones discutidas anteriormente, se puede observar que la superficie de agua está generalmente inclinada hacia el eje central de la cuenca. De manera similar se conecta con Quebrada

Sapunta pero sólo en su parte más superficial, existiendo cierta conexión pero de manera subordinada. En la Figura 3.14 se muestra el perfil.

- **Sección F-F'**

Esta sección EW se encuentra unos kilómetros al Sur de la sección EE' y aproximadamente 2 km al Norte de la sección H-H'. El pozo PUNO-19, en el centro de esta sección ayuda a definir la profundidad y la configuración de la cuenca. Como se mencionó anteriormente en otras secciones, la UH 2 se presenta en forma discontinua, la cual no se puede ver en sección H-H'al Sur, pero si es obvia en la sección E-E' hacia el Norte.

- **Sección G-G'**

Esta sección se encuentra aproximadamente a 1 km al Norte de la sección H-H'. Ésta muestra claramente que el graben se ha angostado y hecho más profundo hacia el Norte. La superficie piezométrica se produce en la parte superior de la UH 2 y en unos pocos lugares en las partes inferiores de la UH 1.

- **Sección H-H'**

Esta sección se encuentra a un poco más de 1 km al Norte de la sección G-G' y refleja al graben con una morfología cada vez más complejo. Una serie de fallas ubicadas a lo largo del margen occidental del graben han servido para aumentar el ancho total de éste. La UH 1 aparece con su mayor espesor en esta sección y el nivel freático está dentro de ella. La naturaleza discontinua de la UH 2 se ilustra por el simple hecho de que no aparece en esta sección.

- **Sección I-I'**

Esta sección se encuentra equidistante entre las secciones H-H' y J-J'. Esta sección se asemeja a la sección G-G', donde el graben es obviamente más profundo y más estrecho que en otros lugares más al Sur. Del mismo modo, como se ve en la sección G-G', la superficie de agua puede ser vista en la parte más alta de la UH 2 y en pocos lugares en la parte más baja de la UH 1.

- **Sección J-J'**

Esta es la primera sección donde la Falla Chocal puede ser vista en el margen occidental. El graben tiene una configuración amplia y profunda. El margen oriental del graben está limitado por Falla Oeste y Falla Puno. El nivel de agua en esta sección se presenta en la UH 1.

- **Sección K-K'**

Esta sección se encuentra un poco más de 1 km al Norte de la sección L-L'. Se puede observar que el graben es más amplio y profundo en comparación a las secciones anteriores. El nivel freático se produce en las UH 2 y UH 3. Como se muestra en la Figura E.12 del Anexo E, las fallas presentes que controlan la cuenca y geomorfología son Falla Puno y Falla Oeste. El cerro Mesón aparece en el margen occidental de la sección. La superficie piezométrica en esta sección es en gran medida interpretada e interpolada a partir de las secciones adyacentes debido a la falta de suficientes pozos de control en la zona.

- **Sección L-L'**

Esta sección EW se encuentra aproximadamente a 1 km al Norte de la sección M-M'. El graben tiene una forma similar a la configuración vista previamente en M-M', pero la naturaleza lenticular y discontinua de UH 0 y UH 1 se puede ver en la parte superior de la Cuenca. Al Este se observa la Quebrada Las Tetras, tratándose de un afluente del Río Loa, a varios kilómetros al Este de la zona de estudio. Similar a la sección M-M', la zona Este de la Falla Oeste está sustentada por rocas paleozoicas de la Formación Collahuasi. En el margen occidental de la sección transversal, el Cerro de La Mira tiene una elevación de 4.175 msnm.

- **Sección M-M'**

Esta es la sección ubicada más al Sureste del área analizada. Está orientada EO con la vista mirando al Norte. El graben inferior de Pampa Puno aparece en la parte central de esta sección. La Falla Oeste aparece en la porción más oriental de esta sección.

La Sierra del Medio se encuentra inmediatamente al Este de la Falla Oeste. La formación Paleozoica Collahuasi compone el basamento rocoso de la Sierra del Medio, hacia el Este del graben. La Falla Puno aparece con dos fallas separadas que crean una porción central del graben más profundo. El basamento rocoso hacia el poniente del graben incluye la Formación Tolar y la Formación Icanche. El nivel de agua subterránea se identifica entre las UH 2 y UH 3.

- **Sección N-N'**

La sección N-N', está orientada de manera NS, mirando hacia el Este, concordante a lo largo del eje de la cuenca. En esta se observa que el perfil general de la cuenca se profundiza hacia el Norte, pero que la superficie de agua en general es bastante plana (gradientes hidráulicos bajos). En la Figura 3.15 se muestra el perfil.

### 3.6.2 Geometría del Acuífero

La superficie del basamento impermeable considerado, corresponde al contacto superior de la unidad hidrogeológica 4. La cuenca se emplaza alargada en el eje NS y se profundiza hacia el Norte. Se identifica un área aislada en el centro de la cuenca donde alcanza las mayores profundidades, una elevación bajo 3.800 msnm. La cuenca aparece con su mayor extensión a lo largo del eje oriente-poniente y que también corresponde a la porción de mayor profundidad de la cuenca. También es posible observar que la cuenca es ampliamente asimétrica a lo largo de este eje.

La pendiente poniente de la cuenca es muy pronunciada mientras que la oriente es mucho más plana. Esto podría reflejar el origen de la compresión inicial de la cuenca antes que fuera expandida en su largo, bajo un régimen trans-tensional.



### 3.6.3 Pruebas Hidráulicas

En la zona de Pampa Puno, se realizaron distintas campañas de perforación de pozos y pruebas de bombeo. En la primera campaña que se llevó a cabo durante los años 1998 y 2000 se efectuaron diversas pruebas de bombeo de estos pozos de producción, en régimen de gasto variable y de gasto constante.

En la campaña realizada durante los años 2009 y 2010, se efectuaron pruebas de bombeo de gasto variable y constante en los pozos Puno-15B y Puno-19B. Durante esta campaña se realizaron pruebas de air lift (8 pozos) y de recuperación (2 pozos), en el resto de los pozos de monitoreo no fue posible obtener registros de airlift y recuperación para ser interpretados. En la tercera campaña efectuada durante los años 2010 a 2012, se realizó una serie de ensayos Lefranc con y sin Packer, en total fueron 7 los pozos perforados.

En la Tabla 3.5 se presenta el resumen de las pruebas hidráulicas realizadas, incluyendo el nombre del pozo, tipo de prueba, número de pruebas y el período de ejecución. En la Figura 3.16 se muestra la ubicación de los pozos en los que se realizaron pruebas hidráulicas.

**Tabla 3.5**  
**Información de las Pruebas Hidráulicas Realizadas**

Pozo	Tipo de Prueba	N° de Pruebas	Año de Ejecución	Objetivo de la Prueba
PUNO-02B	Bombeo	3	1999	Permeabilidad
PUNO-04B	Bombeo	2	1999	Permeabilidad
PUNO-06B	Bombeo	1	1999	Permeabilidad
PUNO-07B	Bombeo	1	1999	Permeabilidad
PUNO-08B	Bombeo	1	1999	Permeabilidad
PUNO-09B	Bombeo	1	1999	Permeabilidad
PUNO-10B	Bombeo	1	2000	Permeabilidad
PUNO-11B	Bombeo	1	2000	Permeabilidad
PUNO-314B	Bombeo	2	1998 -2000	Permeabilidad
PUNO-15B	Bombeo	2	2010	Permeabilidad
PUNO-19B	Bombeo	2	2010	Permeabilidad
DDH-P01	Lefranc con y sin packer	2	2011	Permeabilidad
DDH-P02	Lefranc	3	2011	Permeabilidad
DDH-P04	Lefranc	1	2011	Permeabilidad
DDH-P05	Lefranc con y sin packer	2	2012	Permeabilidad
DDH-P06	Lefranc	5	2012	Permeabilidad
DDH-P07	Lefranc con y sin packer	-	2012	Permeabilidad
SAPUNTA-2	Air-lift	-	2010	Permeabilidad
YOC-8A	Air-lift y Slug test	-	2010	Permeabilidad
YOC-9A	Air-lift	-	2010	Permeabilidad

**Tabla 3.5**  
**Información de las Pruebas Hidráulicas Realizadas. Continuación**

Pozo	Tipo de Prueba	N° de Pruebas	Año de Ejecución	Objetivo de la Prueba
YOC-10A	Slug test	-	2010	Permeabilidad
PUNO-13	Slug test	-	2010	Permeabilidad
PUNO-14	Air-lift y Slug test	-	2010	Permeabilidad
PUNO-15	Air-lift y Slug test	-	2010	Permeabilidad
PUNO-16	Air-lift y Slug test	-	2010	Permeabilidad
PUNO-17	Slug test	-	2010	Permeabilidad
PUNO-18	Slug test	-	2010	Permeabilidad
PUNO-19	Air-lift, Slug test y Recuperación	-	2010	Permeabilidad
PUNO-20	Air-lift, Slug test y Recuperación	-	2010	Permeabilidad
PUNO-21	Slug test	-	2010	Permeabilidad
PUNO-3EA	Slug test	-		Permeabilidad

Fuente: Elaboración propia

### 3.7 Hidroquímica

#### 3.7.1 Aspectos Generales

A partir de los datos históricos de muestreo realizados durante los años 2012 a 2014, se analizó las aguas tanto superficiales como subterráneas, de los distintos pozos y afloramientos presentes en la cuenca Pampa Puno, diferenciando las etapas de bombeos: desde Junio del 2012 a Mayo del 2013 la etapa de Pre Bombeo Técnico y desde Diciembre del 2013 a Noviembre del 2014 el Bombeo Productivo. Los resultados de los análisis de los pozos fueron utilizados para la interpretación de las variaciones de la calidad del agua, mediante los Diagramas de Piper, Stiff. En la Figura 3.17 se muestra la ubicación espacial de los puntos de monitoreo.

#### 3.7.2 Conductividad Específica

La conductividad específica está directamente relacionada con los sólidos totales disueltos y de acuerdo a los resultados obtenidos en la gráfica de conductividad v/s sulfatos en la Figura 3.18, de la situación Pre Bombeo Técnico, se identificaron tres grupos principales:

- 1) Conductividades <400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ : referidas principalmente a las muestras de la Cuenca Puno Oriental que alberga al acuífero principal.
- 2) Conductividades entre 400 y 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ : para Sapunta 2, PSAP-1, PSAP-2, PSAP-3 y PUNO 314B, correspondientes a Vega Sapunta y Cuenca Puno Occidental;
- 3) Conductividades >800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ : definidas por Sapunta 1 y Río Loa, llegando incluso a valores de 3200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para este último.

En la Figura 3.19 se muestra los sulfatos vs la conductividad en la etapa de Bombeo Productivo, la diferencia con respecto al caso de Pre Bombeo, radica en que SAPUNTA-2 aumenta los valores de conductividad por sobre los 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### 3.7.3 pH

En las Figuras 3.20 y 3.21 se presenta el Diagrama pH v/s Conductividad para el período de Pre Bombeo y Bombeo Productivo, respectivamente, en estas se muestra rangos de pH entre 7 y 9, los que tienden a un promedio aproximado de pH 7,5 a medida que aumenta la conductividad. Las diferencias existentes para una misma muestra en los dos períodos pueden ser explicadas por la desgasificación de dióxido de carbono desde la muestra de agua.

Es importante señalar que los valores de pH son dependientes de los métodos de recolección de muestras, la temperatura y del tiempo entre colección y análisis.

### 3.7.4 Cationes y Aniones Mayores

Todos los datos de calidad físico-química del agua fueron analizados en función del muestreo formal que realiza Codelco Norte. Los parámetros hidroquímicos considerados de mayor importancia en Pampa Puno son los cationes mayores (Mg, Ca, Na y K) y aniones mayores ( $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  y Cl), Conductividad Específica (CE) y pH. La base de datos utilizada para realizar el análisis de la calidad del agua se presenta en el Anexo F.1.

A continuación se describen detalladamente las características químicas de las muestras colectadas, las que son clasificadas preliminarmente como aguas naturales.

#### 3.7.4.1 Diagrama de Piper

En el Anexo F.2 se presentan dos diagramas de Piper, uno para la etapa de Pre-Bombeo Técnico (Junio 2012 a Mayo 2013) y otro para el Bombeo Productivo (Diciembre 2013 a Noviembre 2014). A partir de los diagramas se clasifican las muestras de la siguiente manera:

- 1) Los diagramas de Piper asociados al Pre - Bombeo Técnico y Bombeo Productivo, presentan cierta variabilidad dada por la condición geológica del sector y al potencial grado de evaporación según la ubicación espacial de las muestras, tanto en aguas subterráneas, como en afloramientos de agua. En cuanto a las concentraciones de cationes en las aguas se presenta un predominio de Calcio sobre Sodio, con Magnesio subordinado; muy diferente es la representación de aniones con una muy alta variabilidad con predominio de Sulfatos y Bicarbonatos por sobre Cloruros.
- 2) En el caso de Sapunta, ciertas muestras se presentan con elevadas concentraciones de Sulfatos y Calcio debidos básicamente a mayor evaporación en períodos potencialmente más secos; y presencia tanto de yeso en fracturas de las ignimbritas, como cemento en depósitos aluviales.
- 3) La muestra del pozo PUNO-314B, presenta aguas del tipo cloruradas cálcicas, por efecto básicamente de la cercanía al basamento y la presencia de materiales finos de depósitos lacustres.

- 4) La muestra PUNO-08B, representa la escasa descarga desde Cuenca Puno Oriental hacia el Este, mezclando esta agua bicarbonatada con las sulfatadas de la Vega Sapunta.

### 3.7.4.2 Diagrama de Stiff

En el Anexo F.3 se presentan los Diagramas de Stiff y en la Tabla 3.6 se muestran la calidade de las aguas en función de sus cationes y aniones mayores.

**Tabla 3.6**  
**Calidad de Agua - Diagrama de Stiff**

Pozo	Tipo de Agua	Fecha (Pre-Bombeo Técnico)	Tipo de Agua	Fecha (Bombeo Productivo)
PUNO-09B	Na-Ca-Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	16-05-2013	Ca-Na-Cl-HCO <sub>3</sub>	11-03-2014
PUNO-10B	Ca-Na-CO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	16-05-2013	Na-Ca-CO <sub>3</sub> -HCO <sub>3</sub>	20-05-2014
PUNO-04B	Ca-Na-HCO <sub>3</sub> -Cl-SO <sub>4</sub>	29-05-2013	Na-Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Cl	08-04-2014
PUNO-11B	Ca-Na-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> -Cl	16-05-2013	Ca-Na-HCO <sub>3</sub> -Cl-SO <sub>4</sub>	11-03-2014
PSAP-1	Ca-Na-SO <sub>4</sub> -Cl	15-05-2013	Ca-SO <sub>4</sub>	11-03-2014
PSAP-2	Ca-SO <sub>4</sub>	24-04-2013	Ca-Na-SO <sub>4</sub> -Cl	11-03-2014
PUNO-13	Ca-Na-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> -Cl	16-05-2013	-	-
PSAP-3	Ca-SO <sub>4</sub>	24-04-2013	Ca-SO <sub>4</sub>	08-04-2014
PUNO-08B	Ca-Na-HCO <sub>3</sub> -Cl	16-01-2013	Ca-Na-HCO <sub>3</sub> -Cl-SO <sub>4</sub>	11-03-2014
PUNO-06B	-	-	Na-Ca-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	11-03-2014
PUNO-07B	Ca-SO <sub>4</sub>	29-05-2013	Ca-Na-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	11-03-2014
PUNO-02B	Na-Ca-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	29-05-2013	Ca-Na-SO <sub>4</sub>	08-04-2014
PUNO-314B	Ca-Na-Cl-HCO <sub>3</sub>	15-05-2013	Ca-Na-Cl-SO <sub>4</sub>	11-03-2014
SAPUNTA-1	Ca-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	24-04-2013	Ca-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	11-03-2014
SAPUNTA-2	Ca-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	15-05-2013	Ca-Na-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> -Cl	08-04-2014

(-) Sin información

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 3.6, se observa que:

- 1) Las aguas que están en el sector medio de la cuenca, es decir, Cuenca Puno Oriental presentan bajas concentraciones y son de tipo bicarbonatadas cloruradas - cálcicas y en menor medida sulfatadas, bicarbonatadas y sódicas,
- 2) Las aguas del sector Oeste correspondientes a Cuenca Puno Occidental representadas por la muestra PUNO-314B, son del tipo cloruradas cálcicas y en menor medida sulfatadas, en este sector se presenta un basamento de menor profundidad con respecto a Cuenca Puno Oriental.
- 3) El horst en el sector de Vega Sapunta, con un basamento solevado (a baja profundidad desde superficie) se relaciona con aguas sulfatadas bicarbonatadas y cálcicas. El escaso aporte de agua que se produce desde el Oeste y sus mayores concentraciones de Sulfatos y CE se deben básicamente a que las aguas han estado más expuestas a potencial evaporación, sobretudo en el sector de los afloramientos (vegas) y litologías que suman solutos a la solución.

### 3.8 Conexión Vega Sapunta – Pampa Puno

La relación entre la Quebrada Sapunta, Vega Sapunta y la cuenca Pampa Puno fue evaluada en el estudio SWS 2010, habiendo varias relaciones que deben ser consideradas en este análisis. Una de estas, corresponde al drenaje superficial, en donde la Quebrada Sapunta drena Pampa Puno a través de la pared occidental de la cuenca (graben) cruzando la falla Oeste. Esta situación es inusual en el contexto de la geomorfología general, porque las cuencas alargadas y trans-tensionales drenan desde un final a otro y no a través del muro del graben tectónico.

La segunda relación es volumétrica e hidrológica basados en el modelo hidrogeológico desarrollado y el balance de agua de la cuenca (descargas y recargas); aproximadamente un 2.5% (3 l/s) del flujo total de la cuenca sale a través de la Quebrada Sapunta. El mayor flujo de la cuenca es en dirección Norte, hacia la descarga de Pampa Yocas. La descarga de aguas subterráneas por Sapunta es un mínimo considerando la gran dimensión de la cuenca superficial.

Los pozos de monitoreo ubicados en la proximidad a la Quebrada Sapunta han permitido obtener información de la calidad físico química de las aguas subterráneas del sector. Se ha determinado que éstas poseen una firma química distinta a las aguas provenientes de perforaciones más profundas. Los análisis de calidad de aguas e isotopía indican que las aguas subterráneas de la Quebrada Sapunta circulan superficialmente. Conforme a lo anteriormente expuesto, las aguas de la Quebrada Sapunta no se mezclan con aguas de mayor profundidad. Solo existe una muy limitada zona de conexión de las aguas subterráneas de la cuenca Pampa Puno y la Quebrada Sapunta, correspondiente a la Vega Sapunta.

### 3.9 Niveles Piezométricos

#### 3.9.1 Aspectos Generales

En el área de estudio existen 23 pozos de monitoreo de niveles de agua subterránea y 9 pozos de bombeo, en las Figuras 3.22a y 3.22b se muestra la ubicación de los pozos. En la Tabla 3.7 se presentan las principales características de los pozos anteriormente mencionados: coordenadas de ubicación, tipo de pozo, cota terreno, profundidad del pozo, nivel freático histórico y diámetro del pozo. También se indica la fuente de donde se obtuvo la información de cada pozo.

Los niveles de agua subterránea se miden en todos los pozos del acuífero de Pampa Puno, con la diferencia, que en los pozos de monitoreo se miden niveles estáticos (NE) y en los pozos de bombeo que se encuentran en funcionamiento se miden niveles estáticos (NE, sin bombeo) y niveles dinámicos (ND, con bombeo).

La información utilizada se ha dividido en tres períodos: Período de Pre-Bombeo Técnico (01 de Enero de 2011 al 31 de Mayo de 2013); Bombeo Preliminar (01 de Junio de 2013 al 30 de Noviembre de 2013) y Bombeo Productivo (01 de Diciembre de 2013 al 30 de Noviembre de 2014).

El Período de Pre-Bombeo Técnico se caracteriza por presentar niveles de aguas subterráneas estables y sin grandes fluctuaciones. En la etapa de Bombeo Productivo, en la mayoría de los pozos de monitoreo

no se observan variaciones significativas en los niveles estáticos, en los que se presentan descensos las magnitudes van entre los 2 y 6 m, con excepción del pozo PUNO-02E que registra descensos de 10 m aproximadamente (los máximos descensos observados).

En el Anexo G se presentan los niveles de agua subterránea de los pozos del acuífero de Pampa Puno, señalando los períodos de bombeo.

### 3.9.2 Efectos del Bombeo en Pampa Puno sobre Pozos de Monitoreo en Sapunta

La información disponible muestra los marcados efectos del bombeo sobre los pozos de observación PUNO-08B y PUNO-13, que corresponden a los pozos cercanos a Sapunta. Estos mismos efectos no se observan en los pozos localizados en el sector de Quebrada Sapunta, los que por su ubicación debieran haber sentido el mismo tipo de cambios en sus niveles piezométricos. Lo anterior permite concluir que no se identifica una conexión hidráulica entre los sistemas acuíferos de Pampa Puno y Quebrada Sapunta. Esta última aseveración es basada en los efectos ya observados en el área cercana a los pozos actualmente en explotación.

A partir de la Figura 3.23 se concluye que a la fecha de este análisis (Noviembre de 2014) el efecto del bombeo en Pampa Puno no se ha manifestado en Quebrada Sapunta. La razón principal de esto sería la existencia de una estructura que bloquea los efectos del bombeo.

**Tabla 3.7**  
**Pozos de Producción y Monitoreo**

Nombre	Coordenadas*** (m)		Tipo de Pozo	Cota Terreno (msnm)	Profundidad (m)	N.F. Histórico (msnm)	Diámetro (pulg)
	Este	Norte					
YOCA-09	516.984	7.652.777	Monitoreo RCA	4046,80*	200*	3955,53	3,0*
YOCA-10	518.146	7.650.598	Monitoreo RCA	4090,70*	212*	4039,22	3,0*
PIB-2	518.106	7.650.085	Monitoreo	4096,52*	204*	4055,38	22,0*
PUNO-09B	521.001	7.648.159	Bombeo	4144,37**	230**	4032,62	16,0**
YOCA-08	518.955	7.647.854	Monitoreo RCA	4137,80*	218*	4047,51	3,0*
PUNO-10B	521.909	7.647.243	Bombeo	4103,04**	223**	4031,98	16,0**
PUNO-10E	521.951	7.647.213	Monitoreo RCA	4099,19**	300**	4031,93	2,5**
PUNO-04B	521.521	7.646.467	Bombeo	4099,16**	186**	4031,81	16,0**
PUNO-05E	519.031	7.646.424	Monitoreo RCA	4145,55**	181**	4058,84	1,5**
PUNO-11B	520.443	7.646.202	Bombeo	4122,17**	223**	4045,43	16,0**
PUNO-11E	520.412	7.646.161	Monitoreo RCA	4122,34**	300**	4045,67	2,5**
PSAP1	523.715	7.645.554	Monitoreo RCA	4030,40*	50*	4028,57	3,0*
PSAP2	523.653	7.645.504	Monitoreo RCA	4031,20*	50*	4029,17	3,0*
PUNO-13	522.911	7.645.375	Monitoreo RCA	4060,42**	126**	4031,28	3,0**
PSAP3	523.470	7.645.365	Monitoreo RCA	4032,50*	50*	4029,71	3,0*
PUNO-08B	521.932	7.645.237	Bombeo/Monitoreo	4080,05**	185**	4031,75	16,0**
PUNO-06B	521.203	7.644.155	Bombeo	4099,20**	250**	4045,31	16,0**
PUNO-19B	519.974	7.644.029	Monitoreo	4130,63*	230*	4047,07	14,0*
PUNO-19	519.991	7.644.022	Monitoreo	4129,00*	260*	4,045,04	3,0*
PUNO-21	519.525	7.642.985	Monitoreo	4144,00*	172*	4,044,92	3,0*
PUNO-07B	521.003	7.642.803	Bombeo	4101,76**	206**	4,045,18	16,0**
PUNO-20	520.478	7.642.013	Monitoreo	4125,10*	280*	4,044,72	3,0*

**Tabla 3.7**  
**Pozos de Producción y Monitoreo. Continuación**

Nombre	Coordenadas*** (m)		Tipo de Pozo	Cota Terreno (msnm)	Profundidad (m)	N.F. Histórico (msnm)	Diámetro (pulg)
	Este	Norte					
PUNO-02E	520.948	7.641.390	Monitoreo RCA	4119,20**	268**	4,044,77	1,5**
PUNO-02B	521.010	7.641.380	Bombeo	4118,72**	250**	4,044,80	16,0**
PUNO-3EA	522.099	7.641.335	Monitoreo RCA	4091,20*	132*	4,040,99	3,0*
PUNO-314B	518.454	7.641.279	Bombeo/Monitoreo	4201,23**	150**	4,145,37	16,0**
PUNO-01E	519.743	7.641.128	Monitoreo RCA	4139,98**	276**	4,043,71	1,5*
PUNO-18	521.094	7.640.022	Monitoreo	4110,20*	270*	4,043,65	3,0*
PUNO-17	521.261	7.638.948	Monitoreo	4107,00*	270*	4,043,88	3,0*
PUNO-15B	520.847	7.637.651	Monitoreo	4138,20*	226*	4,044,12	14,0*
PUNO-15	520.877	7.637.650	Monitoreo	4136,90*	288*	4,044,07	3,0*
PUNO-16	520.178	7.636.022	Monitoreo	4166,50*	300*	4,043,94	3,0*

(\*) Fuente Informe Actualización Modelo Conceptual y Modelo Numérico, Schlumberger (2010)

(\*\*) Fuente Informe Plan Alerta Temprana Pampa Puno, CODELCO (2014)

(\*\*\*) Datum PSAD 56

(-) Sin información



### 3.10 Parámetros Hidrogeológicos

#### 3.10.1 Conductividad Hidráulica

A partir de las pruebas hidráulicas realizadas en la zona del acuífero de Pampa Puno (acápite 3.6.3), se obtuvieron una serie de resultados de conductividades hidráulicas. En las Tablas 3.8, 3.9 y 3.10 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de hidráulicas.

**Tabla 3.8**  
**Resumen de Permeabilidades en Pampa Puno**

Pozo	K (m/d)
PUNO-02B	0,985
	0,813
	0,670
PUNO-04B	1,771
	12,096
PUNO-06B	0,933
PUNO-07B	0,327
PUNO-08B	0,085
	0,087
PUNO-09B	0,294
PUNO-10B	0,595
PUNO-11B	0,873
	0,181
PUNO-314B	0,009
PUNO-15B	2,851
PUNO-19B	0,173

Fuente: SWS (2012)

**Tabla 3.9**  
**Resumen de Permeabilidades en Pampa Puno, Pruebas Tipo Lefranc**

Pozo	K (m/d)		
	Nivel constante	Nivel Variable	
		Mín	Máx
DDH-P01	1,11E-02	2,29E-06	9,16E-06
	4,82E-02	7,92E-04	1,05E-03
DDH-P02	1,63E-03	7,92E-04	1,05E-03
	1,33E-02	9,94E-03	1,05E-02
	4,39E-02	3,02E-03	3,04E-02
DDH-P04	1,34E-02	2,59E-03	1,12E-02
DDH-P05	2,13E-03	1,61E-03	2,65E-03
	1,68E-03	1,43E-02	2,80E-02
DDH-P06	3,24E-02	7,80E-03	2,95E-02
	2,75E-02	1,34E-02	2,08E-02
	1,79E-02	1,71E-03	1,96E-02
	3,87E-03	1,15E-03	3,97E-03
	1,99E-02	4,91E-03	2,60E-02

Fuente: SWS (2012)

**Tabla 3.10**  
**Resumen de Permeabilidades en Pampa Puno, Pruebas Tipo Lefranc sin Packer**

Pozo	K (m/d)	
	Nivel Variable	
	Mín	Máx
DDH-P02	3,16E-03	1,05E-02
	3,89E-03	1,08E-02
	8,03E-03	7,40E-02
	4,03E-02	4,16E-02
DDH-P05	2,98E-04	7,47E-04
DDH-P07	1,07E-02	3,39E-02

Fuente: SWS (2012)

### 3.10.2 Coeficiente de Almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) es el volumen del agua que un acuífero puede entregar o retener del depósito general por unidad de superficie del acuífero y por unidad de cambio en la componente normal a esa superficie.

En el análisis realizado por SWS (2010), utilizando la información de campo, derivada de los diversos ensayos de bombeo con gasto variable, se determinó valores para el almacenamiento del acuífero para cada pozo. En la Tabla 3.11 se presentan el resumen obtenido del estudio.

**Tabla 3.11**  
**Resumen de Coeficientes de Almacenamiento en Pampa Puno**

Pozo	$S$
PUNO-2B	8,64E-4
	2,99E-3
	1,14E-2
PUNO-4B	4,38E-2
	1,67E-3
PUNO-6B	2,55E-3
PUNO-7B	1,72E-1
PUNO-8B	2,35E-1
	3,29E-1
PUNO-9B	5,00E-6
PUNO-10B	3,99E-6
PUNO-11B	1,33E-6
	4,99E-6
PUNO-15B	1,50E-4
PUNO-19B	5,00E-4

Fuente: SWS (2010)

A partir del estudio elaborado por M&A (2014), se realizaron diversos métodos de estimación de  $S_y$ , considerando como más adecuado al que utiliza como base los descensos observados, definiéndose previamente rangos aceptables de  $S_y$  a partir del tipo de suelo y su grado de consolidación. Conforme lo anterior, basándose en el análisis granulométrico realizado por SWS (2012) a partir de las muestras de los testigos DDH, se propone los rangos de valores para  $S_y$  que se presentan en la Tabla 3.12.

**Tabla 3.12**  
**Valores de Sy para los Distintos Sectores del Área de Estudio**

Sector	Profundidad (m)	Sy (%)	Sondaje
Pampa Puno - Centro	39-645	10-20	DDH-P02
Pampa Puno - Centro-Sur	30-532	10-20	DDH-P06
Pampa Puno - Este	36-110	10-20	DDH-P05
Pampa Puno - Escarpe	-	1-5	DDH-P07
Yocas - Centro	75-320	1-5	DDH-P07
Yocas - Escarpe	-	1-5	DDH-P01 y P04

Fuente: M&A (2014)

### 3.11 Recargas y Descargas

#### 3.11.1 Recargas por Precipitaciones

El método seleccionado para la estimación de la recarga es el método de la Curva Número (CN), del Soil Conservation Service (SCS), el cual es una alternativa simple, predecible y bien establecida. Posee una aplicabilidad para cuencas de más de 30 km<sup>2</sup> y depende de sólo un parámetro para evaluar las pérdidas de la precipitación total que cae sobre el área de estudio, las que están asociadas a la abstracción inicial y la infiltración. La precipitación efectiva sobre el área de estudio se estima en función de la precipitación acumulada (P), cobertura y uso de suelo (suelo desnudo), y de la humedad antecedente. Se ha definido utilizar las unidades hidrogeológicas como referencia del tipo de suelo predominante y asignarle a cada una de ellas un número de curva acorde a su definición.

Dado que este método está orientado principalmente para el cálculo de pérdidas de precipitación para eventos de tormentas y no específicamente a la realización de balances de agua, se ha incorporado el efecto de la evapotranspiración del área de manera de evaluar correctamente las pérdidas predominantes del área.

La estimación de la evapotranspiración se realiza a partir de los registros de evaporación potencial de la estación Pampa Puno. Se han agregado mensualmente los valores diarios y se ha determinado que la evaporación potencial para los meses lluviosos (entre Diciembre y Marzo), período asociado a la ocurrencia de la recarga al acuífero, es de 450 mm. Se ha estimado un factor de evaporación de 65%, con lo que se obtiene una evapotranspiración del sector de Pampa de Puno, que incide en las pérdidas de precipitación, de aproximadamente 290 mm/año.

Las ecuaciones básicas del método son las siguientes:

$$Pe = \frac{(P - la)^2}{P - la + S} \text{ (mm)}$$

$$S = \frac{25,400 - 254CN}{CN} \text{ (mm)}$$

Dónde:

Pe : Precipitación efectiva acumulada, mm.  
P : Precipitación  
Ia : Abstracción inicial, mm.  
S : Retención máxima potencial, una medida de la capacidad de la cuenca para retener y abstraer parte de la precipitación.

El valor recomendado para la abstracción inicial, de acuerdo a la conceptualización clásica del método del SCS es el 20%. No obstante a lo anterior, existen trabajos más recientes (Hawkins et al., 2002), que han llevado a cuestionar este valor típicamente recomendado para esta metodología, indicando que la abstracción inicial puede llegar a ser tan sólo un 5% de la capacidad máxima de retención de humedad del suelo. Por lo anterior, se define utilizar este último valor como representativo del área de interés.

La capacidad de retención del suelo (S) se calcula mediante el valor de la curva número (CN), un parámetro intermedio. Para suelos desnudos, se tiene que CN varía entre 72 y 94 (Chow, V. T., 1994) dependiendo de la capacidad de infiltración de los suelos. El valor de la curva número se corrige de acuerdo a la condición de humedad antecedente del suelo. Se considera antecedente de humedad I, por lo que se debe corregir el valor de CN, de acuerdo a la siguiente expresión (Chow, V. T., 1994):

$$CN_I = \frac{4,2CN_{II}}{10 - 0,058CN_{II}}$$

Dónde:

CN<sub>I</sub> : Valor de la Curva Número, para suelos secos.  
CN<sub>II</sub> : Valor de la Curva Número, para condiciones medias de humedad antecedente.

En la Tabla 3.13 se presentan los valores de recarga estimados para el acuífero Pampa Puno mediante el método de la Curva Número. Los resultados indican que la recarga es de 26,2 mm/año, correspondiente aproximadamente a un 20% de la precipitación media anual, considerando una superficie de 145 km<sup>2</sup> de la cuenca aportante, corresponde a un flujo de 120 l/s.

**Tabla 3.13**  
**Recarga Anual Media Sector de Pampa Puno, Método Curva Número**

Tipo de Suelo	Grupo Hidrológico	CN (II)	CN (I)	S (mm/año)	Ia (mm/año)	Exceso PP (mm/año)		Abstracción Continua (mm/año)		ET mm/año
						Banda 1	Banda 2	Banda 1	Banda 2	
Unidad 0	C	86	72	98,4	4,9	76,3	91,5	56,5	59,6	59,2
Unidad 1	A	75	56	201,6	10,1	49,5	61,3	78,2	84,7	59,2
Unidad 2	C	86	72	98,4	4,9	76,3	91,5	56,5	59,6	59,2
Unidad 3	A	76	57	191,0	9,5	51,5	63,6	76,7	82,9	59,2
Unidad 4	D	92	83	52,6	2,6	97,3	114,2	37,9	39,2	59,2

Tipo de Suelo	Balance Recarga (mm/año)		Distribución Área Cuenca Aportante Pampa Puno (%)		Recarga Pampa Puno (mm/año)		Caudal Recarga Pampa Puno (l/s)
	Banda 1	Banda 2	Banda 1	Banda 2	Banda 1	Banda 2	
Unidad 0	26,9	30,0	37,5	0,0	10,11	0	46,49
Unidad 1	48,6	55,1	19,7	0,1	9,57	0,05	44,25
Unidad 2	26,9	30,0	0,8	0,0	0,21	0	0,98
Unidad 3	47,1	53,3	5,1	1,2	2,42	0,65	14,14
Unidad 4	8,3	9,6	24,6	10,9	2,03	1,04	14,15
<b>Total</b>	<b>157,9</b>	<b>177,9</b>	<b>87,8</b>	<b>12,2</b>	<b>24,4</b>	<b>1,7</b>	<b>120,0</b>

Fuente: Elaboración Propia

### 3.11.2 Descargas por Bombeo

En el área de estudio existen 9 pozos de bombeo, de los cuales se encuentran en funcionamiento 7, los pozos que no se encuentran operando actualmente son el PUNO-08B y PUNO-314B. Entre los meses de Junio y Noviembre de 2013 se realizaron diversas pruebas de terreno que requirieron el bombeo esporádico desde algunos de los pozos ya habilitados. Esto se traduce en que algunos pozos de bombeo y de monitoreo presentan descensos, que se pueden asociar de manera clara al bombeo de pozos cercanos, en períodos previos al mes de Diciembre de 2013, cuando se inicia el bombeo continuo para producción.

Para todos los efectos de este documento se considera un “Período de Pre-Bombeo Técnico” (entre el 01 de Enero de 2011 al 31 de Mayo de 2013), un “Período de Bombeo Preliminar” (entre el 01 de Junio de 2013 y 30 de Noviembre de 2013) y un “Período de Bombeo Productivo” (entre 01 de Diciembre 2013 al 30 de Noviembre 2014).

En algunos pozos de bombeo fue necesario estimar el caudal de bombeo antes de Diciembre de 2013 (Período de Bombeo Preliminar), puesto que no se tienen los caudales aforados anteriores a esa fecha y los niveles de agua subterránea muestran que existió bombeo. En el caso del pozo PUNO-10B fue

necesario estimar su caudal de bombeo para los meses de Enero y Febrero de 2014, debido a que no se tiene información del caudal de extracción y los niveles de agua subterránea muestran que existió bombeo. En la Tabla 3.14 se presenta el programa de extracción de aguas subterránea del acuífero de Pampa Puno.

En las Figuras 3.24 a 3.30 se presentan los caudales diarios y promedios mensuales de extracción a de agua subterránea de los pozos de bombeo del acuífero de Pampa Puno, señalando los períodos de “Pre-Bombeo Técnico”, “Bombeo Preliminar” y “Bombeo Productivo”.

### 3.11.3 Descargas Naturales

A partir del análisis de la piezometría característica del área de estudio, es posible identificar que la dirección del flujo subterráneo es preferencialmente desde las zonas sur / poniente hacia el sector de la Quebrada Yocas, existiendo también una descarga hacia el sector de la Quebrada Sapunta.

**Tabla 3.14**  
**Programa de Bombeo**

Pozo	jun-13	jul-13	ago-13	sep-13	oct-13	nov-13	dic-13	ene-14	feb-14	mar-14	abr-14	may-14	jun-14	jul-14	ago-14	sep-14	oct-14	nov-14	Derecho
PUNO-02B*																			35
PUNO-07B*																			50
PUNO-06B*																			50
PUNO-11B**																			60
PUNO-04B**																			110
PUNO-10B***																			30
PUNO-09B																			50

Bombeo supuesto  
 Bombeo real

(\*) Se utilizó el caudal promedio del bombeo real (diciembre a abril de 2013) para estimar el caudal supuesto.

(\*\*) Derecho de aprovechamiento en (l/s), para los meses de "bombeo supuesto" se supondrá el 10% de este caudal.

(\*\*\*) Derecho de aprovechamiento en (l/s), para los meses de "bombeo supuesto" se supondrá el 25% de este caudal.



## 4. MODELO CONCEPTUAL

### 4.1 Aspectos Generales

Un modelo conceptual describe el funcionamiento y características de un sistema hidrogeológico que se desea analizar. De esta forma, en esta sección se utiliza la información presentada en los puntos anteriores para desarrollar el modelo conceptual que se utilizará para la modelación numérica del balance hídrico de los recursos subterráneos del acuífero de Pampa Puno.

Con base en la información hidrogeológica disponible se confeccionó el modelo conceptual del sistema acuífero, el cual incluye la extensión o límites del acuífero, la discretización vertical en términos del número de estratos a utilizar en el análisis posterior, así como toda la información sobre parámetros hidrogeológicos, pozos de bombeo, descargas desde el sistema, así como la identificación de los sectores y montos de las recargas.

La elaboración del modelo conceptual constó de tres pasos independientes, cuyo adecuado desarrollo permitió contar con bases sólidas para la elaboración de un modelo numérico robusto, representativo de la zona estudiada y defendible en forma objetiva ante autoridades y otros usuarios del sistema de interés. Los tres pasos se listan a continuación:

- Identificación del problema y formulación de objetivos.
- Definición del área de interés, revisión y recolección de datos disponibles.
- Elaboración del modelo conceptual.

El modelo conceptual resultó de la incorporación de la información geológica, hidrogeológica e hidrológica disponible, la que fue evaluada en su conjunto para dar soporte técnico a las decisiones posteriores que se tomen durante la elaboración del modelo de simulación hidrogeológico.

### 4.2 Extensión Areal del Sistema Acuífero a Estudiar

En la Figura 4.1 se muestra de manera aproximada el área de interés para el desarrollo del modelo conceptual del sistema acuífero de Pampa Puno. Tal como se ha señalado en los capítulos anteriores, en el área de estudio se identificaron cuatro unidades hidrogeológicas principales, las cuales han sido agrupadas en dos unidades acuíferas principales y una tercera unidad que representa el basamento rocoso del acuífero de Pampa Puno.

La geometría de los acuíferos desarrollados en estas unidades está fuertemente controlada por la ocurrencia de extensas fallas regionales de tendencia general NS y, de una manera secundaria, por el nivel estático en cada área. El control estructural principal de los cuerpos de agua viene dado por las fallas que definen el “graben tectónico”, donde se albergan los potentes depósitos sedimentarios, es decir, Falla Puno y Chocal por el Oeste y Falla Oeste por el lado oriental. Se reconocen subordinadamente estructuras menores, que definen la profundidad y espesores de las unidades, y que aparentemente sus movimientos relativos de estas en el tiempo son los que definen su forma específica.

En el sector de Sapunta se observa cierto grado de desconexión hidráulica debido a la Falla Oeste y a bloques alzados “horst” que generan una descarga menor. La descarga principal en esta área se produciría básicamente en superficie y/o subsuperficie con niveles freáticos elevados y más expuestos a evaporación, recargándose principalmente por precipitación directa desde el sector Sur y Norte. Esta desconexión hidráulica ha sido corroborada con la información de niveles de agua subterránea de los pozos de monitoreo ubicados en la vega Sapunta (PSAP-1, PSAP-2 y PSAP-3) y cercanos a ésta (PUNO-08B y PUNO-13). La información detallada de los niveles de agua subterránea de los pozos anteriormente mencionados se presenta en el Anexo G.

### **4.3 Esquema General del Funcionamiento Hidráulico del Sistema Subterráneo**

#### **4.3.1 Balance Hídrico**

El funcionamiento hidráulico del sistema subterráneo del acuífero de Pampa Puno, así como las variables más relevantes que lo conforman, se presenta gráficamente en la Figura 4.2. La figura anterior muestra que el balance hídrico del embalse subterráneo depende de términos que dan cuenta del aporte de agua a la napa subterránea (recarga) y de términos que dan cuenta de la extracción de agua subterránea (descarga) ya sea en forma natural o artificial. Adicionalmente se da cuenta del efecto del flujo subterráneo natural, tanto de entrada como salida al embalse subterráneo.

La información que se detalla a continuación en esta sección se divide en las dos componentes antes señaladas: recarga y descarga.

#### **4.3.2 Recargas**

La recarga hacia el acuífero de Pampa Puno está asociada principalmente a las infiltraciones que ocurren en la superficie del sector debido a las precipitaciones directas.

De acuerdo a la actualización de la recarga realizada en el presente estudio, mediante el método de la Curva Número (CN), se determinó un valor del orden de 120 l/s el cual será considerado como referencial para su validación en la etapa de modelación numérica. El área de recarga al acuífero de Pampa Puno considera la cuenca hidrográfica de la quebrada Sapunta, además de las áreas al interior de la cuenca subterránea considerada y que suman una superficie total de 145 km<sup>2</sup>. Se estableció un valor de recarga unitario anual de 26 mm/año el cual equivale a un 20% de la precipitación media anual.

De acuerdo a la información de precipitación presentada en el Capítulo 3, se observa que el año 2014 se caracteriza por ser seco. Como se mencionó anteriormente, el sector de la Vega Sapunta es principalmente recargado por precipitación directa. Los niveles de agua subterránea de los pozos ubicados en la Vega Sapunta (PSAP-1, PSAP-2 y PSAP-3) muestran que entre los meses de Enero a Marzo de los años 2011 a 2013, existe un ascenso en los niveles coincidente con la precipitación del sector. En el año 2014 no se observan ascensos de los niveles de agua subterránea, lo cual se representó con una tasa de recarga menor para el sector de Sapunta en el período comprendido entre Diciembre de 2013 a Marzo de 2014.

#### 4.3.3 Descargas

El desembalse del sistema hídrico subterráneo que se encuentra ubicado en el sector del acuífero de Pampa Puno, se realiza de forma natural y artificial. La descarga natural se produce a través de Yocas y Sapunta. La descarga artificial es producto de la extracción de agua subterránea a través de pozos de bombeo.

Las extracciones por bombeo se realizan desde 7 pozos de bombeo ubicados dentro del área de estudio, con registro de caudales explotados desde Diciembre de 2013 hasta Noviembre de 2014. En la Figura 3.21b se muestra la ubicación de los pozos de bombeo y en la Tabla 3.14 se presenta el programa de bombeo.

#### 4.4 Propiedades Hidrogeológicas

Para el estudio de cualquier tipo de escurrimiento subterráneo es necesario conocer las propiedades que determinan el flujo, entre ellas destacan la permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

##### 4.4.1 Permeabilidad

Se define la permeabilidad como el cociente entre transmisividad y el espesor saturado. En el área de estudio los valores de conductividad hidráulica calculados mediante ensayos hidráulicos en el acuífero de Pampa Puno se encuentran entre 0,001 m/día y 12 m/día. Los ensayos hidráulicos se realizaron en puntos específicos del área de estudio, por cual se considera representativo de los materiales encontrados en el sector, utilizar un rango de conductividad hidráulica de 0,001 m/d a 100 m/d para las dos unidades acuíferas principales. En el caso del basamento del sistema subterráneo se considera adecuado utilizar un rango de conductividad hidráulica de  $1 \times 10^{-5}$  a  $1 \times 10^{-4}$ .

##### 4.4.2 Coeficiente de Almacenamiento

En el área de estudio los valores del coeficiente de almacenamiento obtenido a través de los ensayos hidráulicos en el acuífero de Pampa Puno se encuentran entre de  $1,3 \times 10^{-6}$  a  $3,3 \times 10^{-1}$ .

##### 4.4.3 Volumen Almacenado

El volumen almacenado representa la cantidad de agua subterránea embalsada en el acuífero, y se calcula estimando el volumen comprendido entre la superficie freática y el basamento considerado (potencia del acuífero) multiplicado por el almacenamiento específico del acuífero.

El cálculo del volumen almacenado se realizó a través del cálculo de la diferencia de volumen entre la superficie freática (obtenida del régimen permanente, teniendo en cuenta la exclusión de las celdas secas) y la superficie del basamento, multiplicándolo por el almacenamiento específico ( $S_y$ ) asociado a cada unidad hidrogeológica. Los valores de  $S_y$  utilizados son los ajustados en la calibración del régimen transiente del modelo numérico.

Con esta información, se determinó que el volumen de agua almacenada en el acuífero de Pampa Puno considerado en el presente estudio es de  $841 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

## 5. MODELO NUMÉRICO DE FLUJO

### 5.1 Aspectos Generales

La elaboración del modelo de simulación numérico incluye la definición dentro de la estructura del software de los límites de la zona de modelación, la discretización horizontal y vertical, la distribución espacial de parámetros hidrogeológicos, la asignación de condiciones de borde y la incorporación de las acciones externas al sistema modelado, lo que incluye las recargas y descargas.

Con base en la información disponible se ha supuesto que el sistema de aguas subterráneas en el acuífero de Pampa Puno es un medio poroso tradicional, lo que permite utilizar herramientas clásicas en la modelación de este sistema como el programa MODFLOW, desarrollado por McDonald y Harbaugh pertenecientes al U.S. Geological Survey (1988).

En el caso particular de este estudio se utiliza el software Visual MODFLOW, desarrollado por la empresa canadiense Waterloo Hydrogeologic Inc. El modelo Visual MODFLOW, es una herramienta computacional muy útil y fácil de operar, por sus características visuales y de manejo de datos.

Para completar la fase de modelación numérica se procede a calibrar y validar el modelo, para lo cual se seleccionan períodos de tiempo que dispongan de información suficiente.

### 5.2 Idealización Sistema Físico Hidrogeológico

#### 5.2.1 Área de Modelación

El área de modelación corresponde al sistema acuífero de Pampa Puno, ubicado en el límite entre la Primera y Segunda Región. Los límites geográficos del modelo se determinaron de acuerdo a la extensión de los acuíferos analizados. La zona de interés para la modelación está comprendida entre las coordenadas 7.634.000 – 7.656.000 Norte y 514.000 – 526.000 Este (DATUM PSAD-56). La Figura 5.1 muestra el área seleccionada para la modelación incluyendo la definición de la zona activa (lugar donde se desarrolla flujo de agua subterránea) e inactiva (que actúa como una condición de no flujo) del mismo.

El área activa del modelo que se presenta en la Figura 5.1, se definió identificando todos los sectores de la cuenca hidrológica en donde el modelo conceptual determinó la presencia de rellenos no consolidados en condición saturada, factibles de constituir acuíferos. Este criterio excluyó los sectores más elevados e impermeables de la cuenca. Cabe señalar que la recarga considerada como caudal de ingreso se estima en base de la cuenca hidrológica total y no en base al sector activo. La recarga de las zonas no modeladas se ingresa como flujo lateral en los bordes del dominio activo, para mantener la recarga calculada de un 20% de la precipitación anual y que es 120 l/s.

## 5.2.2 Discretización Espacial

### 5.2.2.1 *Discretización Espacial Horizontal*

El modelo numérico del sistema acuífero de Pampa Puno se ha discretizado mediante una malla de diferencias finitas con diferentes tamaños de celdas. La malla está compuesta por celdas de 100 m x 100 m, la cual ha sido refinada gradualmente hacia el sector de la Quebrada Sapunta, donde el tamaño de las celdas es de 50 m x 25 m, dando un total de 320 filas y 160 columnas. La Figura 5.2 muestra la malla de simulación utilizada para el modelo, observándose en esta figura los límites del área de modelación, incluyendo la definición de las zonas activas e inactivas del mismo.

### 5.2.2.2 *Discretización Espacial Vertical*

En cuanto a la discretización vertical del modelo numérico, en el área de estudio se identificaron cuatro unidades hidrogeológicas principales, las cuales han sido agrupadas en dos unidades acuíferas principales y una tercera unidad que representa el basamento rocoso del acuífero de Pampa Puno.

En la Figura 5.3 se muestra la localización de perfiles que ayudan a visualizar la geometría vertical del área de modelación del acuífero de Pampa Puno. La Figura 5.4 muestra dos perfiles horizontales (A – A y B – B), mientras que la Figura 5.5 muestra un perfil vertical (C – C), los que caracterizan la geometría vertical impuesta al modelo del acuífero de Pampa Puno.

## 5.2.3 Discretización Temporal

Temporalmente el modelo numérico en régimen transiente del acuífero de Pampa Puno incorpora un período de 1,5 años (18 meses), abarcando desde Junio de 2013 hasta Noviembre de 2014. En el período de simulación, la discretización temporal en intervalos o períodos de estrés, están determinados por la reglas de bombeo y recargas, siendo estas variables constantes en cada intervalo. Los períodos de estrés incorporados son 79, los que tienen una frecuencia semanal. Cada uno de estos intervalos fue subdividido en 7 pasos de tiempo, los cuales corresponden a pasos de cálculos internos del modelo.

Cabe mencionar, que la información utilizada para representar el régimen permanente del acuífero de Pampa Puno, corresponde al período entre el 01 de Enero de 2011 al 31 de Mayo de 2013. Este período se caracteriza por presentar niveles de aguas subterráneas estables y sin grandes fluctuaciones.

## 5.2.4 Propiedades Hidrogeológicas

Los valores de conductividades hidráulicas utilizados como iniciales en el modelo del acuífero de Pampa Puno, corresponden a los obtenidos en la calibración del modelo realizado por SWS en el año 2010. La distribución inicial de la conductividad hidráulica se presenta en las Figuras 5.6a a 5.6b. En estas Figuras los colores representan un valor diferente para los parámetros hidrogeológicos asignados y que posteriormente serán calibrados para lograr un ajuste adecuado de los niveles de agua subterránea medidos y simulados.

#### 5.2.5 Condiciones de Borde

Las condiciones de borde corresponden a sectores, dentro del sistema a modelar, en el cual es posible identificar características que pueden ser estimadas de manera independiente y que constituyen la base del proceso de modelación.

De acuerdo con el entendimiento conceptual del sistema, el flujo subterráneo que ocurre en los rellenos acuíferos del sector de Pampa Puno, descarga subterráneamente tanto en la Quebrada Yocas en el borde Norte de la cuenca así como en el sector de la Quebrada Sapunta.

Las características hidrogeológicas de estos sectores permiten inferir que la descarga en la Quebrada Sapunta debiese ser muy menor en caudal, en relación con la descarga subterránea en Yocas. La descarga en Sapunta corresponde sólo al afloramiento local que se observa en el sector de la vega y al flujo subterráneo pasante por los rellenos de la Quebrada.

En Yocas, la salida es representada en el modelo numérico como una condición de borde de tipo General Head, proyectándose el gradiente hidráulico del sector hacia aguas abajo y fijando el nivel de referencia a 1.000 m de distancia en esa dirección. De esta forma, se permiten variaciones de nivel y caudal en las celdas en la salida, lo cual no se lograría con otros tipos de condiciones de borde, como por ejemplo, la condición de borde de tipo Constant Head. La Figura 5.7 presenta la condición de borde impuesta en Yocas.

En Sapunta se representó el afloramiento de agua subterránea como una condición de borde de tipo Dren. En este tipo de condición de borde se deben ingresar la conductancia (representa la capacidad de transferencia de agua entre el acuífero y el dren) y la cota de elevación del dren. El caudal extraído depende de la carga hidráulica por sobre la cota de elevación del dren y es proporcional a la conductancia. Una vez que el nivel desciende por debajo de la cota del dren, éste deja de extraer agua del sistema. La cota del dren se impone según la estratigrafía del sector, mientras que la conductancia es un resultado de la calibración del modelo. En la Figura 5.8 se muestra la ubicación de la condición de borde de tipo Dren.

#### 5.2.6 Acciones Externas

En el caso de las acciones externas se debe considerar la información de bombeos, recargas naturales o artificiales y descargas. En este caso se debe disponer de datos medidos en terreno o estimados a partir de información secundaria que permitan cuantificar los montos de estas acciones.

La recarga desde la superficie, debido a la percolación de la precipitación efectiva fue determinada en el presente estudio y se representó como una variable temporal en el primer estrato del modelo hidrogeológico del acuífero de Pampa Puno. En la Figura 5.9 se muestra la distribución espacial de las áreas de recarga utilizadas en el primer estrato del modelo numérico.

Se utilizó el mismo valor de la tasa de recarga para cada área de recarga durante todo el período de simulación, exceptuando el área de Sapunta, como se mencionó anteriormente en el Capítulo 4.

Los bombes o extracciones desde pozos fueron representados como descargas puntuales variables en el tiempo. En la Figura 5.10 se muestran los pozos de bombeo utilizados en el modelo numérico. El caudal promedio extraído desde los pozos de bombeo del acuífero de Pampa Puno durante el período “Bombeo Producción” es de 230 l/s.

### 5.3 Calibración y Validación

#### 5.3.1 Régimen Permanente

La calibración en régimen permanente del modelo del acuífero de Pampa Puno consideró la definición de nuevas zonas de conductividad y la modificación de los valores de las conductividades hidráulicas, permitiendo de este modo que los valores de los niveles de agua en los pozos de la red de monitoreo puedan ser adecuadamente reproducidos.

La calibración del modelo hidrogeológico se realizó en régimen permanente, para lo cual se dispuso de 32 puntos con información medida de los niveles de agua subterránea en el acuífero de Pampa Puno. La ubicación de los pozos de observación se muestra gráficamente en la Figura 5.11.

Cabe mencionar, que la información utilizada para calibrar el régimen permanente del acuífero de Pampa Puno, corresponde a los niveles de agua subterránea medidos durante el período del 01 de Enero de 2011 al 31 de Mayo de 2013. Este período se caracteriza por presentar niveles de aguas subterráneas estables y sin grandes fluctuaciones.

Durante la calibración del modelo hidrogeológico se modificó los valores de la conductividad hidráulica hasta conseguir que los valores medidos y simulados de los niveles de agua en los 32 puntos fueran lo más parecidos posibles entre ellos. Las distribuciones finales de la conductividad hidráulica obtenidas del proceso de calibración para los tres estratos del modelo se presentan gráficamente en la Figura 5.12a y 5.12b.

Al finalizar el proceso de calibración del modelo numérico mediante el proceso de prueba y error, se obtuvieron ajustes globales satisfactorios entre los valores simulados y medidos, lo que se mide a través de diversos indicadores de bondad de ajuste. El indicador más utilizado para medir la calidad del ajuste es el denominado error cuadrático medio normalizado (NRMS) el que alcanzó un valor de 1,621%, lo que se considera como adecuado para una calibración en condiciones de régimen permanente.

En la Figura 5.13 se muestra el RMS Normalizado obtenido en el proceso de calibración y una comparación gráfica entre los valores medidos y simulados de los niveles de agua para el modelo numérico de Pampa Puno. En la Tabla 5.1 se presentan los valores observados y calculados de los niveles de agua para los pozos de observación utilizados en el proceso de calibración. Los niveles de agua simulados de la etapa de calibración del régimen permanente del modelo actualizado se presentan gráficamente para los tres estratos en la Figura 5.14.



**Tabla 5.1**  
**Niveles de Agua Subterránea Observados y Calculados**

<b>NOMBRE</b>	<b>OBSERVADOS (msnm)</b>	<b>CALCULADOS (msnm)</b>	<b>CALC.-OBS. (m)</b>
PIB-2(M)	4055,38	4053,99	-1,39
PSAP1(M)	4028,57	4030,20	1,63
PSAP2(M)	4029,17	4031,05	1,88
PSAP3(M)	4029,71	4032,08	2,37
PUNO-01E(M)	4043,71	4048,29	4,58
PUNO-02B(M)	4044,80	4045,27	0,47
PUNO-02E(M)	4044,77	4045,22	0,45
PUNO-04B(M)	4031,81	4031,72	-0,09
PUNO-05E(M)	4058,84	4059,46	0,62
PUNO-06B(M)	4045,31	4042,11	-3,20
PUNO-07B(M)	4045,18	4042,78	-2,40
PUNO-08B(M)	4031,75	4033,69	1,94
PUNO-09B(M)	4032,62	4029,64	-2,98
PUNO-10B(M)	4031,98	4031,39	-0,59
PUNO-10E(M)	4031,93	4031,44	-0,49
PUNO-11B(M)	4045,43	4040,35	-5,08
PUNO-11E(M)	4045,67	4040,63	-5,04
PUNO-13(M)	4031,28	4032,86	1,58
PUNO-15(M)	4044,07	4049,39	5,32
PUNO-15B(M)	4044,12	4049,39	5,26
PUNO-16(M)	4043,94	4049,72	5,78
PUNO-17(M)	4043,88	4047,89	4,01
PUNO-18(M)	4043,65	4047,54	3,89
PUNO-19(M)	4045,04	4046,81	1,77
PUNO-19B(M)	4047,07	4047,36	0,30
PUNO-20(M)	4044,72	4043,32	-1,40
PUNO-21(M)	4044,92	4043,18	-1,74
PUNO-314B(M)	4145,37	4142,10	-3,27
PUNO-3EA(M)	4040,99	4046,53	5,54
YOCA-08(M)	4047,51	4045,19	-2,32
YOCA-09(M)	3955,53	3955,21	-0,32
YOCA-10(M)	4039,22	4036,22	-3,00

### 5.3.2 Régimen Transiente

#### 5.3.2.1 Parámetros de Calibración

La calibración en régimen transiente del modelo actualizado se realizó para el período comprendido desde Junio de 2013 hasta Mayo de 2014, considerando las condiciones de borde y acciones externas indicadas previamente en el presente Capítulo, para lo cual se dispuso de 29 puntos con información medida de los niveles de agua subterránea en el acuífero de Pampa Puno. Cabe mencionar que para la calibración del régimen transiente solo se utilizaron niveles estáticos medidos en los pozos.

Durante la calibración del modelo hidrogeológico en régimen transiente se modificó los valores de los coeficientes de almacenamientos hasta conseguir ajustar las tendencias de descensos de los niveles de agua producidos por el bombeo del campo de pozos. Las distribuciones finales del coeficiente de almacenamiento obtenidas del proceso de calibración se presentan gráficamente en las Figuras 5.15a a 5.15b.

Como complemento a la fase de calibración se llevó a cabo la validación del modelo de simulación. La validación del modelo numérico del acuífero de Pampa Puno se realizó en régimen transiente para el período comprendido desde Junio de 2014 hasta Noviembre de 2014, considerando las condiciones de borde y acciones externas indicadas previamente en el presente Capítulo, para lo cual se dispuso de 24 puntos. La ubicación de los pozos de observación utilizados en la etapa de calibración y validación del modelo de simulación se muestra gráficamente en la Figura 5.16.

El indicador utilizado para medir la calidad del ajuste entre los valores simulados y medidos durante las fases de calibración y validación fue el Normalized RMS (Root Mean Squared) el que alcanzó un valor de 1,623% para el período comprendido entre Junio de 2013 hasta Noviembre de 2014. En la Figura 5.17 se muestra el RMS Normalizado obtenido en los procesos de calibración y validación en régimen transiente y una comparación gráfica entre los valores medidos y simulados de los niveles de agua para el modelo numérico del acuífero de Pampa Puno. En la Tabla 5.2 se presentan los principales indicadores de bondad de ajuste de las etapas de calibración, validación y del período total de modelación.

**Tabla 5.3**  
**Principales Indicadores de Bondad de Ajuste**

Parámetro	Calibración Jun 2013 a May 2014	Validación Jun 2014 a Nov 2014	Período Total Jun 2013 a Nov 2014
Número de Pozos	29	24	32
Número de Residuales	699	185	916
Promedio de Errores de Residuales (m)	0,890	1,404	0,974
Error Medio Absoluto (m)	2,588	2,488	2,541
Raíz Error Cuadrático Medio (RMS) (m)	3,110	3,023	3,091
RMS Normalizado (m)	1,633	1,588	1,623

Fuente: Elaboración Propia

#### 5.3.2.2 Equipotenciales Simuladas

Los niveles de agua simulados al final de las etapas de calibración y validación del régimen transiente se presentan gráficamente para los tres estratos en la Figura 5.18. En estas figuras se observa que las equipotenciales del primer y segundo estrato presentan un cambio respecto a las equipotenciales obtenidas en el régimen permanente en el sector del campo de pozos, éstos cambios están asociados a explotación de los pozos de bombeo.

#### 5.3.2.3 Descensos de Niveles de Aguas Subterráneas

En el caso del modelo numérico se dividió el área de modelación del acuífero de Pampa Puno en tres sectores (Norte, Centro y Sur) para poder analizar mejor los resultados de los descensos de los niveles simulados, los cuales se muestran en la Figura 5.19. En las Figuras 5.20 a 5.26 se presentan los resultados de los descensos absolutos de los niveles medidos y simulados de algunos pozos de observación durante la etapa de calibración y validación del régimen transiente del modelo hidrogeológico.

Cabe mencionar, que durante el proceso de calibración se dio mayor prioridad en lograr un mejor ajuste en los pozos de observación más cercanos a los pozos de bombeo, lo cual se refleja en los resultados obtenidos de los ajustes de los descensos de los niveles de agua, como por ejemplo los pozos: PUNO-13, PUNO-19B y PUNO-02E.

Respecto a los pozos de observación que se encuentran más alejados del campo de pozos de bombeo, como por ejemplo el pozo PUNO-16 (Figura 5.26), no se lograron tan buenos ajustes de los descensos de los niveles de estos pozos.

En el Anexo H se presentan los descensos de los niveles de agua subterránea medidos y simulados de los pozos del acuífero de Pampa Puno, señalando los períodos de calibración y validación.

#### 5.3.2.4 Niveles de Aguas Subterráneas

En el caso de los niveles de aguas subterráneas, al igual que en los descensos de los niveles, se dio mayor prioridad en el ajuste de los niveles de los pozos de observación más cercanos a los pozos de bombeo, por cual se obtuvieron mejores ajustes en los pozos cercanos al campo de pozos

En las Figuras 5.27 a 5.33 se presentan los resultados de los niveles medidos y simulados de algunos pozos de observación del modelo hidrogeológico.

En el Anexo I se presentan los niveles de agua subterránea medidos y simulados de los pozos del acuífero de Pampa Puno, señalando los períodos de calibración y validación.

#### 5.3.2.5 Resumen Niveles y Descensos de Aguas Subterráneas Simulados

Los resultados obtenidos del modelo numérico del acuífero de Pampa Puno, muestran que en general se logró representar correctamente los efectos de la extracción de agua subterránea desde el campo de pozos, lo que se refleja en los niveles y descensos de aguas subterráneas simulados.

### 5.4 Balance Hídrico

El balance hídrico del sistema subterráneo del acuífero de Pampa Puno depende de términos que dan cuenta del aporte de agua a la napa subterránea (recarga) y de términos que dan cuenta de la extracción de agua subterránea (descarga) en forma natural.

Una vez calibrado el modelo hidrogeológico del acuífero del área de estudio, es posible cuantificar los flujos de entrada y salida del sistema acuífero, y por ende conocer el balance hídrico del sistema.

La información resumida del balance hídrico general en régimen permanente del sector acuífero de Pampa Puno se presenta en la Tabla 5.4. En la Figura 5.34 se presentan los errores de cierre del balance hídrico del modelo en régimen transiente para el período de calibración y validación. En las Figuras 5.35 y 5.36 se presentan los caudales de salida a través de las condiciones de borde que representan a Sapunta y Yocas, respectivamente.

**Tabla 5.4**  
**Balance Hídrico General**

<b>Entradas</b>	<b>m<sup>3</sup>/d</b>	<b>l/s</b>
Recarga	10.378	120
<b>Total</b>	<b>10.378</b>	<b>120</b>

<b>Salidas</b>	<b>m<sup>3</sup>/d</b>	<b>l/s</b>
Yocas	10.115	117
Sapunta	250	3
<b>Total</b>	<b>10.365</b>	<b>120</b>

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los resultados anteriores es posible cerrar este informe con una serie de conclusiones y recomendaciones acerca de la utilidad de la herramienta desarrollada y sus posibles usos para el análisis del comportamiento de los recursos hídricos subterráneos del acuífero de Pampa Puno.

### 6.1 Conclusiones

Tomando en consideración los antecedentes entregados en este informe, es posible establecer las siguientes conclusiones con respecto a los modelos de simulación hidrogeológicos:

- A partir de la revisión y evaluación de los modelos conceptuales y numéricos existentes del acuífero de Pampa Puno se actualizó el modelo hidrogeológico.
- La información disponible permitió actualizar el modelo numérico de simulación hidrogeológica que representa el acuífero de Pampa Puno, utilizando para ello el software comercial Visual MODFLOW.
- La actualización del modelo numérico ha sido posible debido a la disponibilidad de información geológica, hidrológica e hidrogeológica, la que ha sido integrada para permitir la elaboración de un modelo conceptual que ha sido la base del modelo numérico.
- En el área de estudio se identificaron cuatro unidades hidrogeológicas principales, las cuales han sido agrupadas en dos unidades acuíferas principales y una tercera unidad que representa el basamento rocoso del acuífero de Pampa Puno.
- El volumen de agua almacenada en el acuífero de Pampa Puno, estimada en el presente estudio, es de  $841 \times 10^6 \text{ m}^3$ .
- La actualización del modelo numérico tuvo como objetivo actualizar: los datos de niveles de agua subterránea y los caudales de bombeo hasta Noviembre de 2014, la geometría (incluyendo la estructura inferida que separa los sectores de Pampa Puno y Vega Sapunta), así como la recarga del acuífero en base a la nueva información generada en el área de estudio.
- El modelo numérico actualizado fue calibrado en régimen permanente mediante un proceso de prueba y error para determinar los valores de la conductividad hidráulica. Al finalizar el proceso de calibración, se obtuvo un RMS Normalizado de 1,62%, lo que se considera como adecuado para una calibración en condiciones de régimen permanente.
- El modelo numérico actualizado fue calibrado en régimen transiente, para el período comprendido desde Junio de 2013 hasta Mayo de 2014, mediante un proceso de prueba y error para determinar los valores del coeficiente de almacenamiento. Como complemento a la fase calibración se llevó a cabo la validación del modelo numérico en régimen transiente, para el período comprendido desde Junio de 2014 hasta Noviembre de 2014. Al finalizar el proceso de calibración y validación, se obtuvo un RMS Normalizado de 1,62%, lo que se considera como adecuado para una calibración en condiciones de régimen transiente. Los resultados obtenidos del modelo numérico del acuífero de Pampa Puno, muestran que en general se logró representar correctamente los efectos de la extracción de agua subterránea desde el campo de pozos, lo que se refleja en los niveles y descensos de aguas subterráneas simulados.

## 6.2 Recomendaciones

Con respecto a recomendaciones al modelo numérico del acuífero de Pampa Puno es posible indicar lo siguiente:

- Como todo modelo de simulación estas herramientas deben ser actualizadas y recalibradas con nueva información que se vaya generando durante los próximos años.
- Continuar con la medición de los niveles de aguas subterráneas en los pozos de monitoreo y bombeo del acuífero de Pampa Puno.
- Realizar la medición de los niveles de agua subterránea en los pozos de bombeo, cuando éstos no se encuentren en funcionamiento (N.E.).
- Se recomienda la construcción de pozos de monitoreo cercanos a pozos de bombeo, que en la actualidad no cuenten con un pozo de monitoreo cercano.
- Mejorar el ajuste de los niveles de descensos de agua subterránea simulados en el sector del pozo PUNO-16.
- Realizar una inspección en terreno del pozo YOCA-10, ya que los niveles registrados muestran un descenso de los niveles y no se encuentran pozos de bombeo cercanos a este pozo de monitoreo.

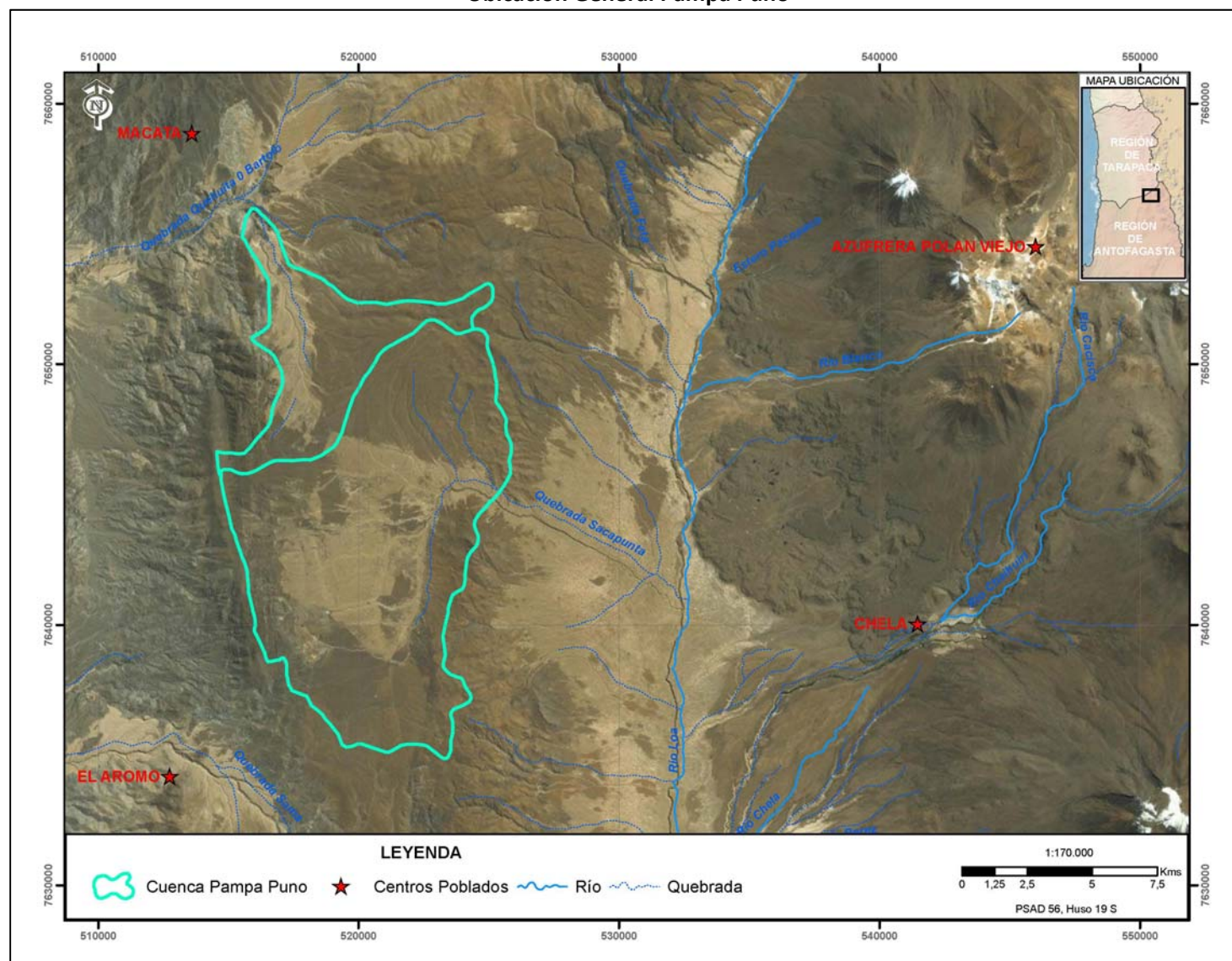
## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- INGEOREC. (2001). Hidrogeología y Modelo de Simulación Pampa Puno.
- SWS. (2010). Actualización Modelo Conceptual y Modelo Numérico.
- SWS. (2012).Informe Hidrogeológico del Acuífero Pampa Puno.
- M&A.(2014). Alternativas para Estimar el Parámetro Specific Yield (Sy) en el Acuífero de Pampa Puno, Región II, Chile.
- HIDROMAS. (2015). Niveles de Agua Subterránea y Caudales de Bombeo Pampa Puno.

# FIGURAS

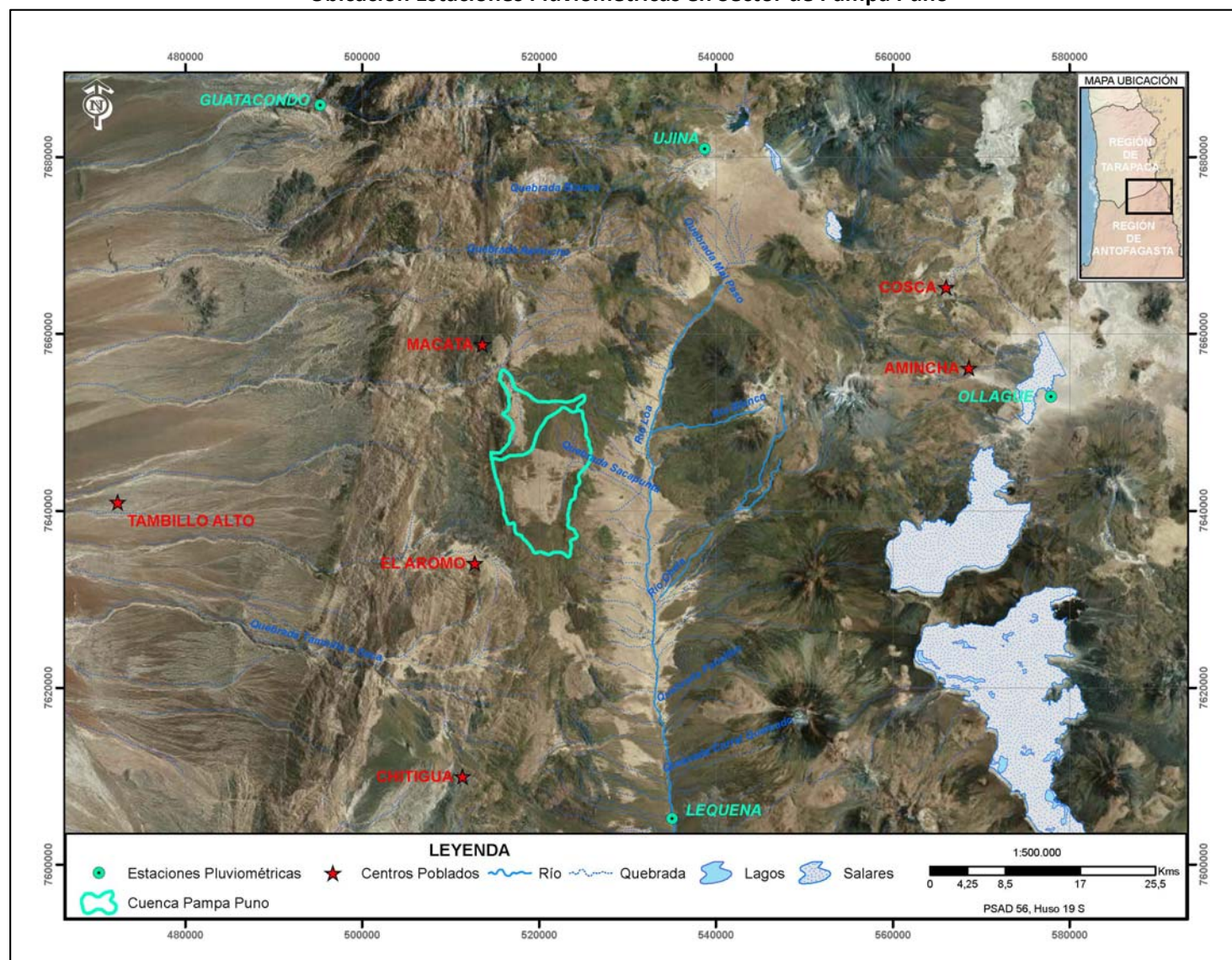


**Figura 1.1**  
**Ubicación General Pampa Puno**



Fuente: Elaboración Propia

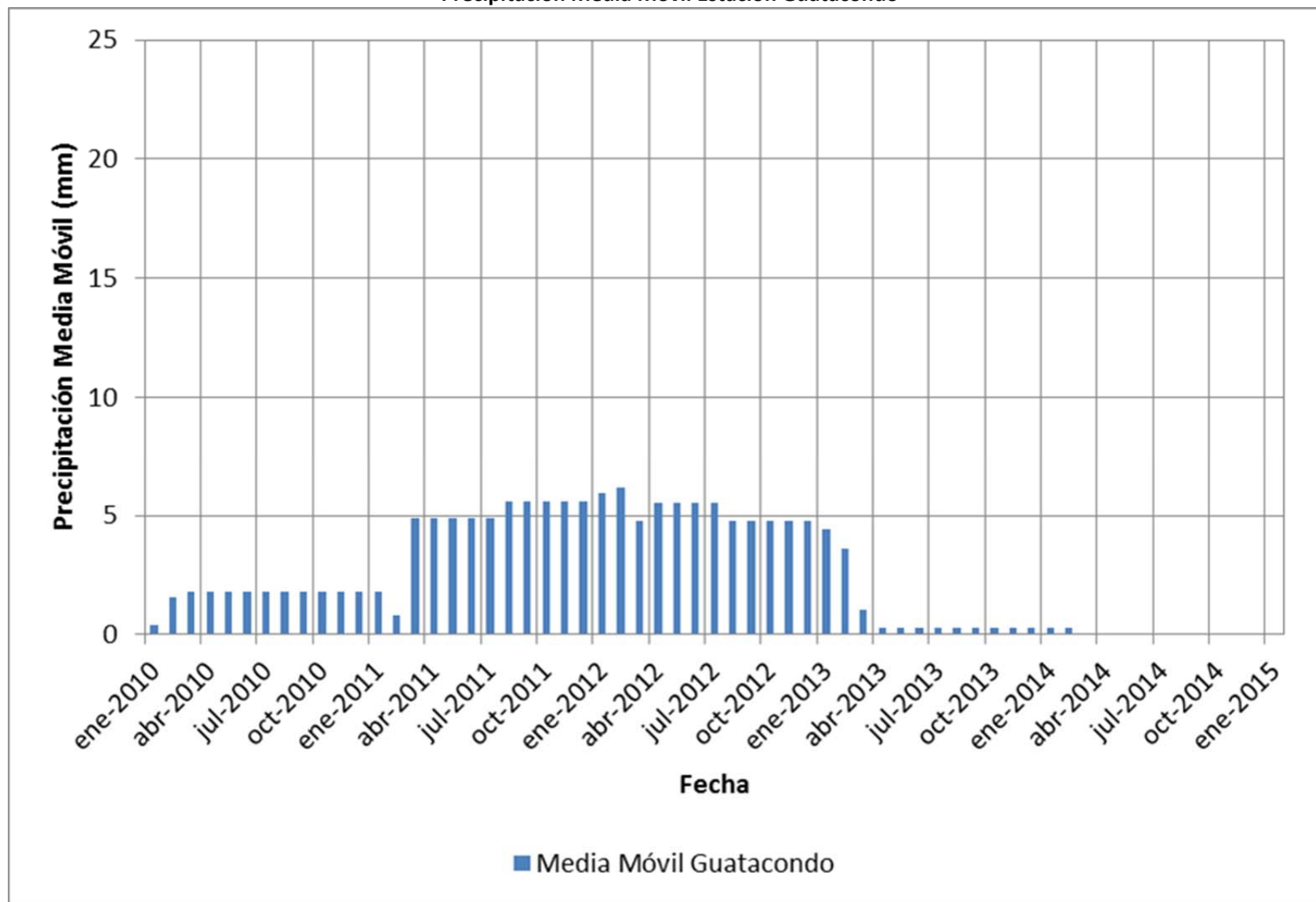
**Figura 3.1**  
**Ubicación Estaciones Pluviométricas en Sector de Pampa Puno**



Fuente: Elaboración Propia

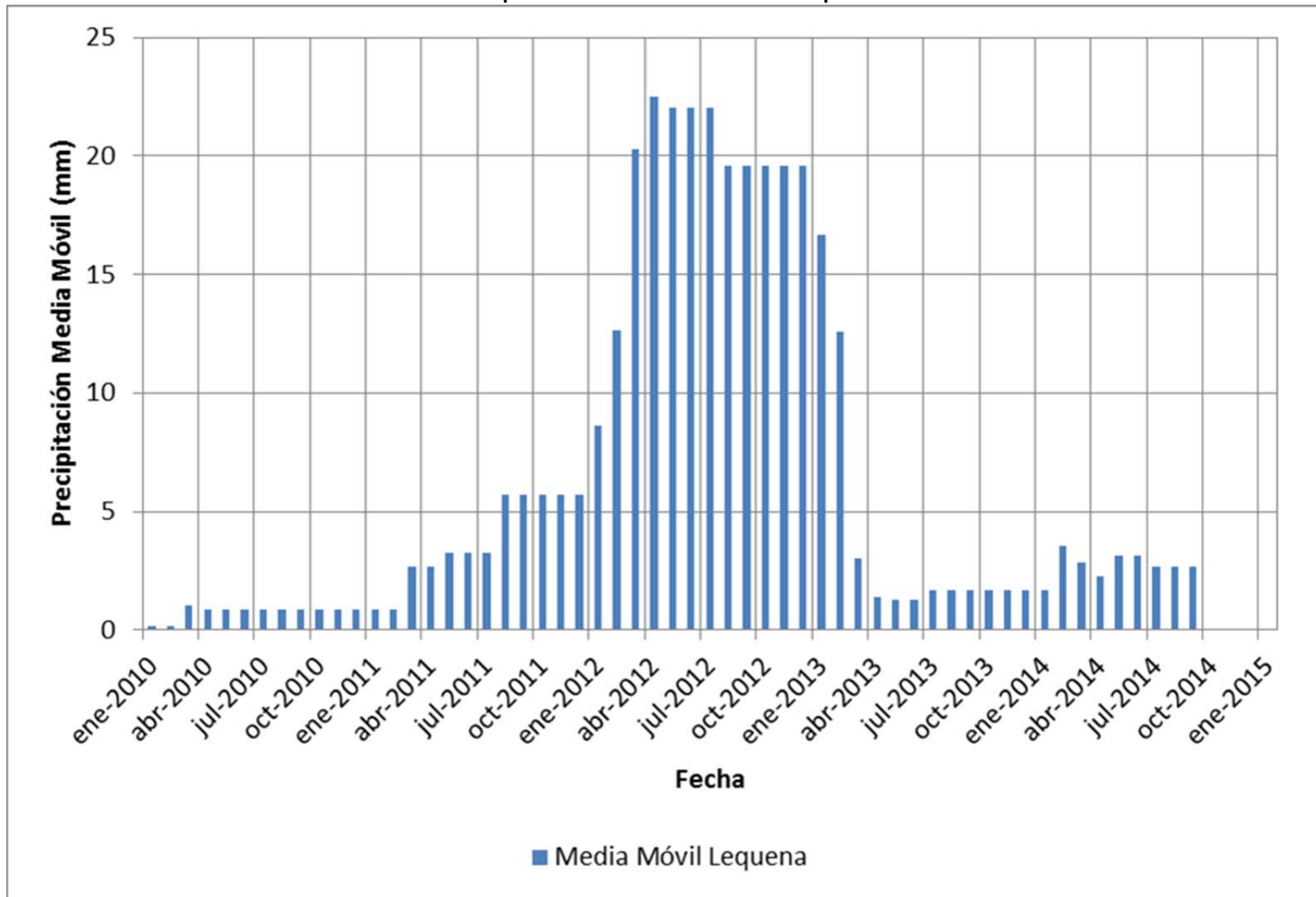


**Figura 3.2**  
**Precipitación Media Móvil Estación Guatacondo**



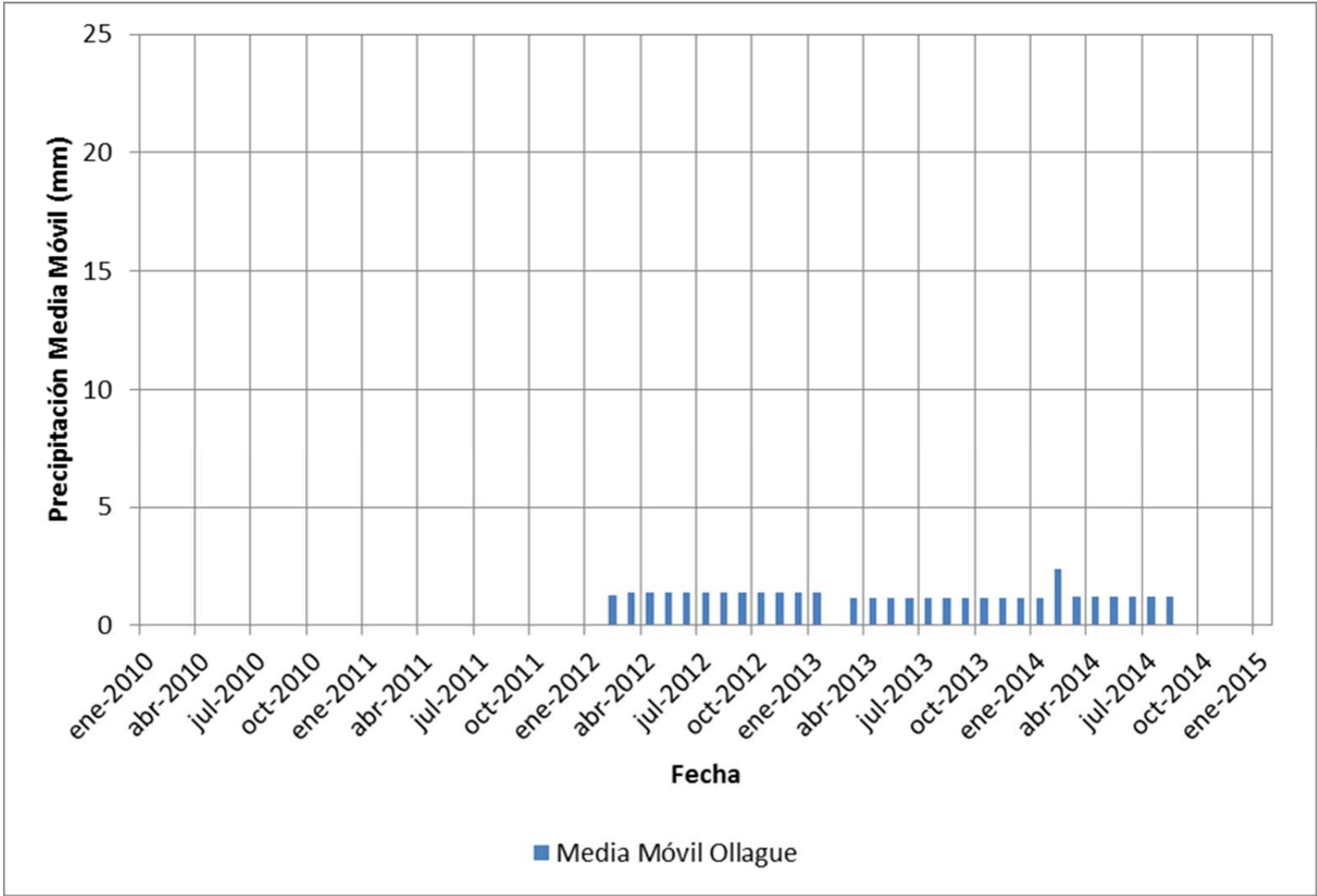
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.3**  
**Precipitación Media Móvil Estación Lequena**



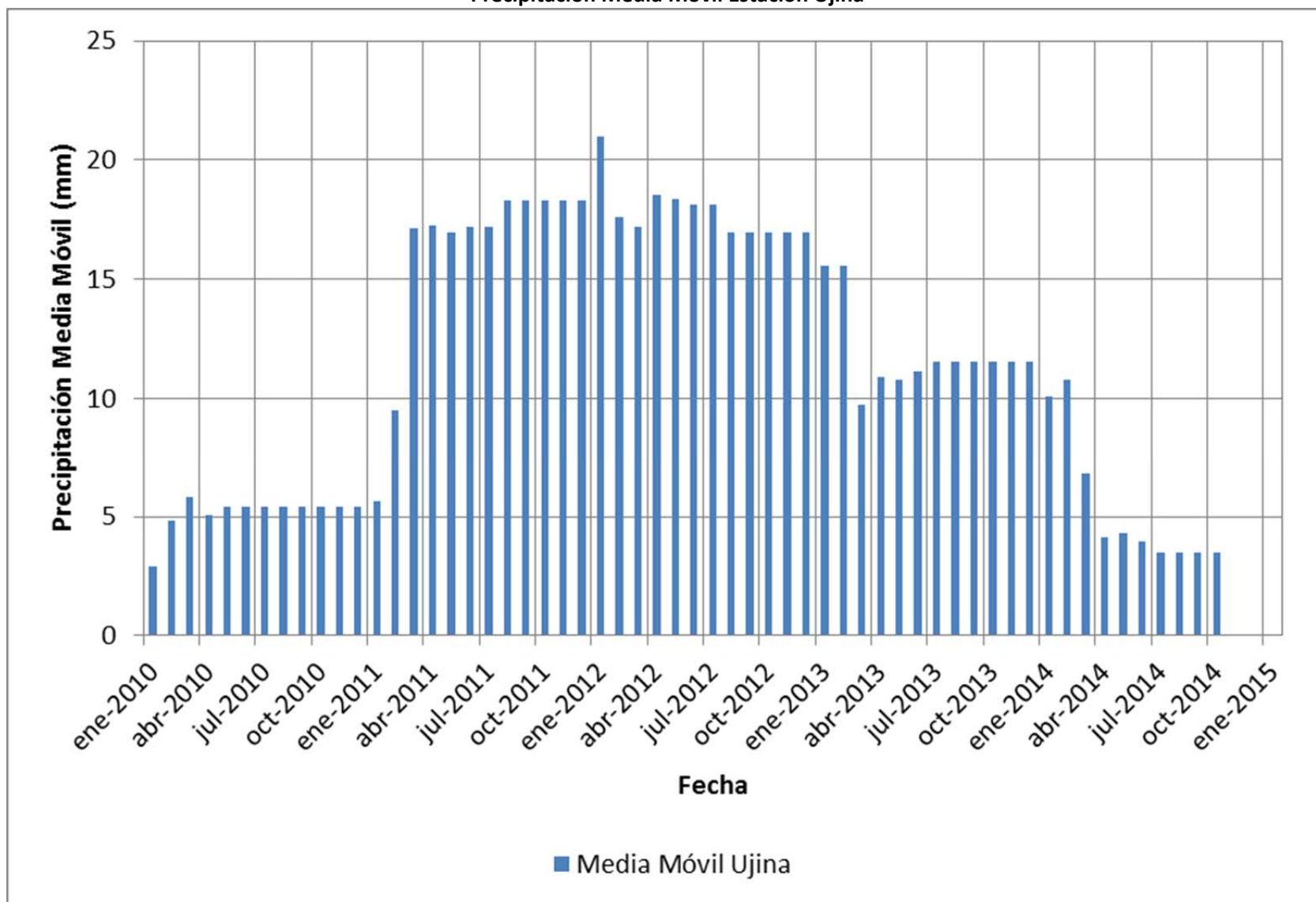
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.4**  
**Precipitación Media Móvil Estación Ollague**



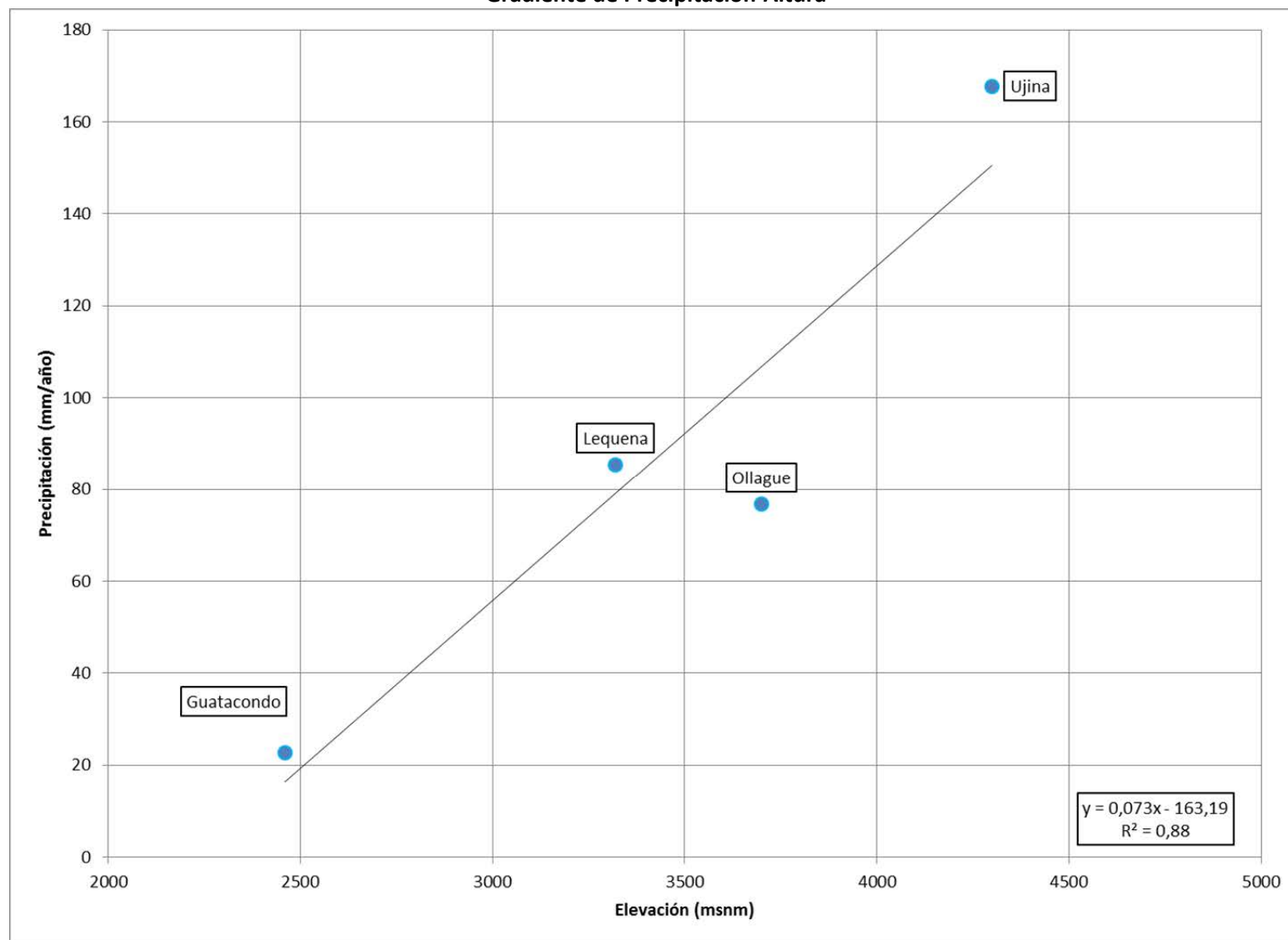
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.5**  
**Precipitación Media Móvil Estación Ujina**



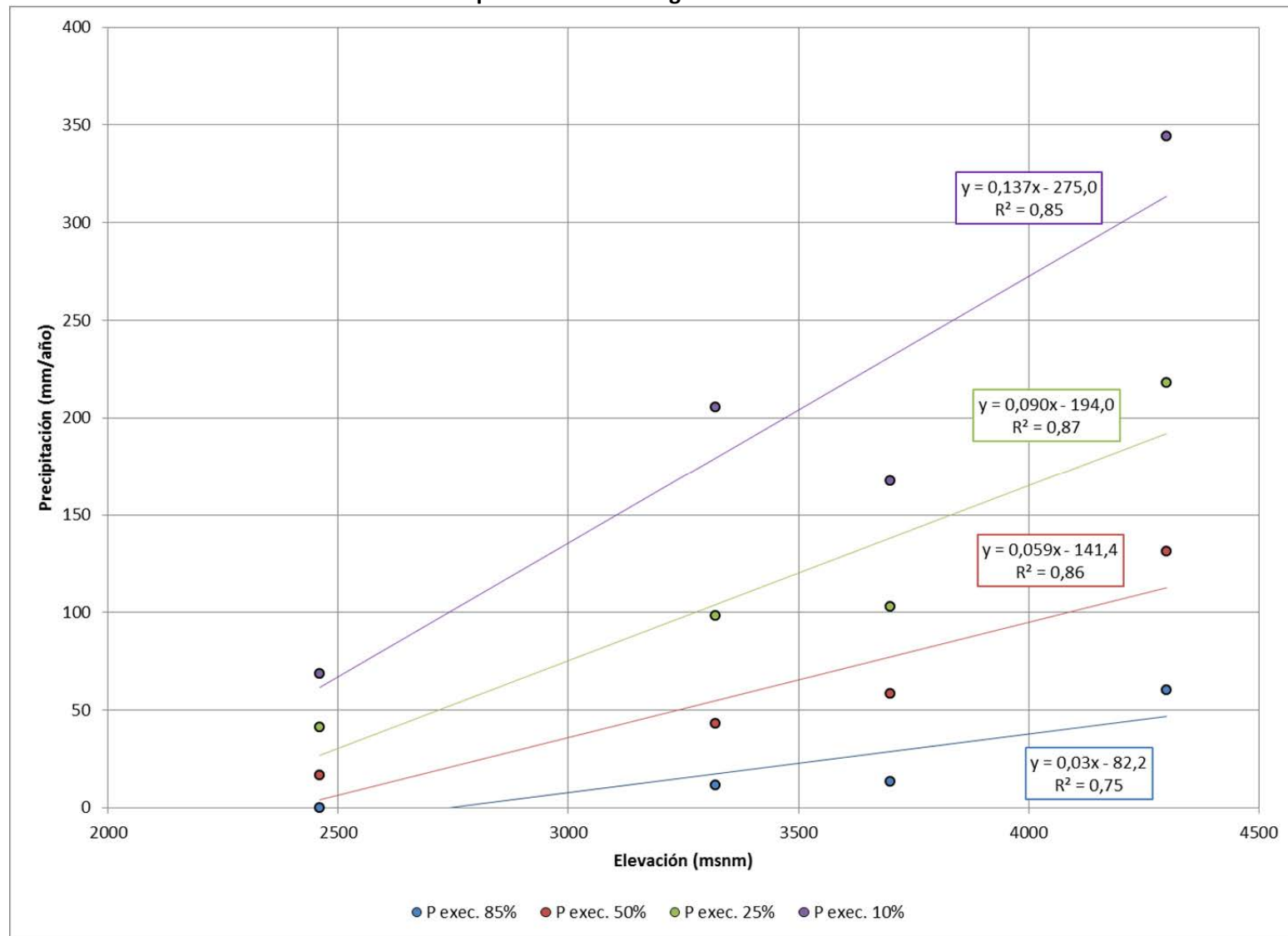
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.6**  
**Gradiente de Precipitación-Altura**



Fuente: Elaboración Propia

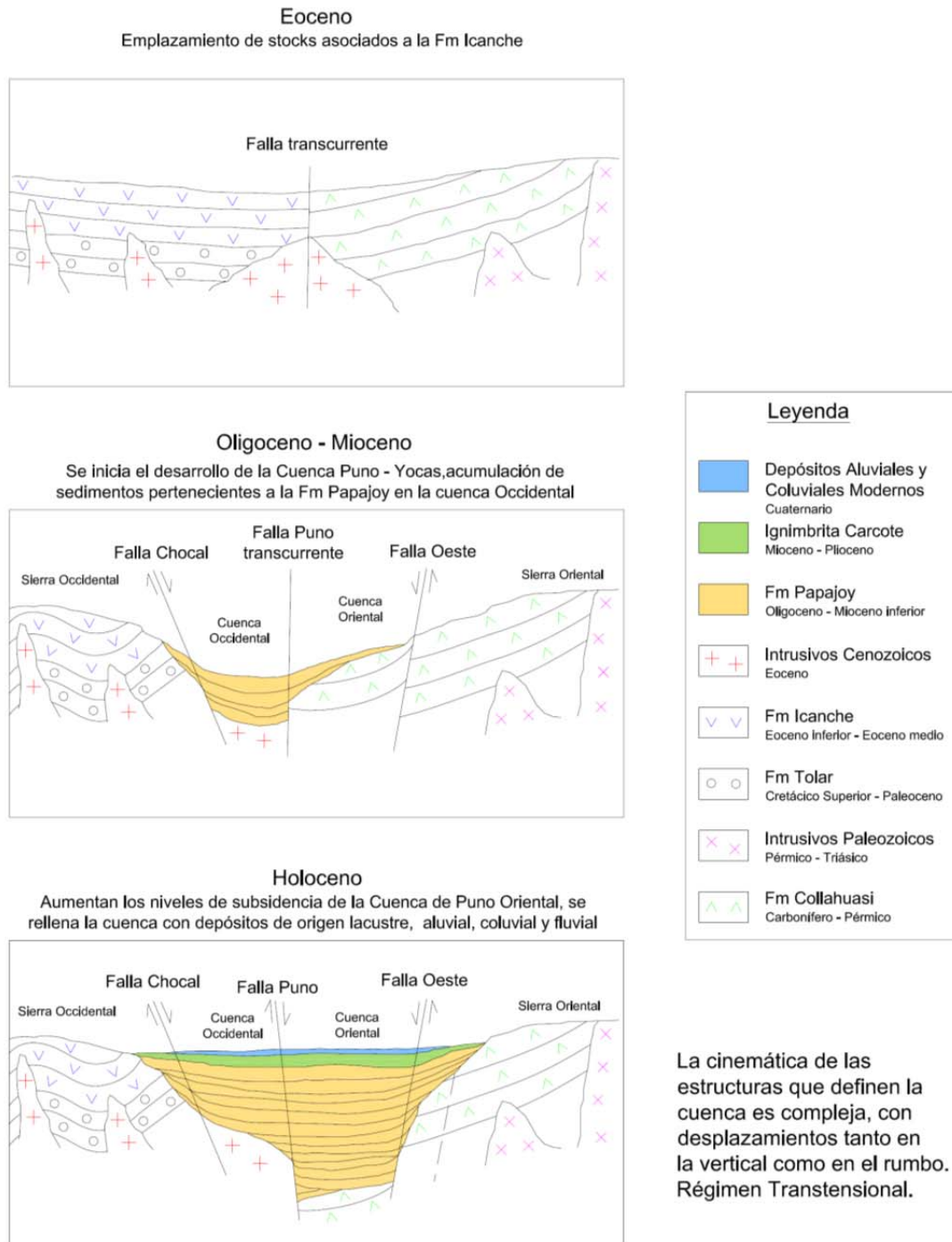
**Figura 3.7**  
**Gradiente Precipitación - Altura Según Probabilidad de Excedencia**



Fuente: Elaboración Propia

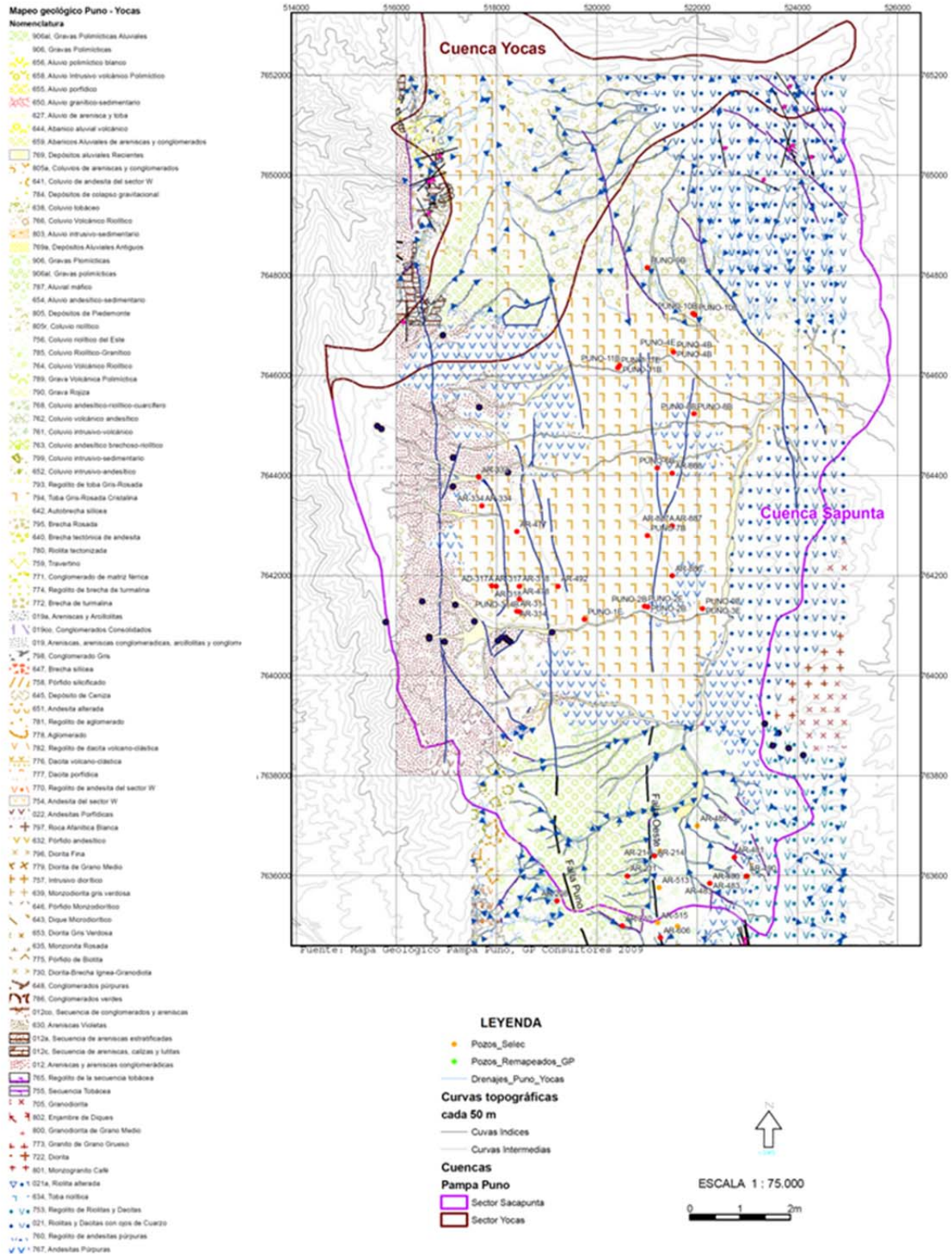


**Figura 3.8**  
**Evolución de la Cuenca Puno y Yocas**



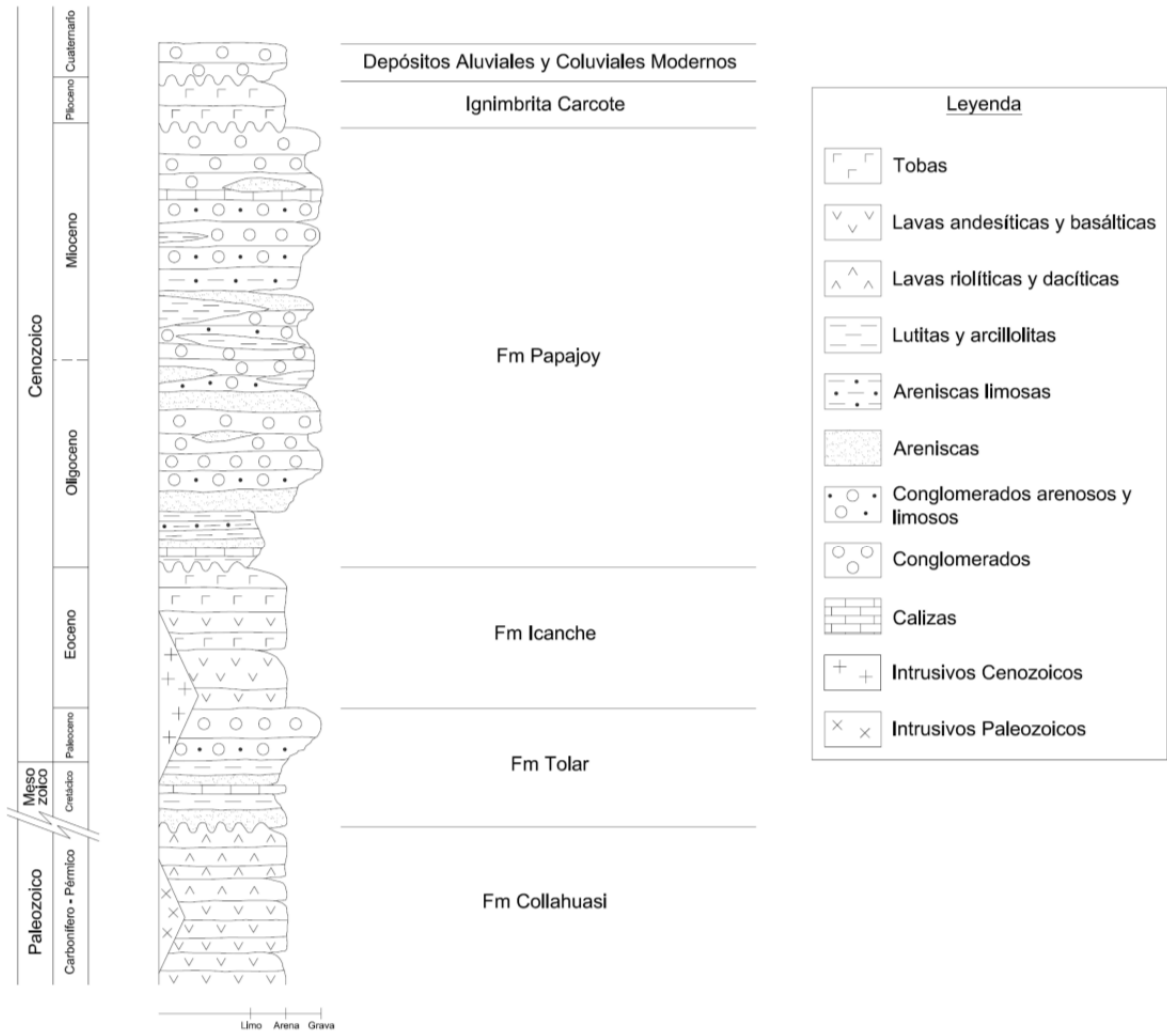
Fuente: SWS (2010)

Figura 3.9  
Mapa Geológico Pampa Puno



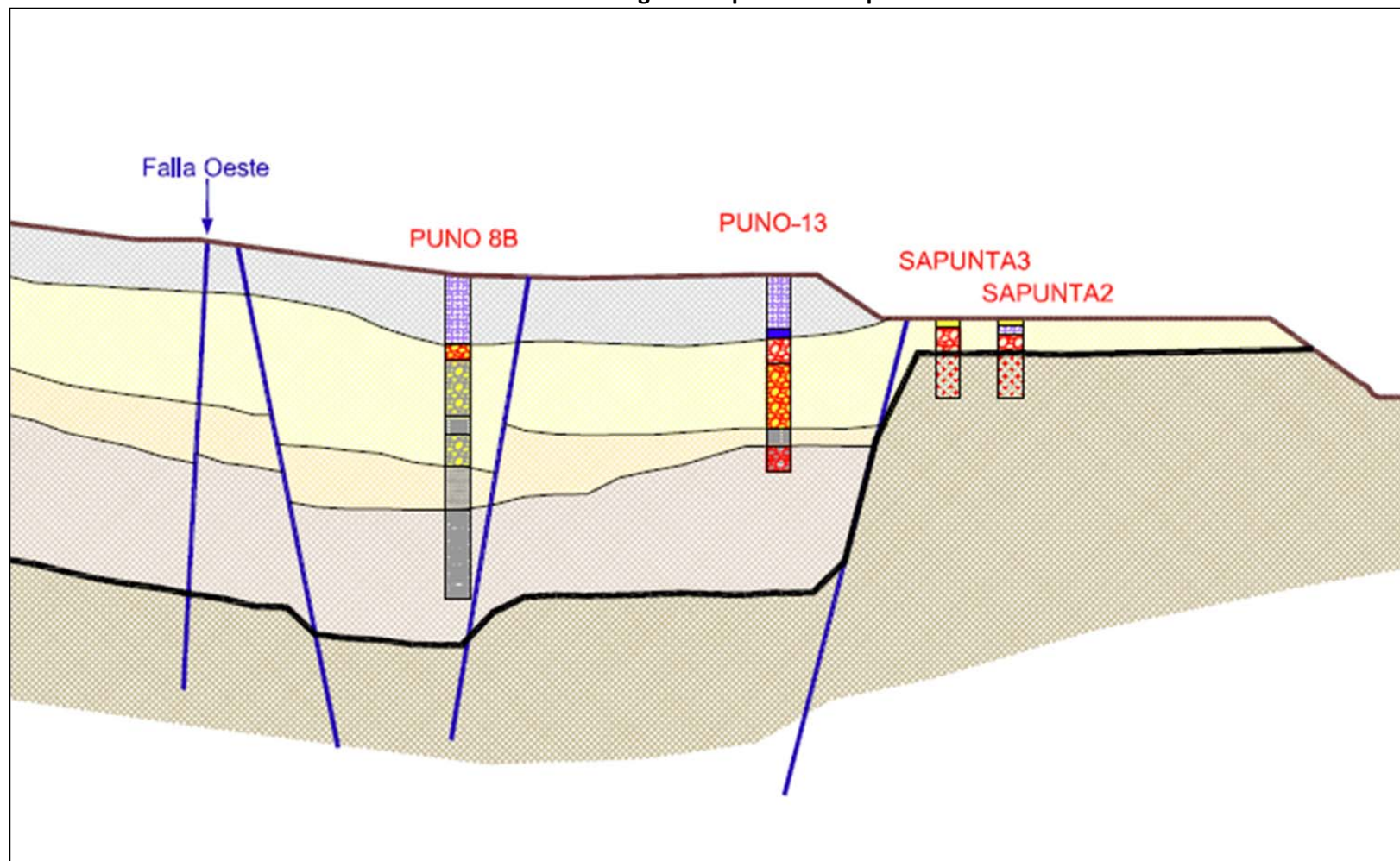
Fuente: SWS (2010)

**Figura 3.10**  
**Columna Estratigráfica de la Cuenca**



Fuente: SWS (2010)

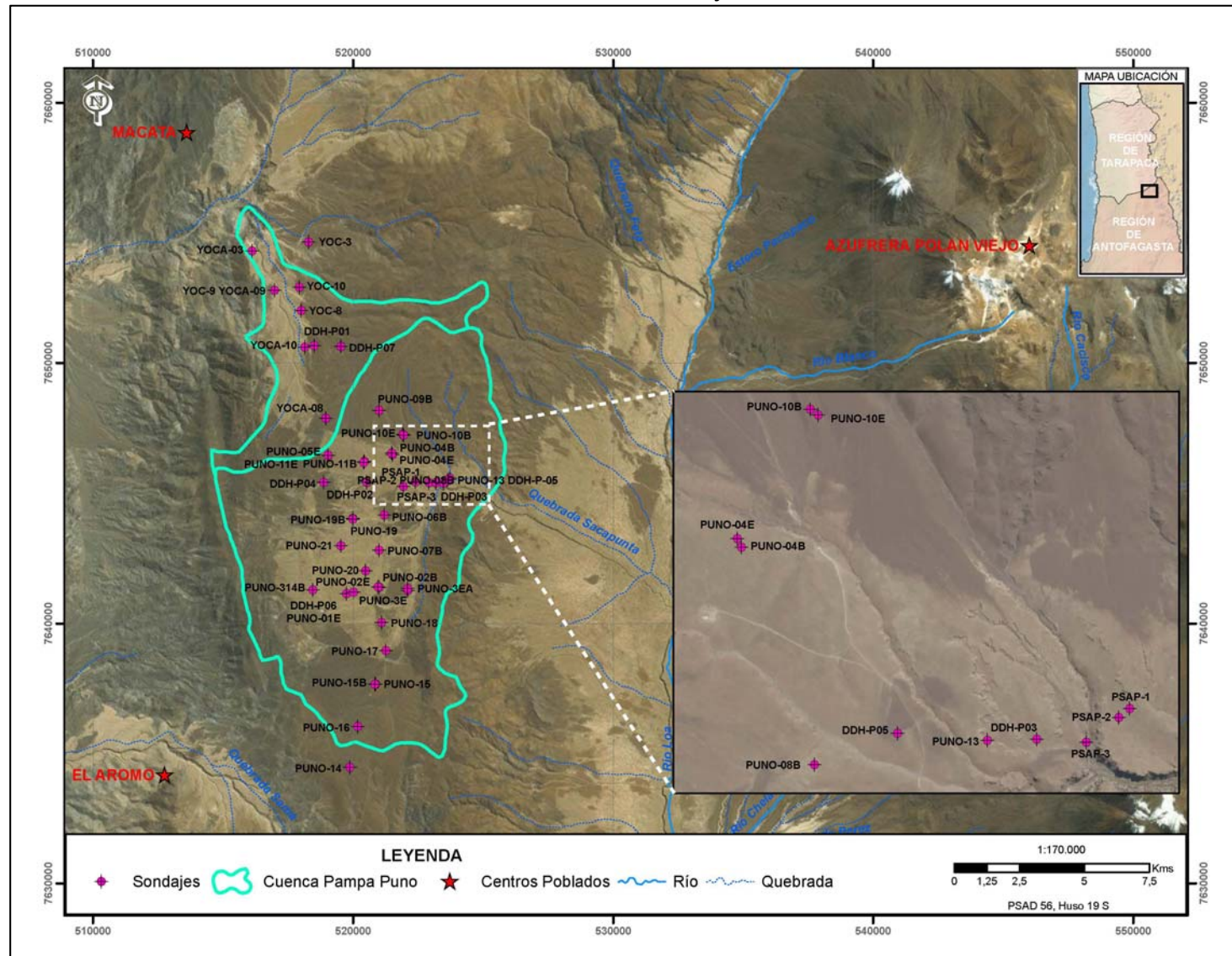
Figura 3.11  
Sección Geológica Pampa Puno – Sapunta



Fuente: SWS (2010)



**Figura 3.12**  
**Ubicación de Sondajes**



Fuente: Elaboración Propia



Figura 3.13  
Ubicación de los Perfiles Hidrogeológicos

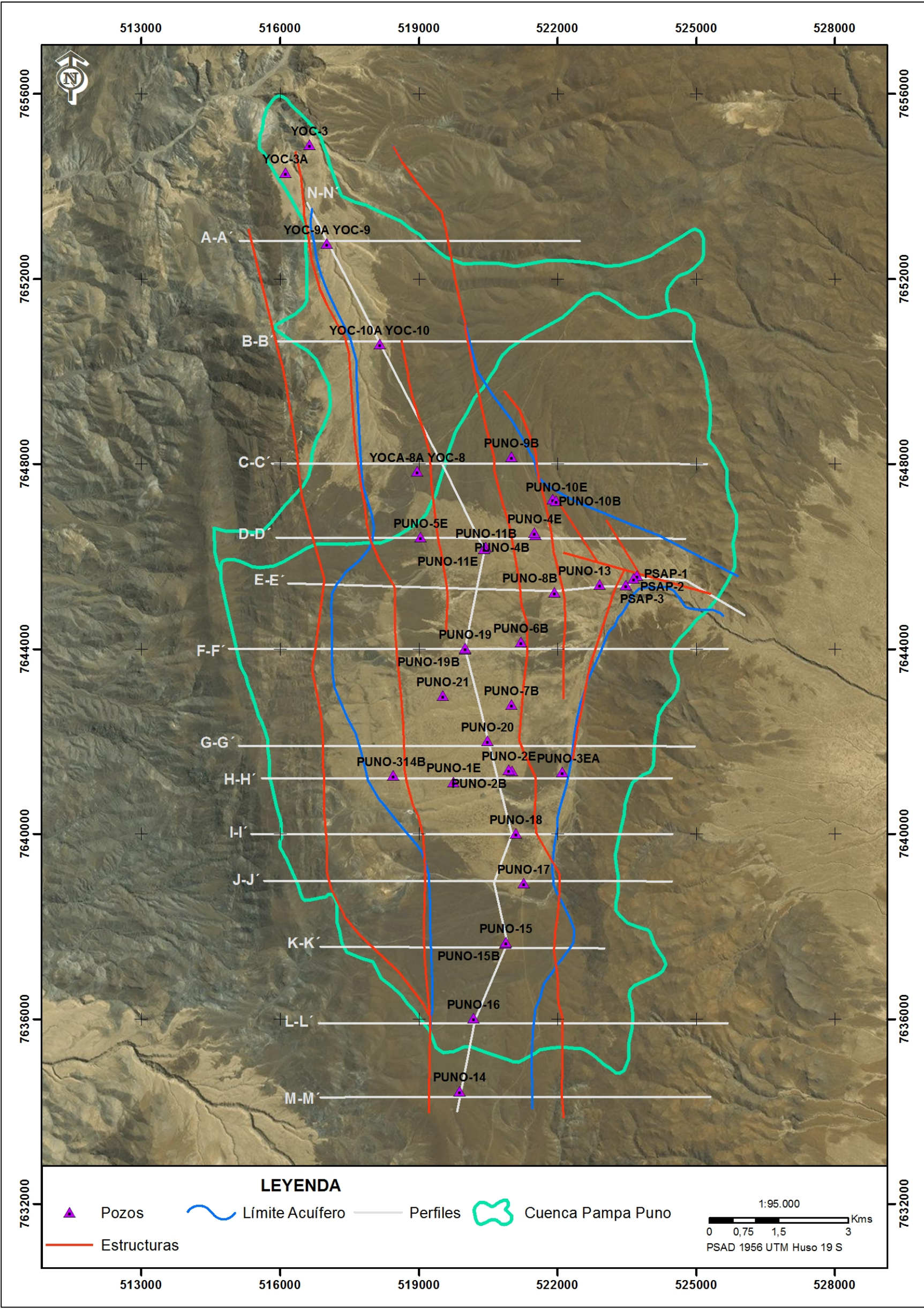
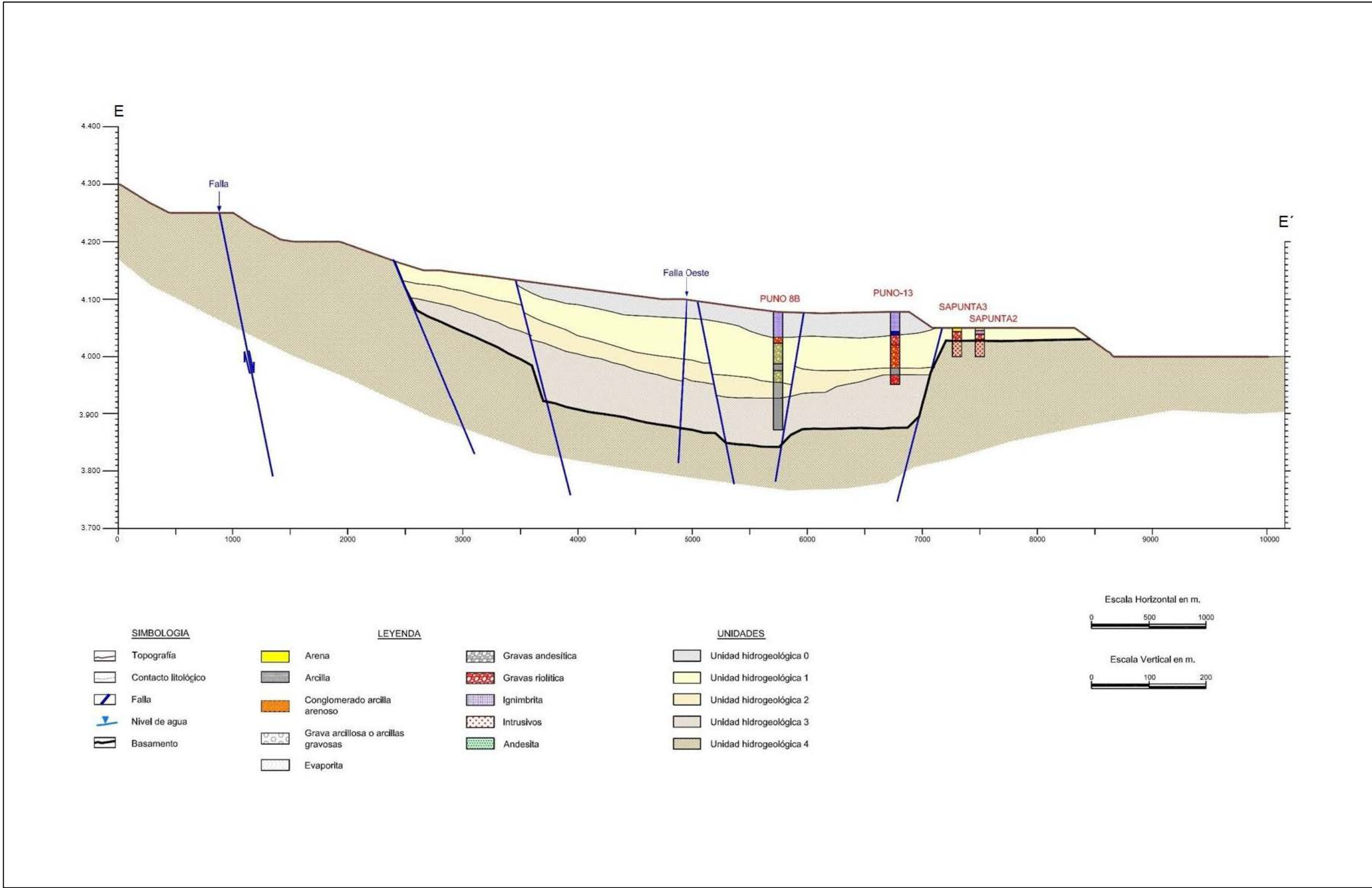


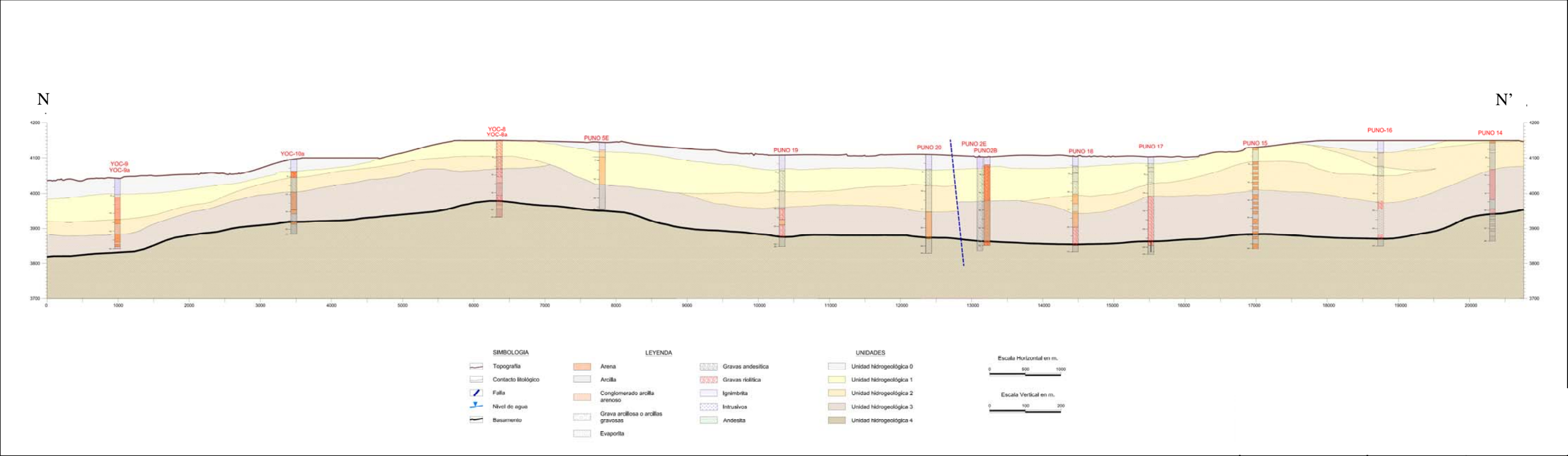


Figura 3.14  
Perfil Hidrogeológico E-E'



Fuente: SWS (2010)

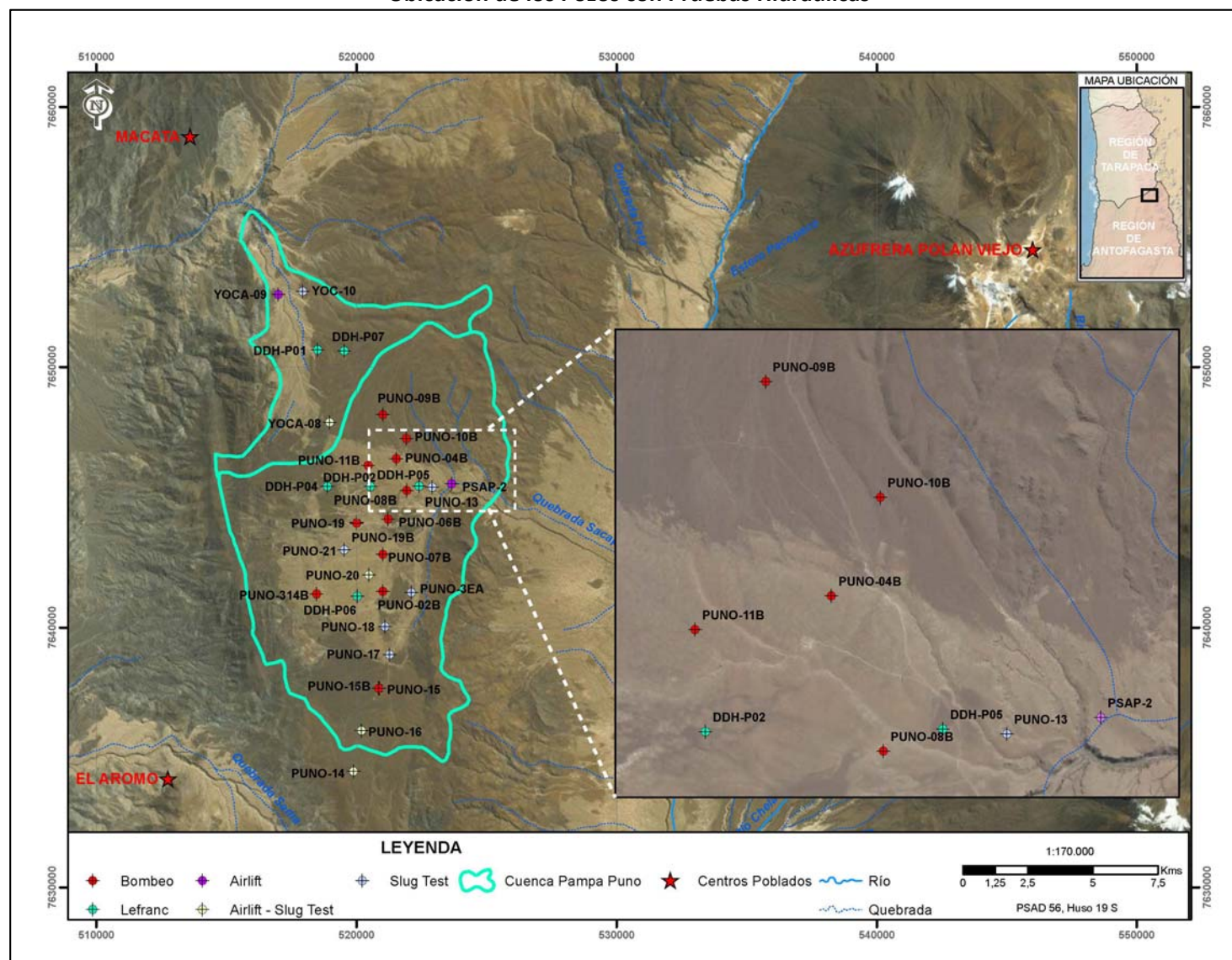
Figura 3.15  
Perfil Hidrogeológico N-N'



Fuente: SWS (2010)

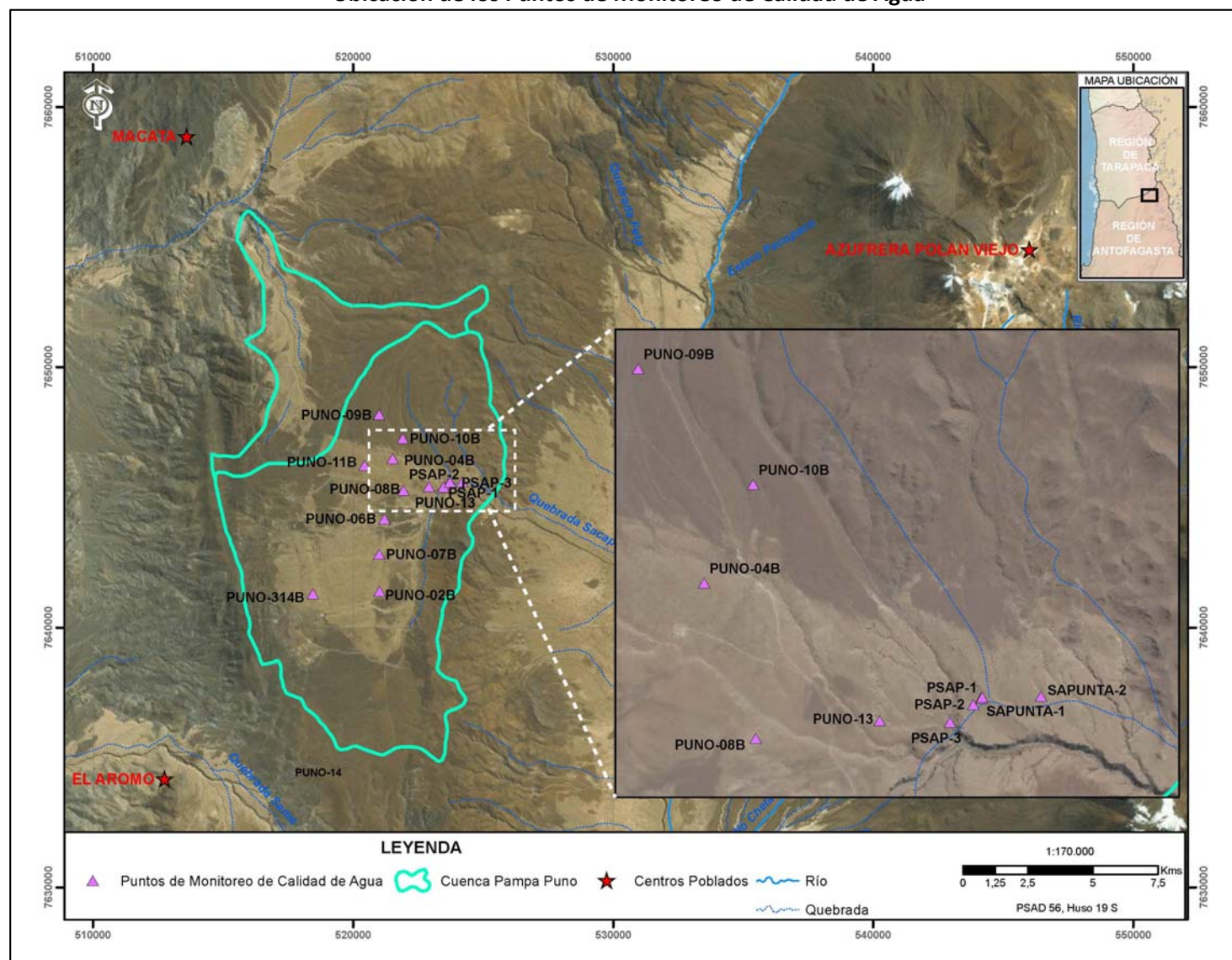


**Figura 3.16**  
**Ubicación de los Pozos con Pruebas Hidráulicas**



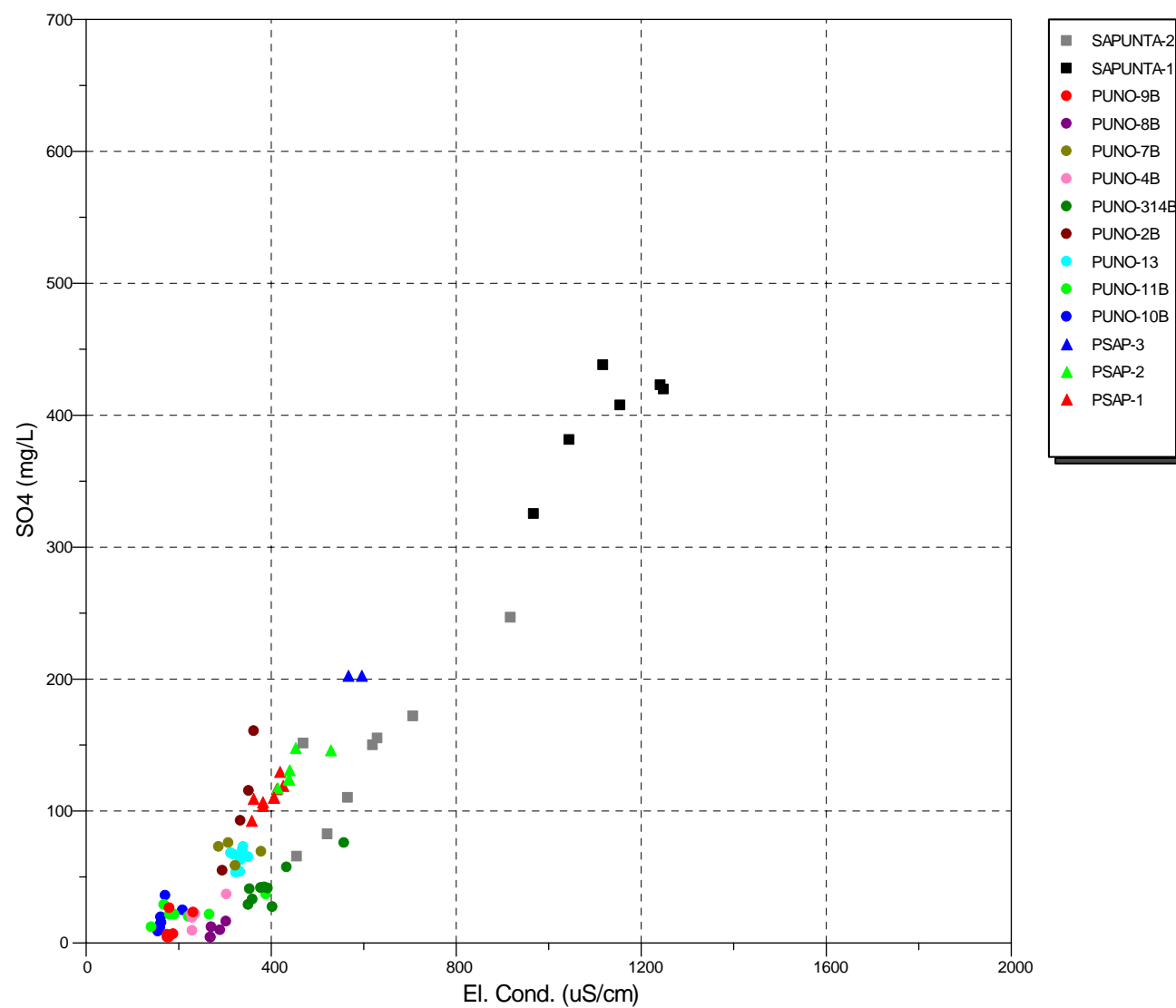
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.17**  
**Ubicación de los Puntos de Monitoreo de Calidad de Agua**



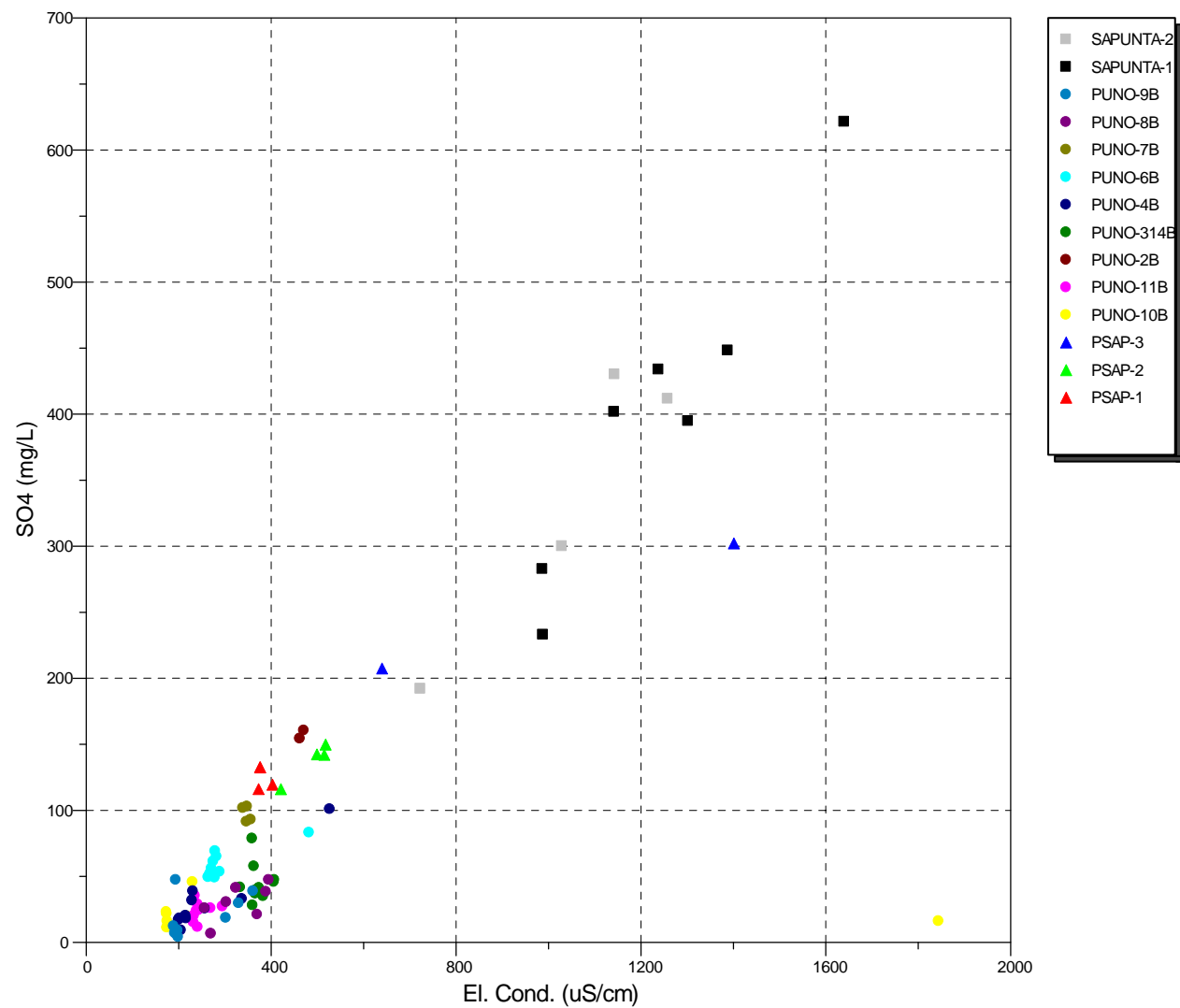
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.18**  
**Diagrama Sulfatos v/s Conductividad Específica Pre Bombeo Técnico**



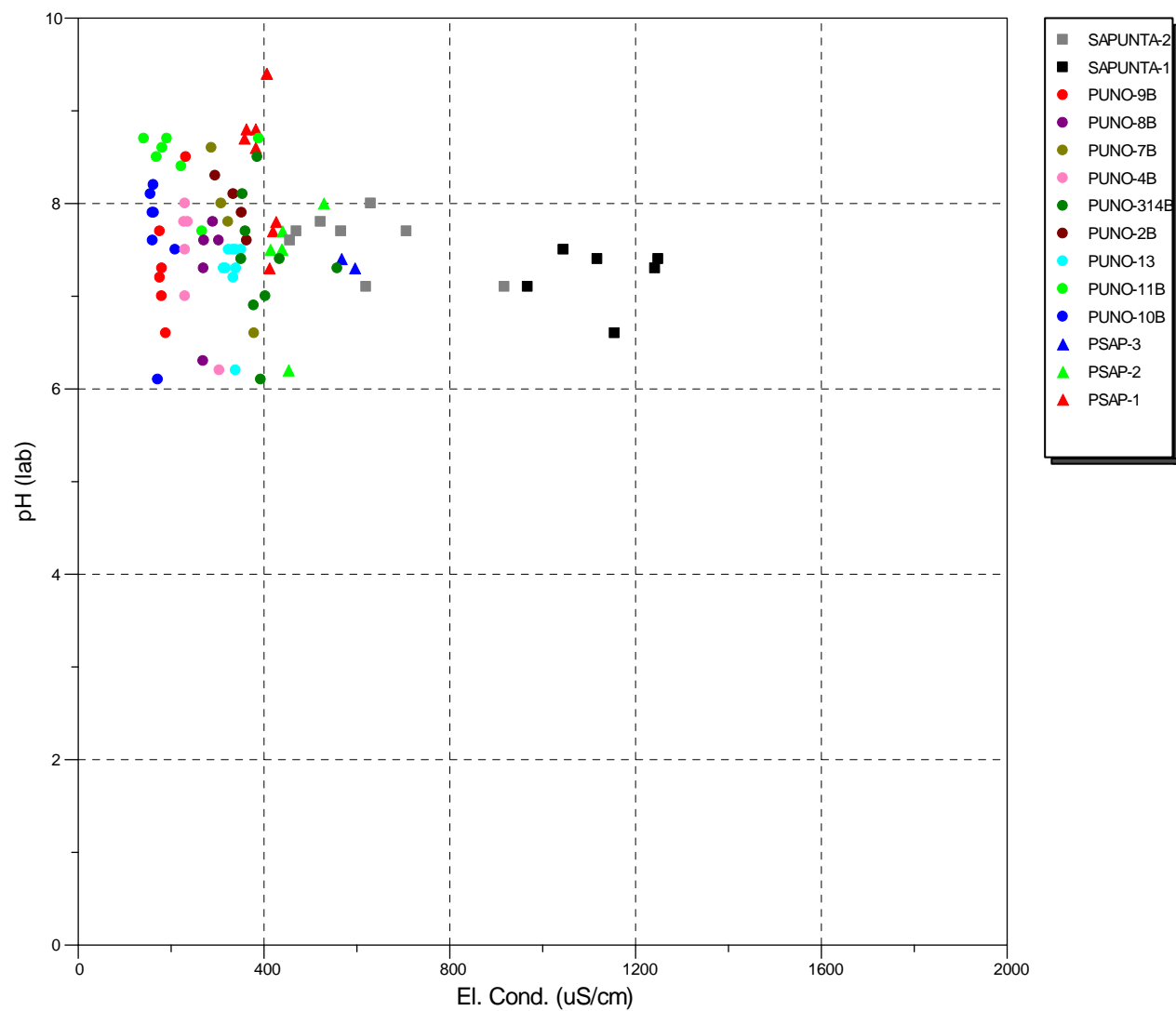
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.19**  
**Diagrama Sulfatos v/s Conductividad Específica Bombeo Productivo**



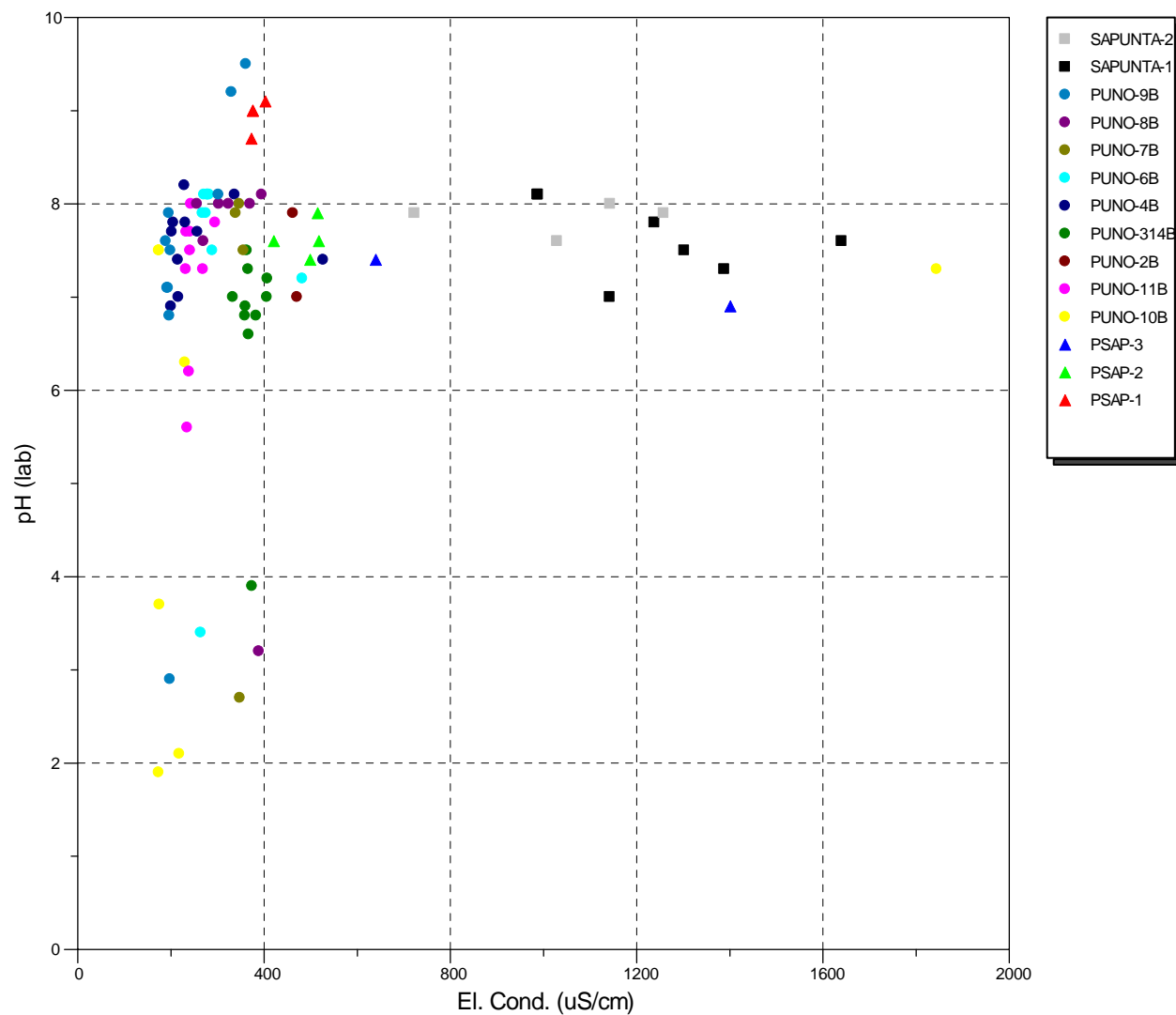
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.20**  
**Diagrama pH v/s Conductividad Específica Pre Bombeo**



Fuente: Elaboración Propia

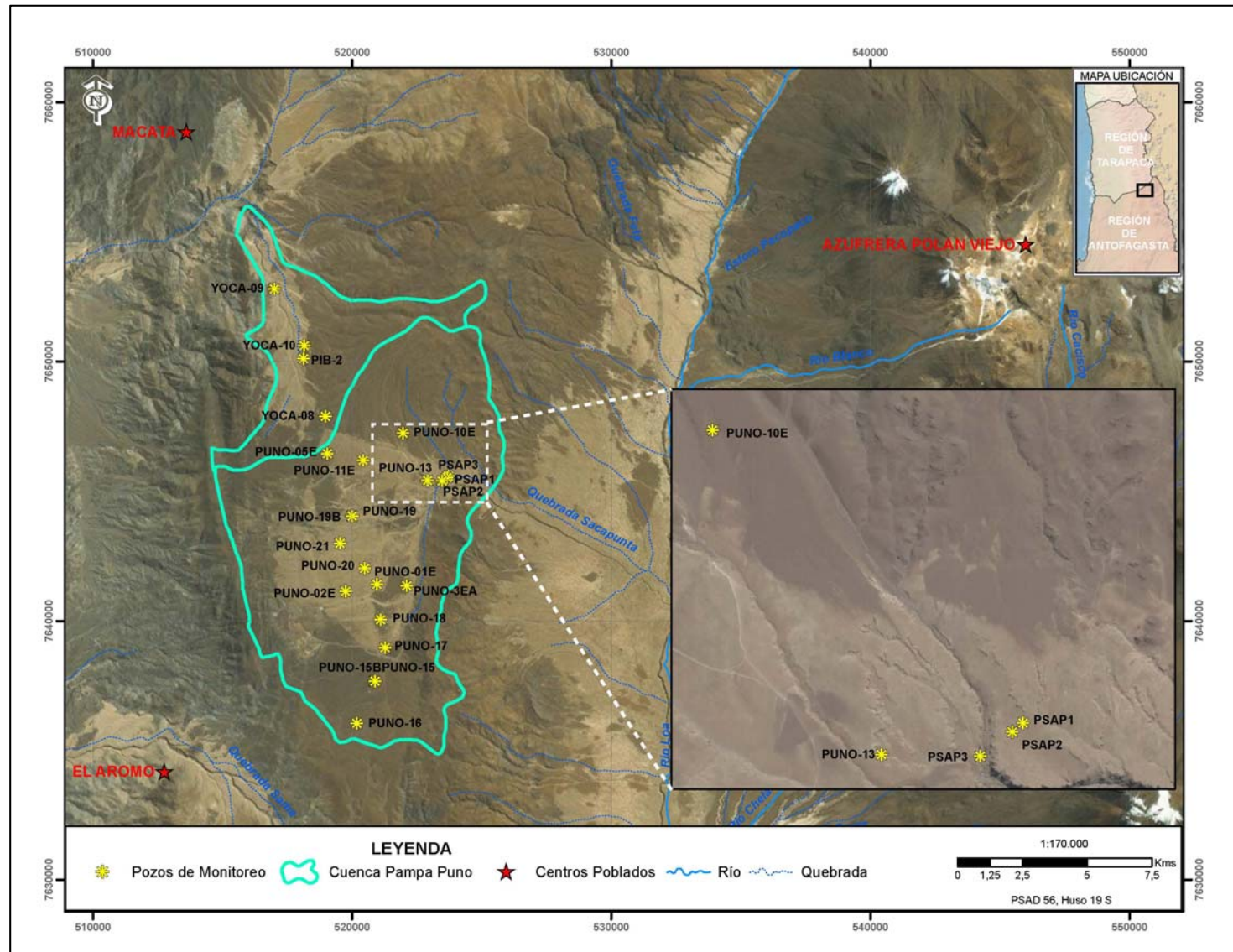
**Figura 3.21**  
**Diagrama pH v/s Conductividad Específica Bombeo Productivo**



Fuente: Elaboración Propia

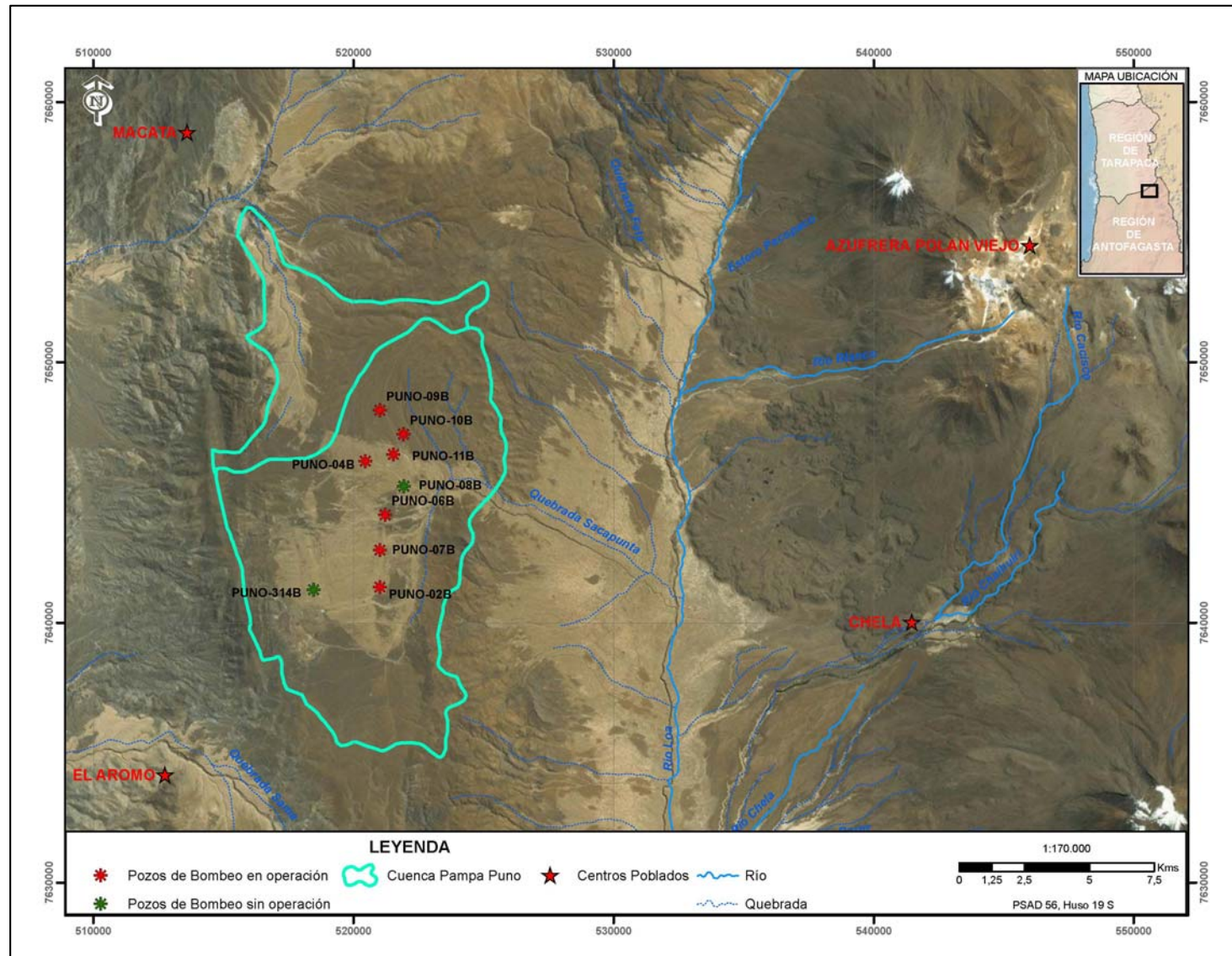


**Figura 3.22a**  
**Ubicación Pozos de Monitoreo**



Fuente: Elaboración Propia

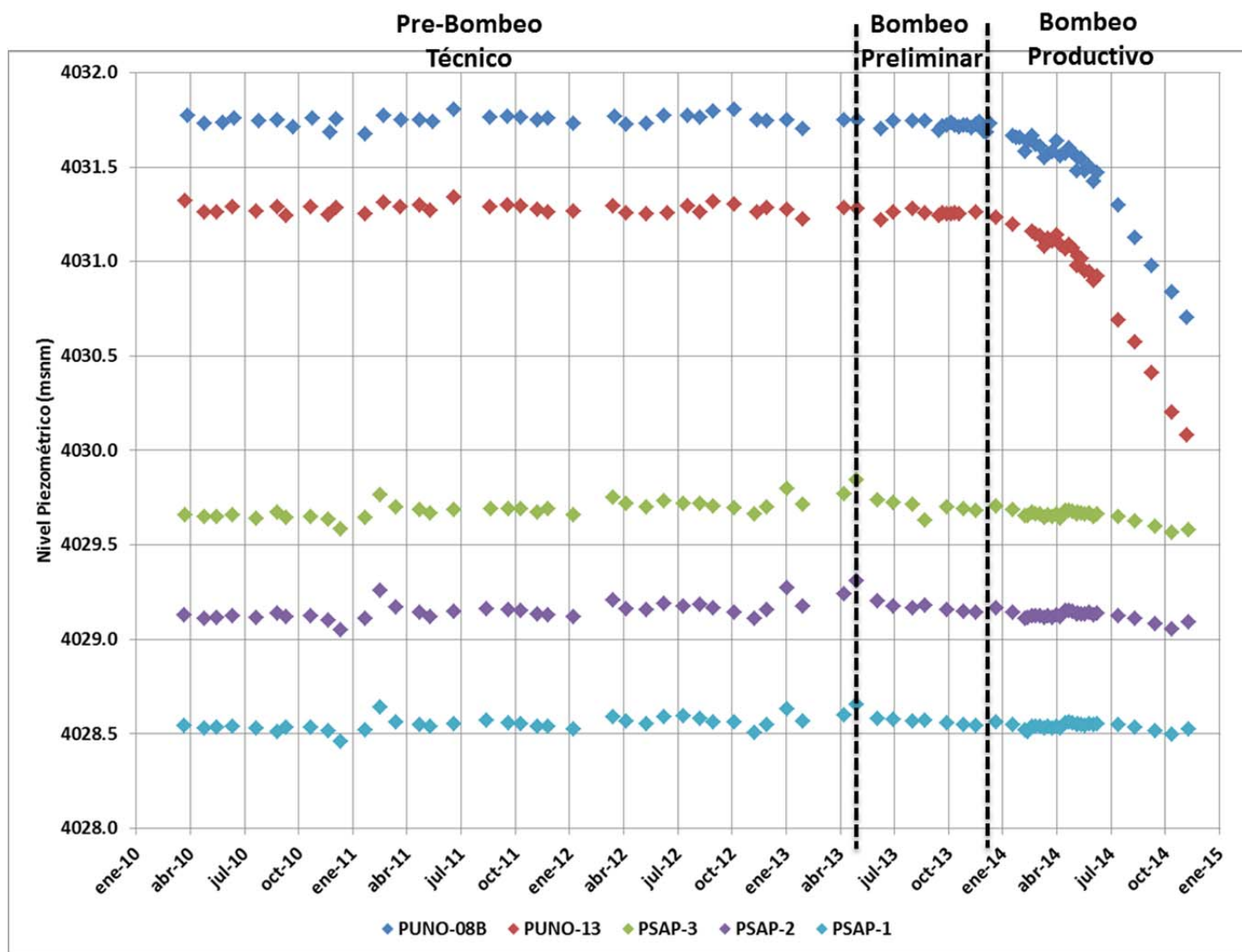
**Figura 3.22b**  
**Ubicación Pozos de Bombeo**



Fuente: Elaboración Propia

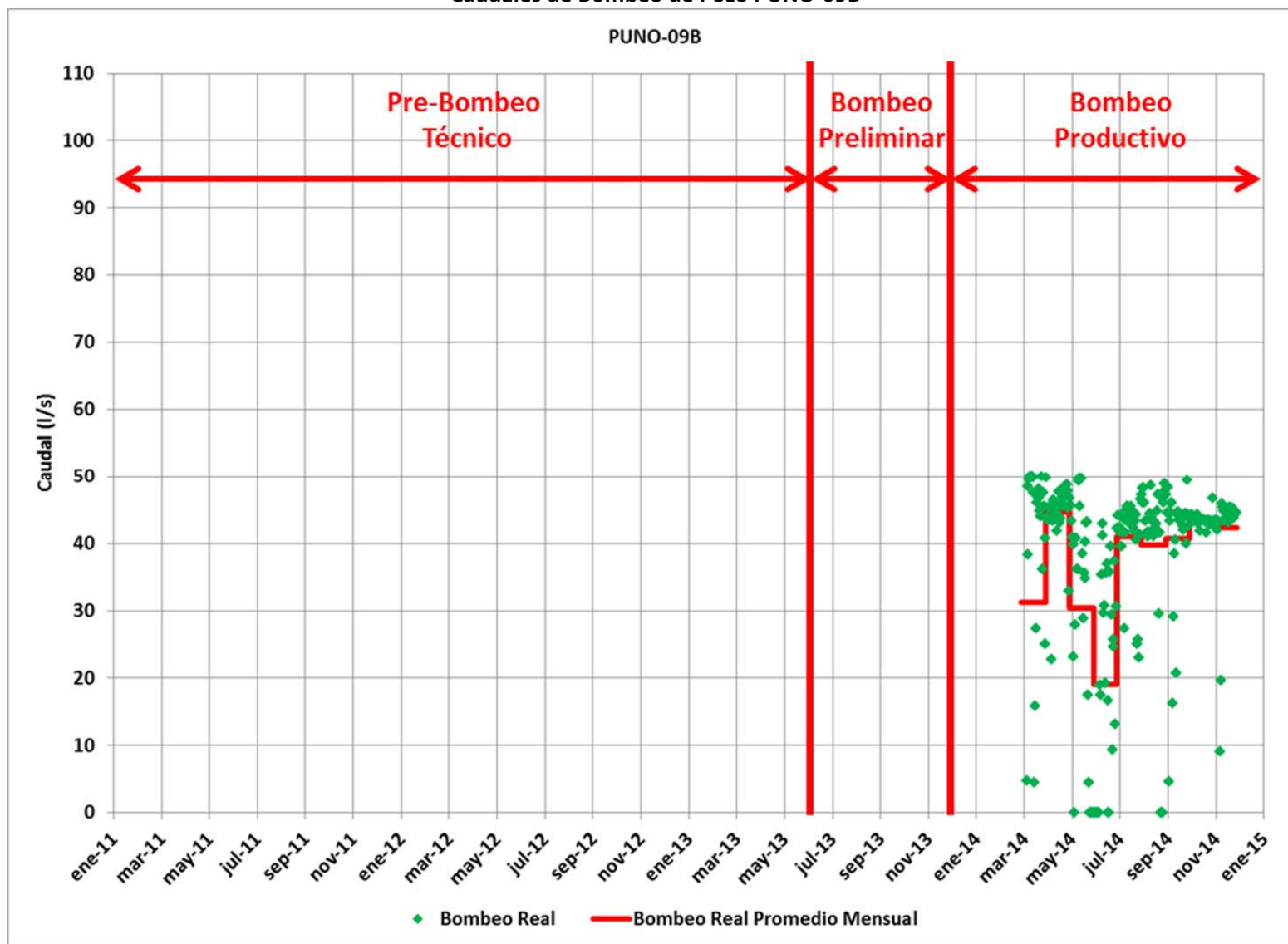


**Figura 3.23**  
**Niveles Agua Subterránea Sector Sapunta**



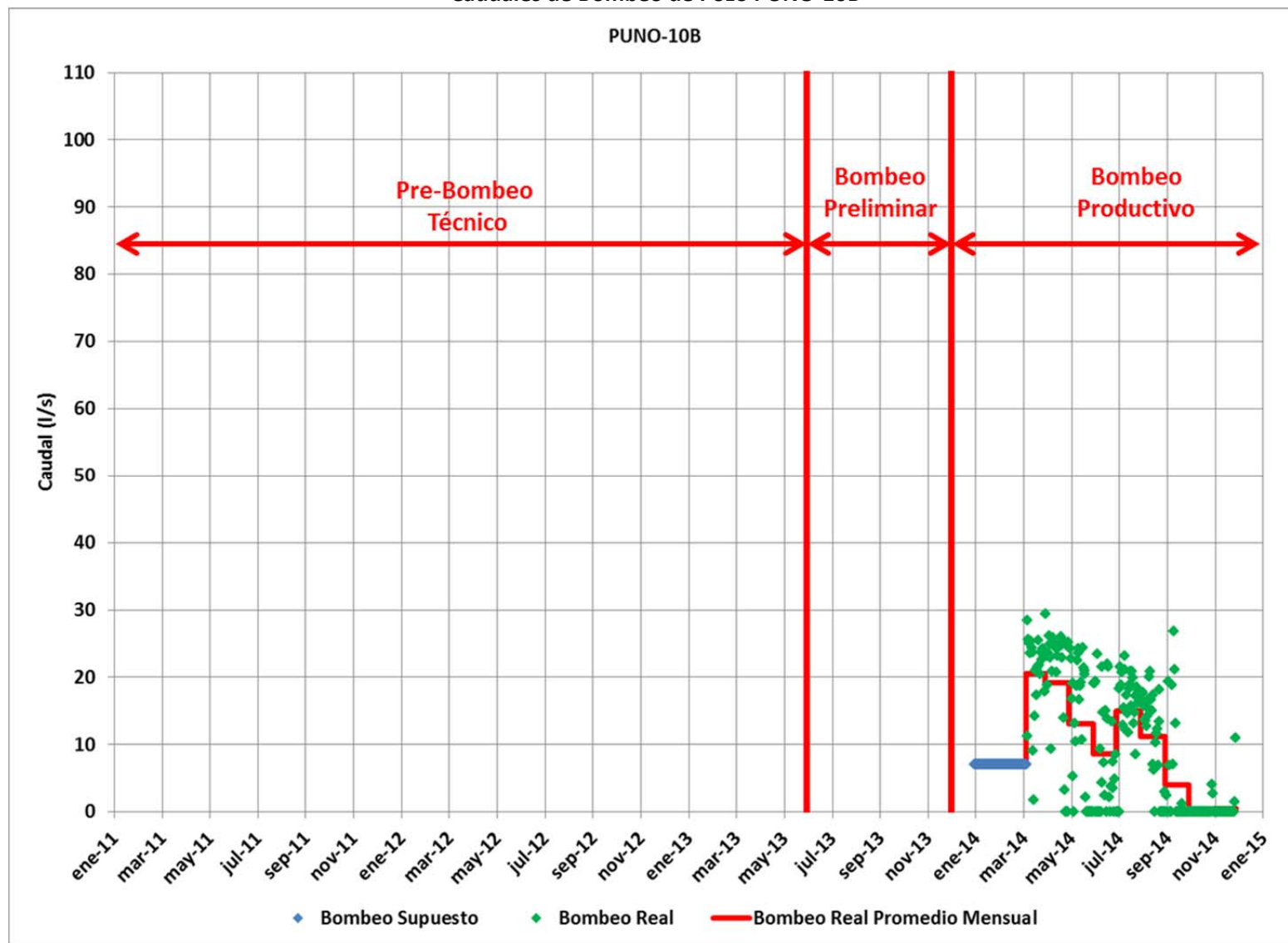
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.24**  
**Caudales de Bombeo de Pozo PUNO-09B**



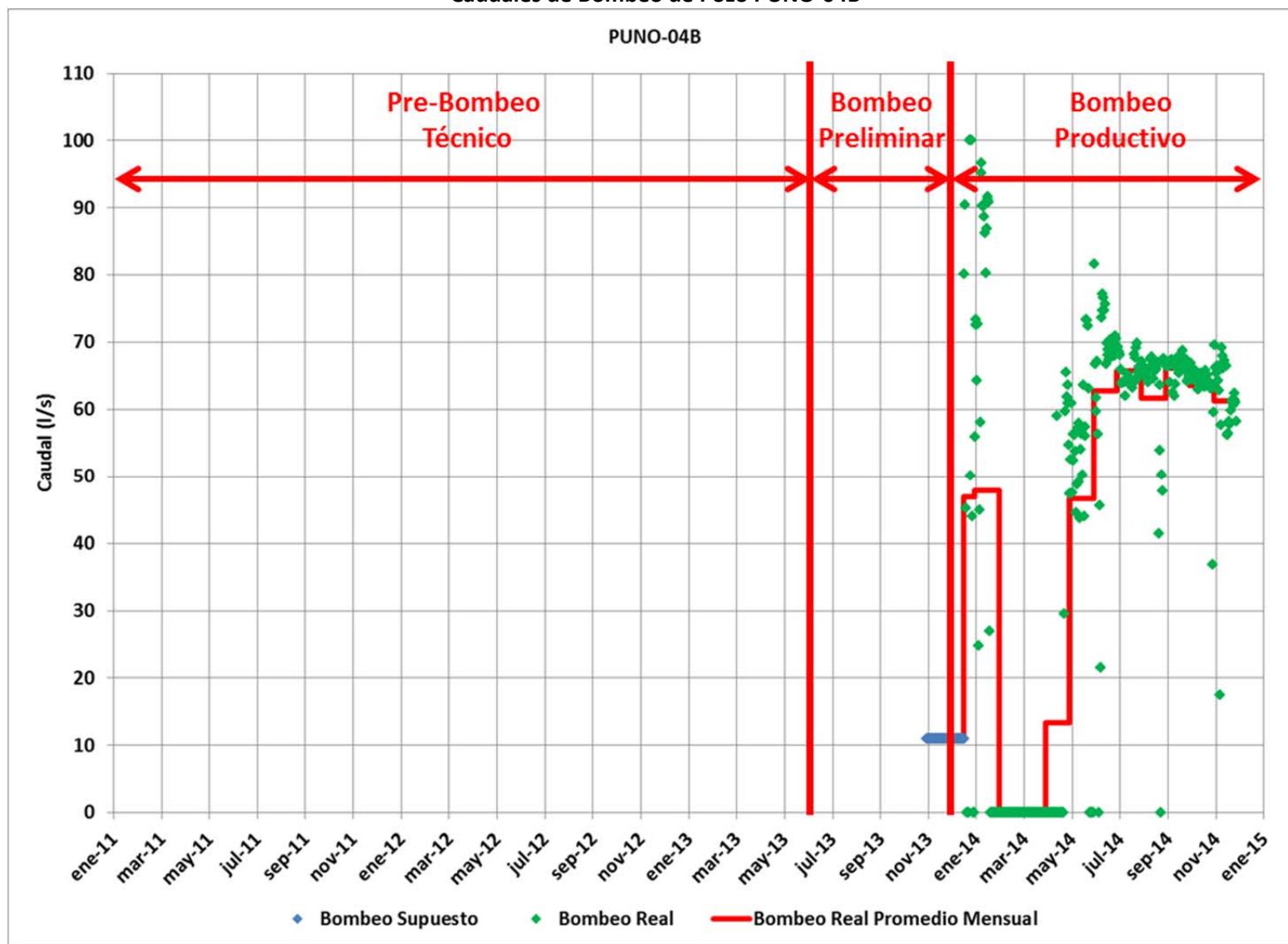
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 3.25**  
**Caudales de Bombeo de Pozo PUNO-10B**



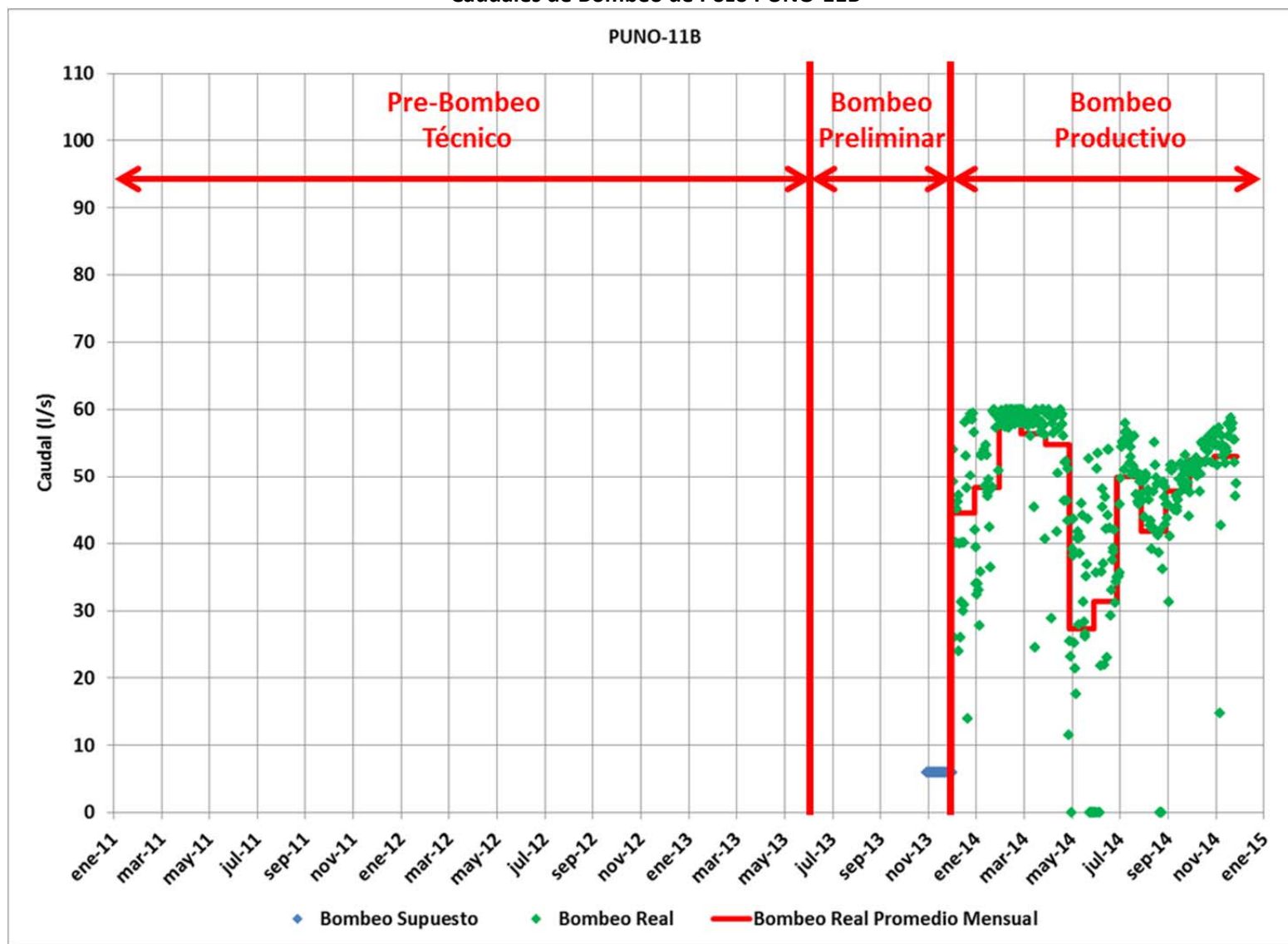
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.26  
Caudales de Bombeo de Pozo PUNO-04B



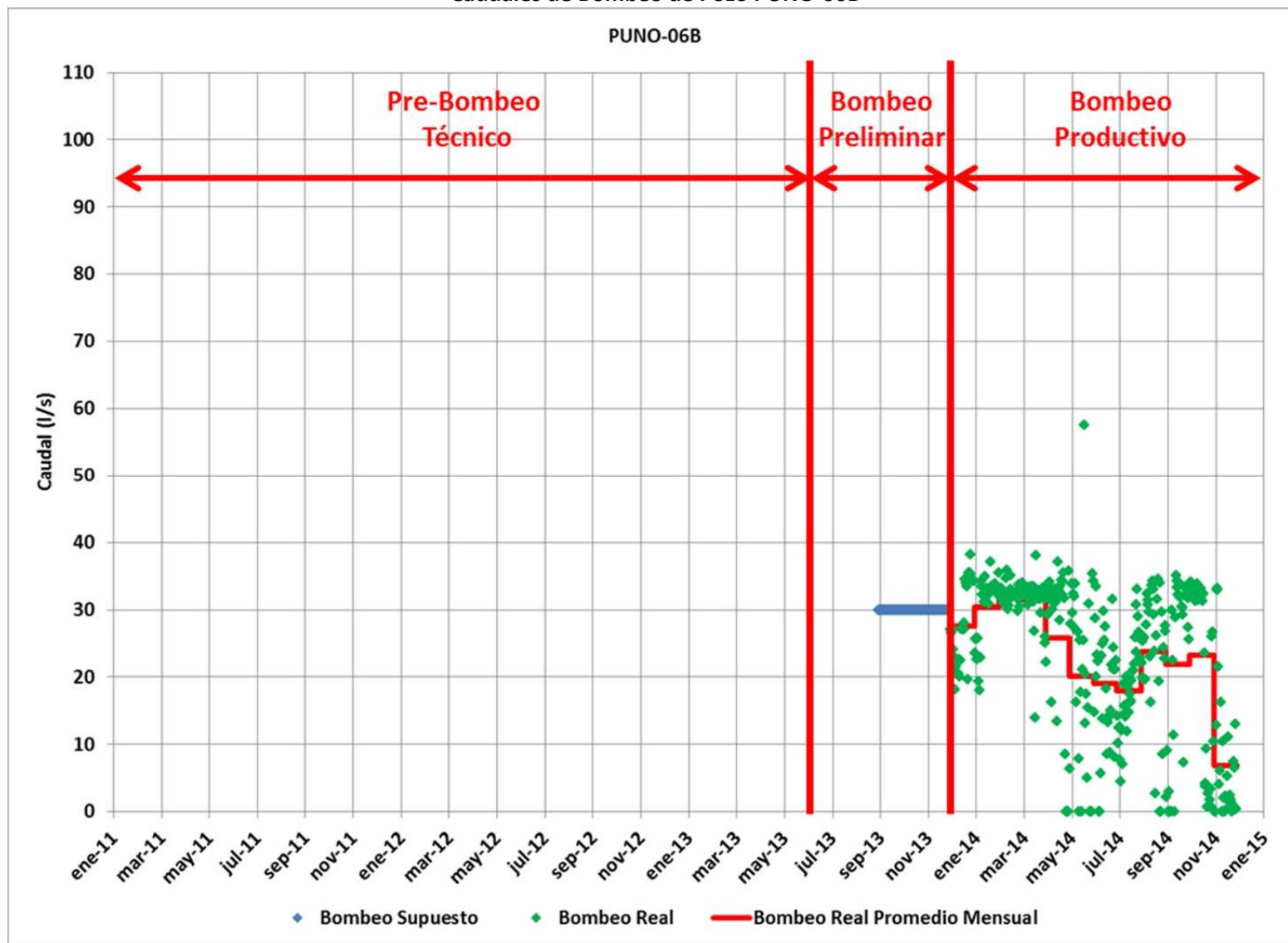
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.27  
Caudales de Bombeo de Pozo PUNO-11B



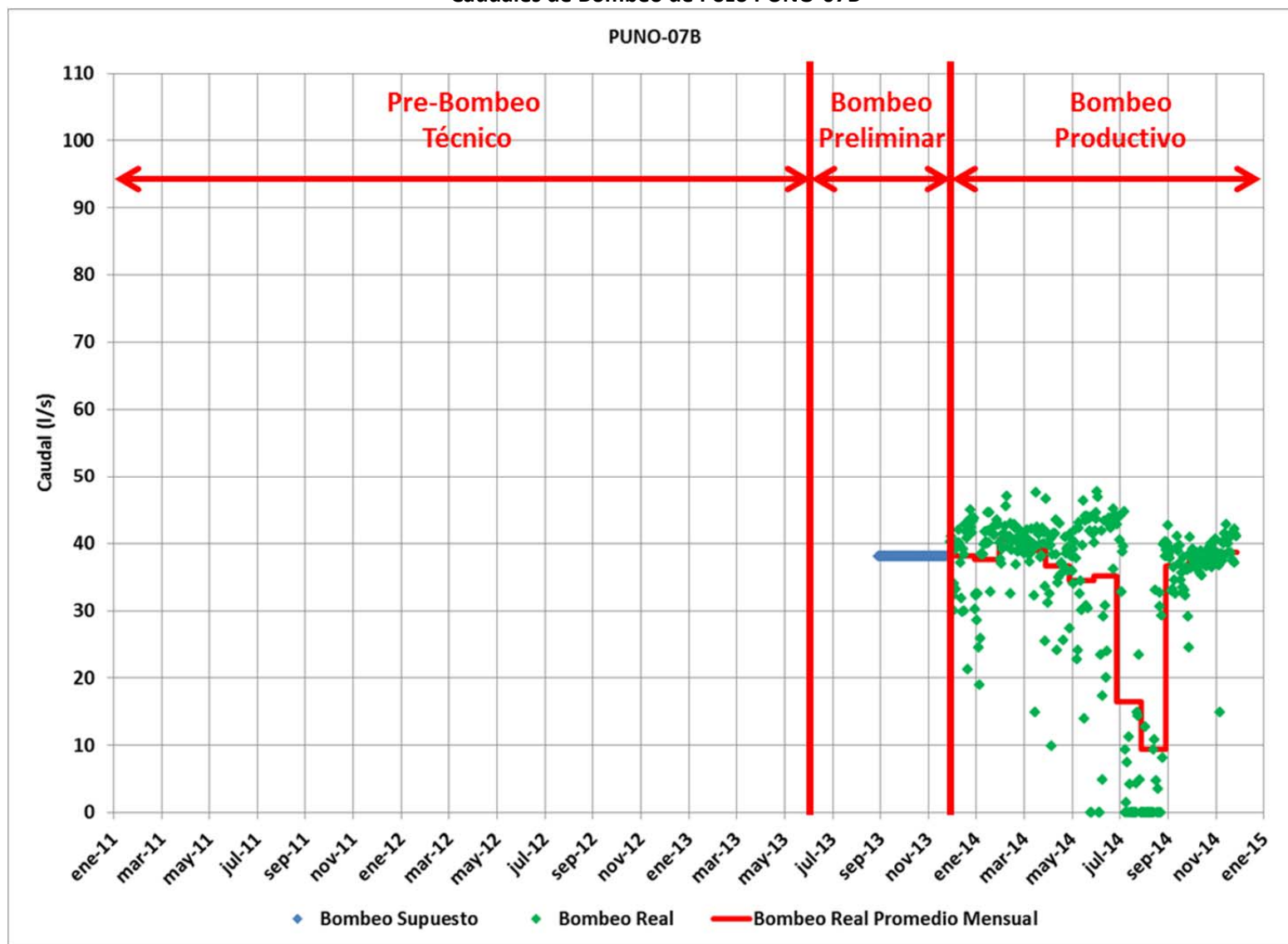
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.28  
Caudales de Bombeo de Pozo PUNO-06B



Fuente: Elaboración Propia

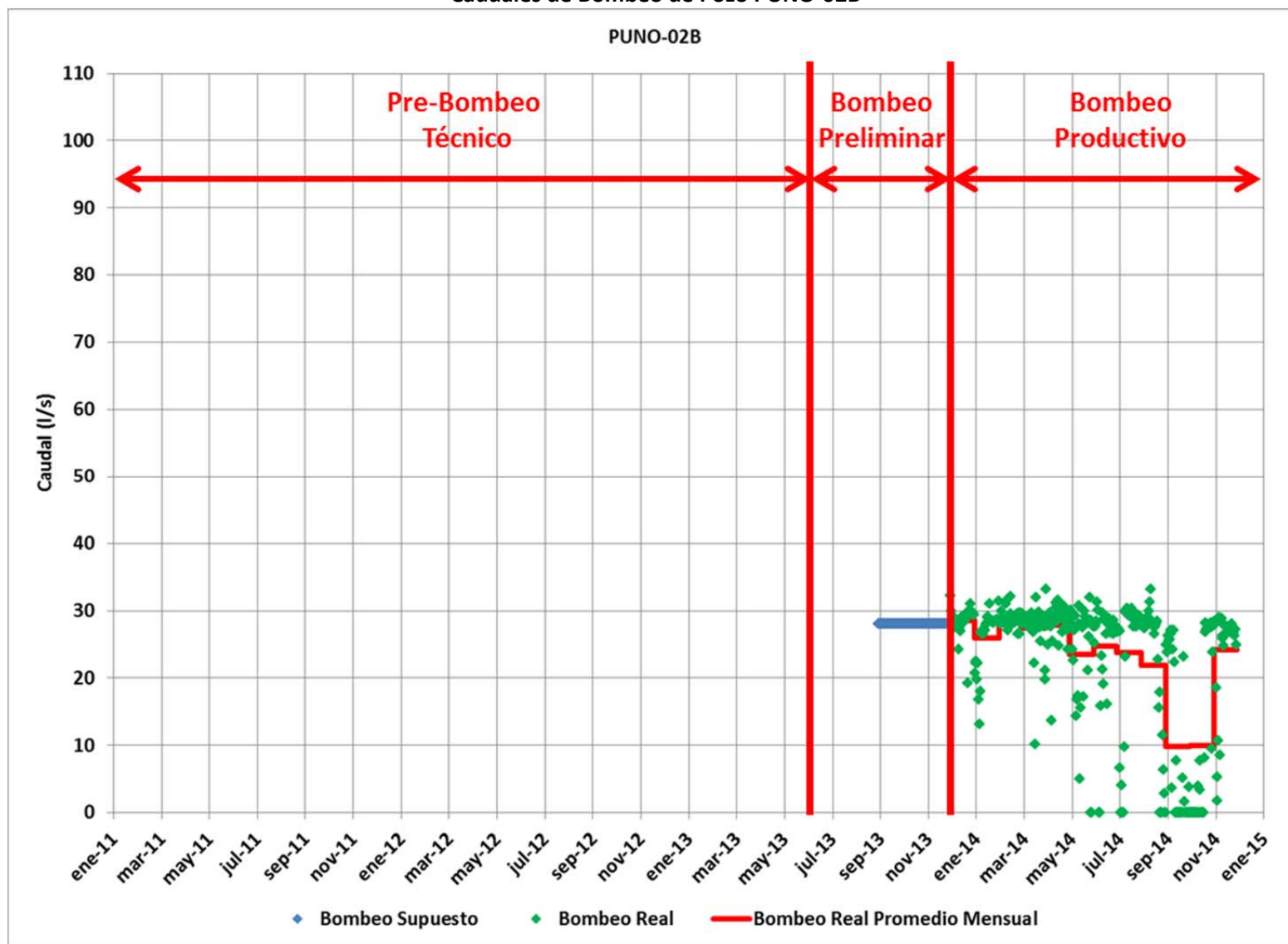
Figura 3.29  
Caudales de Bombeo de Pozo PUNO-07B



Fuente: Elaboración Propia

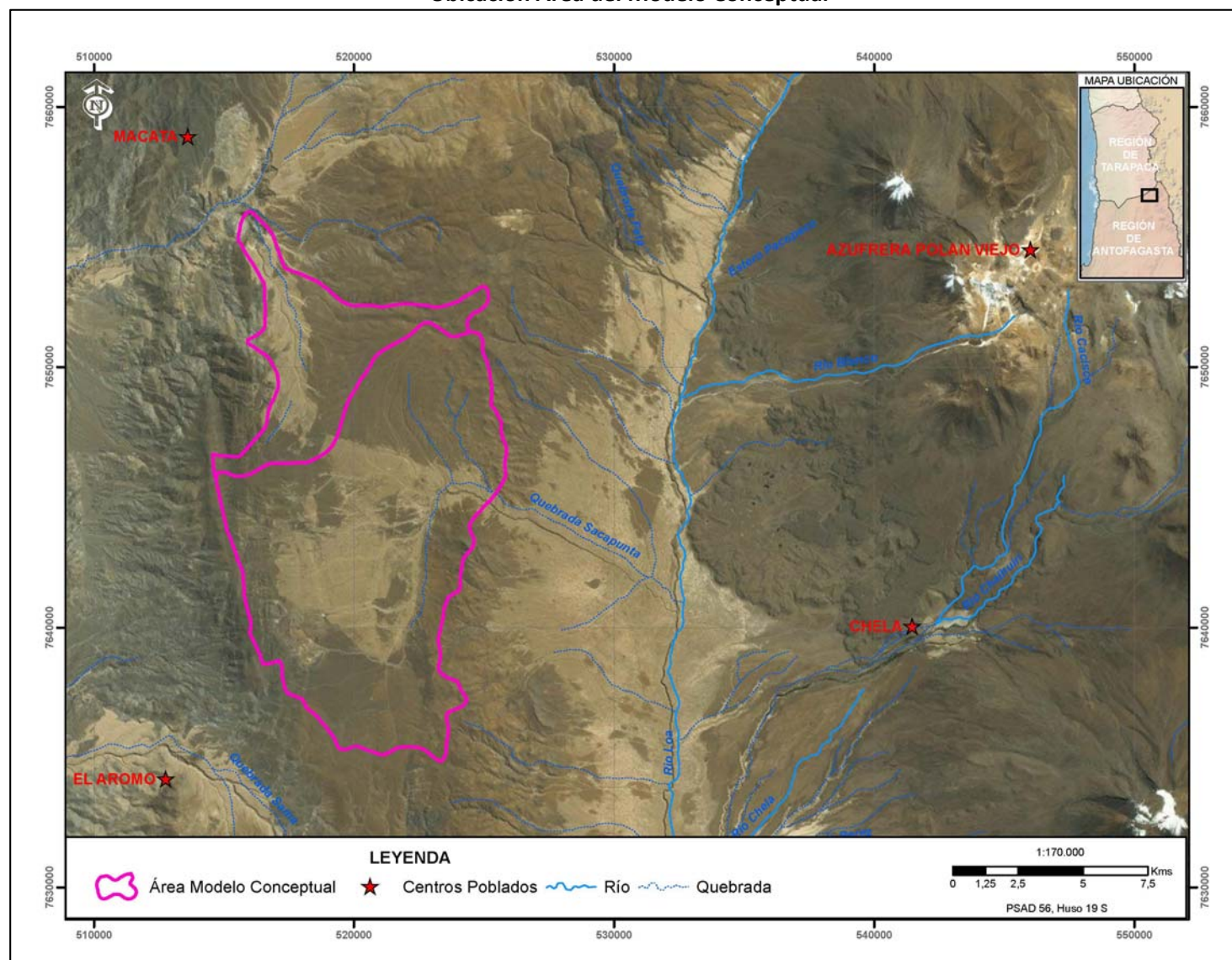


Figura 3.30  
Caudales de Bombeo de Pozo PUNO-02B



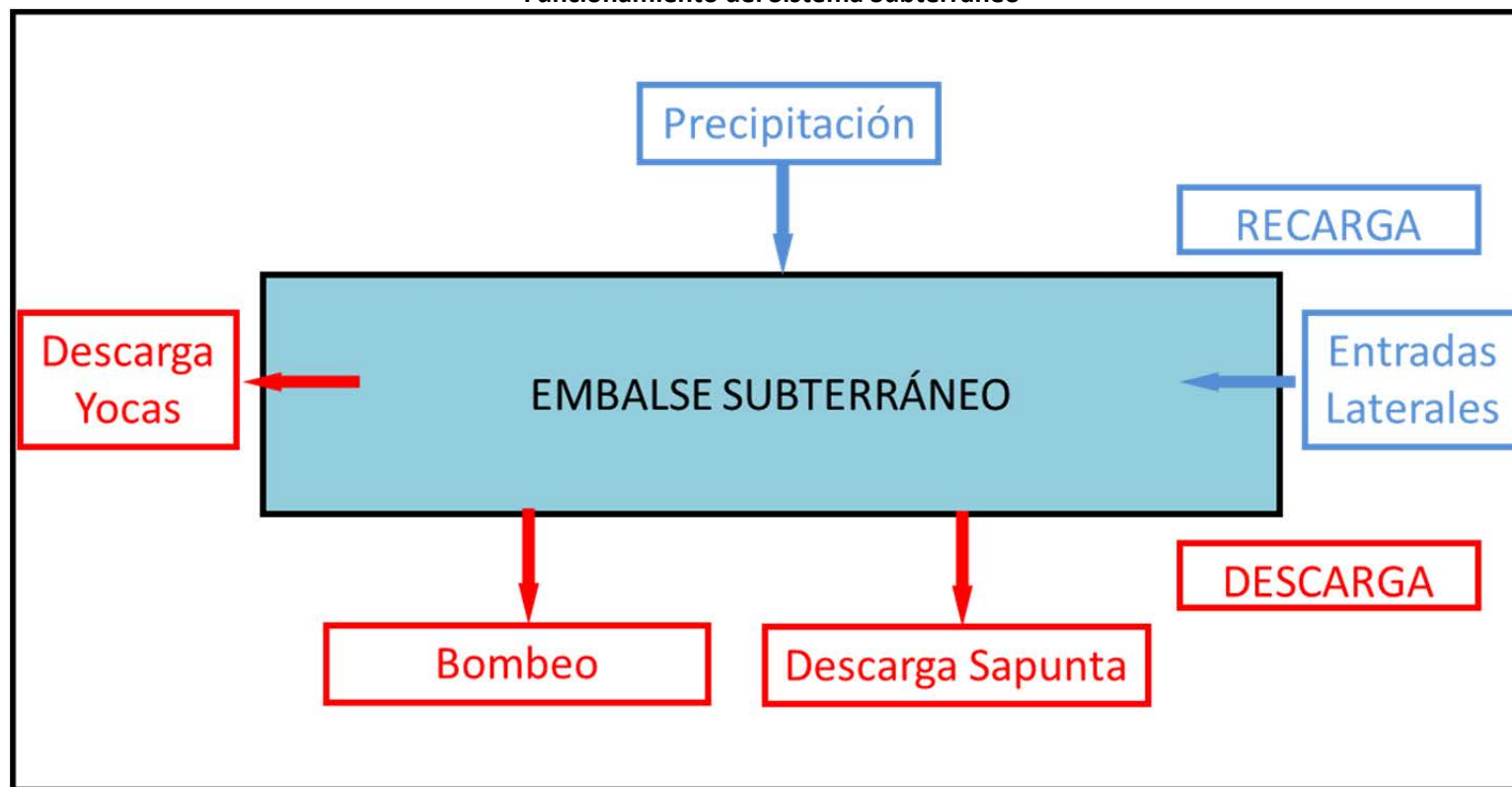


**Figura 4.1**  
**Ubicación Área del Modelo Conceptual**



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4.2  
Funcionamiento del Sistema Subterráneo



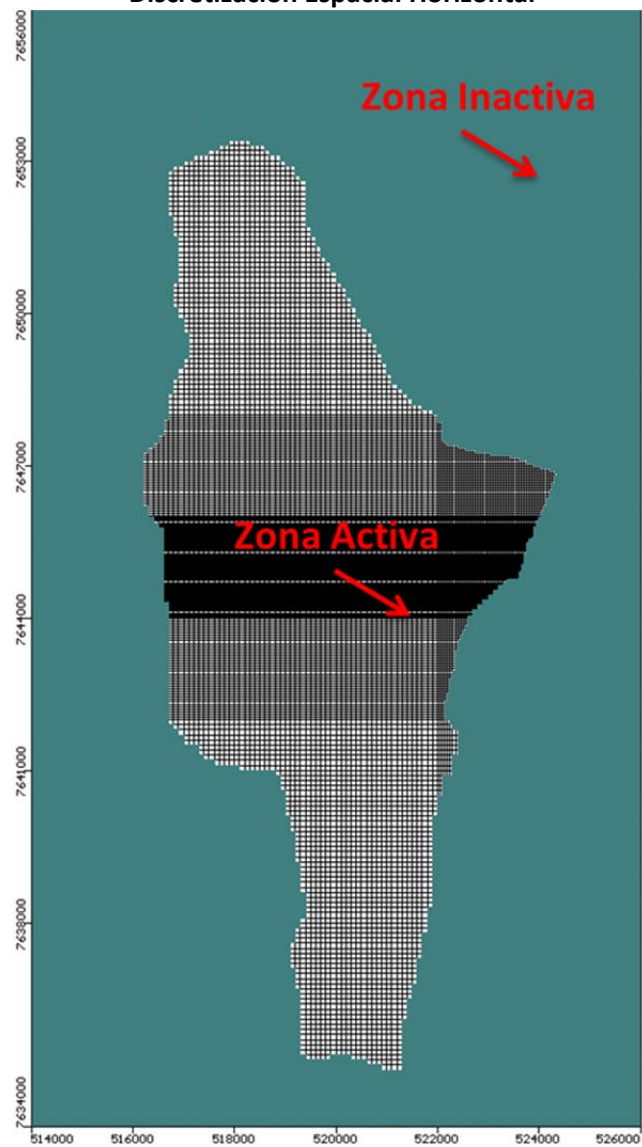
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.1**  
**Área de Modelación**



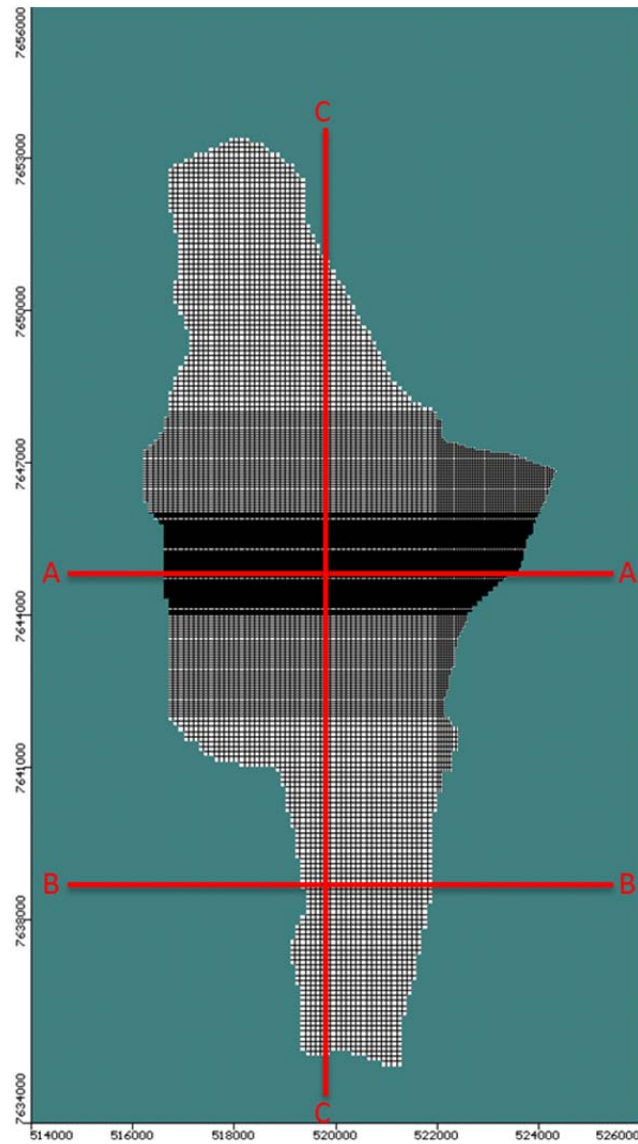
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.2**  
**Discretización Espacial Horizontal**



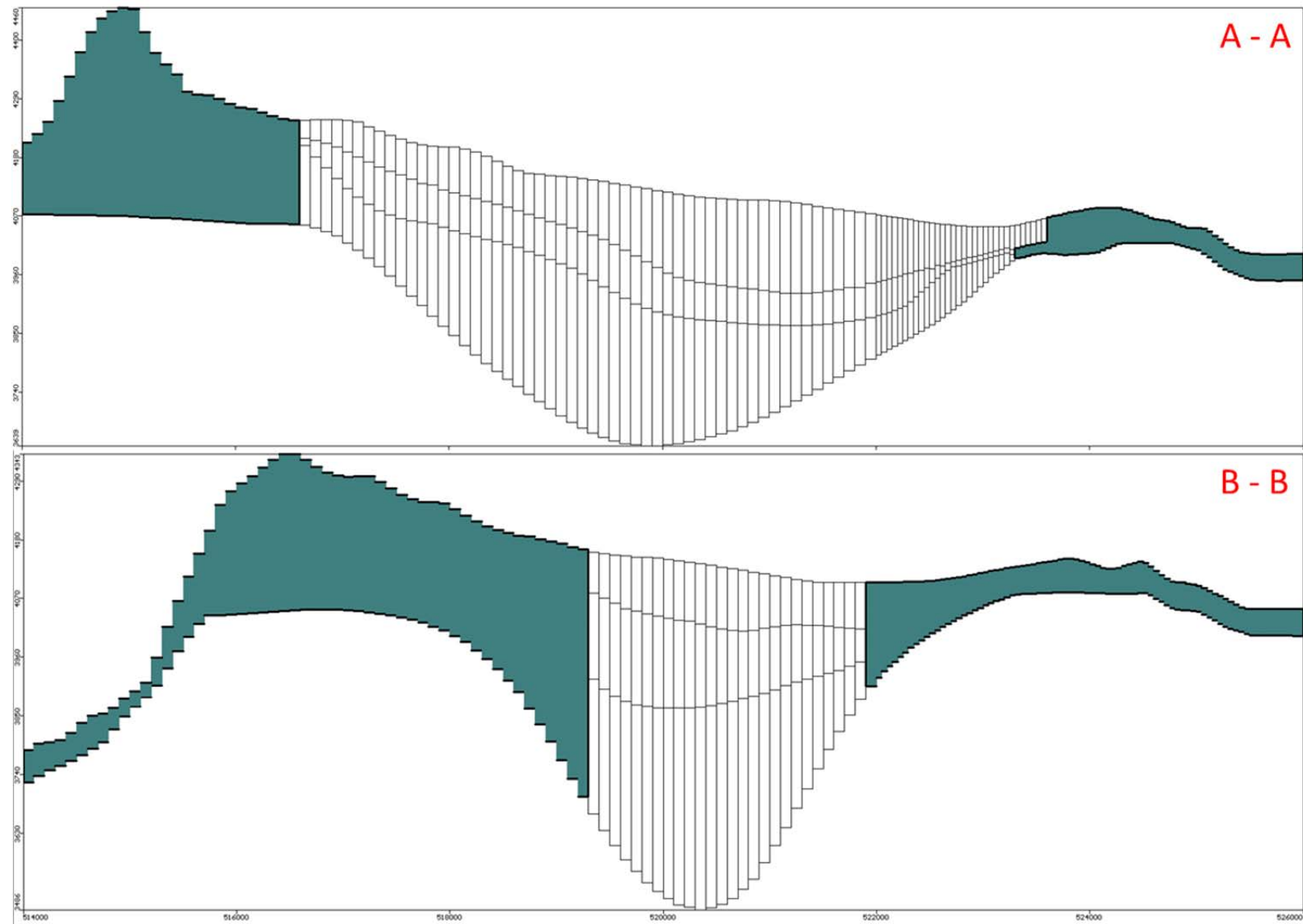
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.3**  
**Ubicación de Perfiles en Área de Modelación**



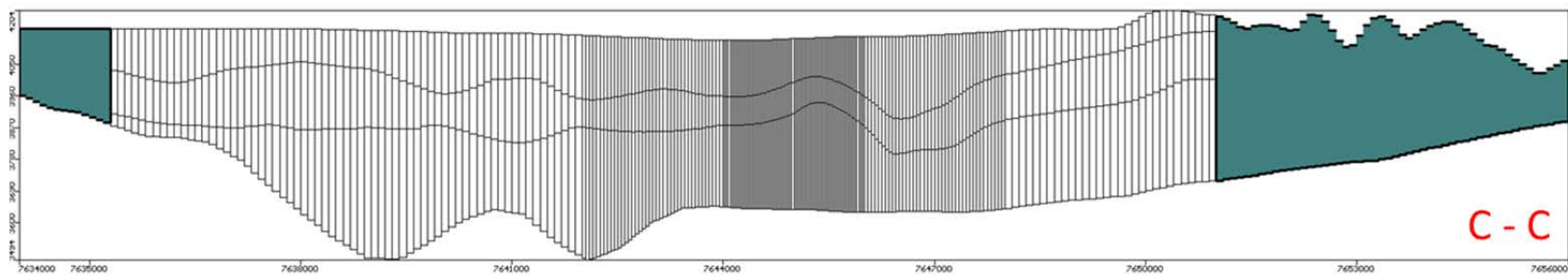
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.4**  
**Perfiles Horizontales en Área de Modelación**



Fuente: Elaboración Propia

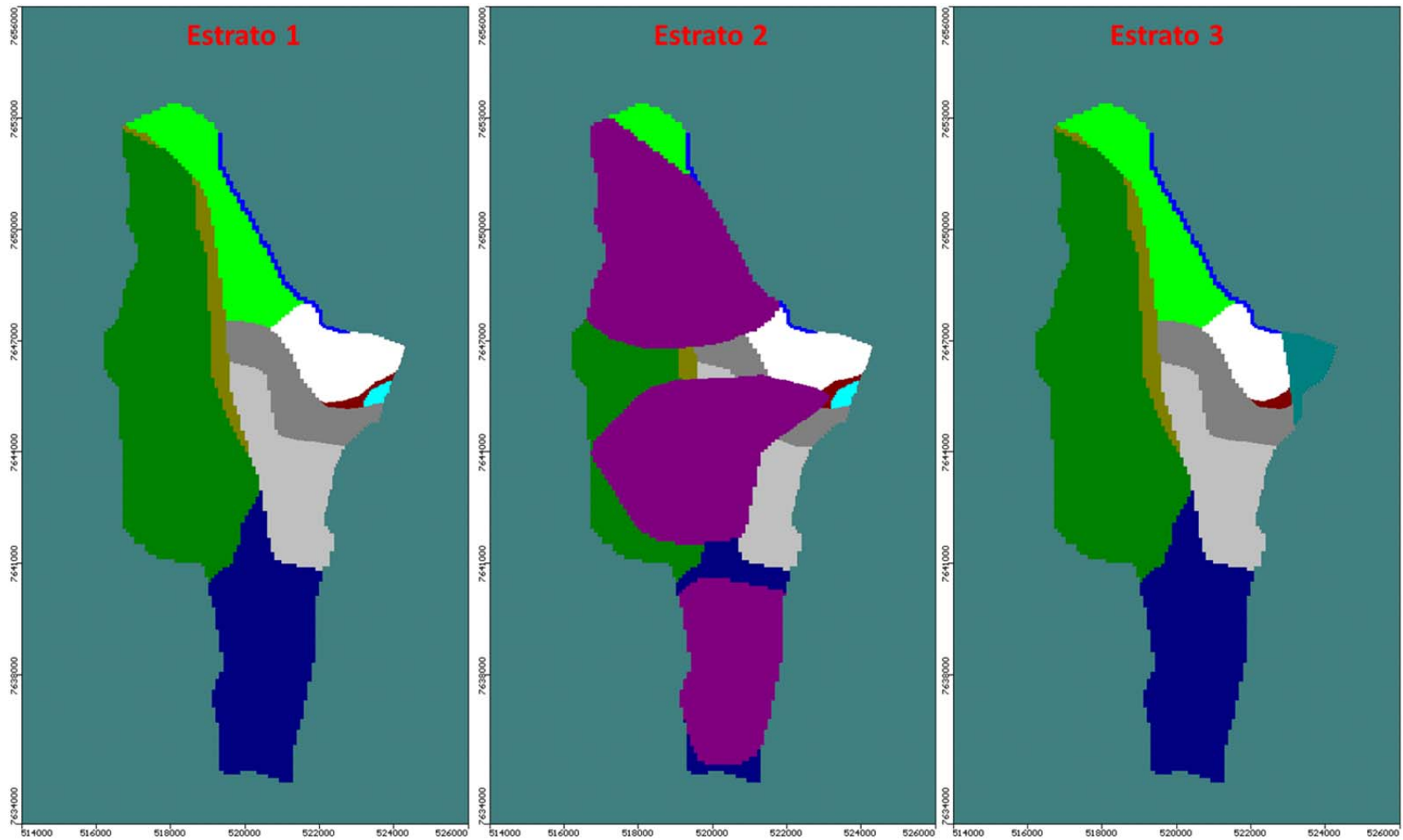
**Figura 5.5**  
**Perfil Vertical en Área de Modelación**



Fuente: Elaboración Propia



**Figura 5.6a**  
**Conductividades Hidráulicas Iniciales**



Fuente: Elaboración Propia

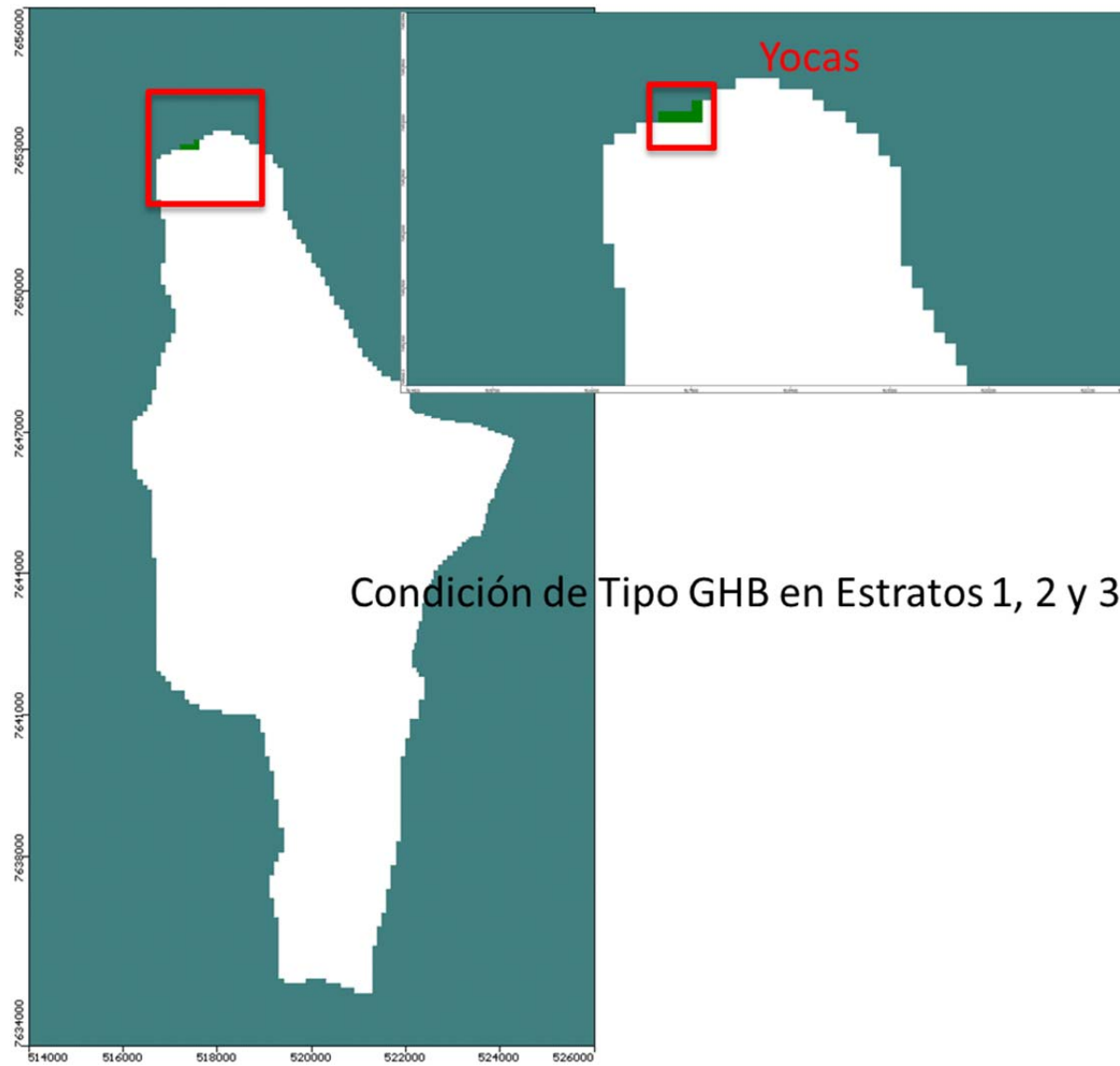


**Figura 5.6b**  
**Valores de Conductividades Hidráulicas Iniciales**

Zone	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]
1	60.48	60.48	60.48
2	51.84	51.84	51.84
3	0.013824	0.013824	0.013824
4	0.002592	0.002592	0.002592
5	7.776	7.776	7.776
6	0.00864	0.00864	0.00864
7	0.432	0.432	0.432
8	51.84	51.84	51.84
9	0.864	0.864	0.864
10	0.6048	0.6048	0.6048
11	13.2192	13.2192	13.2192
12	2.592	2.592	2.592

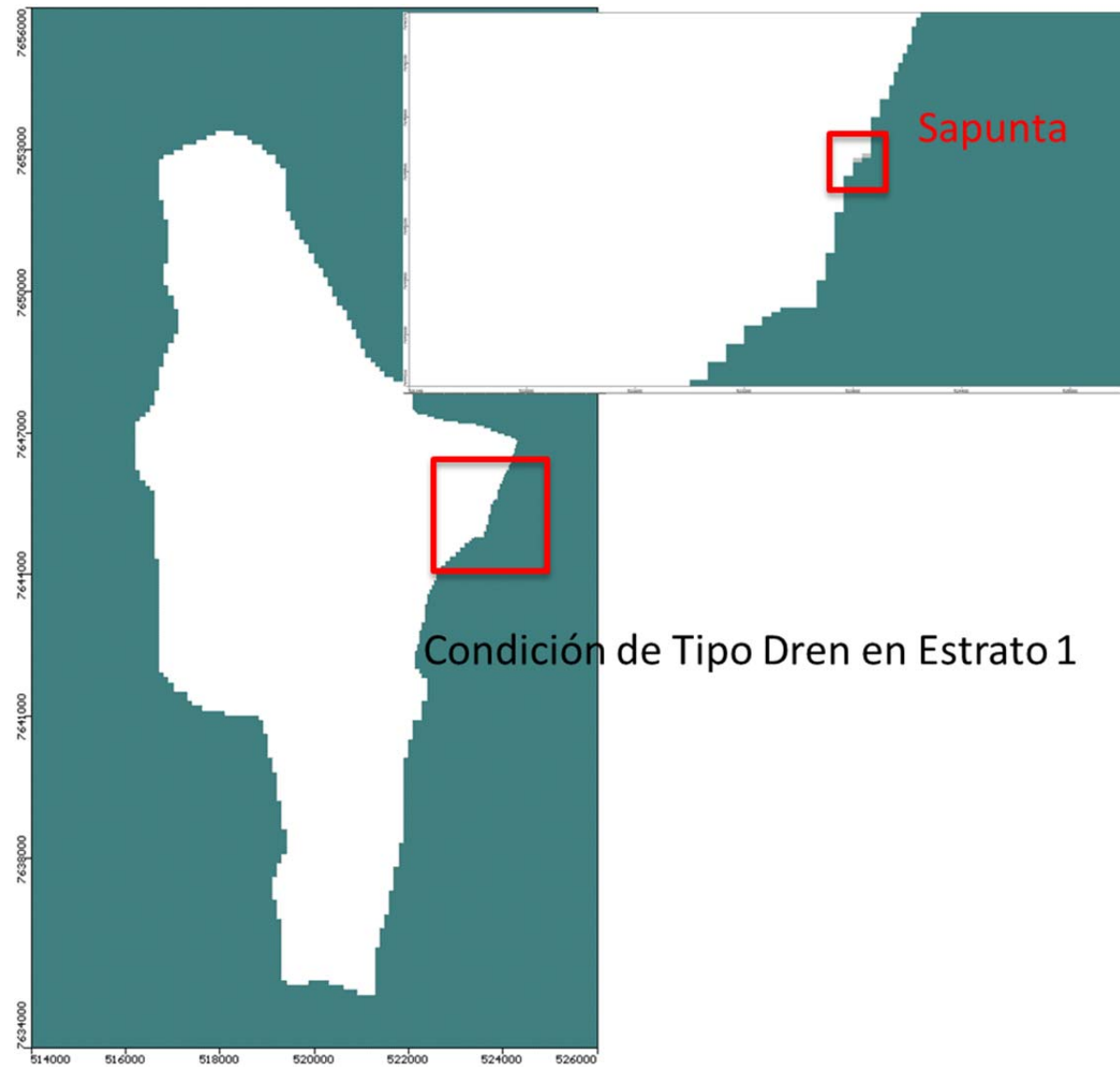
Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.7  
Condición de Borde – General Head



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.8**  
**Condición de Borde – Dren**

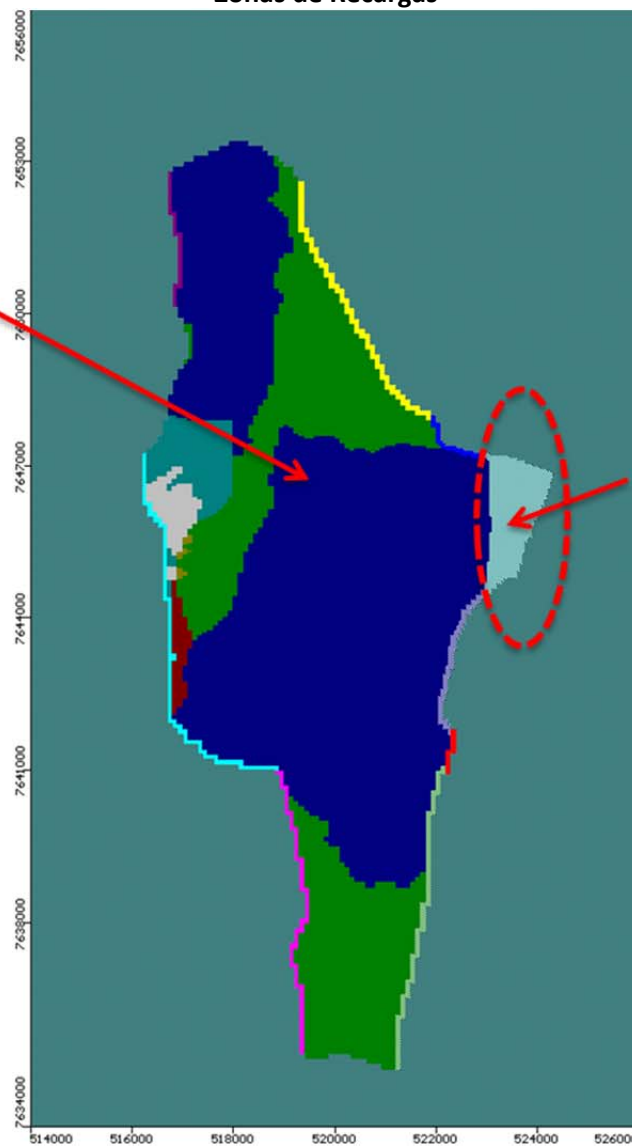


Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.9**  
**Zonas de Recargas**

Recarga Pampa Puno:  
Jun 2013 – Nov 2014 = 117.32 l/s

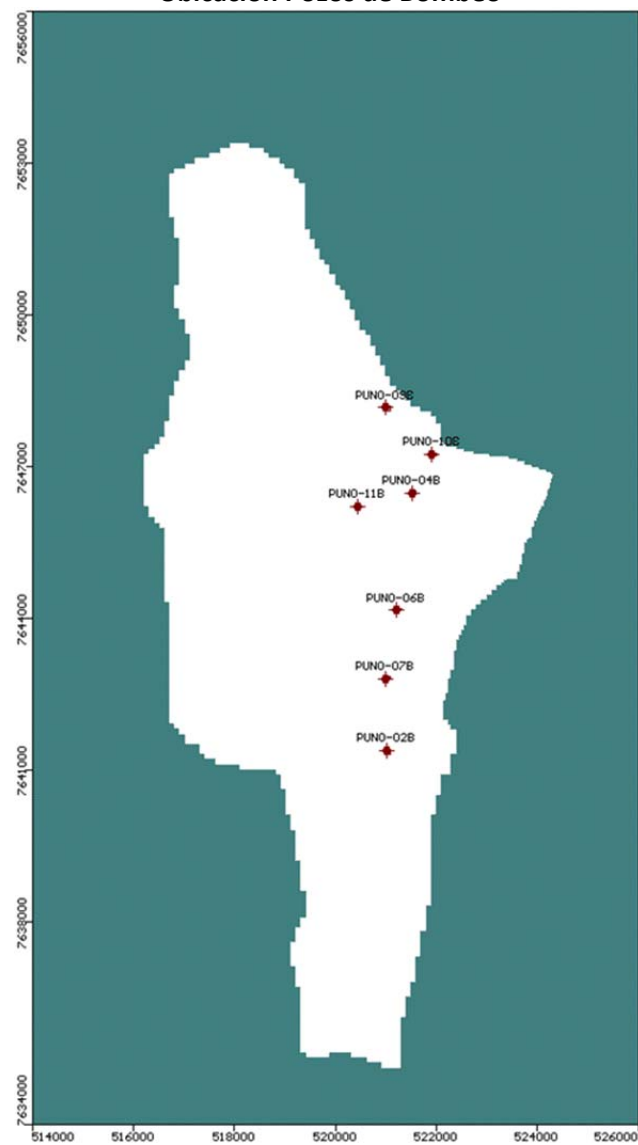
Recarga Total:  
Jun 2013 – Nov 2013 = 120.1 l/s  
Dic 2013 – Mar 2014 = 118.43 l/s  
Abr 2014 – Nov 2014 = 120.1 l/s



Recarga Sapunta:  
Jun 2013 – Nov 2013 = 2.78 l/s  
Dic 2013 – Mar 2014 = 1.11 l/s (40%)  
Abr 2014 – Nov 2014 = 2.78 l/s

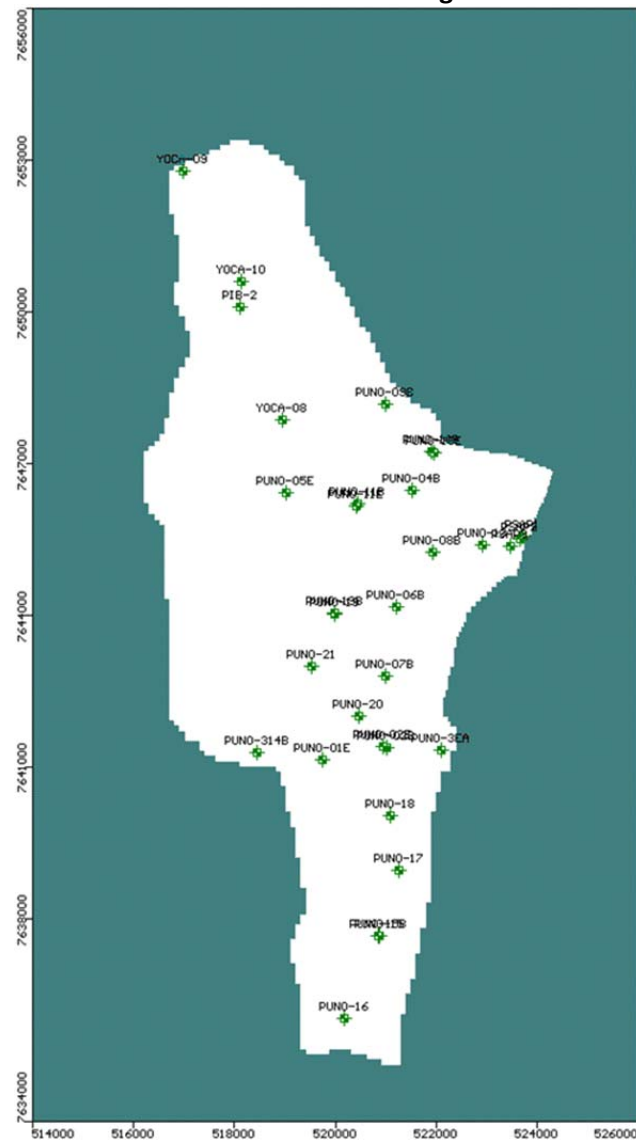
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.10**  
**Ubicación Pozos de Bombeo**



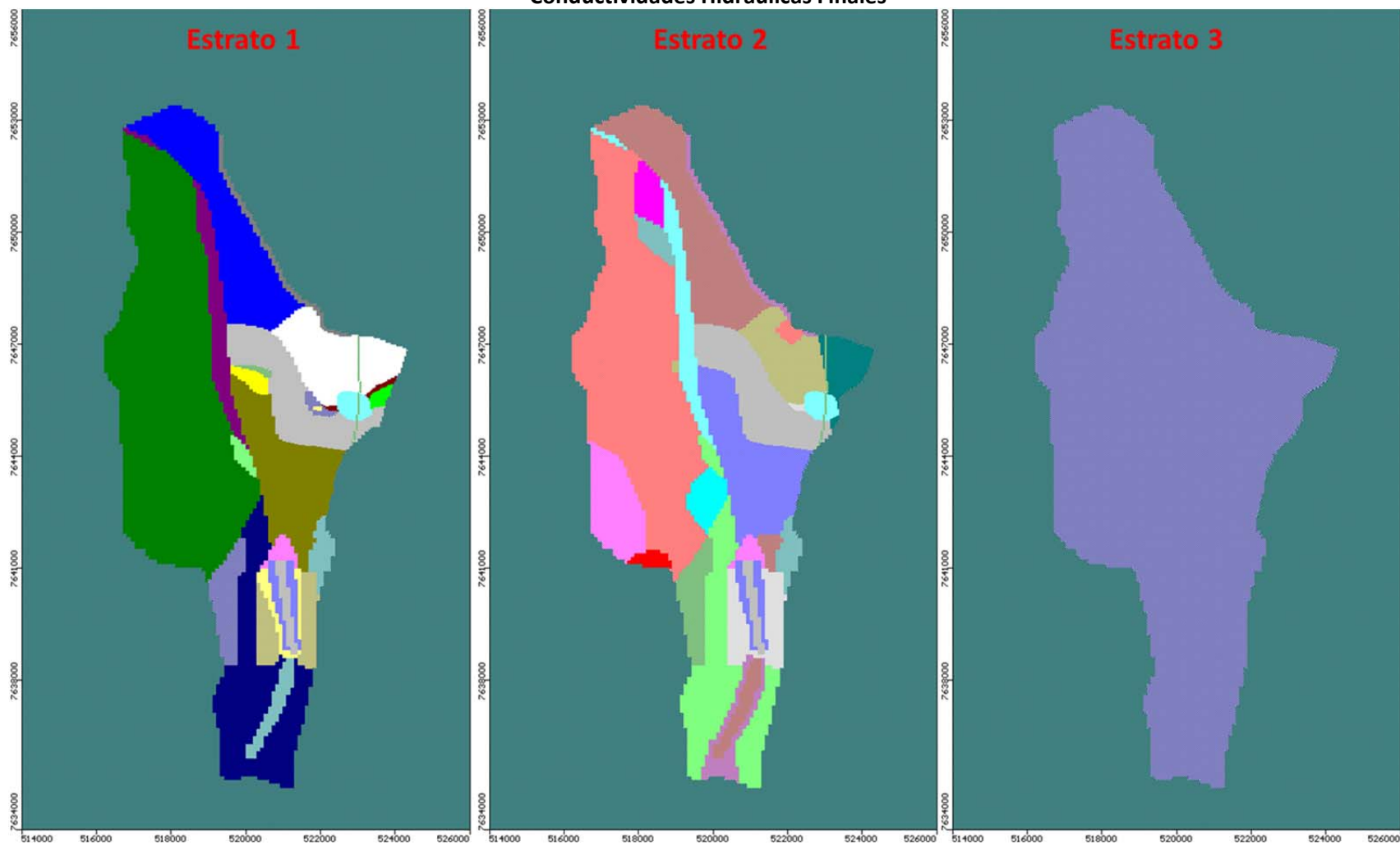
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.11**  
**Ubicación Pozos de Observación – Régimen Permanente**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.12a**  
**Conductividades Hidráulicas Finales**



Fuente: Elaboración Propia



**Figura 5.12b**  
**Valores de Conductividades Hidráulicas Finales**

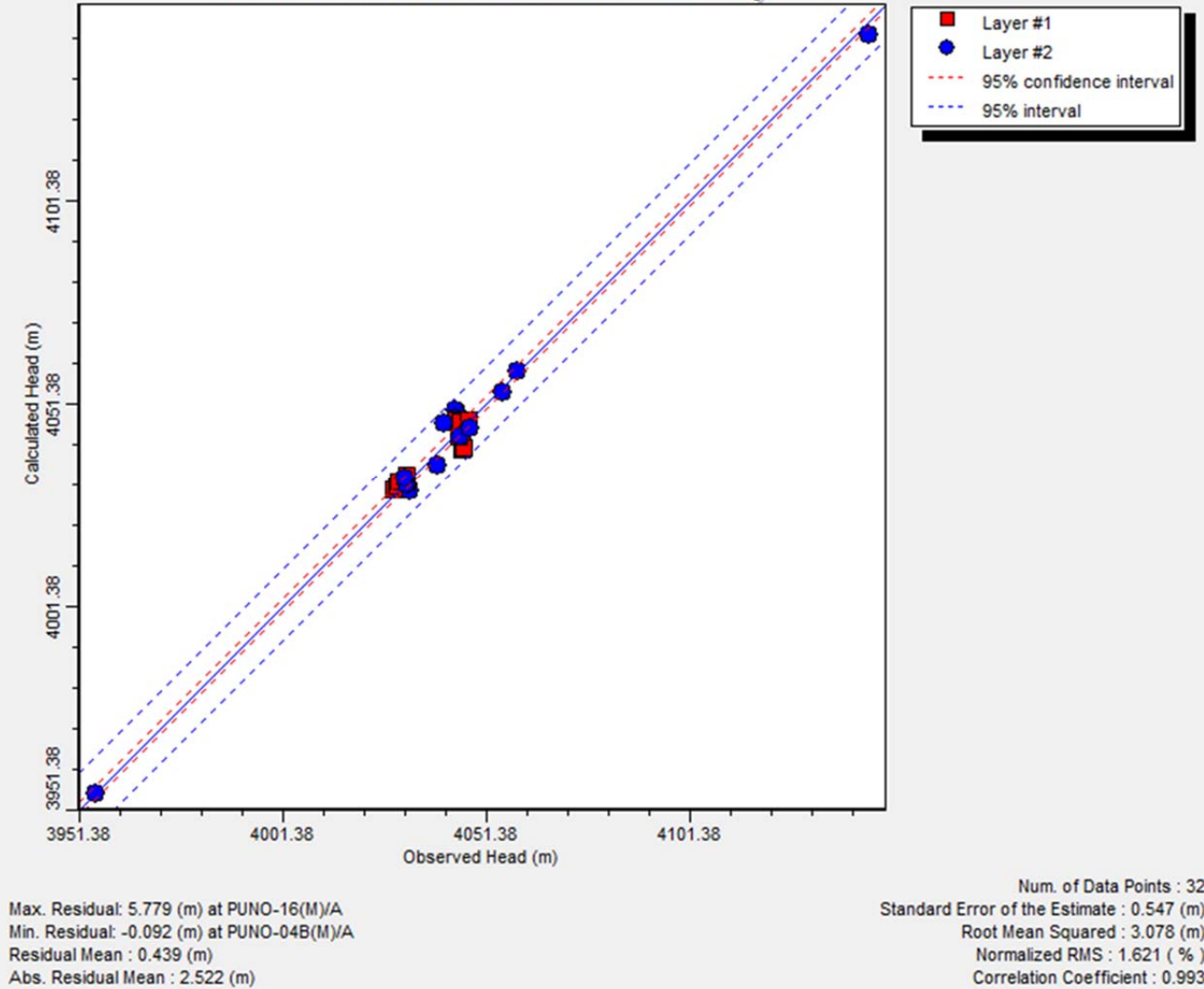
Zone	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]
1	60.48	60.48	6.048
2	44.77	44.77	4.477
3	0.0138	0.0138	0.0138
4	0.00259	0.00259	0.000259
5	7.78	7.78	0.778
6	0.43	0.43	0.43
7	60.48	60.48	6.048
8	0.86	0.86	0.086
9	0.6	0.6	0.06
10	13.22	13.22	13.22
11	3.07	3.07	0.307
12	20	20	2
13	0.000945	0.000945	0.000945
14	0.0163	0.0163	0.0163
15	29.07	29.07	2.907
16	5.43	5.43	0.543
17	0.15	0.15	0.015
18	0.0219	0.0219	0.00219
19	13.22	13.22	13.22
20	0.6	0.6	0.06
21	60.48	60.48	6.048
22	7.78	7.78	0.778
23	0.86	0.86	0.86
24	6	6	6
25	4	4	4
26	0.43	0.43	0.43
27	0.0138	0.0138	0.0138
28	0.6	0.6	0.6
29	0.1	0.1	0.01
30	0.01	0.01	0.01
31	0.1	0.1	0.1
32	1	1	1
33	0.01	0.01	0.001
34	25	25	2.5
35	0.005	0.005	0.0005
36	1	1	0.1
37	60.48	60.48	6.048
38	0.05	0.05	0.005
39	0.015	0.015	0.015
40	0.7	0.7	0.7
41	15	15	15
42	0.138	0.138	0.138
43	0.002	0.002	0.002
44	8.64E-5	8.64E-5	8.64E-6
45	0.001	0.001	0.001
46	1	1	1
47	20	20	20
48	0.005	0.005	0.0005
49	0.005	0.005	0.0005

Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.13

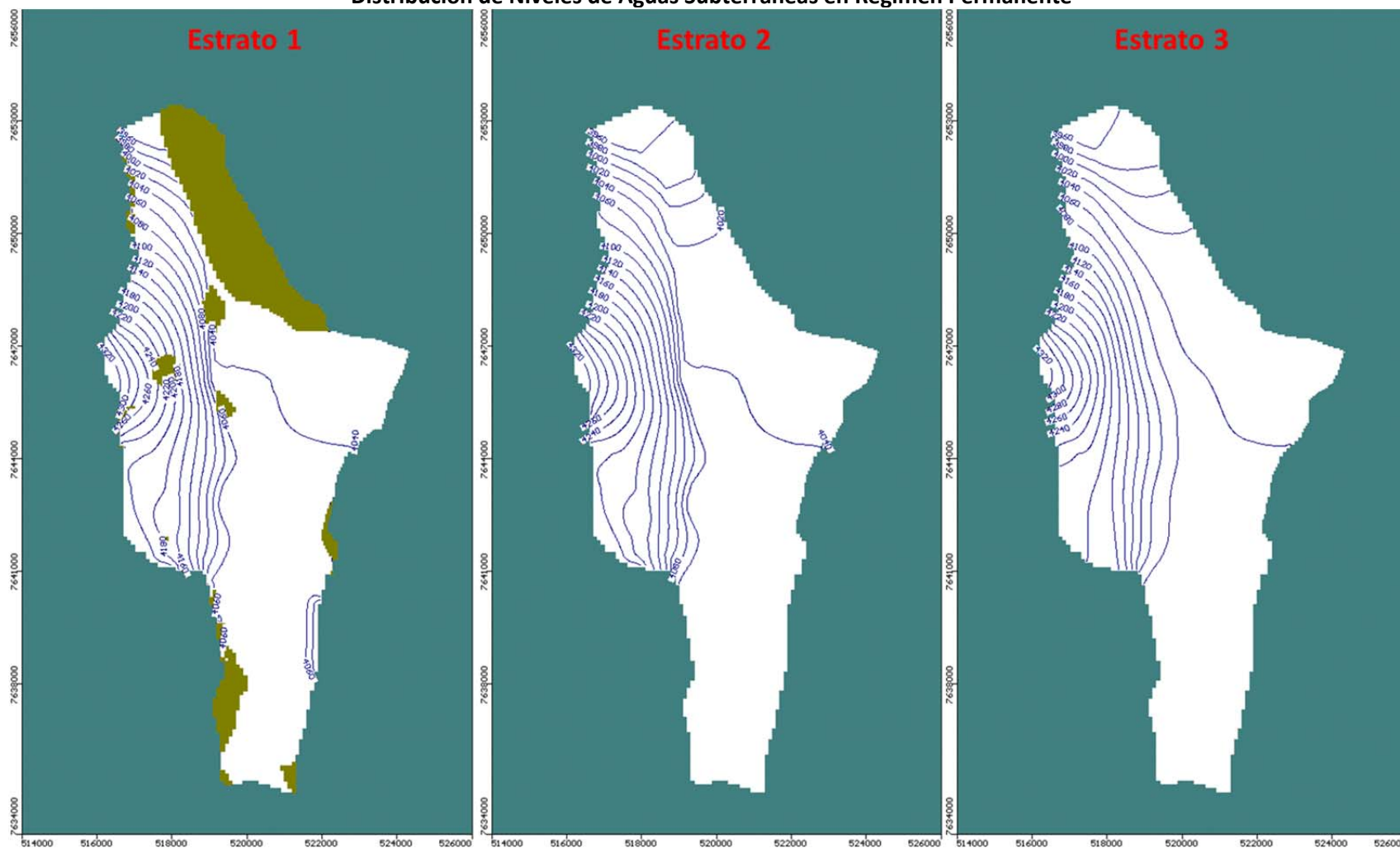
Indicadores de Ajuste en Proceso de Calibración en Régimen Permanente

Calculated vs. Observed Head : Time = 0.01 days



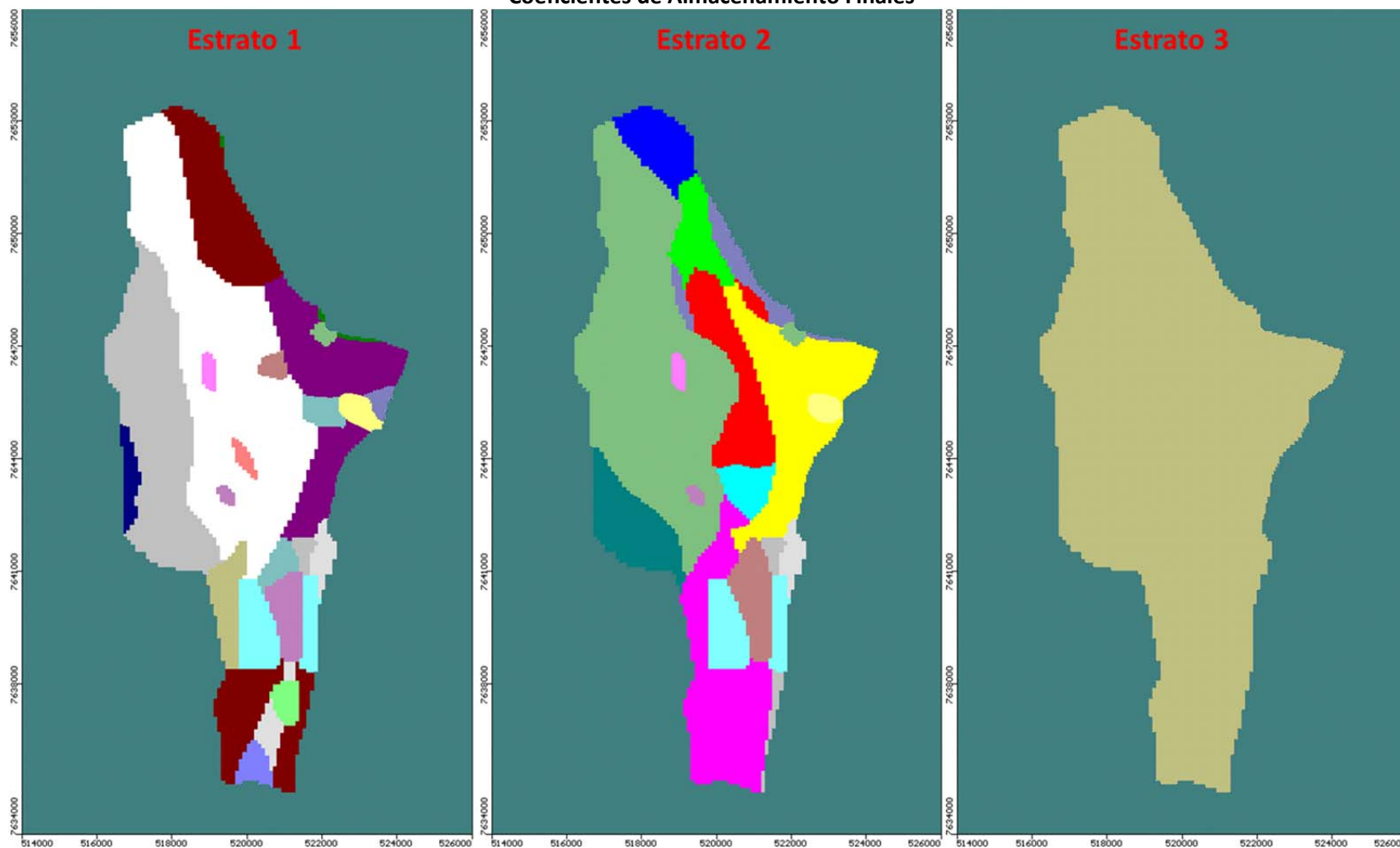
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.14**  
**Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas en Régimen Permanente**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.15a**  
**Coefficientes de Almacenamiento Finales**



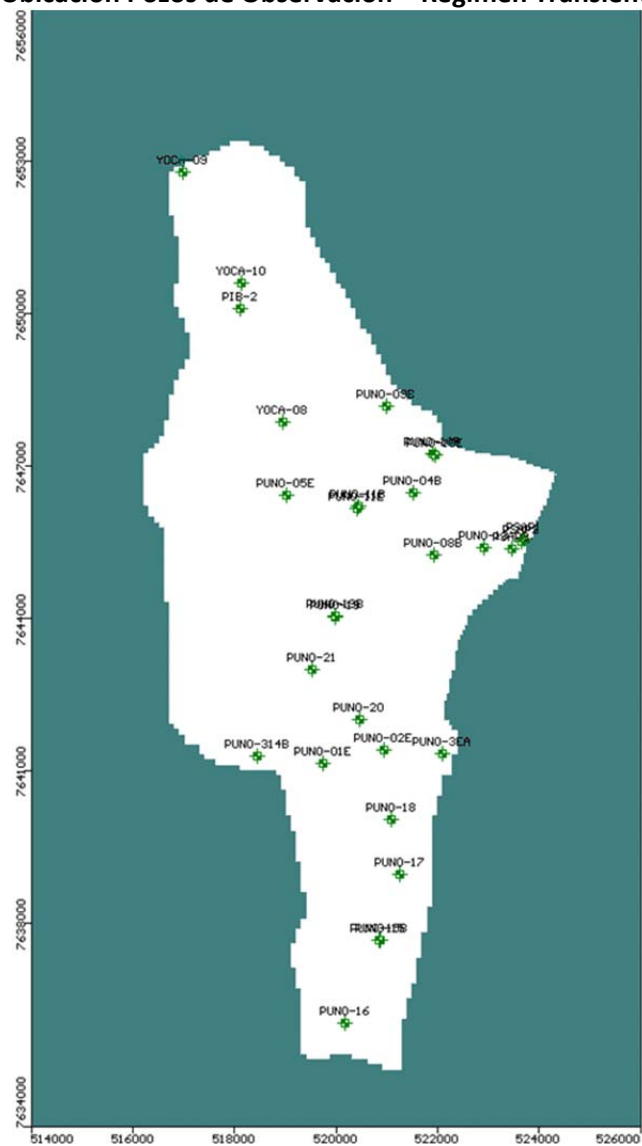
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.15b**  
**Valores de Coeficientes de Almacenamiento Finales**

Zone	Ss [1/m]	Sy []
1	1E-7	0.01
2	1E-7	0.02
3	1E-7	0.1
4	1E-7	0.005
5	1E-7	0.005
6	1E-7	0.1
7	1E-7	0.1
8	1E-7	0.01
9	1E-7	0.1
10	1E-7	0.1
11	1E-7	0.1
12	1E-7	0.1
13	1E-7	0.1
14	1E-7	0.1
15	1E-7	0.1
16	1E-7	0.1
17	1E-7	0.01
18	1E-7	0.1
19	1E-7	0.01
20	1E-7	0.005
21	1E-7	0.03
22	1E-7	0.3
23	1E-7	0.3
24	1E-7	0.3
25	1E-7	0.3
26	1E-7	0.005
27	1E-7	0.05
28	0.001	0.3
29	1E-7	0.2
30	1E-7	0.3
31	1E-7	0.01
32	1E-7	0.3
33	1E-7	0.3
34	1E-7	0.005
35	1E-9	0.01
36	1E-7	0.3

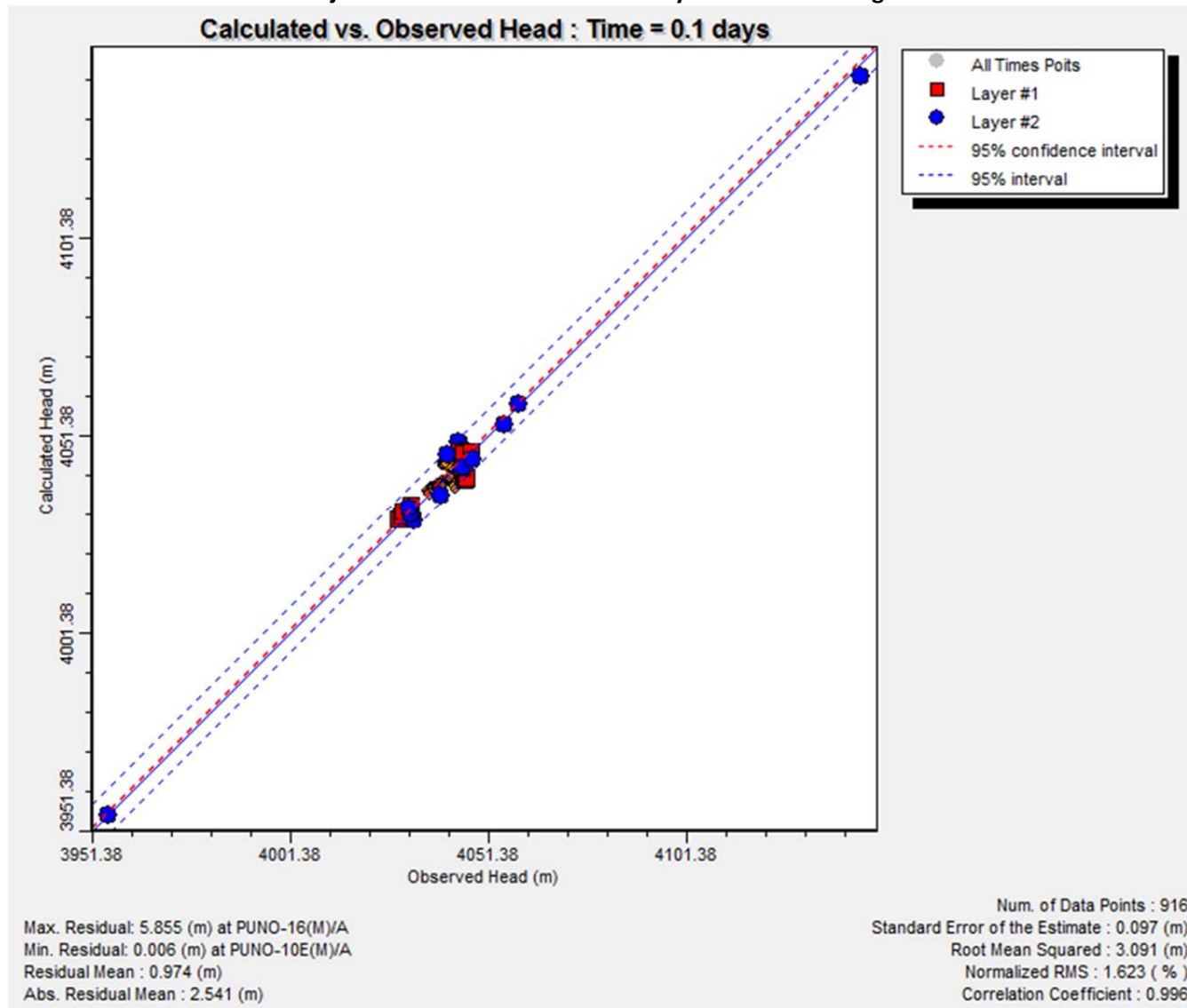
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.16**  
**Ubicación Pozos de Observación – Régimen Transiente**



Fuente: Elaboración Propia

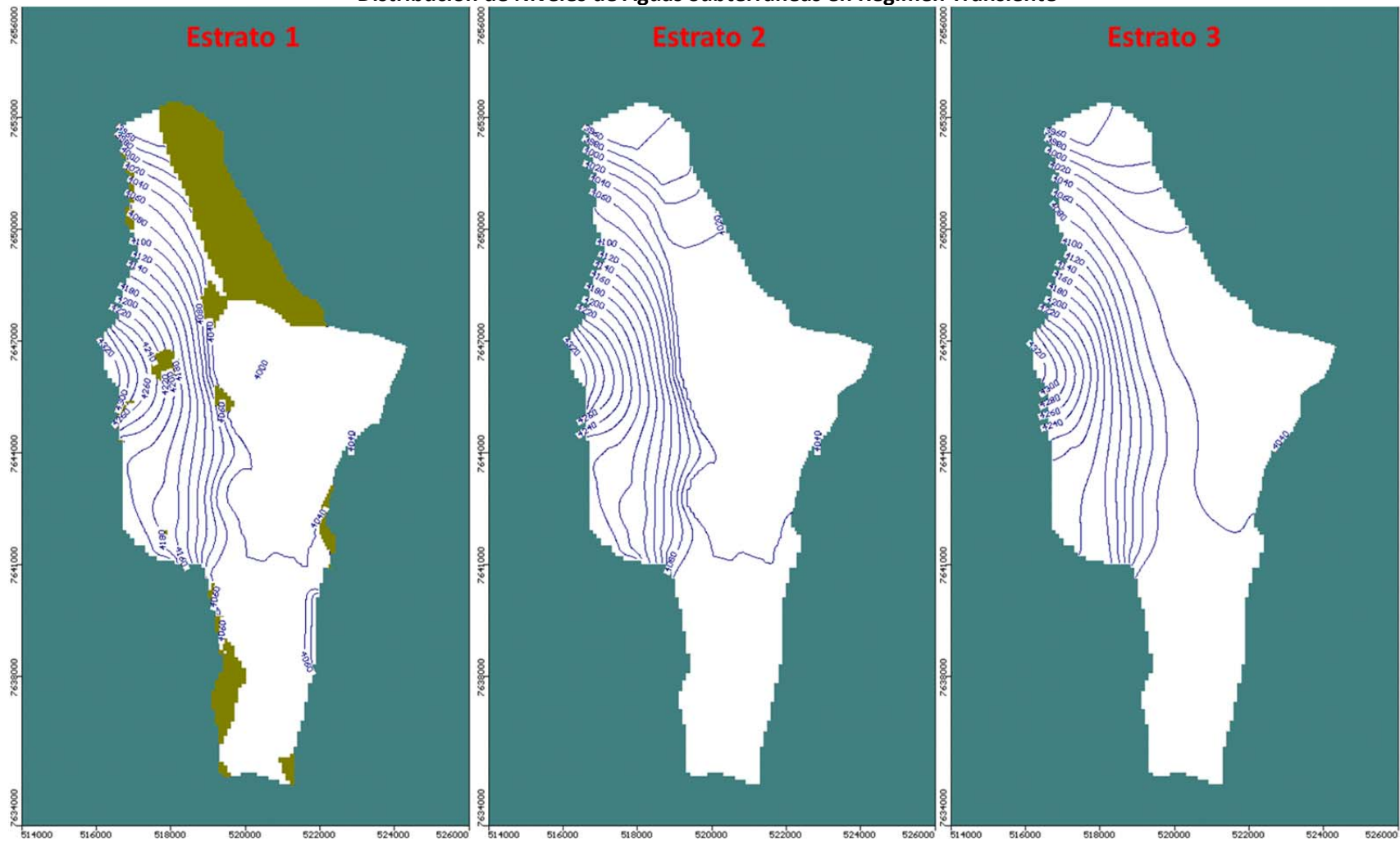
**Figura 5.17**  
**Indicadores de Ajuste en Proceso de Calibración y Validación en Régimen Transiente**



Fuente: Elaboración Propia



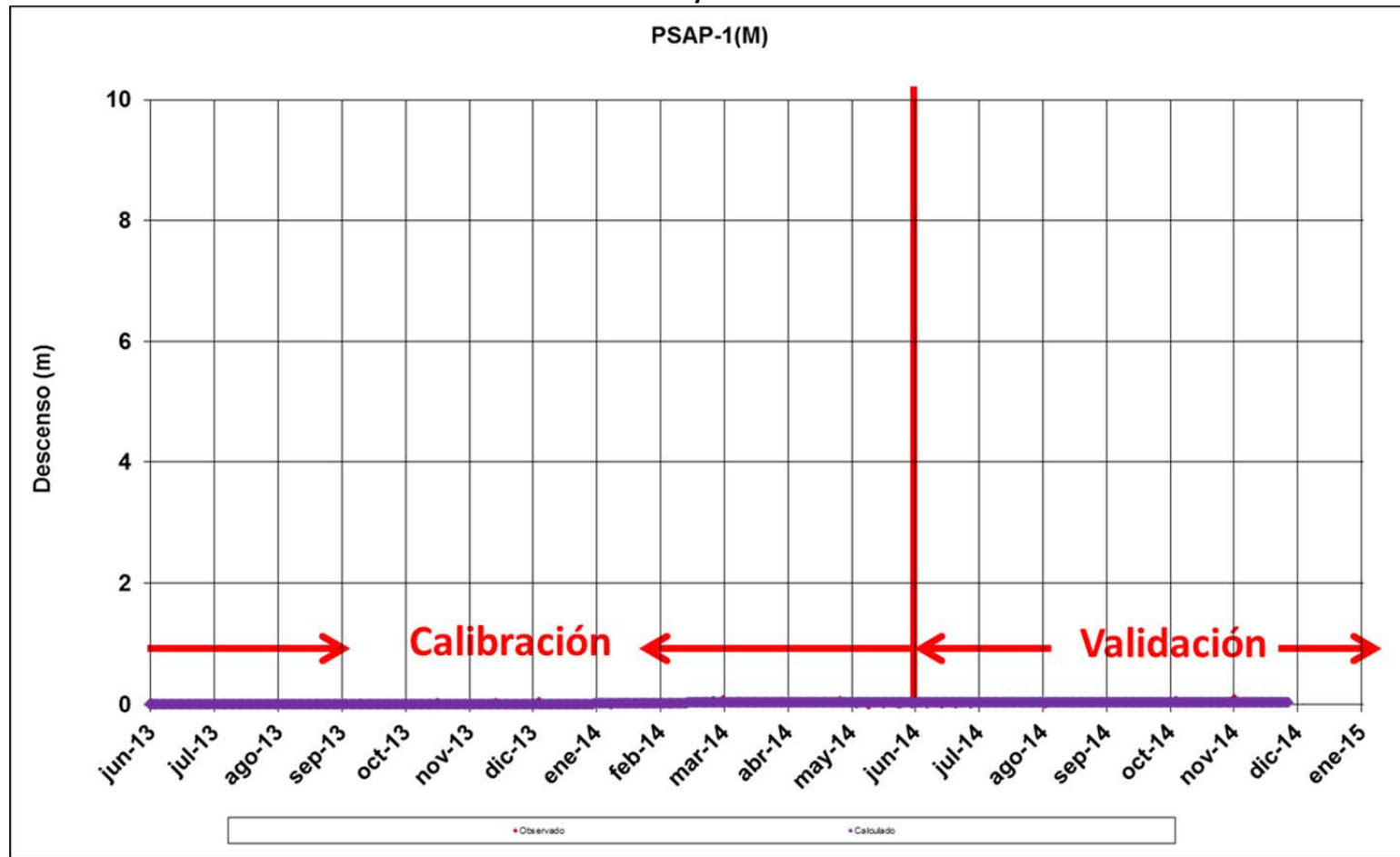
**Figura 5.18**  
**Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas en Régimen Transiente**



Fuente: Elaboración Propia



Figura 5.20  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PSAP-1 – Sector Norte



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.21  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PSAP-2 – Sector Norte

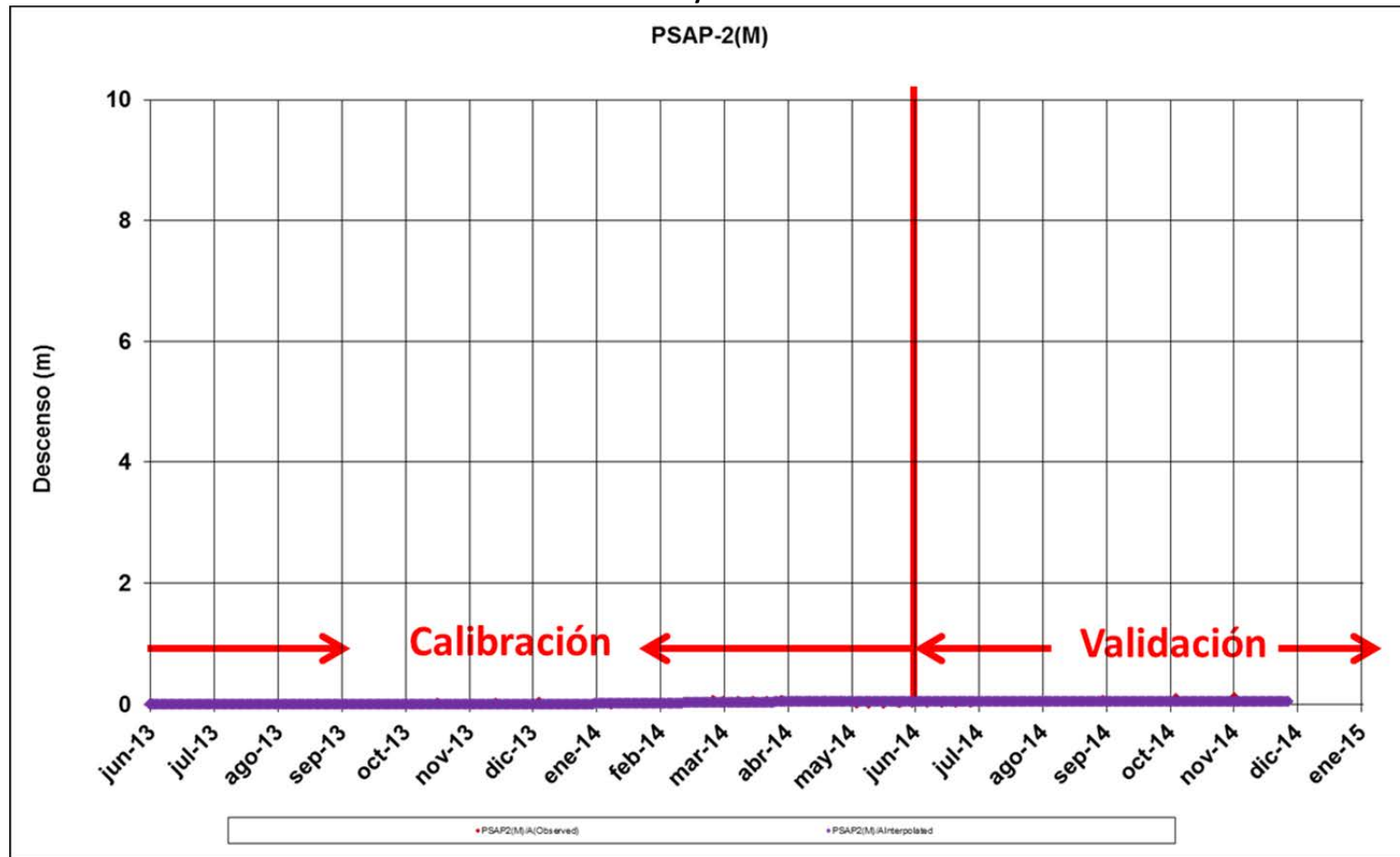
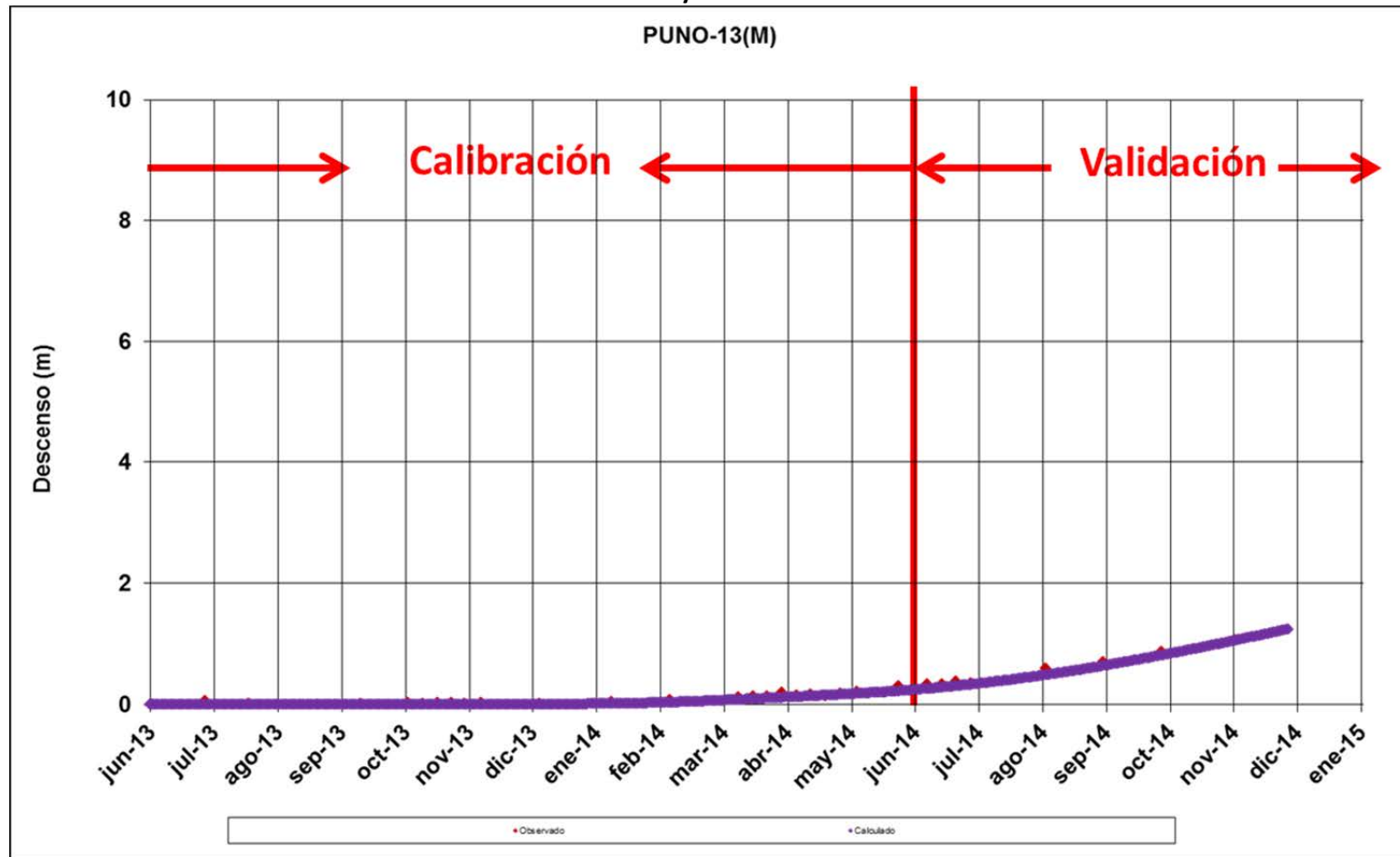
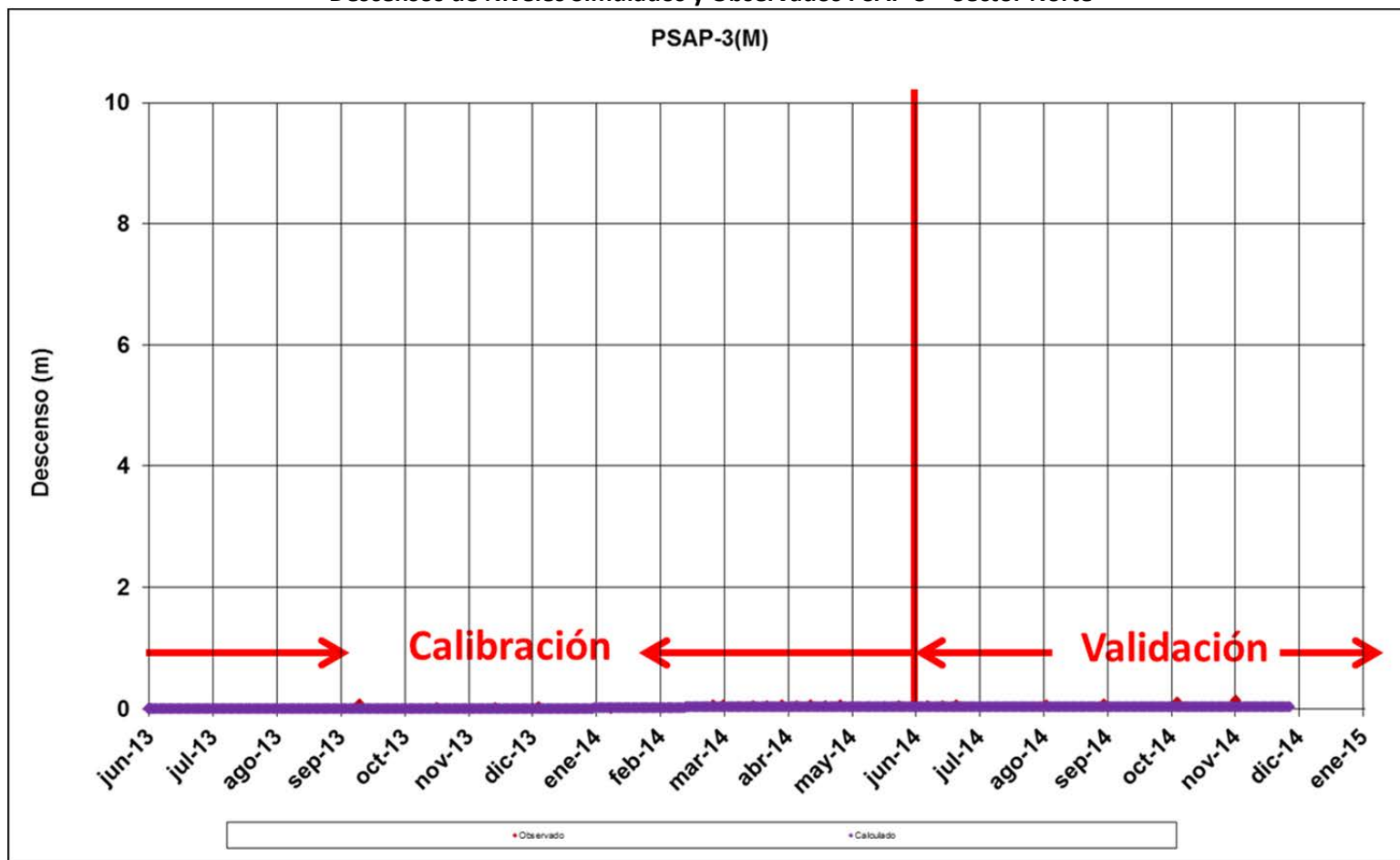


Figura 5.22  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-13 – Sector Norte



Fuente: Elaboración Propia

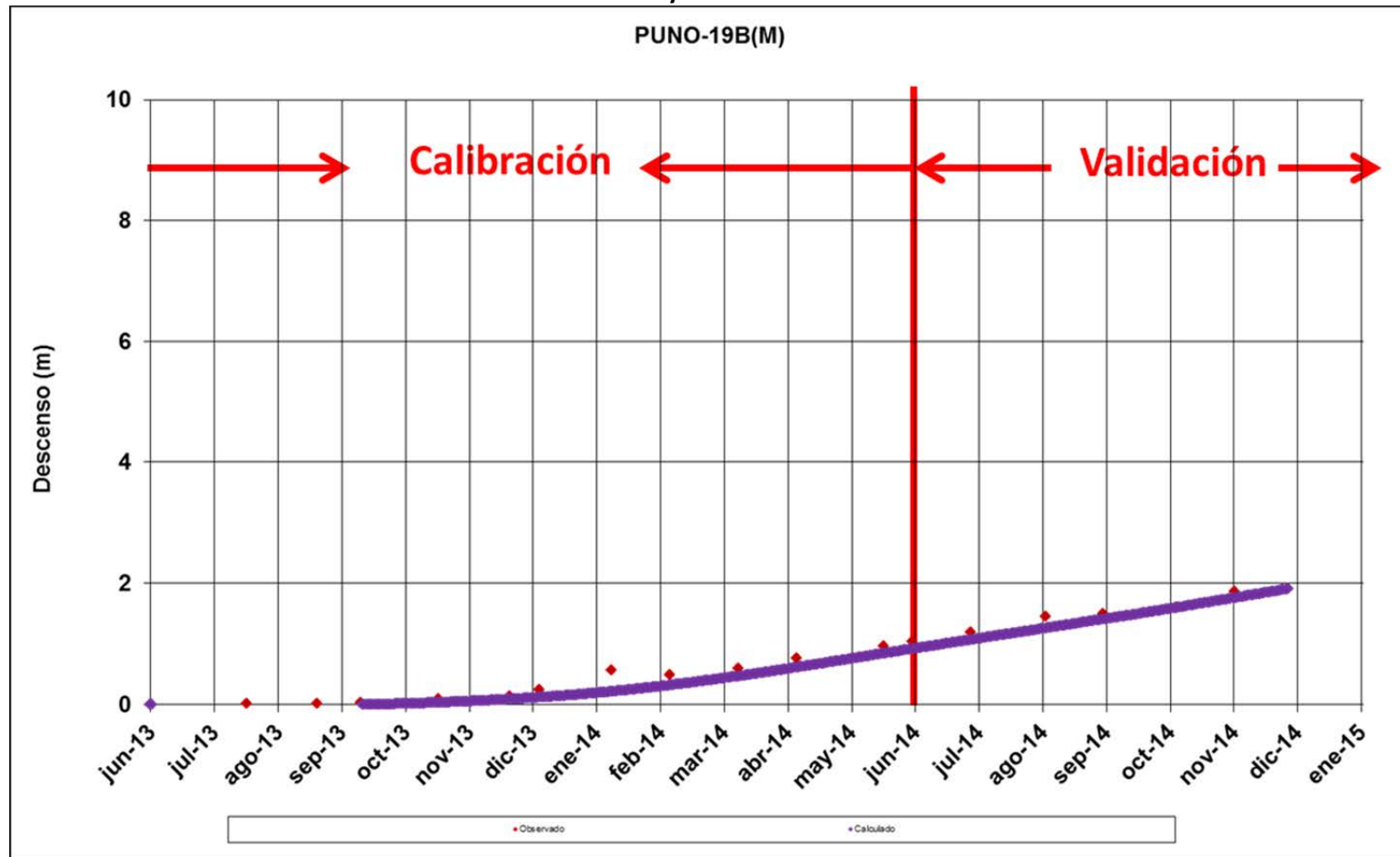
**Figura 5.23**  
**Descensos de Niveles Simulados y Observados PSAP-3 – Sector Norte**



Fuente: Elaboración Propia

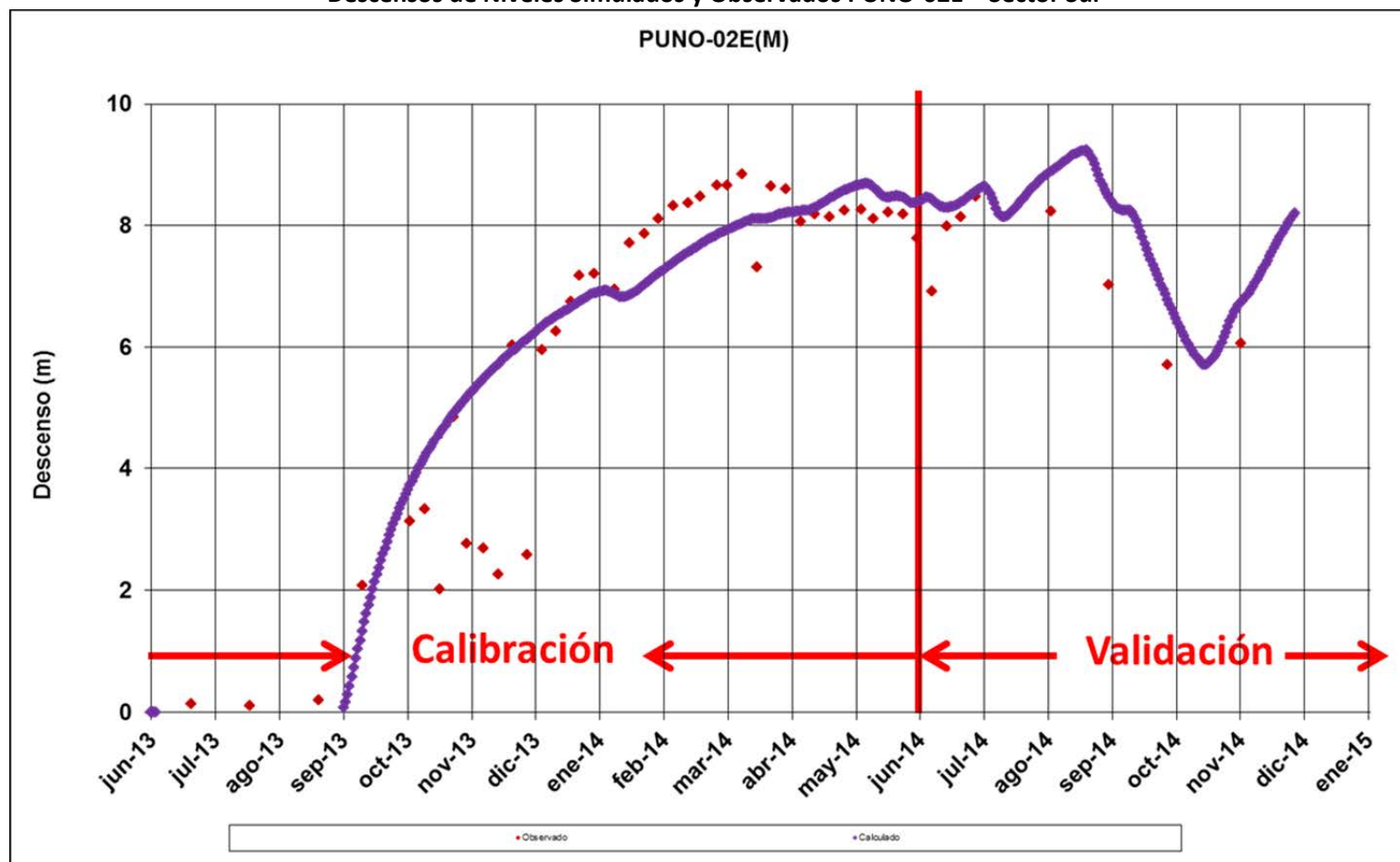


Figura 5.24  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-19B – Sector Centro



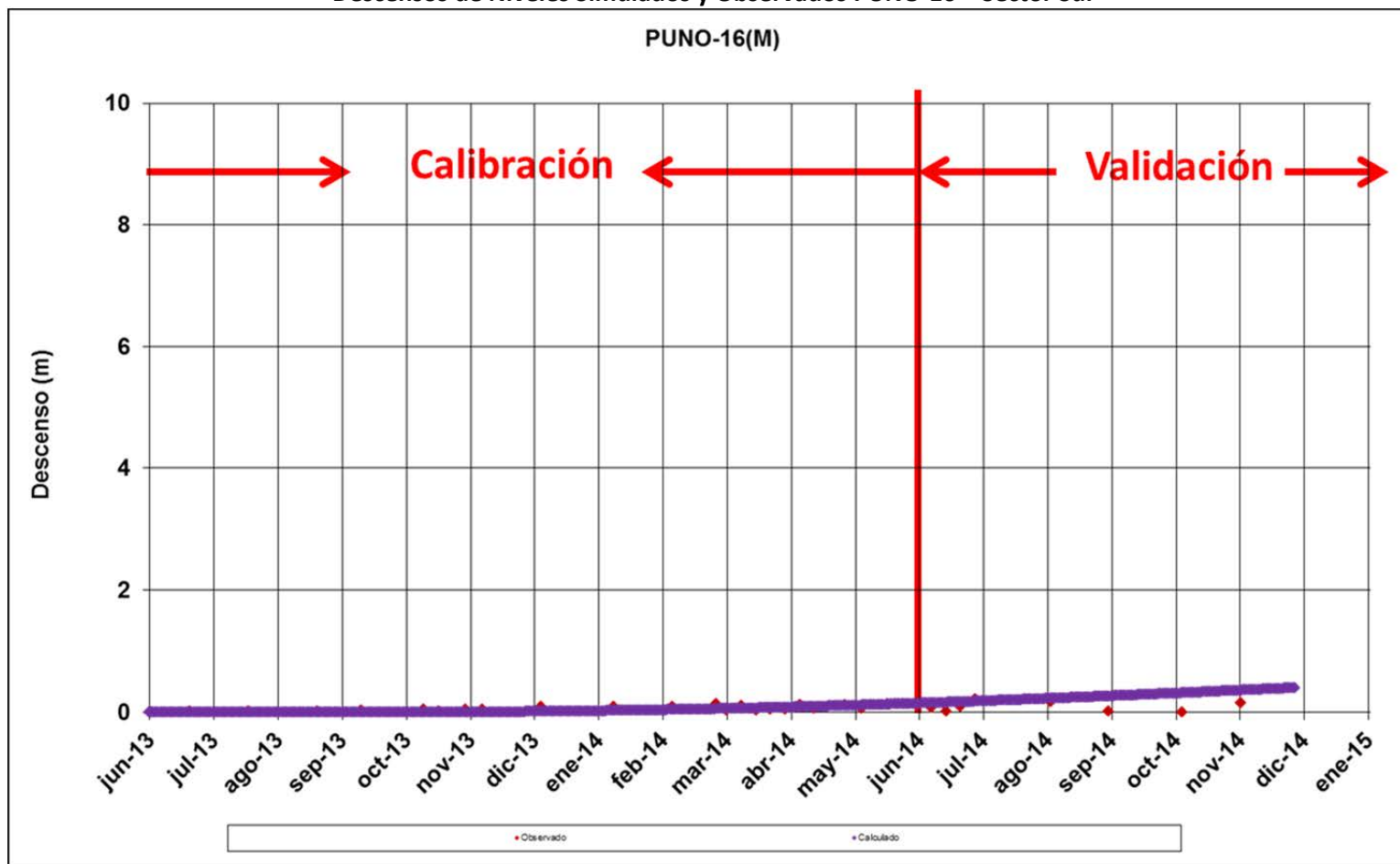
Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.25  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-02E – Sector Sur



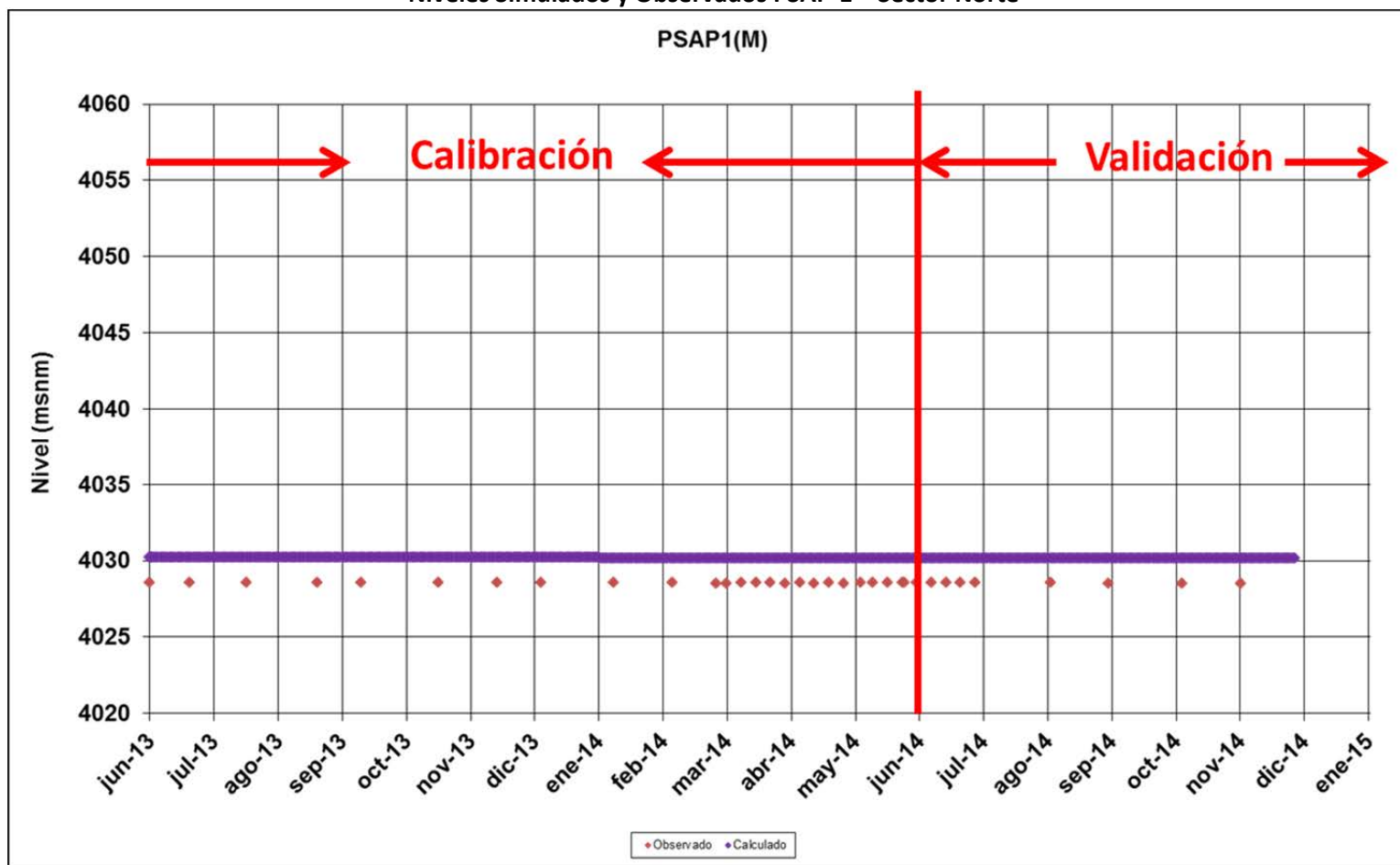
Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.26  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-16 – Sector Sur



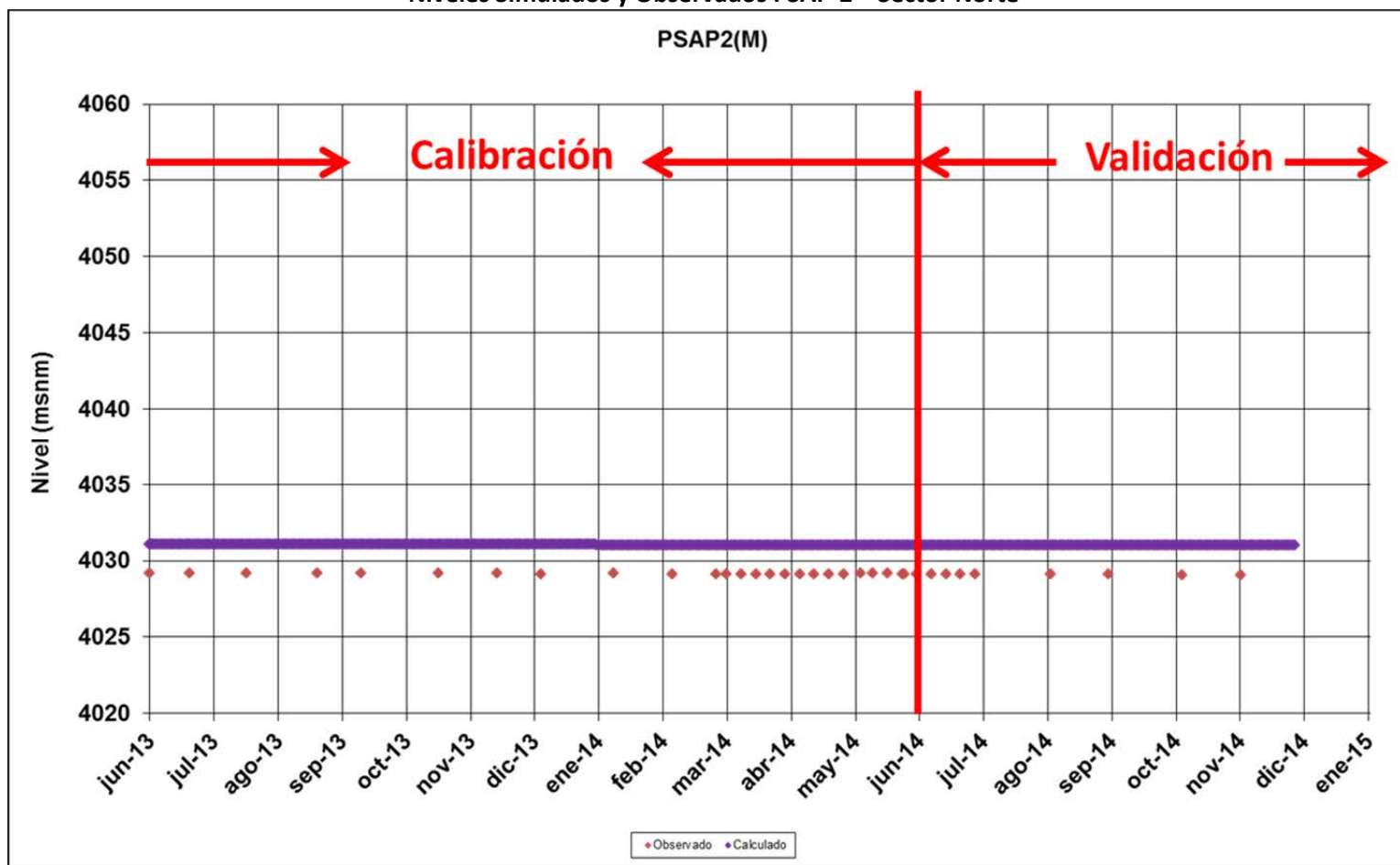
Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.27  
Niveles Simulados y Observados PSAP-1 – Sector Norte



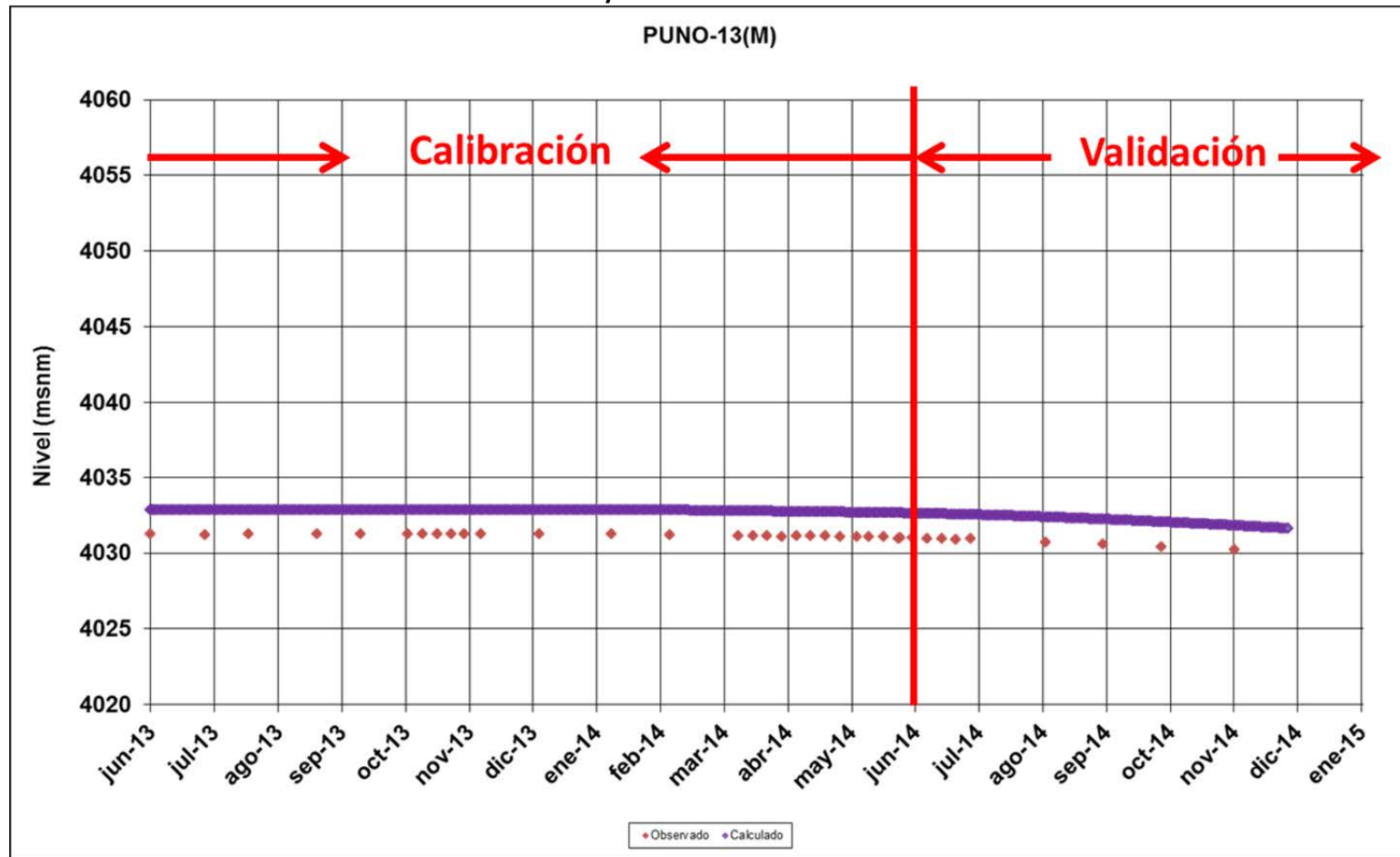
Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.28  
Niveles Simulados y Observados PSAP-2 – Sector Norte



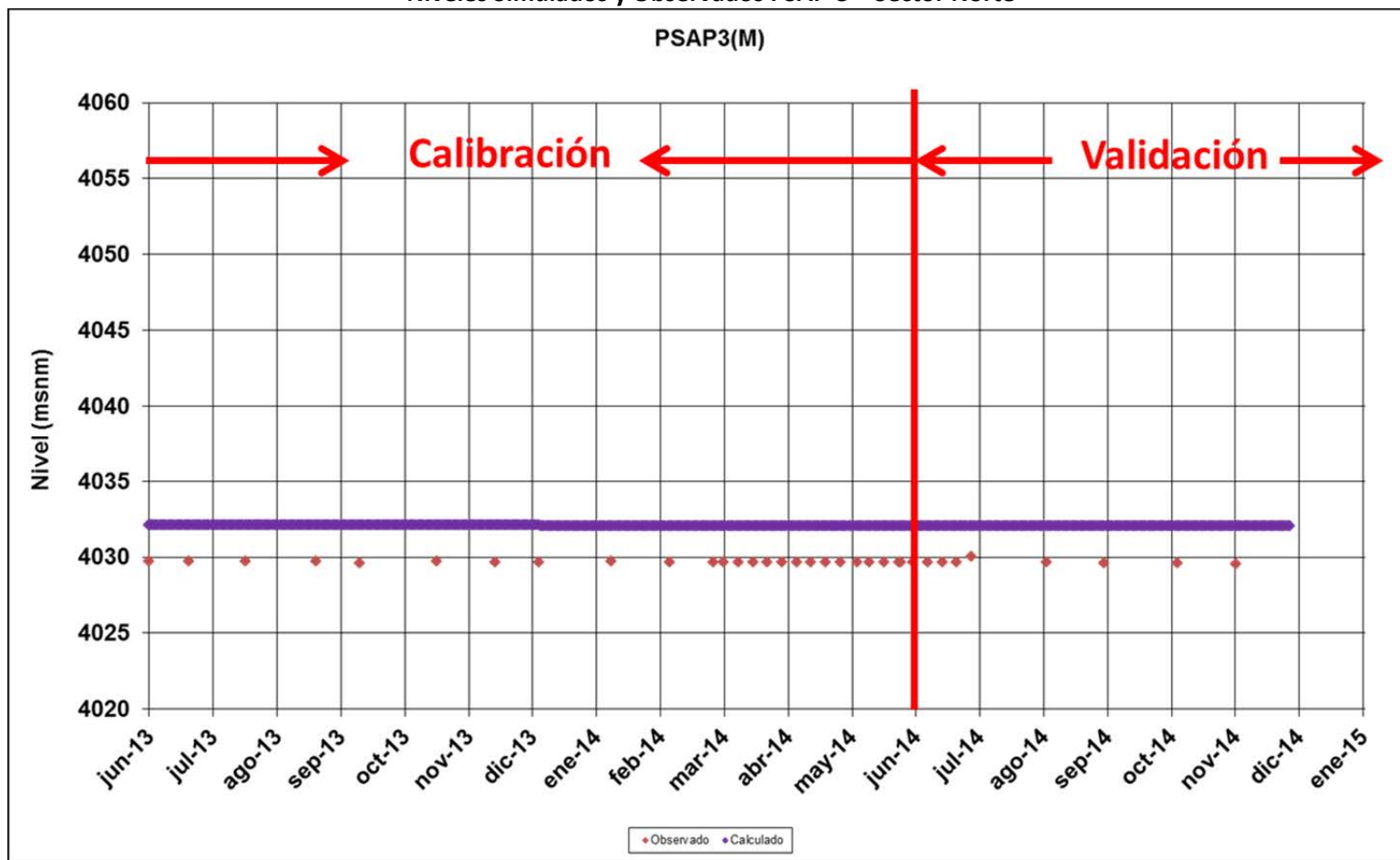
Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.29  
Niveles Simulados y Observados PUNO-13 – Sector Norte



Fuente: Elaboración Propia

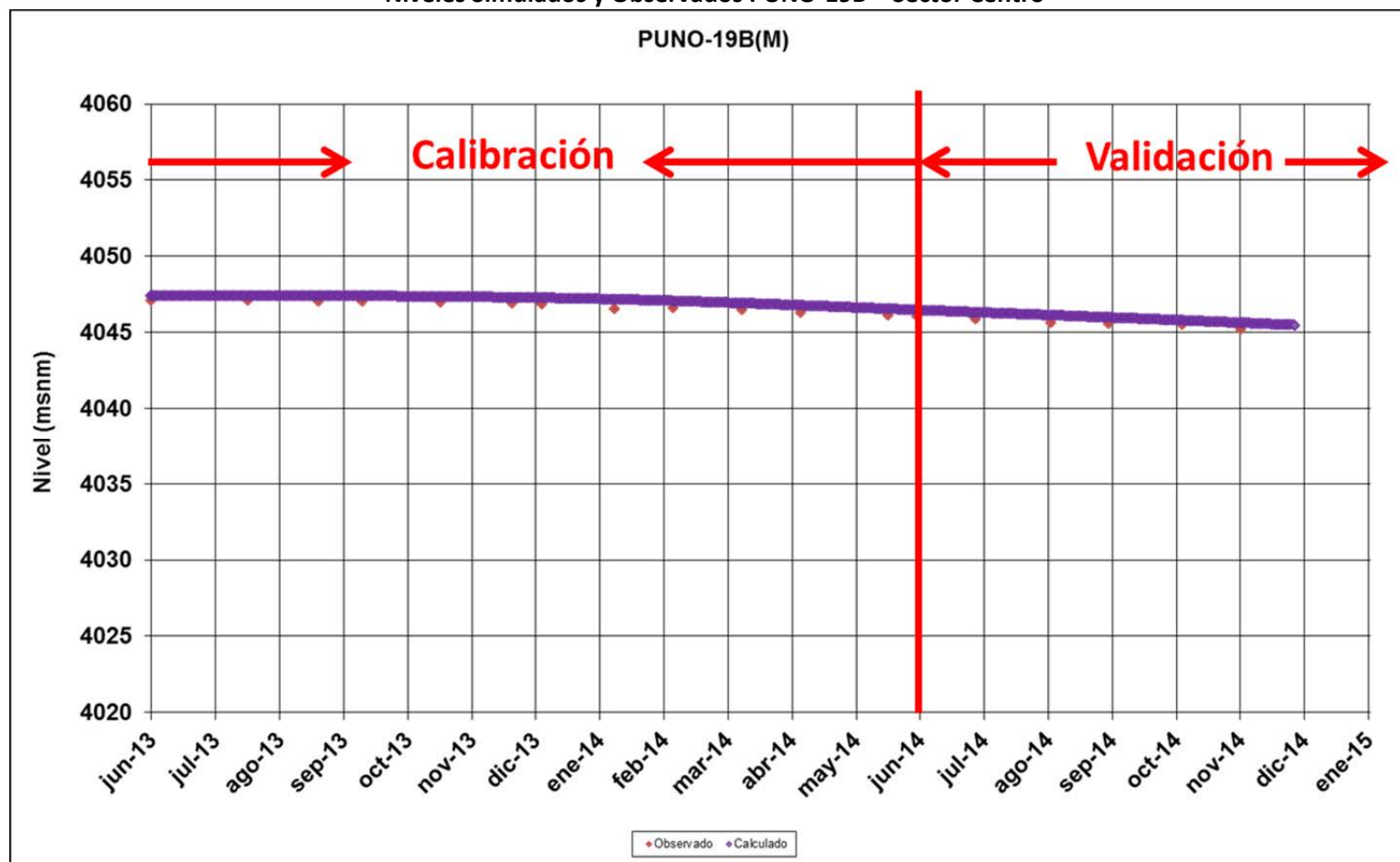
Figura 5.30  
Niveles Simulados y Observados PSAP-3 – Sector Norte



Fuente: Elaboración Propia

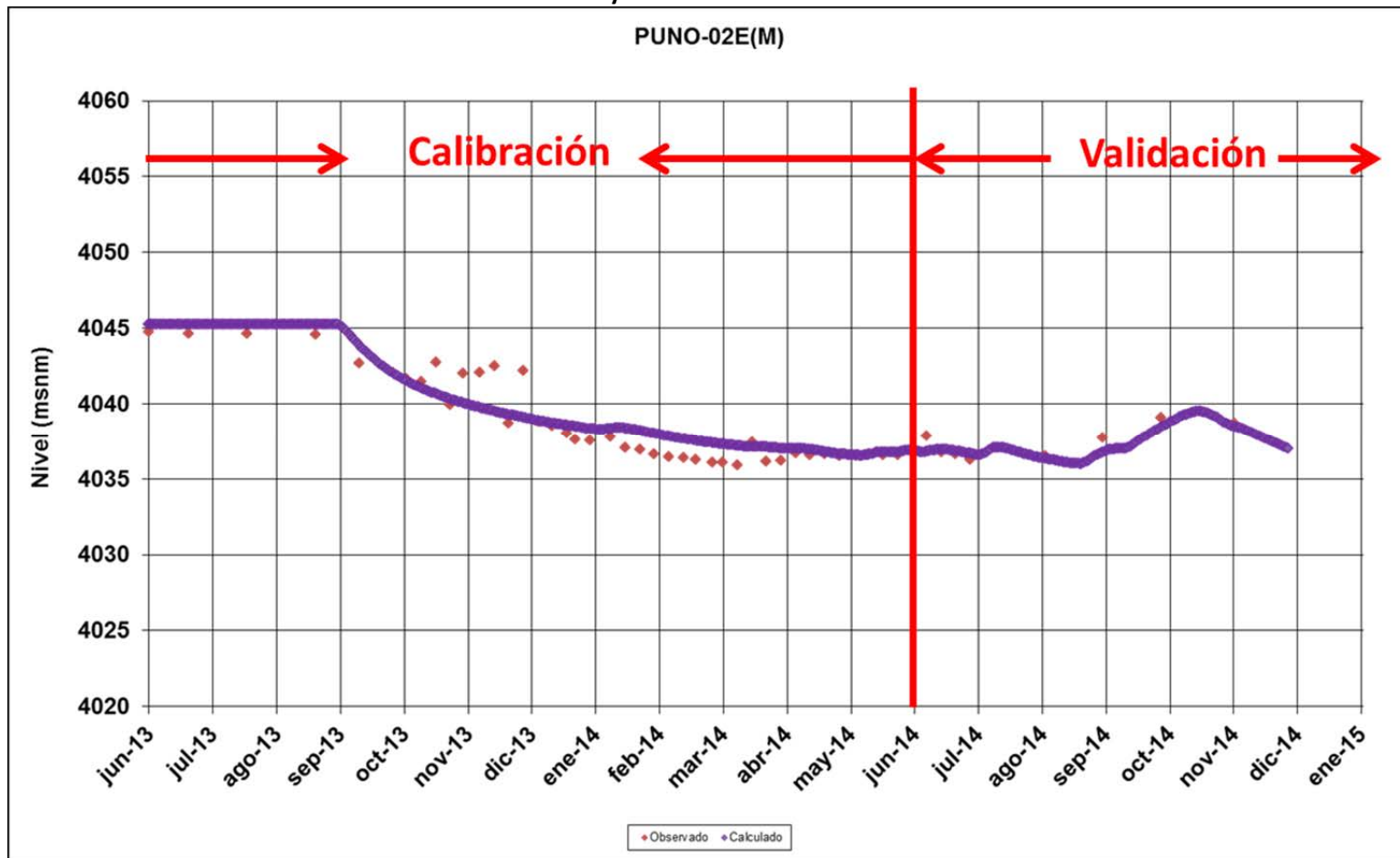


Figura 5.31  
Niveles Simulados y Observados PUNO-19B – Sector Centro



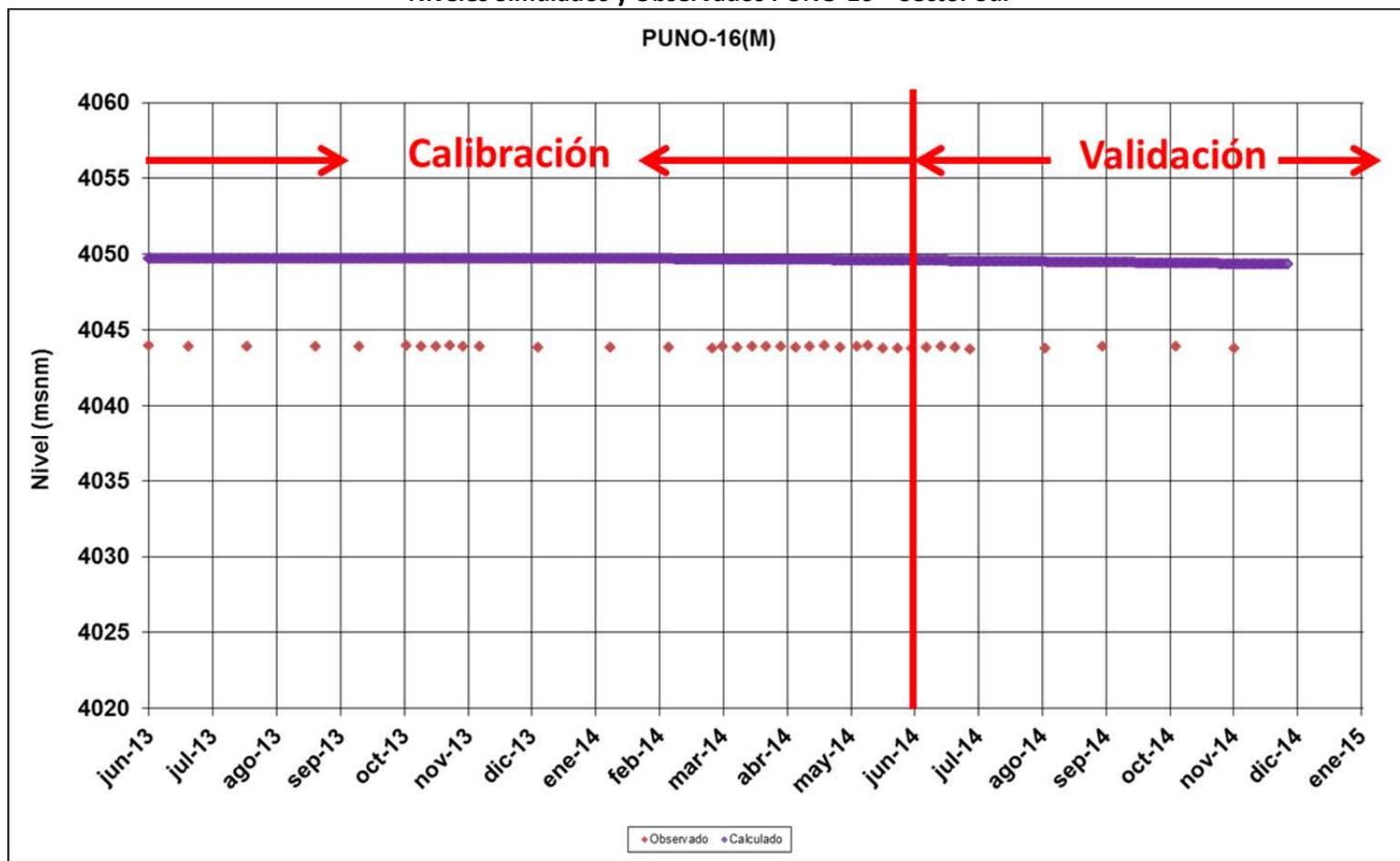
Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.32  
Niveles Simulados y Observados PUNO-02E – Sector Sur



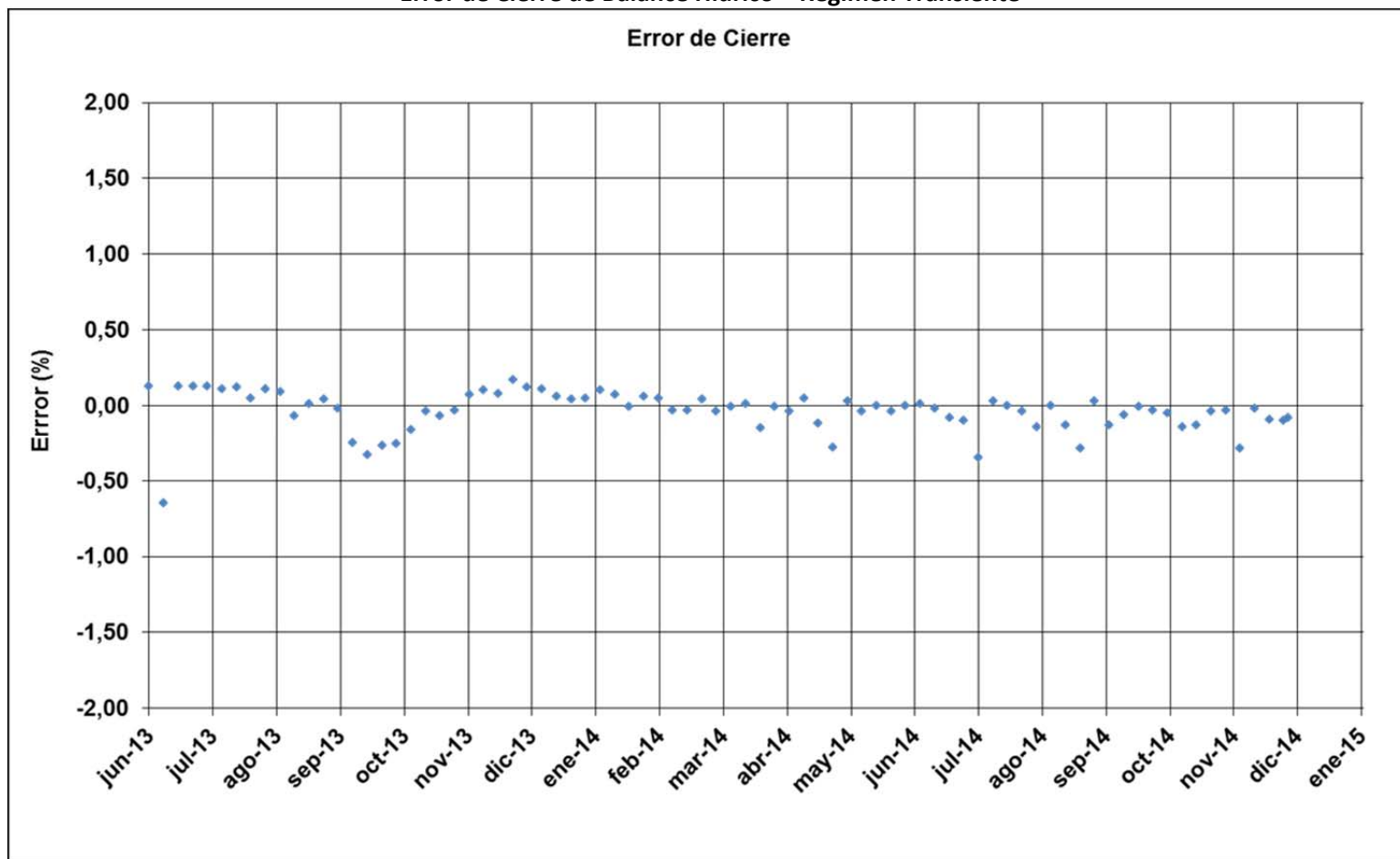
Fuente: Elaboración Propia

Figura 5.33  
Niveles Simulados y Observados PUNO-16 – Sector Sur



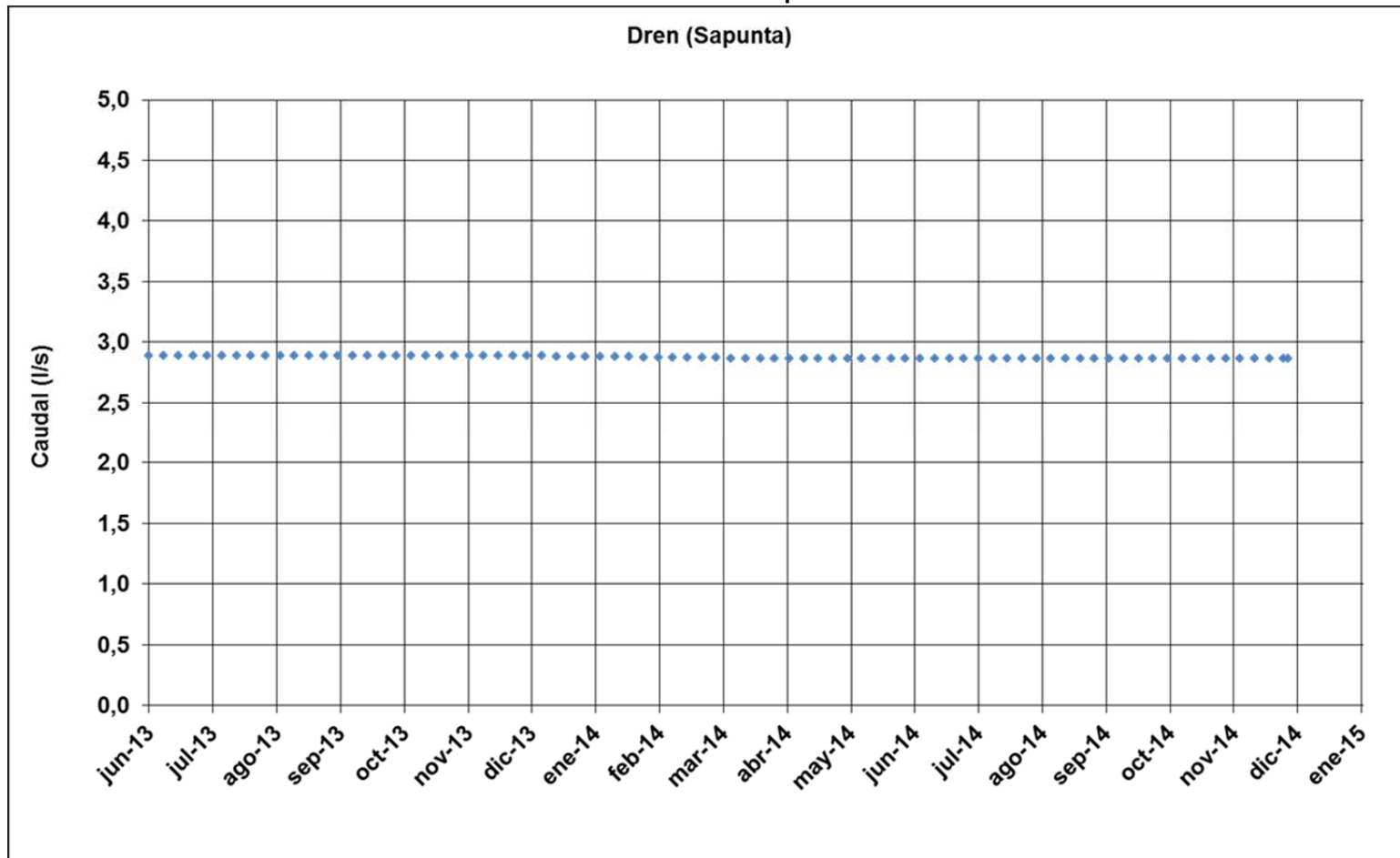
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.34**  
**Error de Cierre de Balance Hídrico – Régimen Transiente**



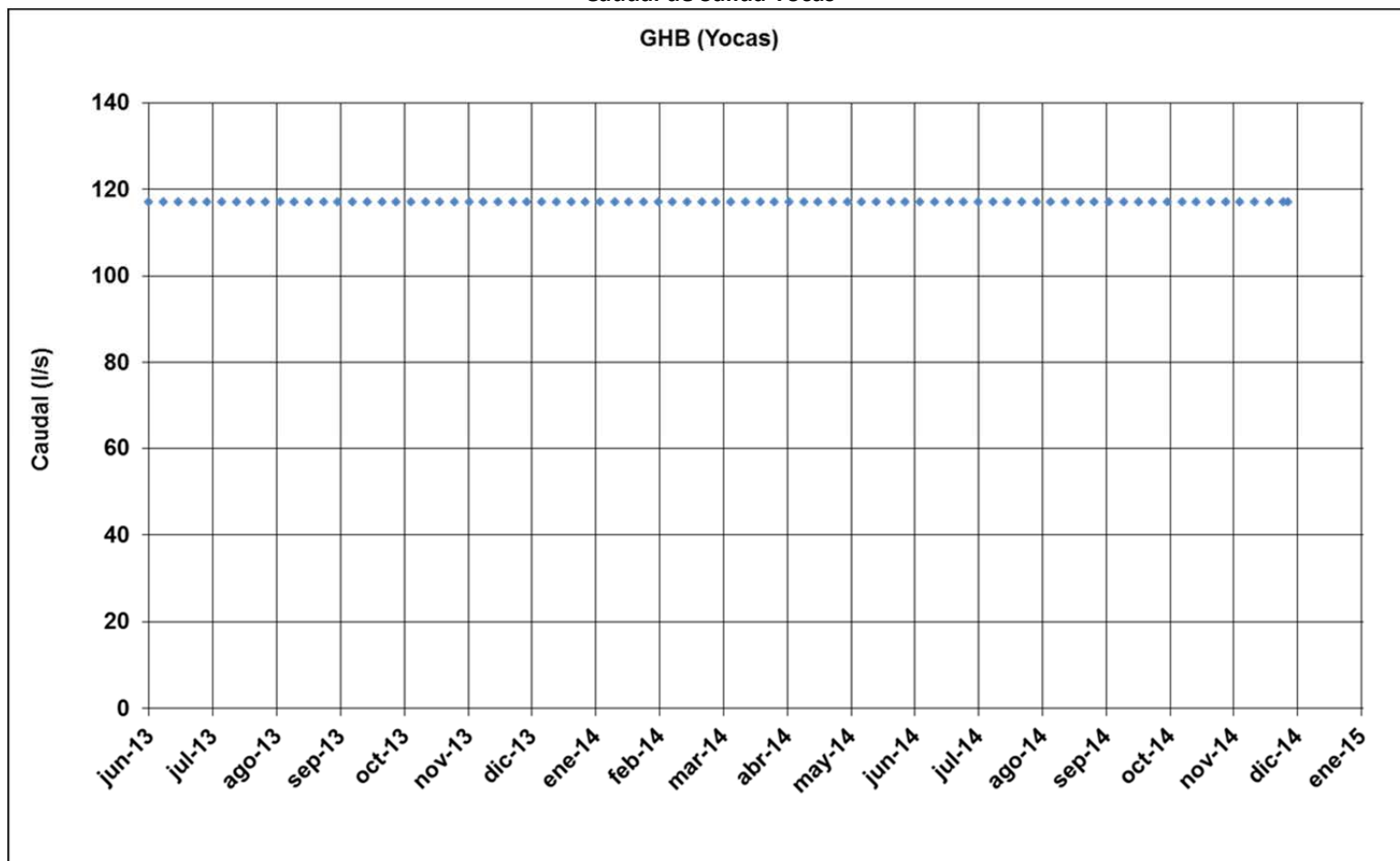
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.35**  
**Caudal de Salida Sapunta**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 5.36**  
**Caudal de Salida Yocas**



Fuente: Elaboración Propia

## **ANEXO A**

### **INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA PAMPA PUNO**

**REV B**

**MARZO 2015**

**PREPARADA POR**



**HIDROGEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE**



**Tabla A.1**  
**Estadística Pluviométrica Estación Lequena**

<b>AÑO</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
1973											0,0	0,0
1974	139,5	90,5	49,8	0,0	0,0	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1975	176,0	278,8	182,0	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,0
1976	121,0	20,0	64,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
1977	14,0	265,0	118,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
1978	25,0	9,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0
1979	64,1	1,0	3,5	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1980	0,0	1,0	16,5	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1981	6,0	25,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	2,4	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0
1983	8,0	3,0	23,0	0,0	5,0	5,0	0,0	0,0	7,0	0,0	0,0	0,0
1984	58,4	44,5	3,0	0,0	4,0	13,1	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0
1985	0,0	51,3	22,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	0,0
1986	52,2	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	0,0	0,0	0,0	10,5
1987	46,0	22,0	15,3	0,0	0,0	2,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1988	13,0	0,0	6,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1989	0,0	30,2	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1990	11,7	0,0	5,5	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,2
1991	1,5	0,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1992	5,2	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5
1993	26,4	1,6	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0	11,5	0,0	0,0	0,0	0,0
1994	6,0	0,0	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5
1995	35,0	0,0	10,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1996	0,0	5,0	3,5	0,0	0,0	2,5	0,0	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0
1997	4,0	27,5	16,0	0,0	1,0	0,0	0,0	11,5	16,9	0,0	0,0	0,0
1998	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1999	0,0	31,5	29,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5
2000	100,1	10,5	4,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2001	9,5	125,0	121,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
2002	0,0	21,0	29,5	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2003	1,0	1,0	6,5	0,0	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2004	0,0	57,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0
2005	26,5	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	2,0
2006	17,7	39,0	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2007	5,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2008	14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2009	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2010	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2011	0,5	31,5	0,0	7,0	0,0	0,0	29,7	0,0	0,0	0,0	0,0	34,5
2012	49,1	122,8	26,8	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2013		7,9	7,0	0,0		5,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2014	22,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0					

Fuente: DGA (2014)

**Tabla A.2**  
**Estadística Pluviométrica Estación Ollague**

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1972	64,5	58,5	10,5									
1973	121,8	21,9	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7
1974	77,6	61,0	18,0	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	42,0
1975	90,0	12,2	3,7	0,0	2,1	1,0	0,0	1,0	4,4	0,0	0,0	4,6
1976	20,0	84,0	12,9	0,9	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	8,0
1977	38,0	24,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	3,0	0,0	0,0
1978												7,0
1979	3,0	7,0	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1980	25,0	51,0	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0	9,0
1981	26,0	0,0	7,0	0,0	5,0	6,0	1,6	9,0	0,0	0,0	4,0	2,0
1982	0,0	2,0	3,0	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	3,0
1983	82,5	81,0	18,5	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	8,0	4,0	0,0
1984	0,0	98,0	12,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	34,5
1985	29,0	10,0	40,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	16,5
1986	43,0	27,0	20,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
1987												
1988												
1989												
1990												
1991												
1992												
1993				2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	10,6
1994	52,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0						
1995												
1996												
1997												
1998				0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,0
1999	7,0	18,5	8,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			1,0
2000									0,0	0,0	0,0	
2001												
2002				0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
2003	23,0	26,0	6,5	0,0	0,0	0,1	0,0	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0
2004	16,0	23,5	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0
2005	50,0	16,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2006	14,0	15,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2007	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2008	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
2010	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2011	15,0		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2012	0,0	14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2013	14,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
2014	64,5	58,5	10,5									

Fuente: DGA (2014)

**Tabla A.3**  
**Estadística Pluviométrica Estación Ujina**

<b>AÑO</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
1974	102,5	70,5	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,4	0,0
1975	81,5	229,0	117,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	70,0
1976	184	29,5	20,0	0,0	3,3	62,0	0,0	50,0	59,0	0,0	0,0	2,0
1977	7,8	87,1	24,0	0,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	0,0	41,0
1978	44,0	44,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	0,0	0,0	0,0	8,0
1979	98,0	7,5	22,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1980		9,0	19,0									0,0
1981	60,5	99,0	1,5									15,0
1982	36,5	0,0	12,0	2,0	4,4	5,0	0,0	0,4	3,0	0,0	12,0	4,8
1983	8,0	12,0	3,8	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1984	96,0	82,0	34,0	0,0								
1985	0,0	157,3	12,5	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,5	16,0
1986	40,0	14,0	66,3	0,0	0,0	0,0	0,0	56,0	0,0	0,0	17,0	158,5
1987	169,5	18,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	39,0	0,0	0,0
1988	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
1989												
1990												
1991	117,0	27,0	14,5	0,7	0,0	3,0		0,0	0,0	0,0	0,0	
1992												
1993												
1994												
1995												
1996								66,5	0,0	0,0	6,2	6,0
1997	59,0	90,0	16,5	0,0	0,0	0,0	0,0	10,7	9,5	0,0	0,0	0,0
1998	42,0	6,0			0,0		0,0	0,0	0,0	4,7	0,0	0,0
1999	0,0	70,5	60,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	
2000	117,3	53,2	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	7,2
2001	89,2	143,1	7,6	8,0	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	12,0
2002		48,7	87,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,7	10,7	0,0
2003	35,5	0,6	10,3	0,0	8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,9
2004	67,7	46,7	0,3	0,0	0,0	0,0	7,9	5,3	0,0	0,0	0,1	15,1
2005	44,3	80,3	4,8	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,4	19,9
2006	53,3	29,5	19,0	4,5	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
2007	29,3	3,8	4,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2008	113,2	1,6	5,7	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
2009	3,0	18,2	8,8	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
2010	25,9	30,3	0,0	7,4	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5
2011	71,9	122,5	1,1	4,1	3,0	0,0	13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	35,8
2012	31,5	117,2	17,6	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,9
2013	31,1	47,7	31,6	0,0	3,9	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
2014	39,1	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			

Fuente: DGA (2014)

**Tabla A.4**  
**Estadística Pluviométrica Estación Guatacondo**

<b>AÑO</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
1977									0,0	0,0	0,0	0,0
1978	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1979	8,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1980	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1981	0,1	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1982	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1983	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0
1984	42,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	3,0
1985	0,0	7,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1986	1,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1987	8,0	0,0	25,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1988	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1989	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1990	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
1991	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1992	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1993	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1994	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1995	0,0	0,0	22,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1996	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1997	26,0	3,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0
1998	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1999	0,0	1,0	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2000	58,3	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2001	5,0	17,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2002	13,6	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	26,0	0,0	0,0		0,0	0,0
2003	0,0	0,0	2,5	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2004	15,5	40,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0
2005	126,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5
2006	9,5	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2007	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2008	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2009	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2010	19,0	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2011	7,0	51,3	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0
2012	10,0	34,0	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2013	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2014	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			

Fuente: DGA (2014)

## **ANEXO B**

### **ESTRATIGRAFÍA DE LOS SONDAJES PAMPA PUNO**

**REV B**

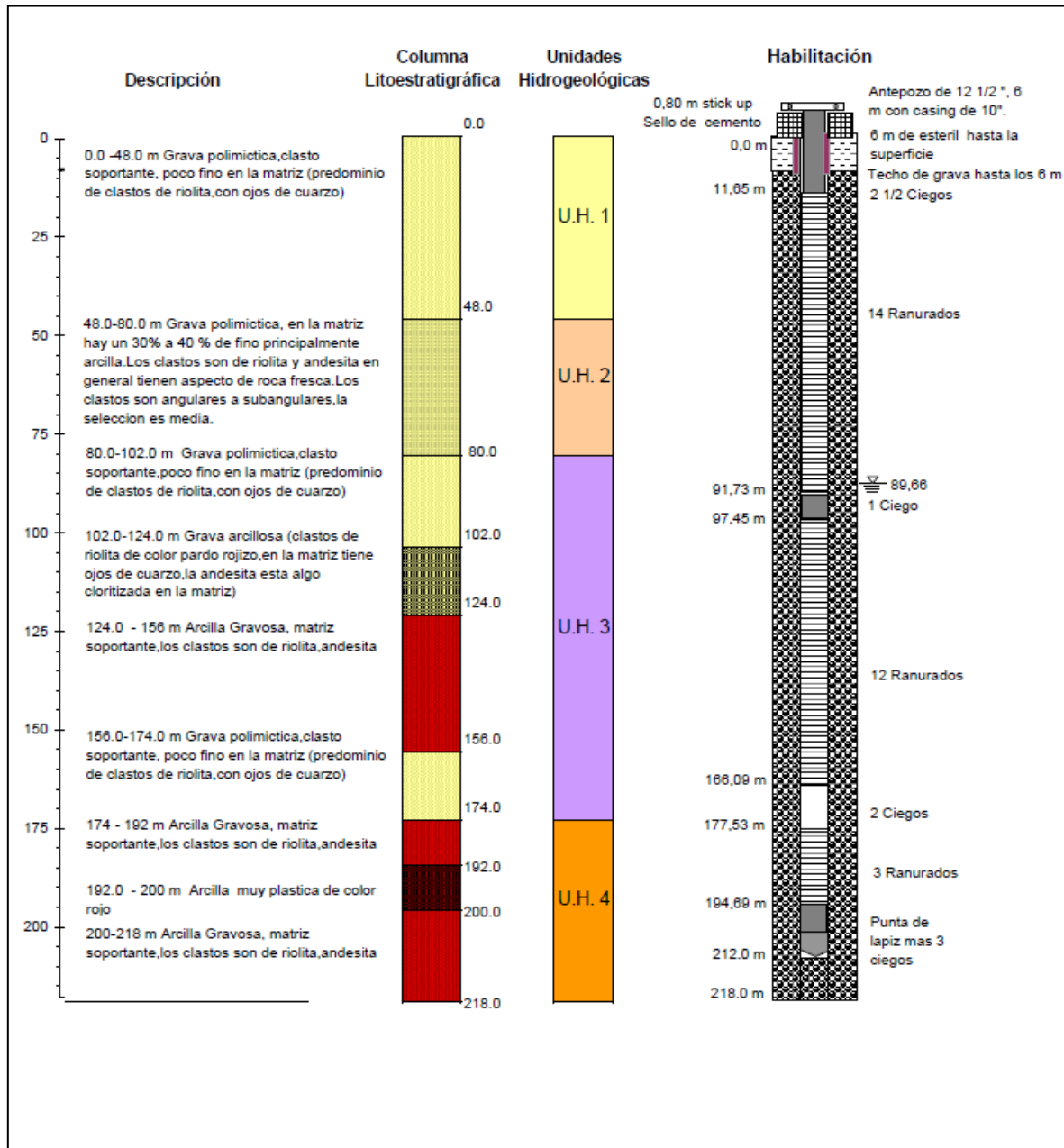
**MARZO 2015**

**PREPARADA POR**



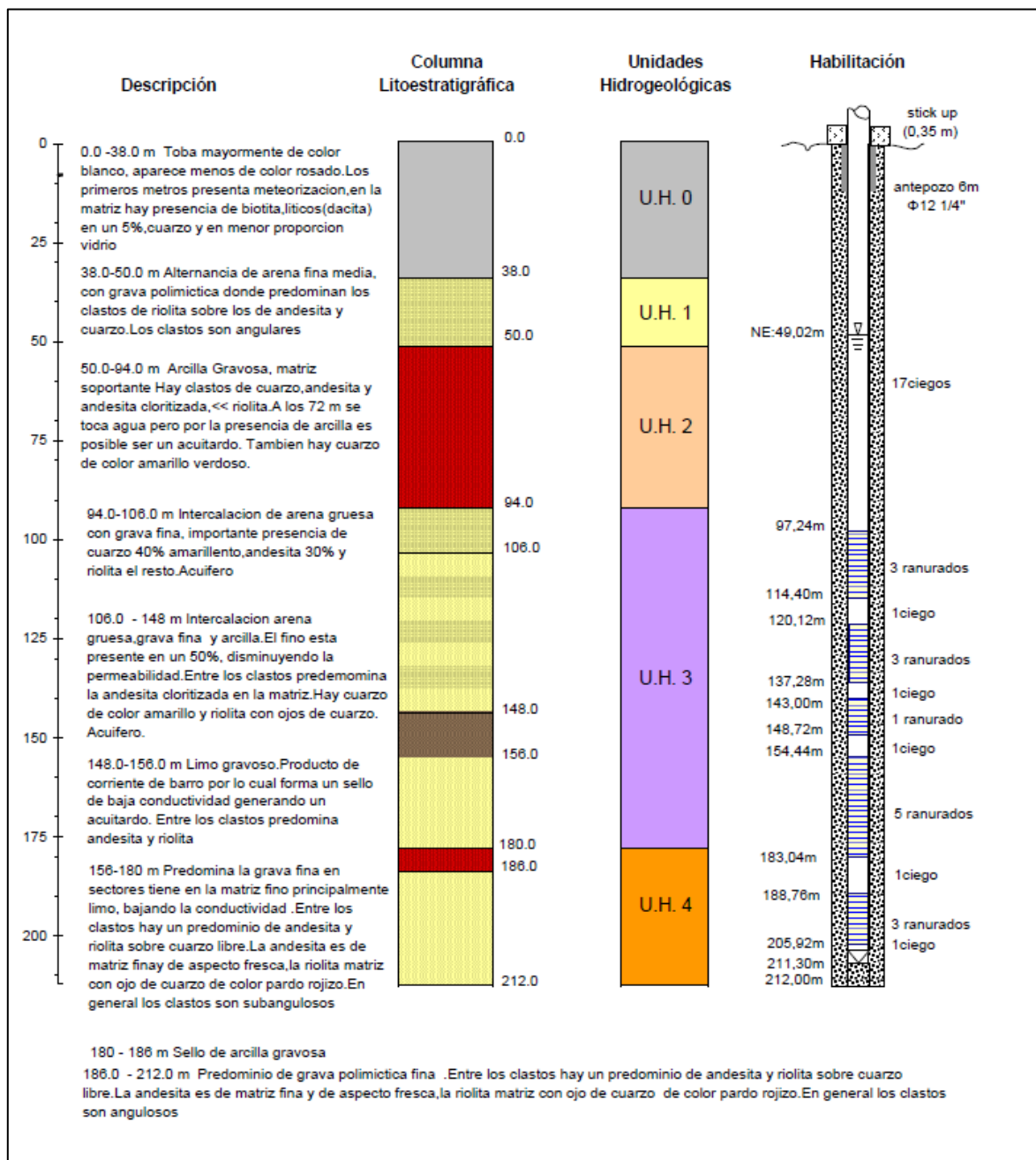
**HIDROGEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE**

**Figura B.1**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación YOCA-08**



Fuente: SWS (2010)

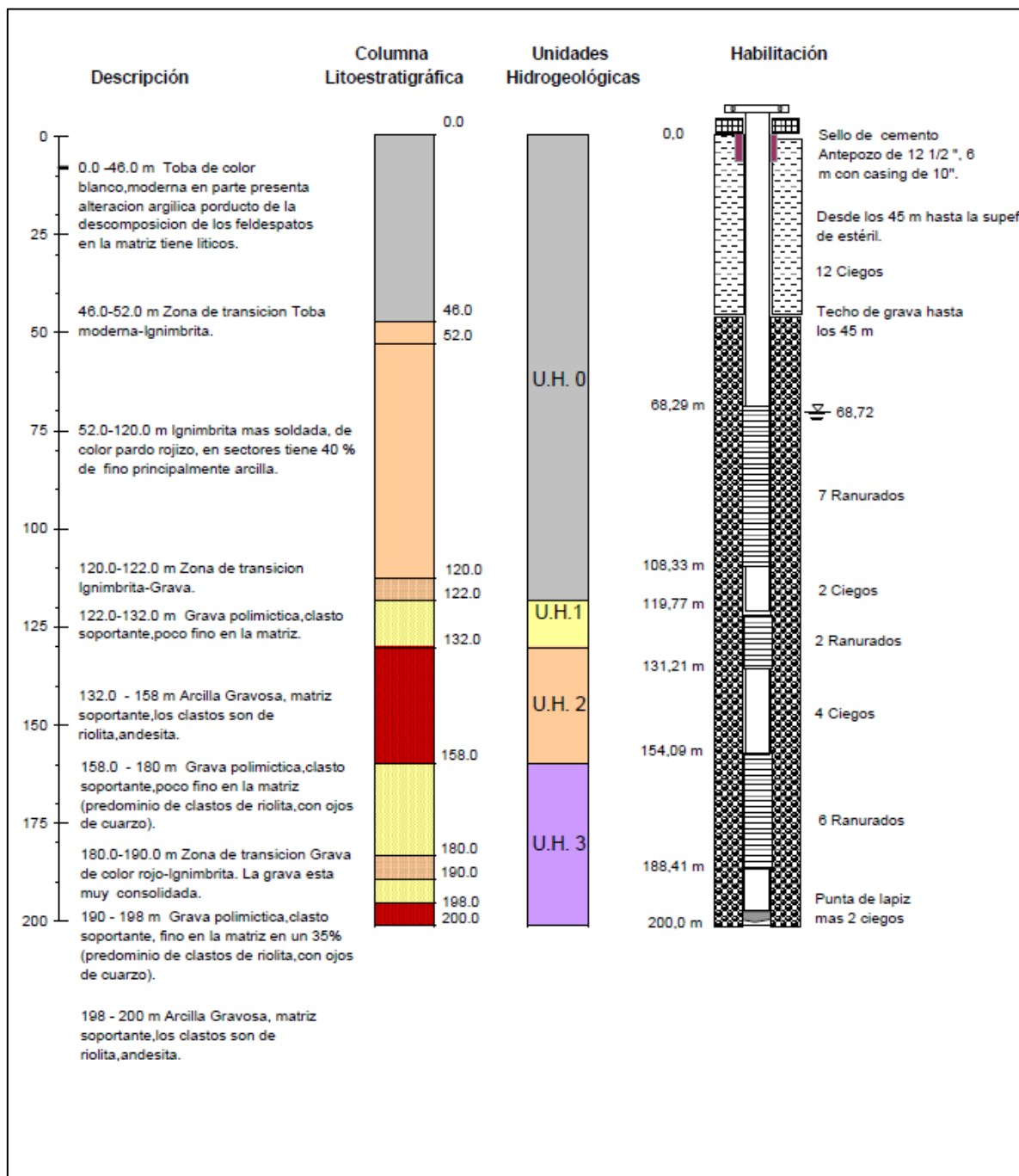
**Figura B.2**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación YOCA-10**



Fuente: SWS (2010)

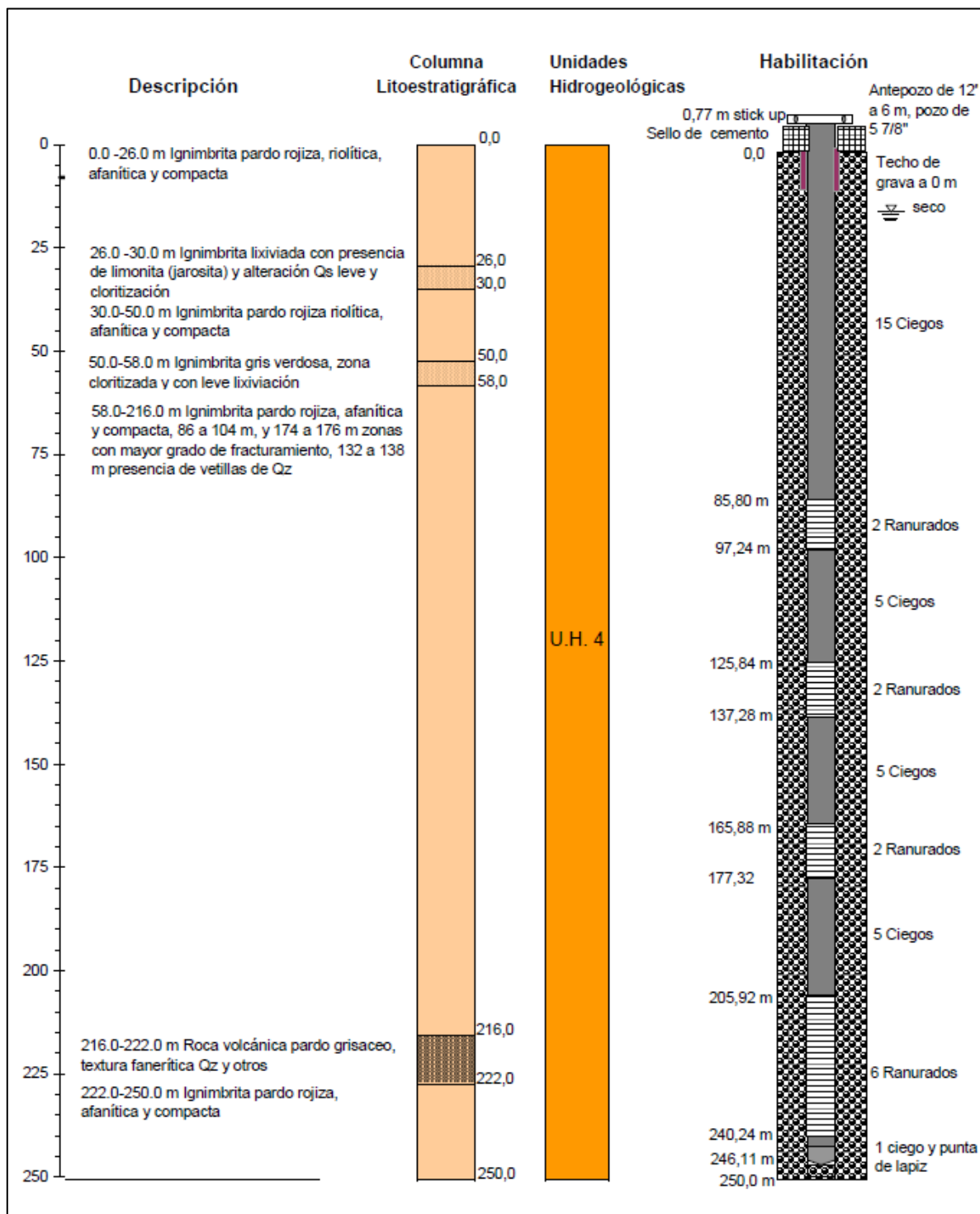


**Figura B.3**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación YOCA-09**



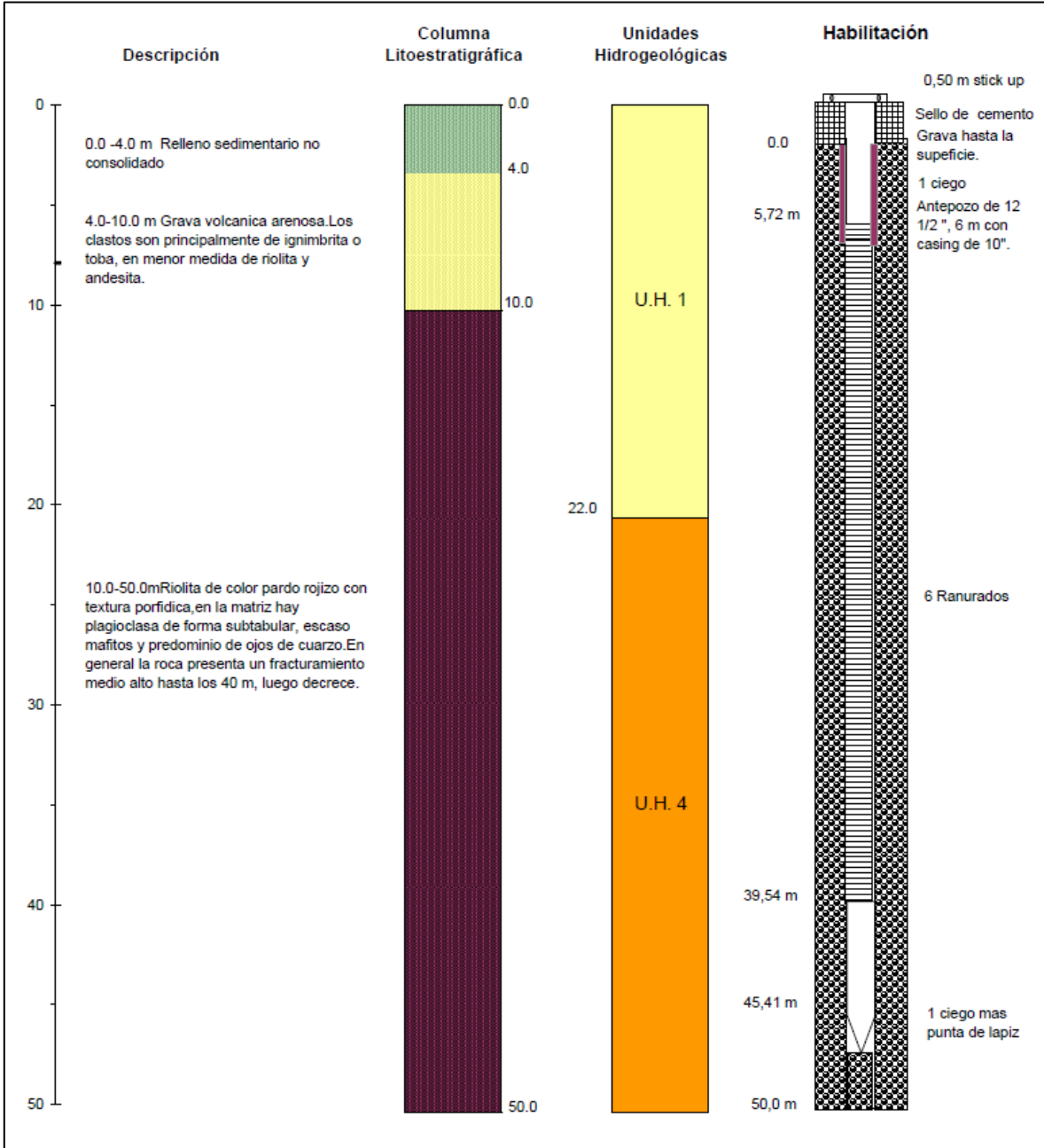
Fuente: SWS (2010)

## Cartilla Resumen Pozo de Observación YOCA-03



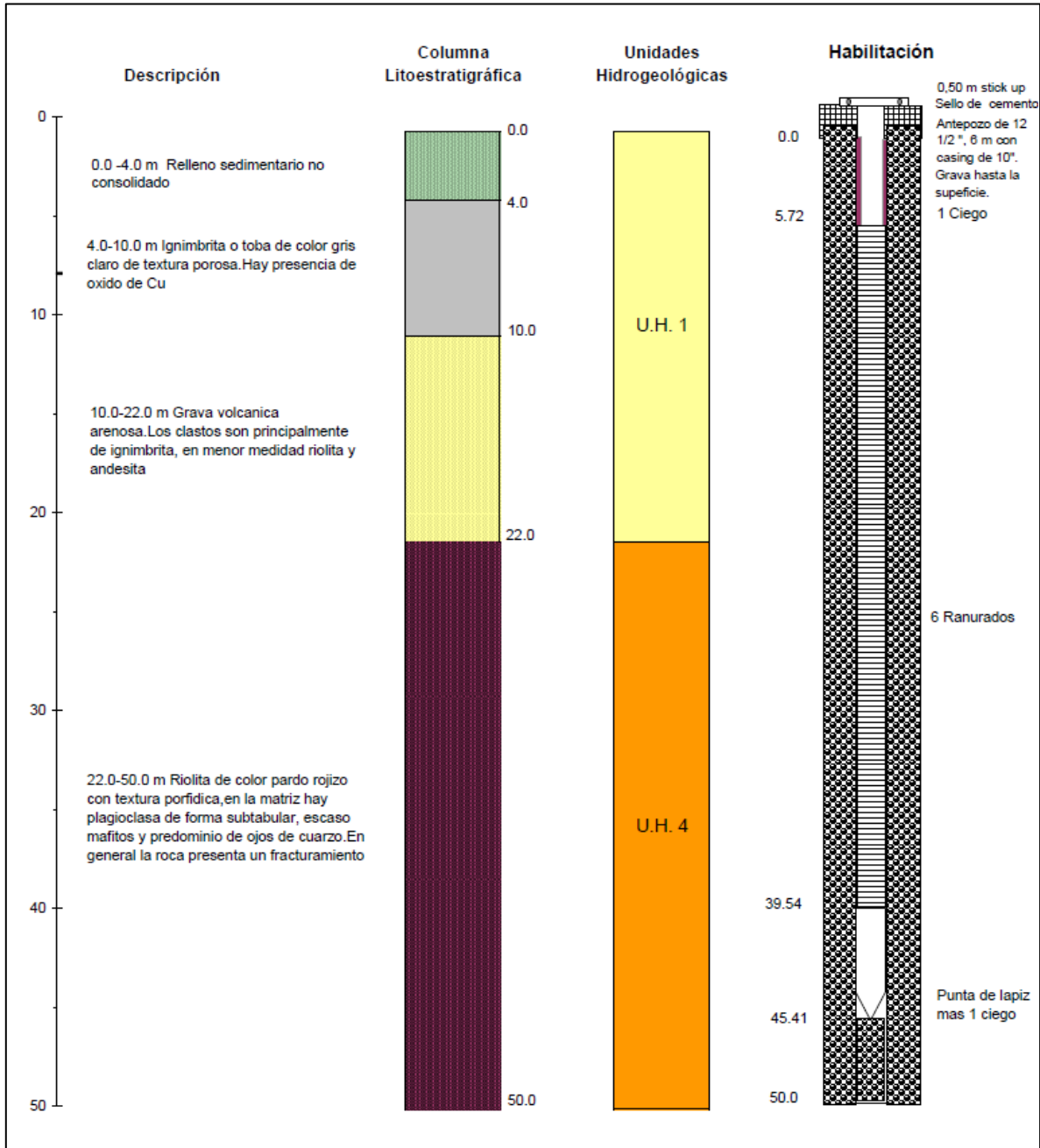
Fuente: SWS (2010)

**Figura B.5**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PSAP-3**



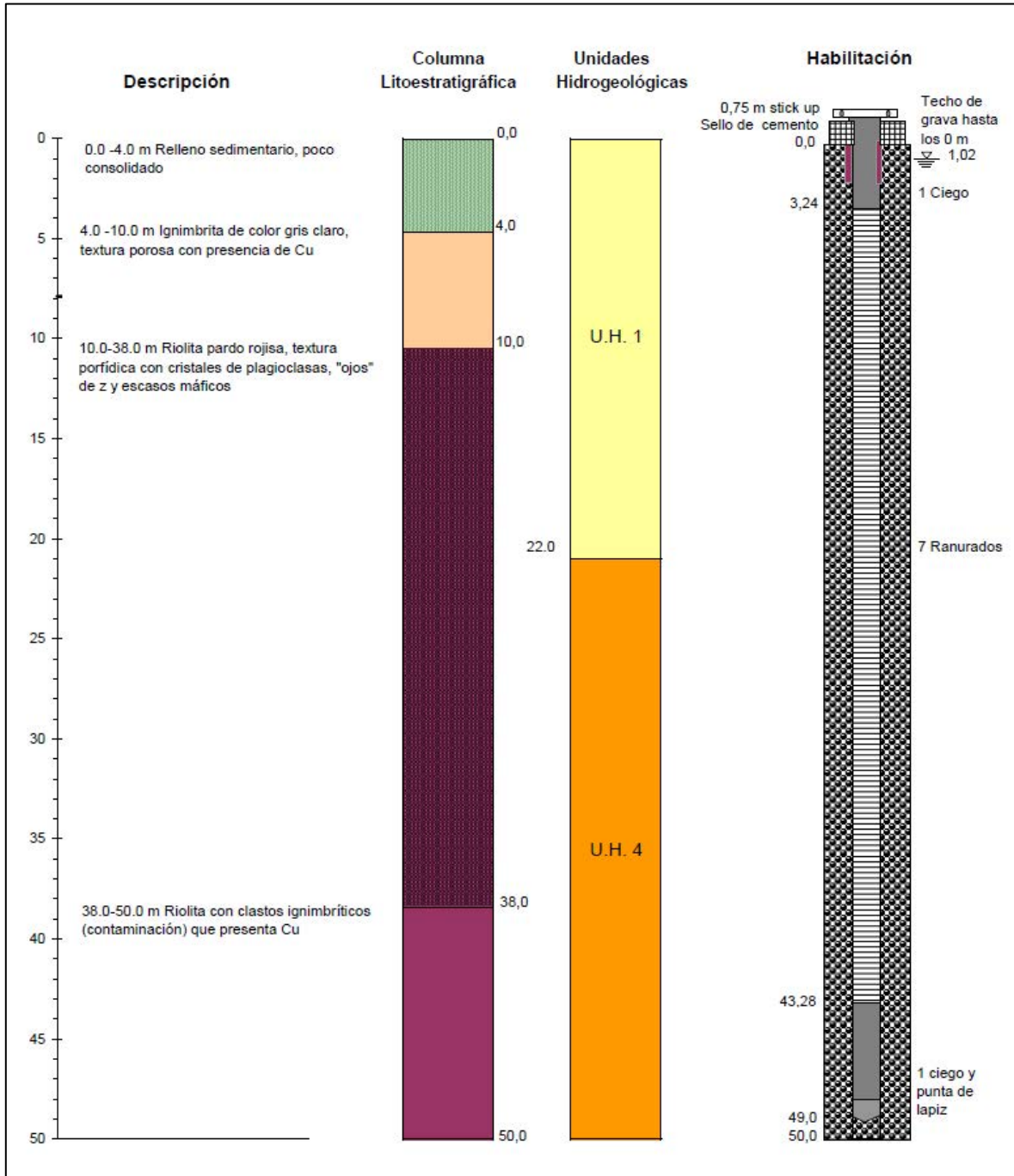
Fuente: SWS (2010)

**Figura B.6**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PSAP-2**



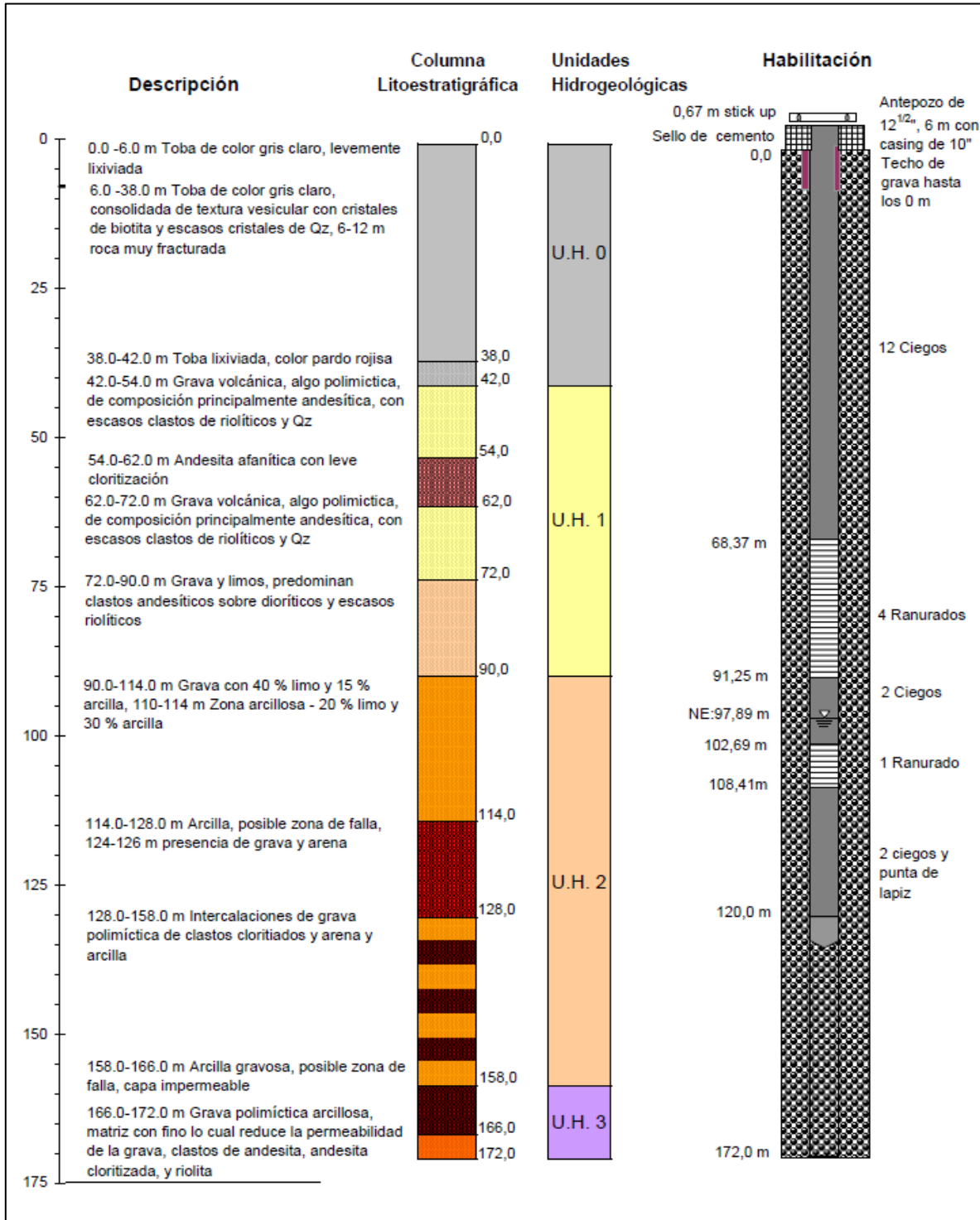
Fuente: SWS (2010)

**Figura B.7**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PSAP-1**



Fuente: SWS (2010)

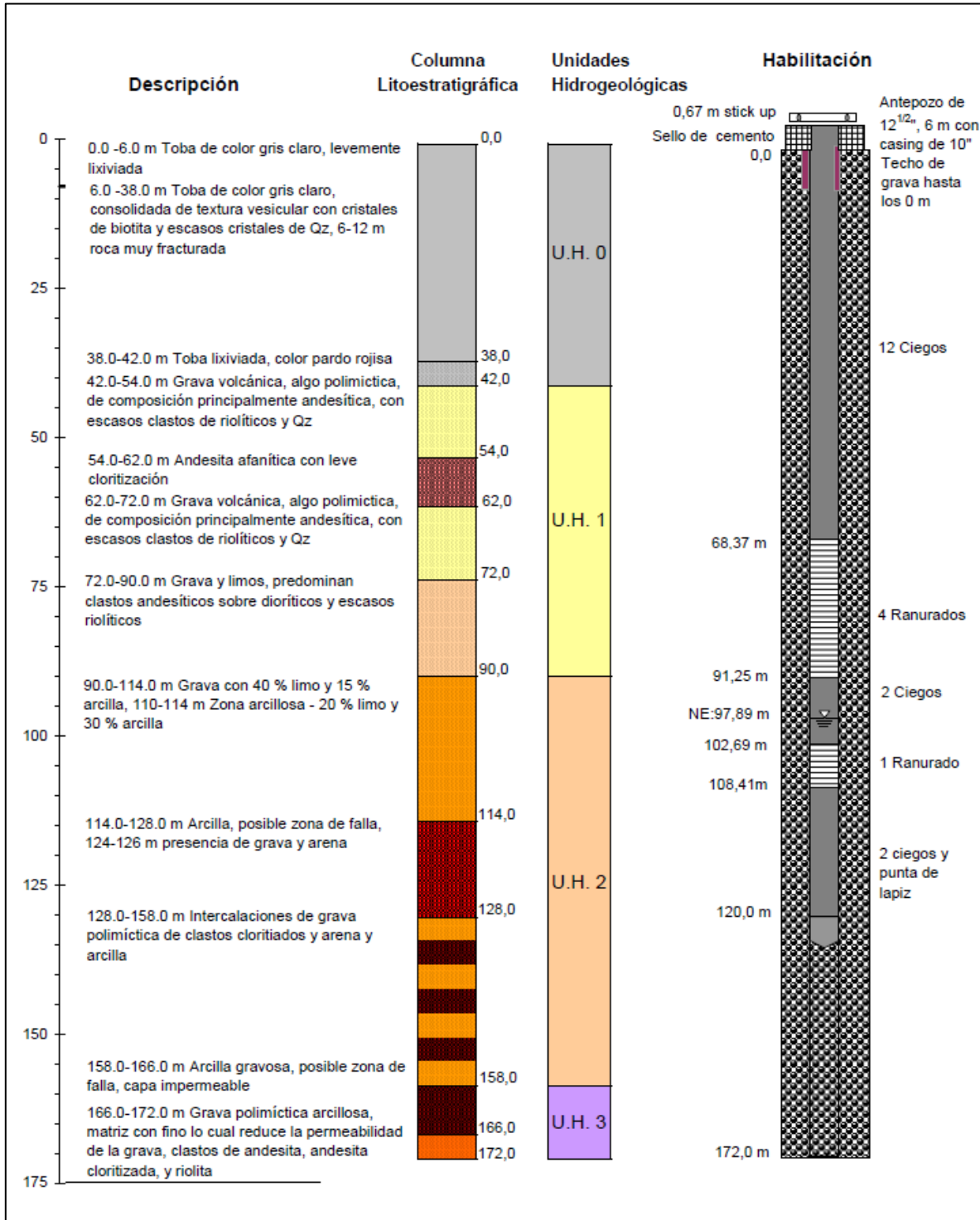
**Figura B.8**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-21**



Fuente: SWS (2010)



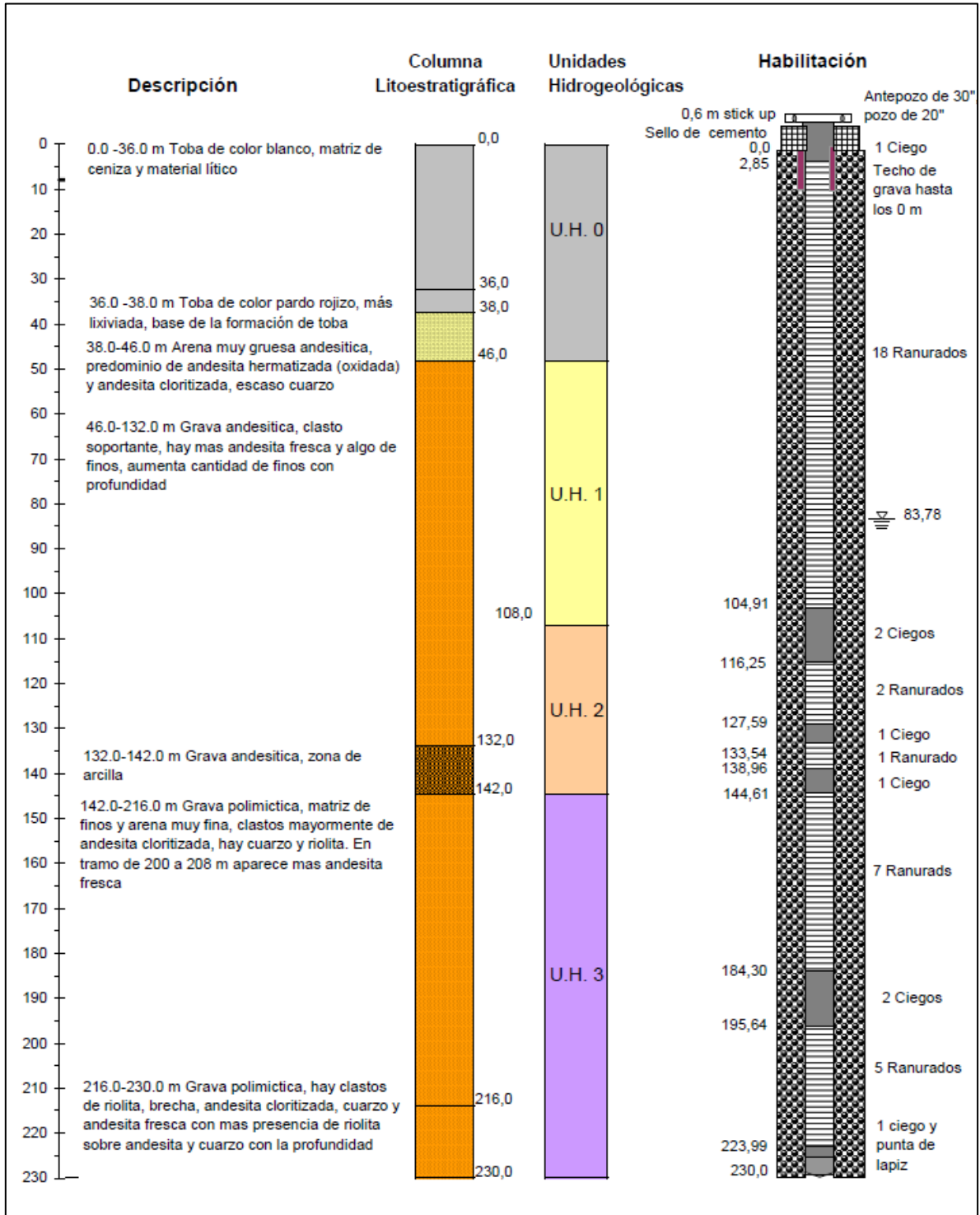
**Figura B.9**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-20**



Fuente: SWS (2010)

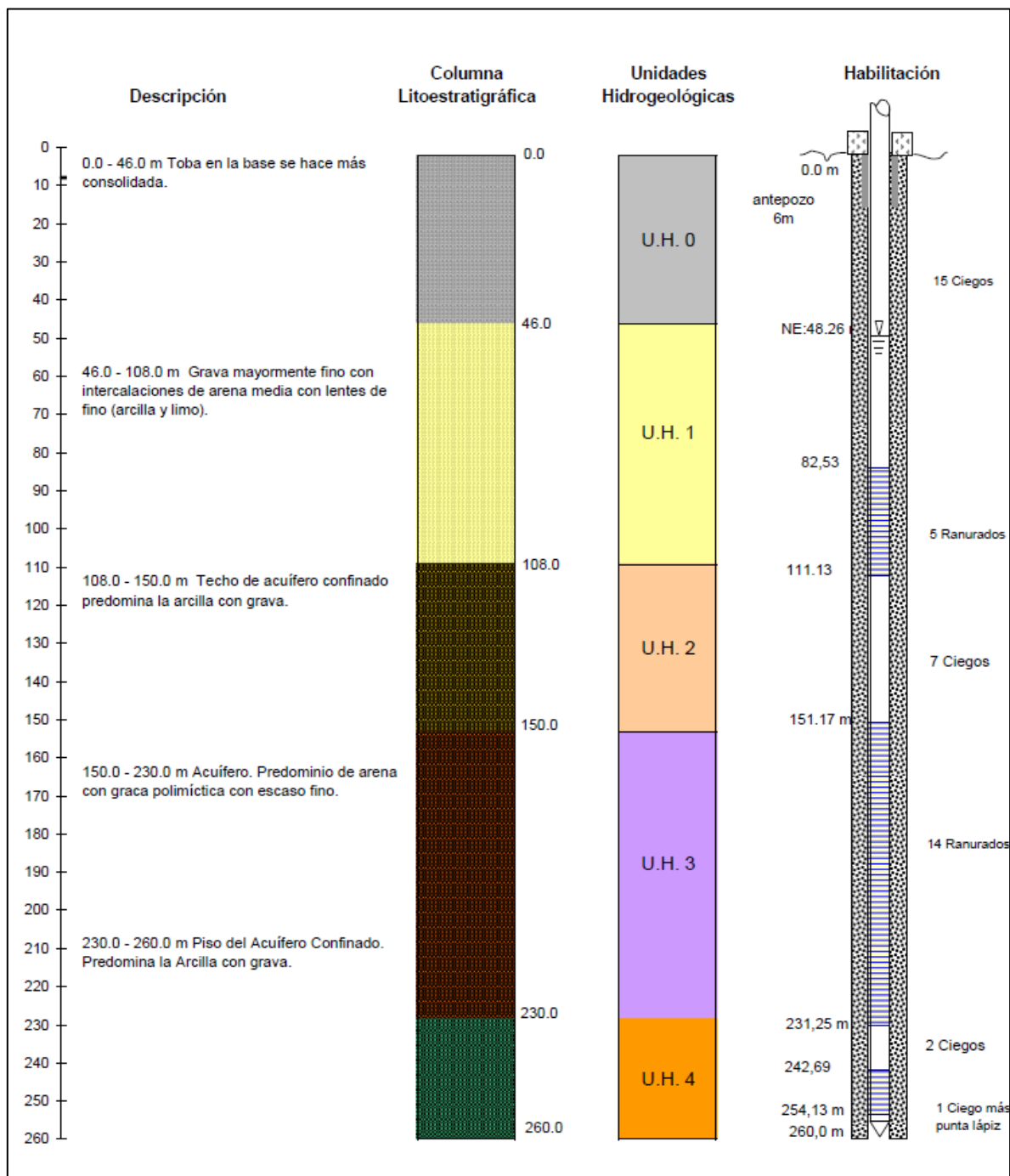


**Figura B.10**  
**Cartilla Resumen Pozo de Bombeo PUNO-19B**



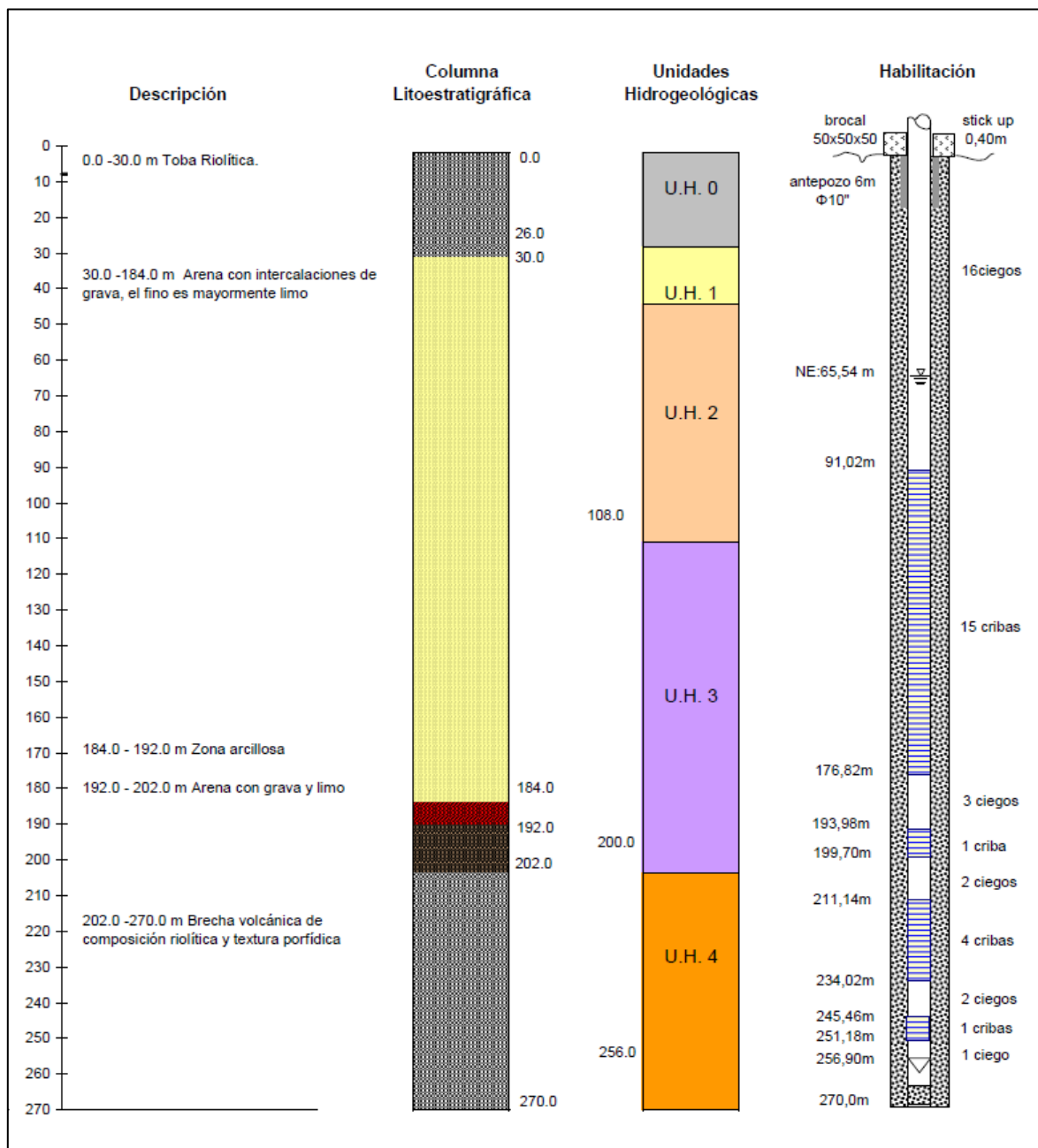
Fuente: SWS (2010)

**Figura B.11**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-19**



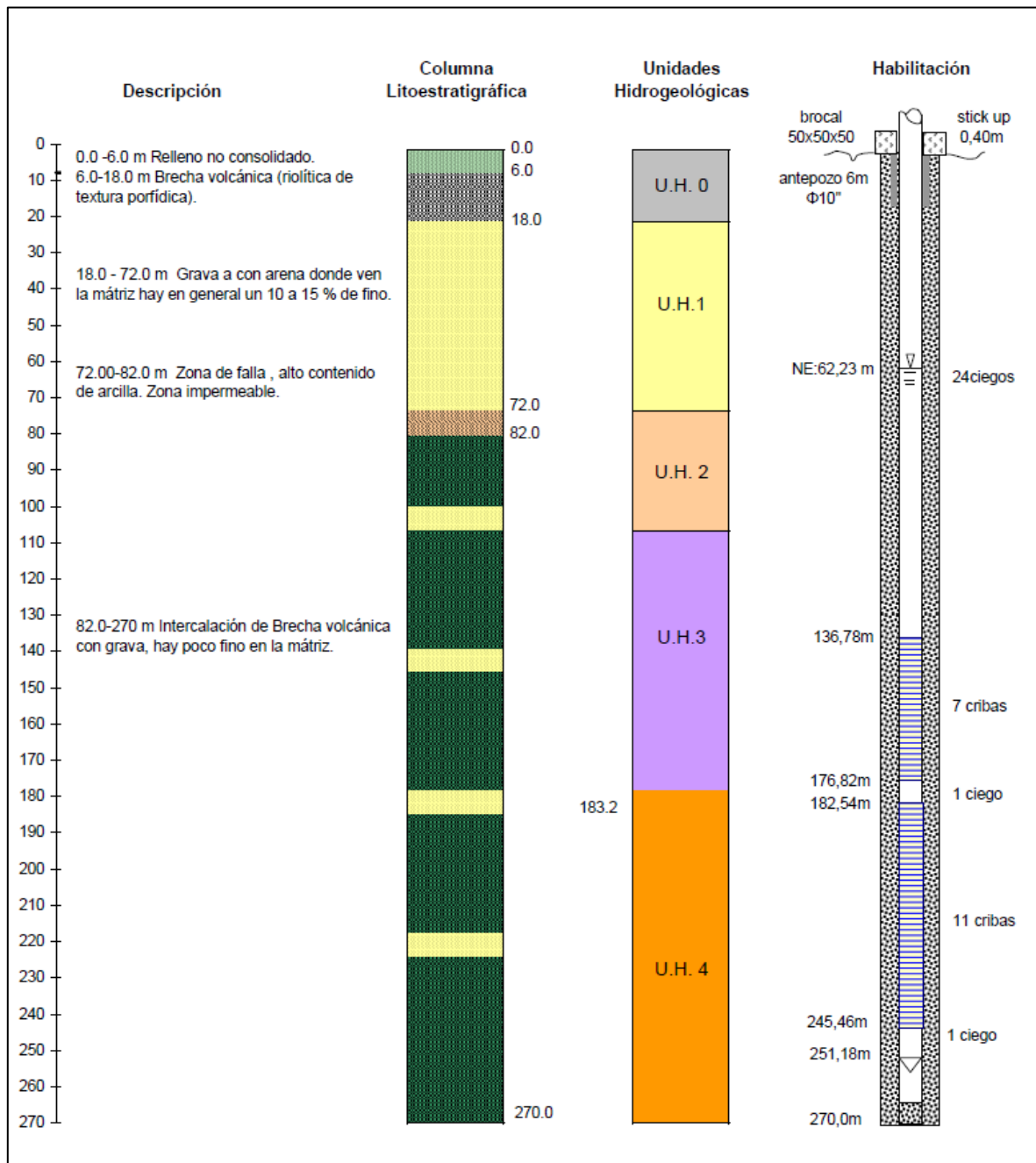
Fuente: SWS (2010)

**Figura B.12**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-18**



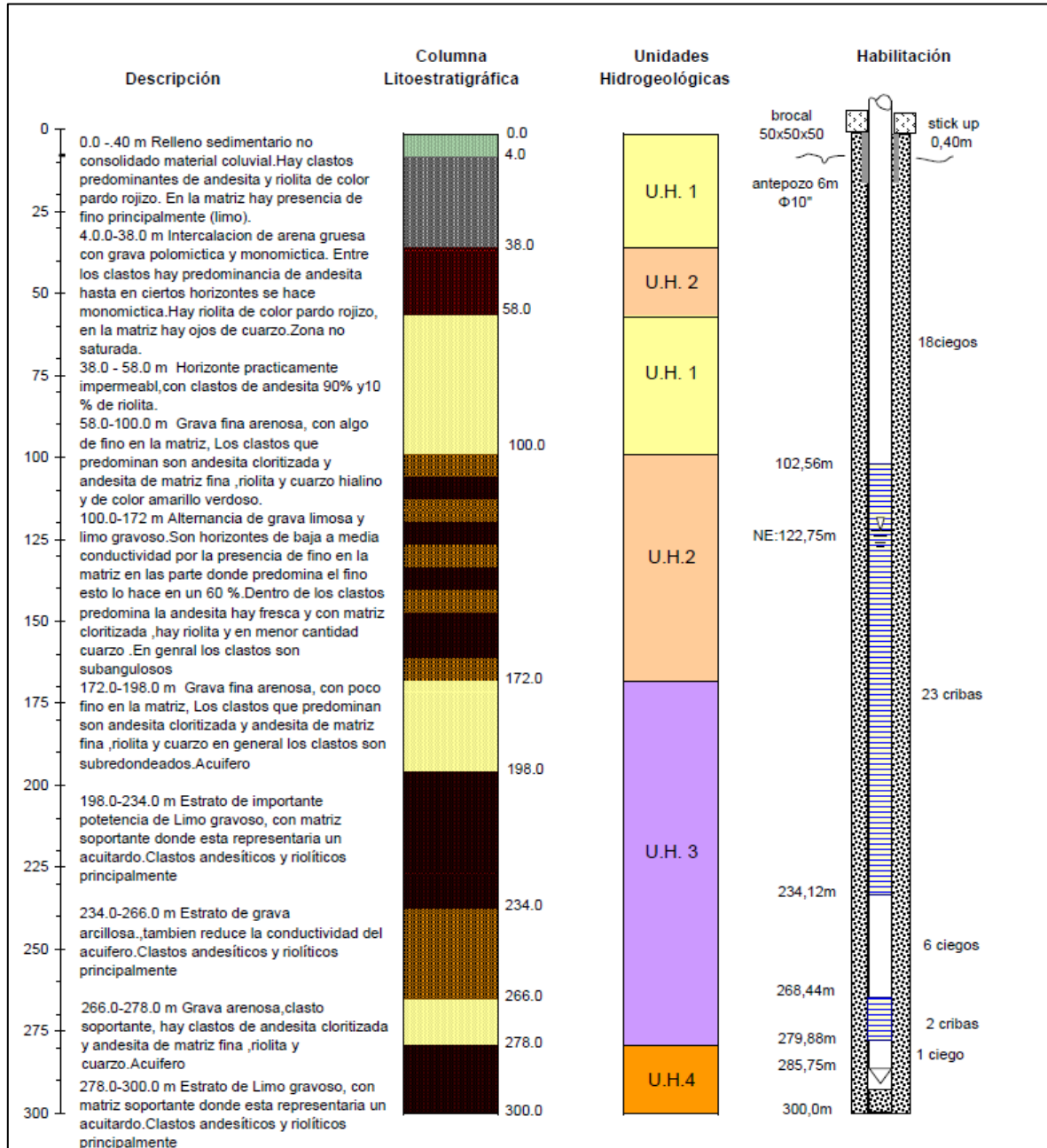
Fuente: SWS (2010)

**Figura B.13**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-17**



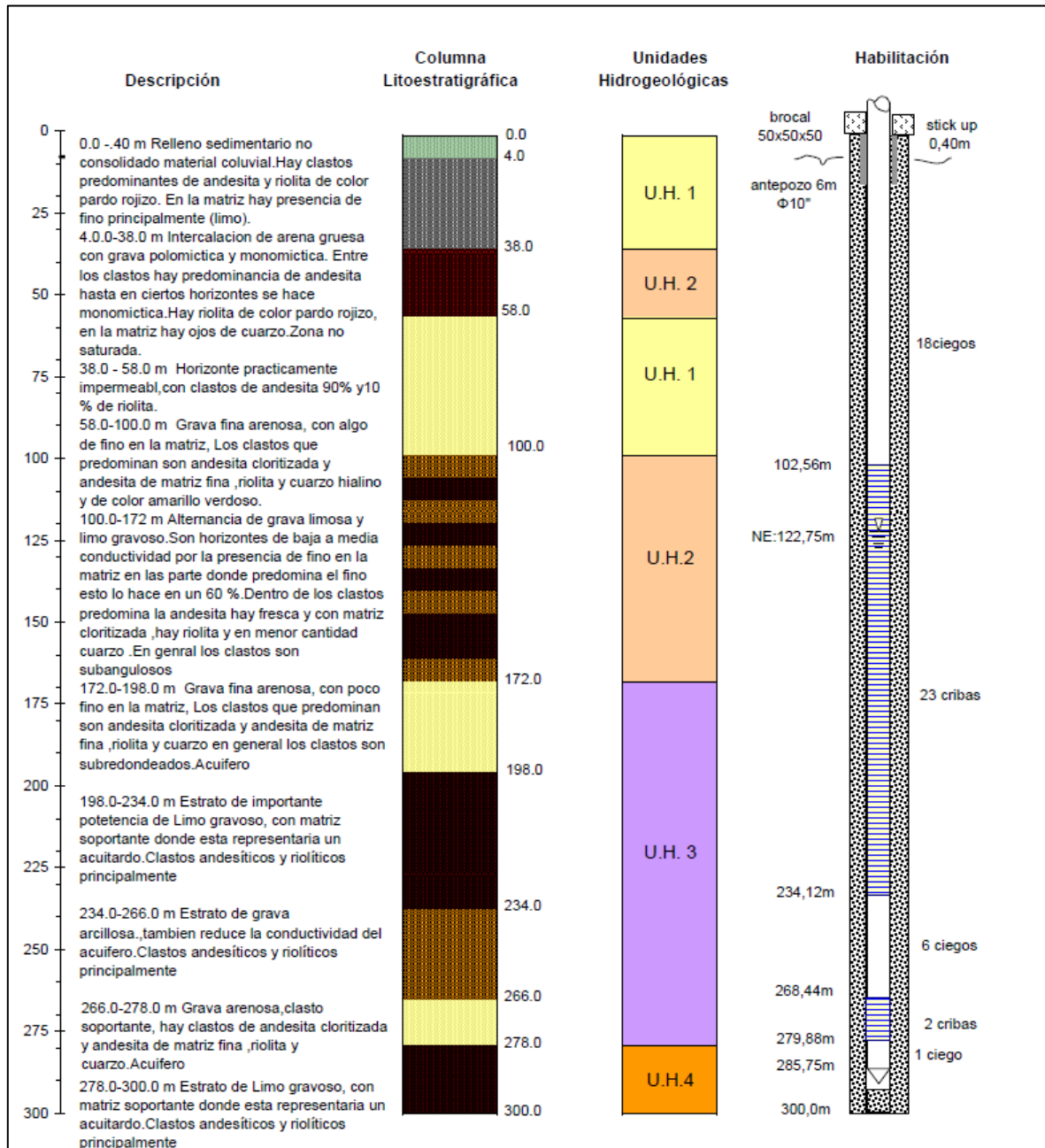
Fuente: SWS (2010)

**Figura B.14**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-16**



Fuente: SWS (2010)

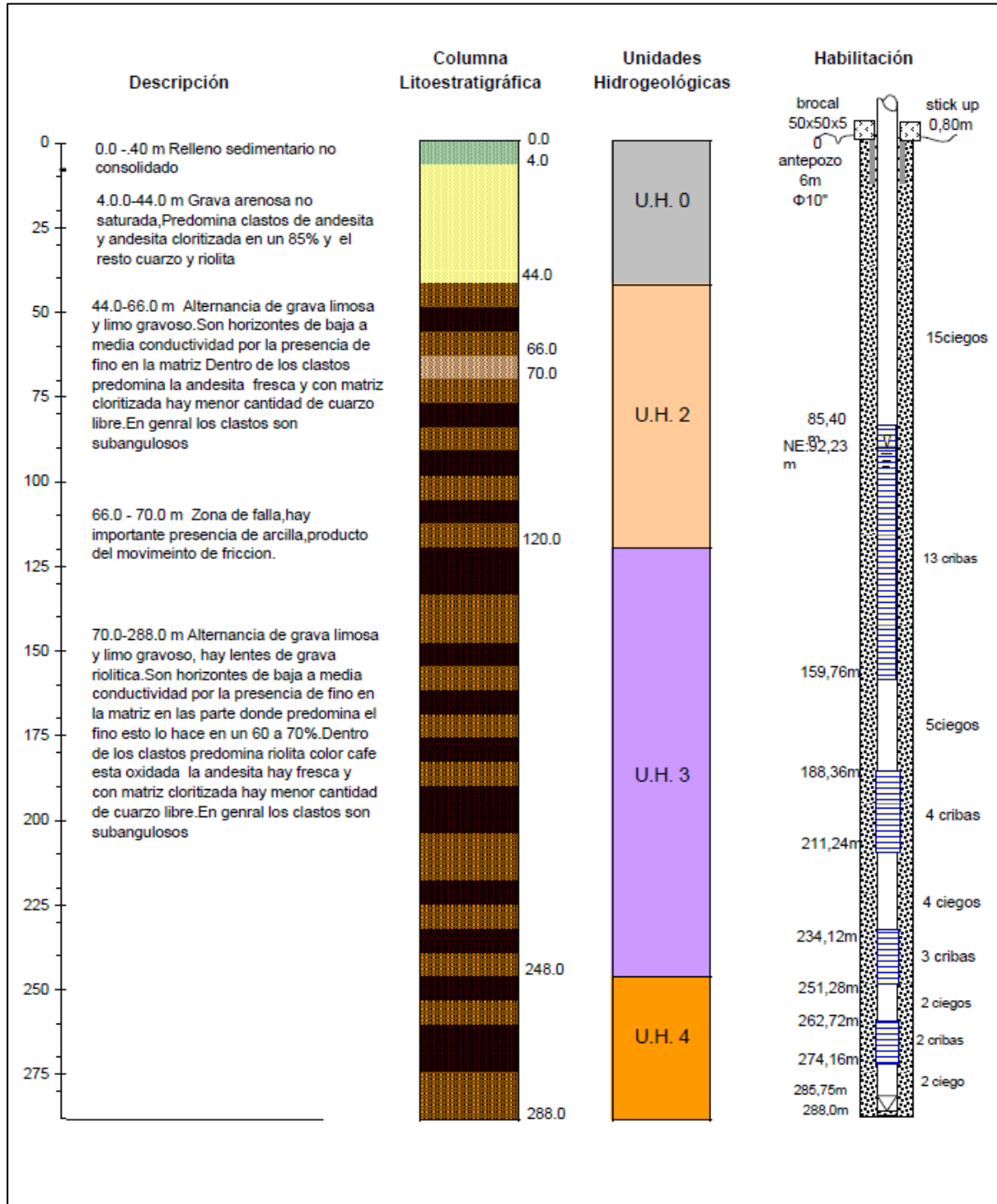
**Figura B.15**  
**Cartilla Resumen Pozo de Bombeo PUNO-15B**



Fuente: SWS (2010)



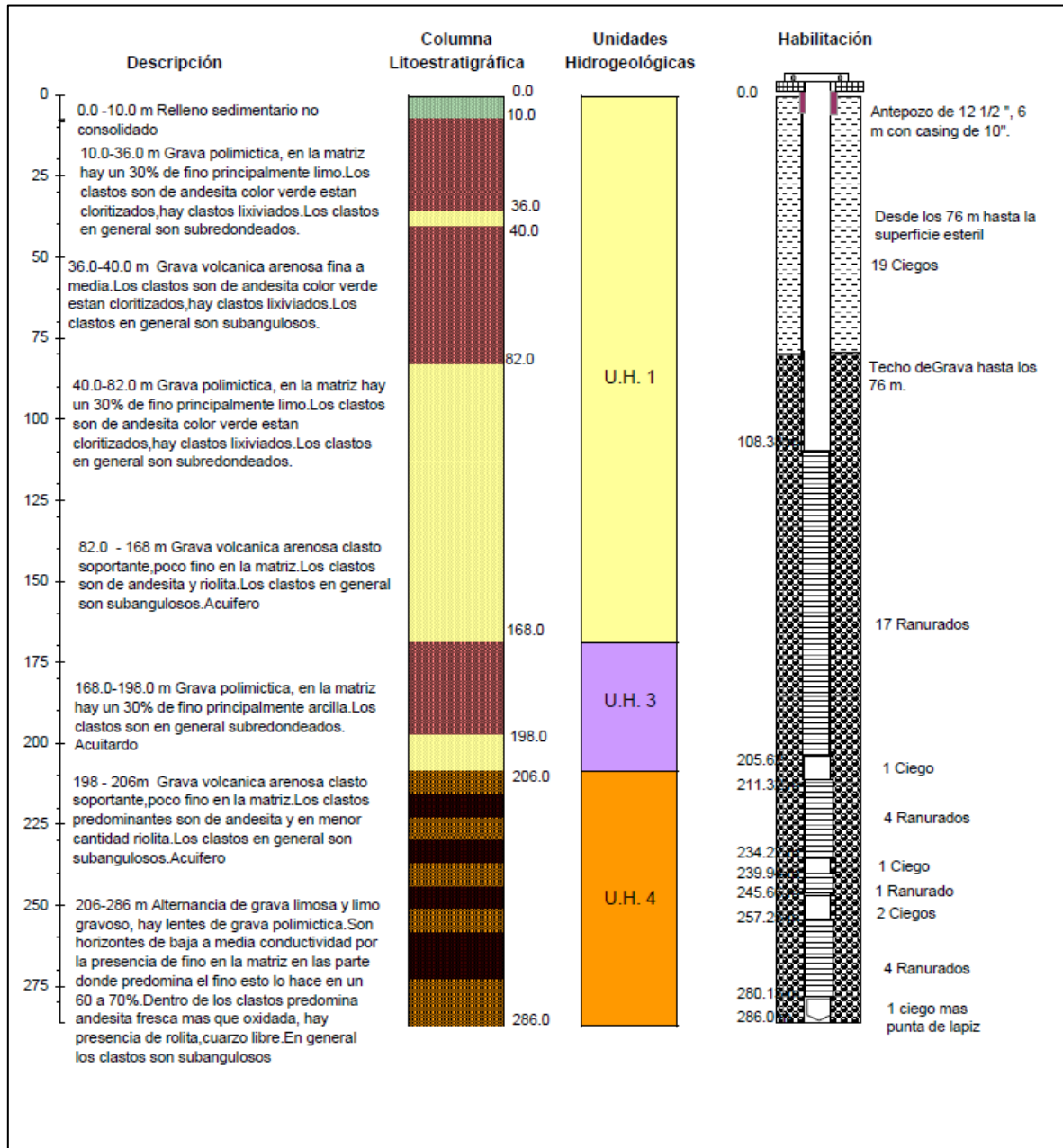
**Figura B.16**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-15**



Fuente: SWS (2010)

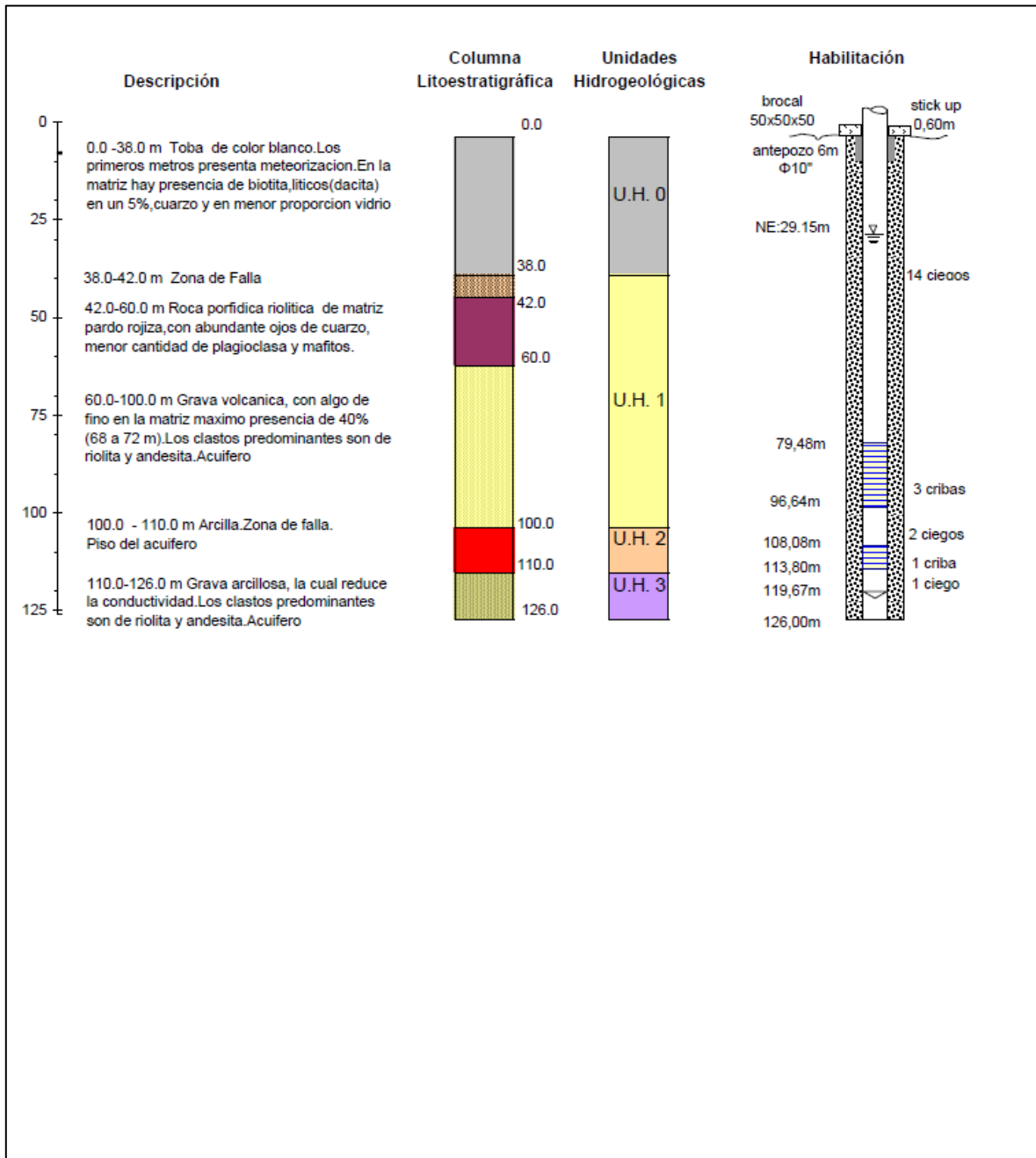


**Figura B.17**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-14**



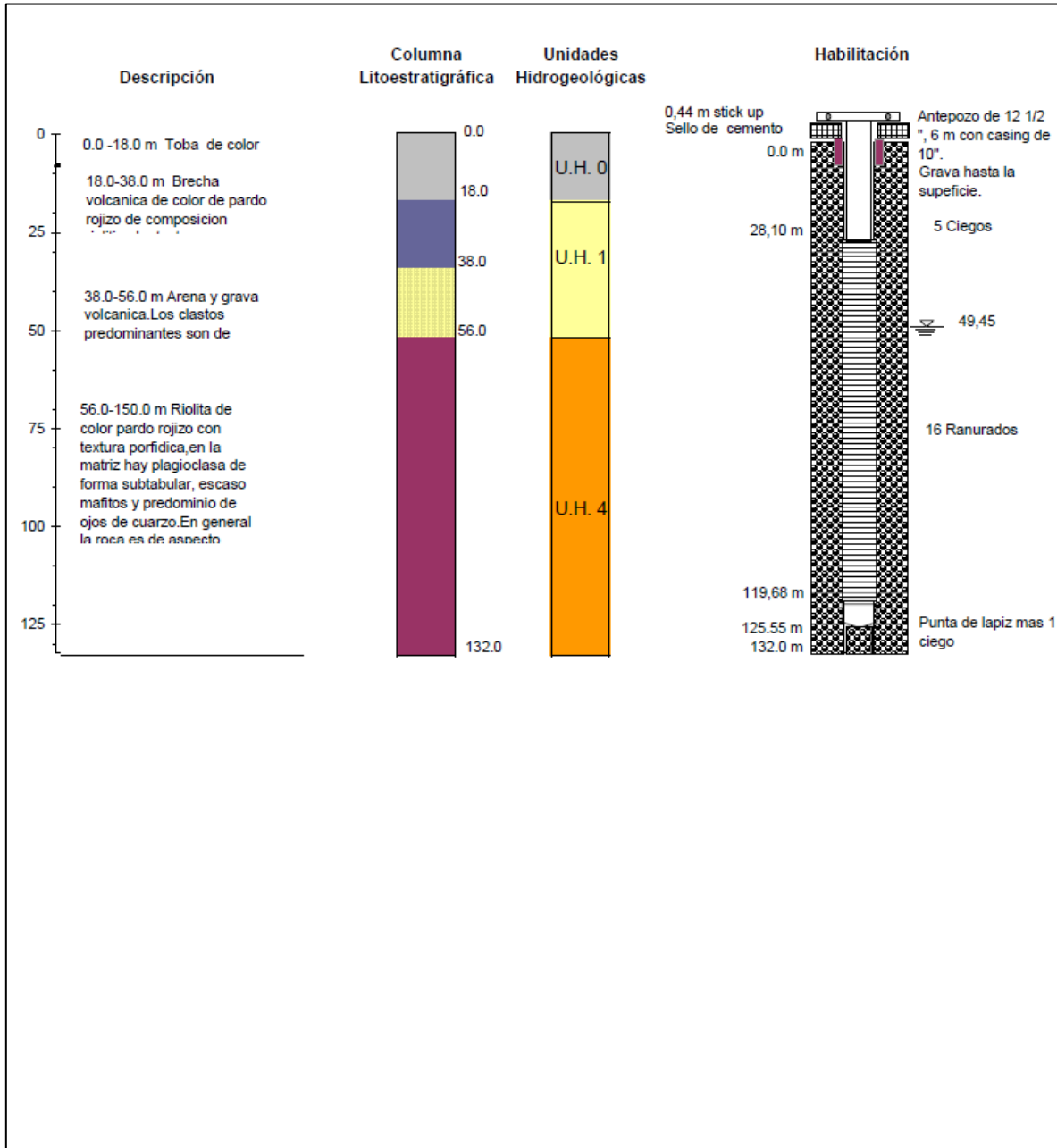
Fuente: SWS (2010)

**Figura B.18**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-13**



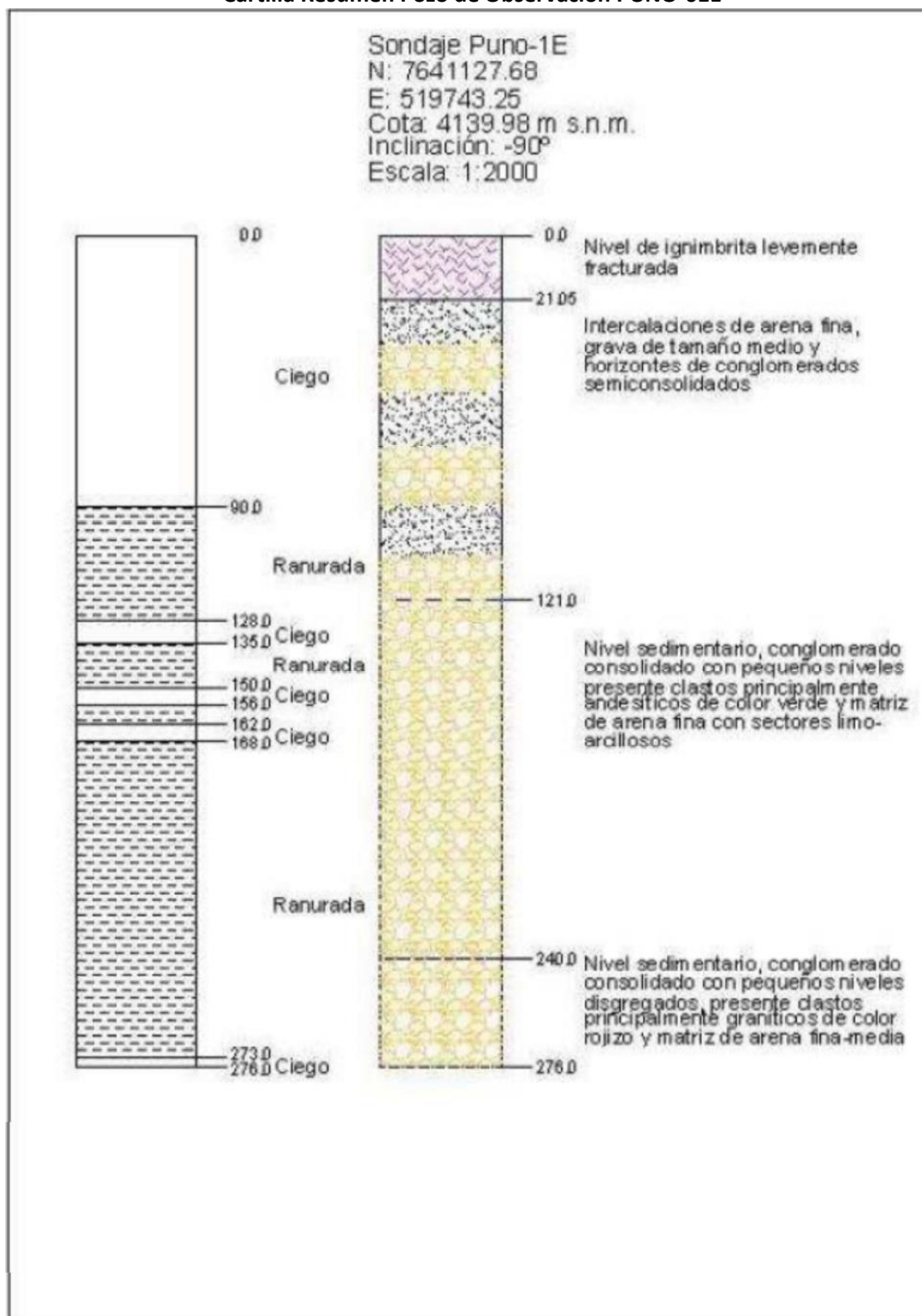
Fuente: SWS (2010)

**Figura B.19**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-3EA**



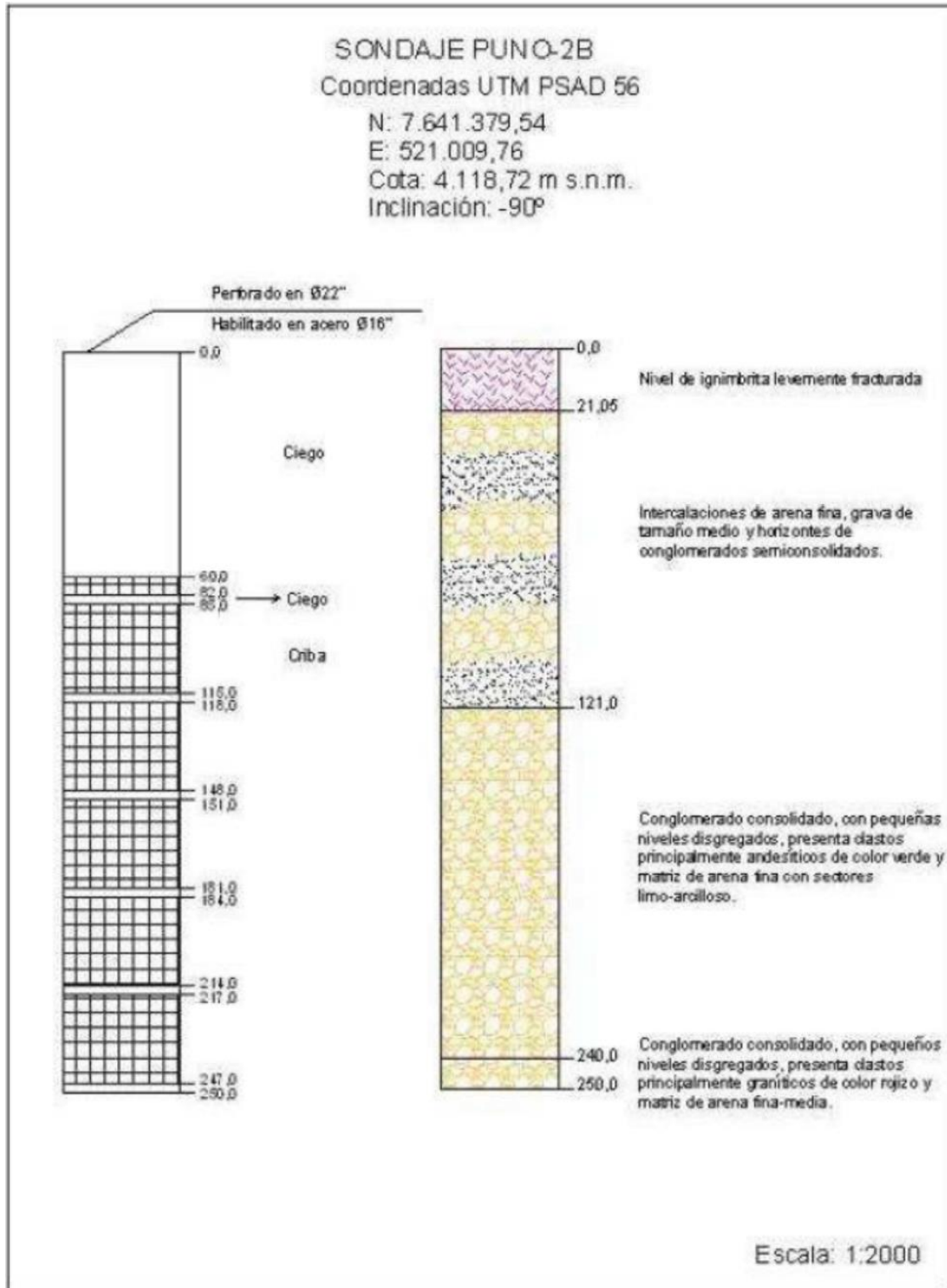
Fuente: SWS (2010)

**Figura B.20**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-01E**



Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

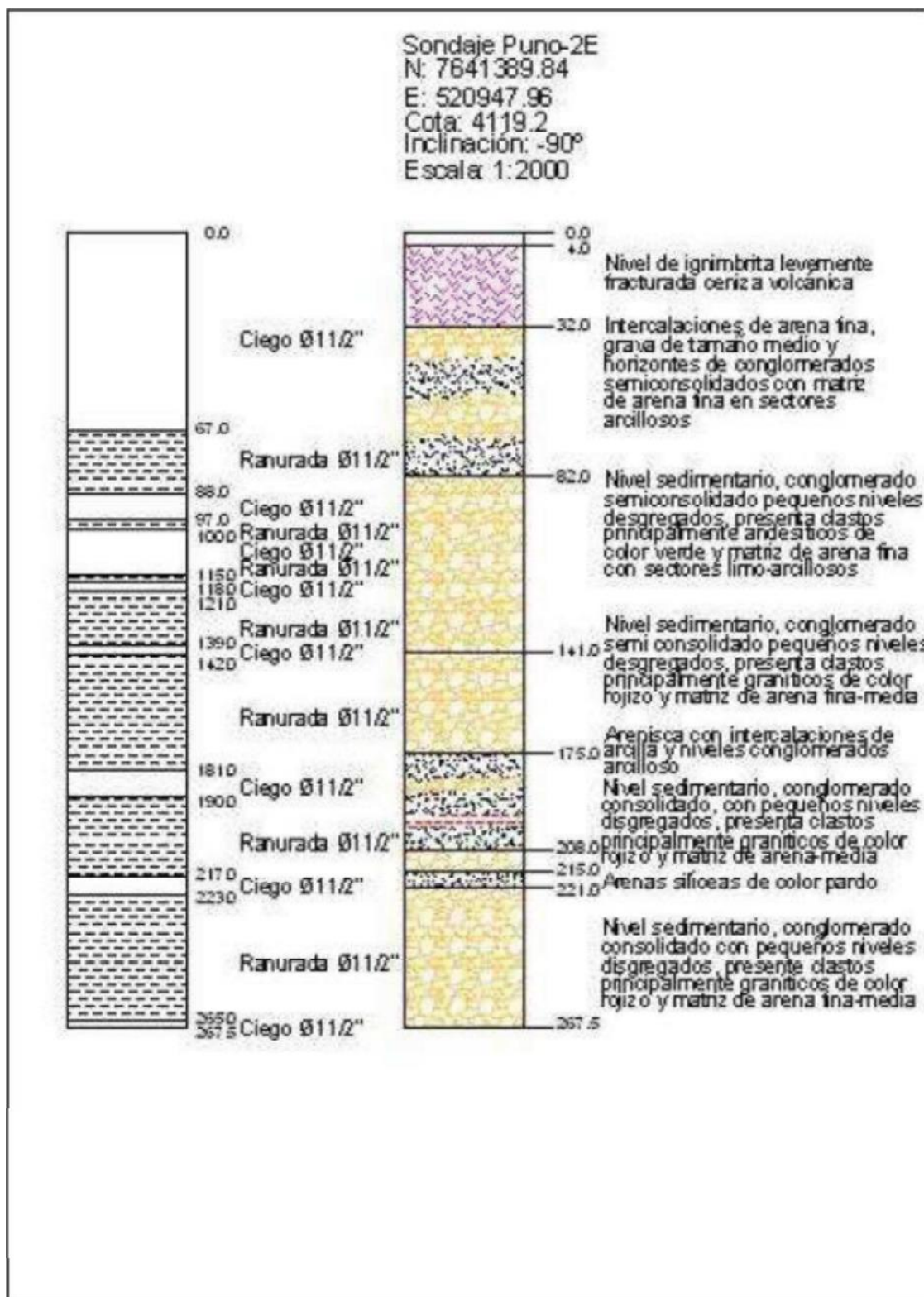
**Figura B.21**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-02B**



Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

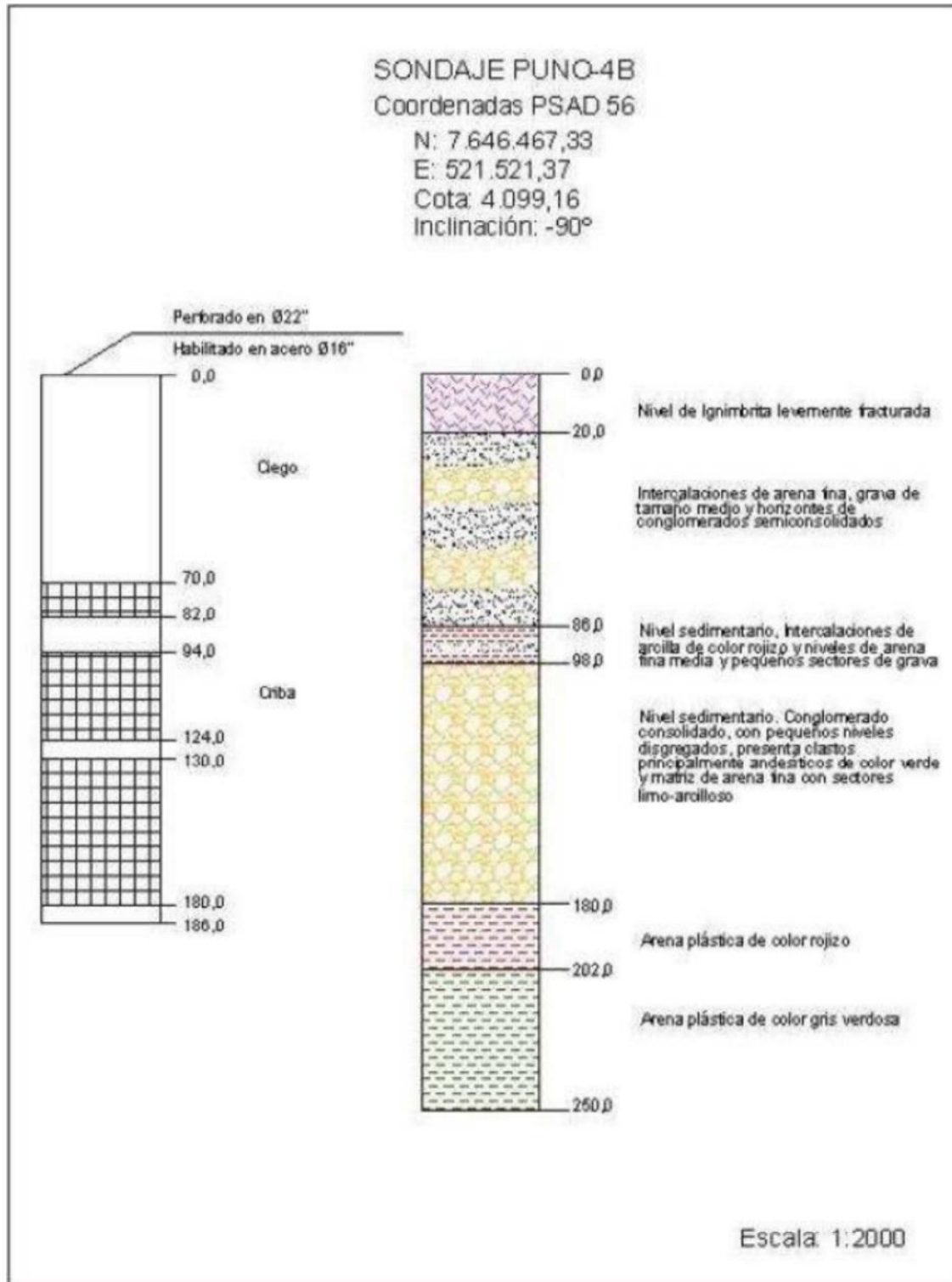


**Figura B.22**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-02E**



Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

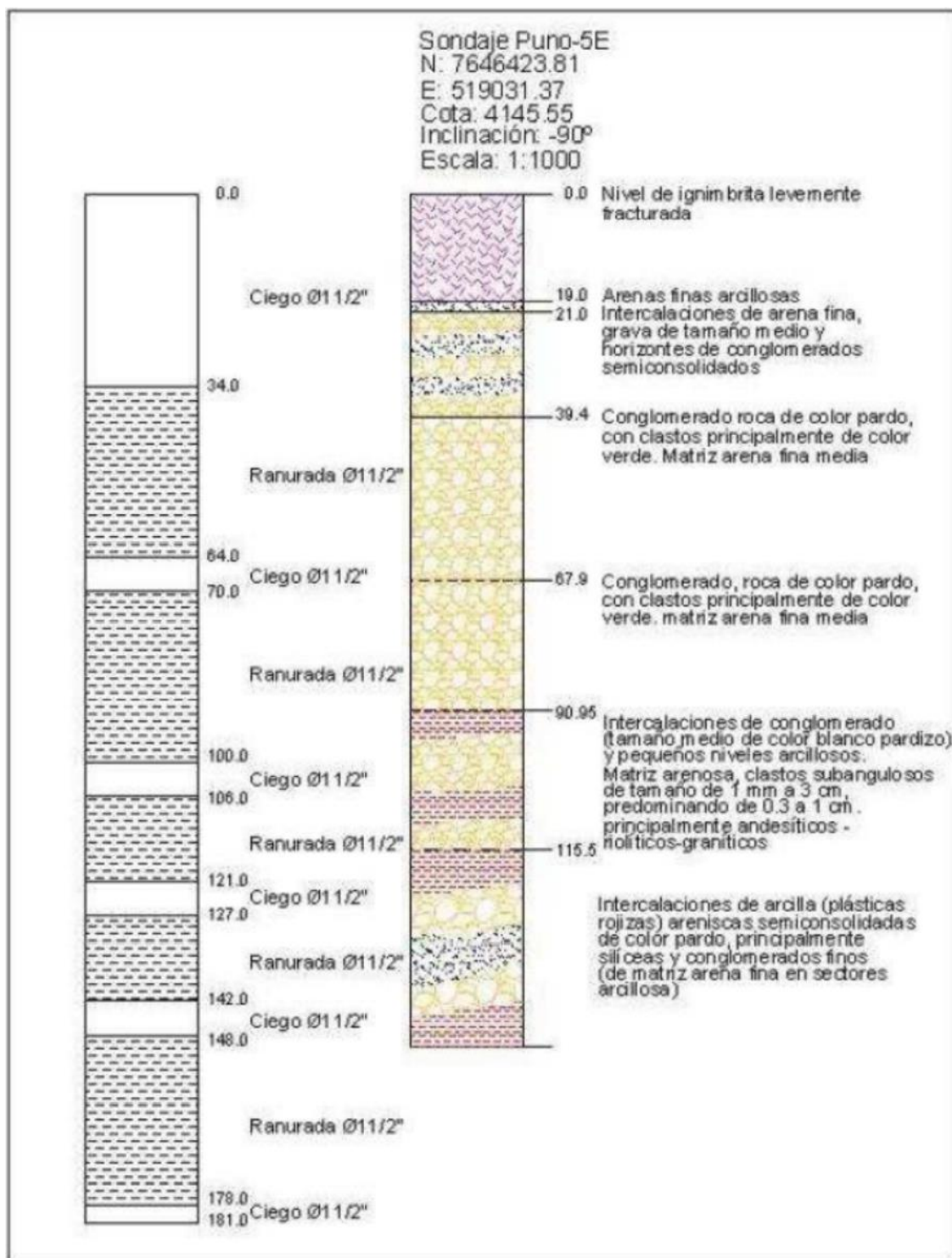
**Figura B.23**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-04B**



Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

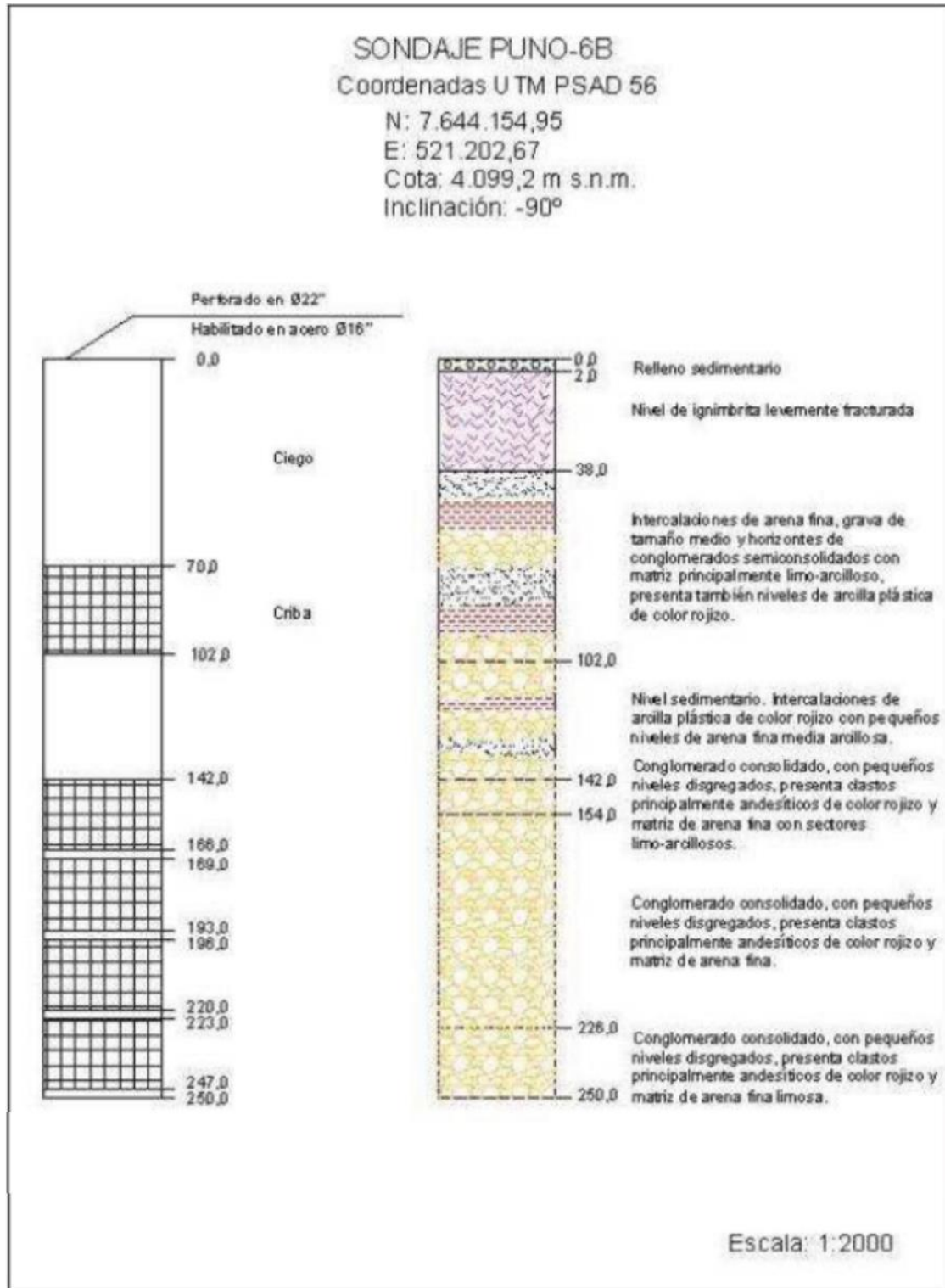


**Figura B.24**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-05E**



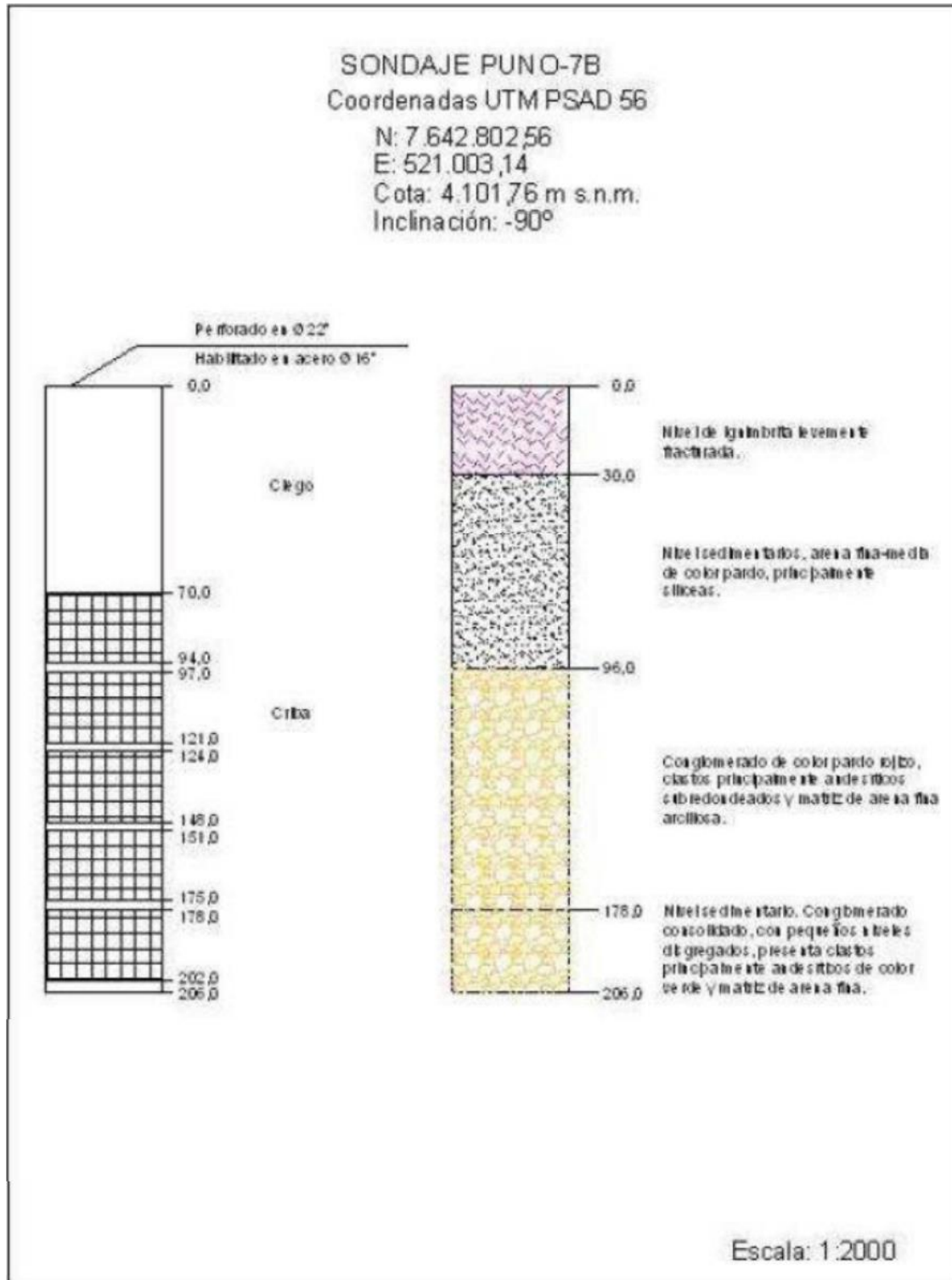
Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

**Figura B.25**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-06B**



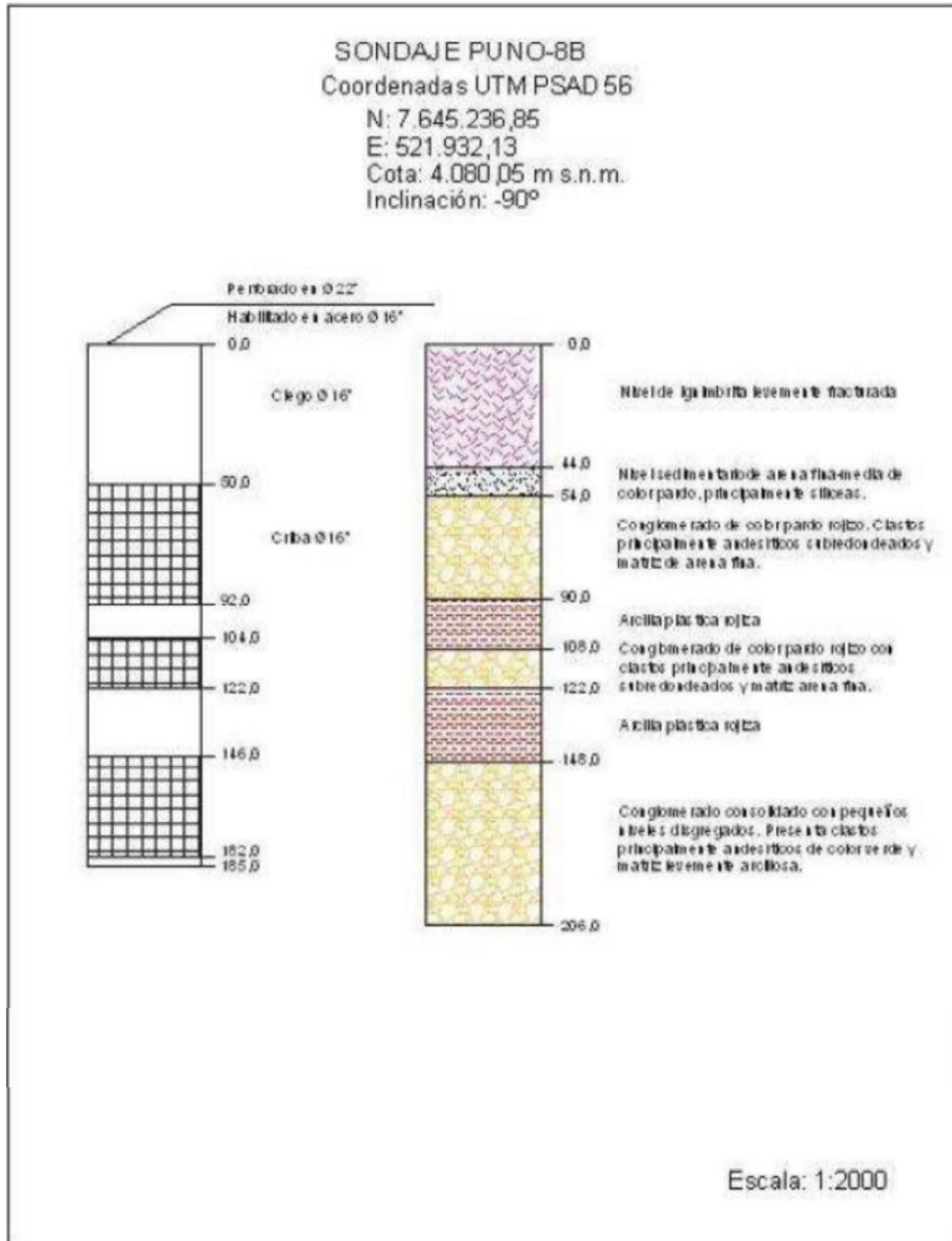
Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

**Figura B.26**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-07B**



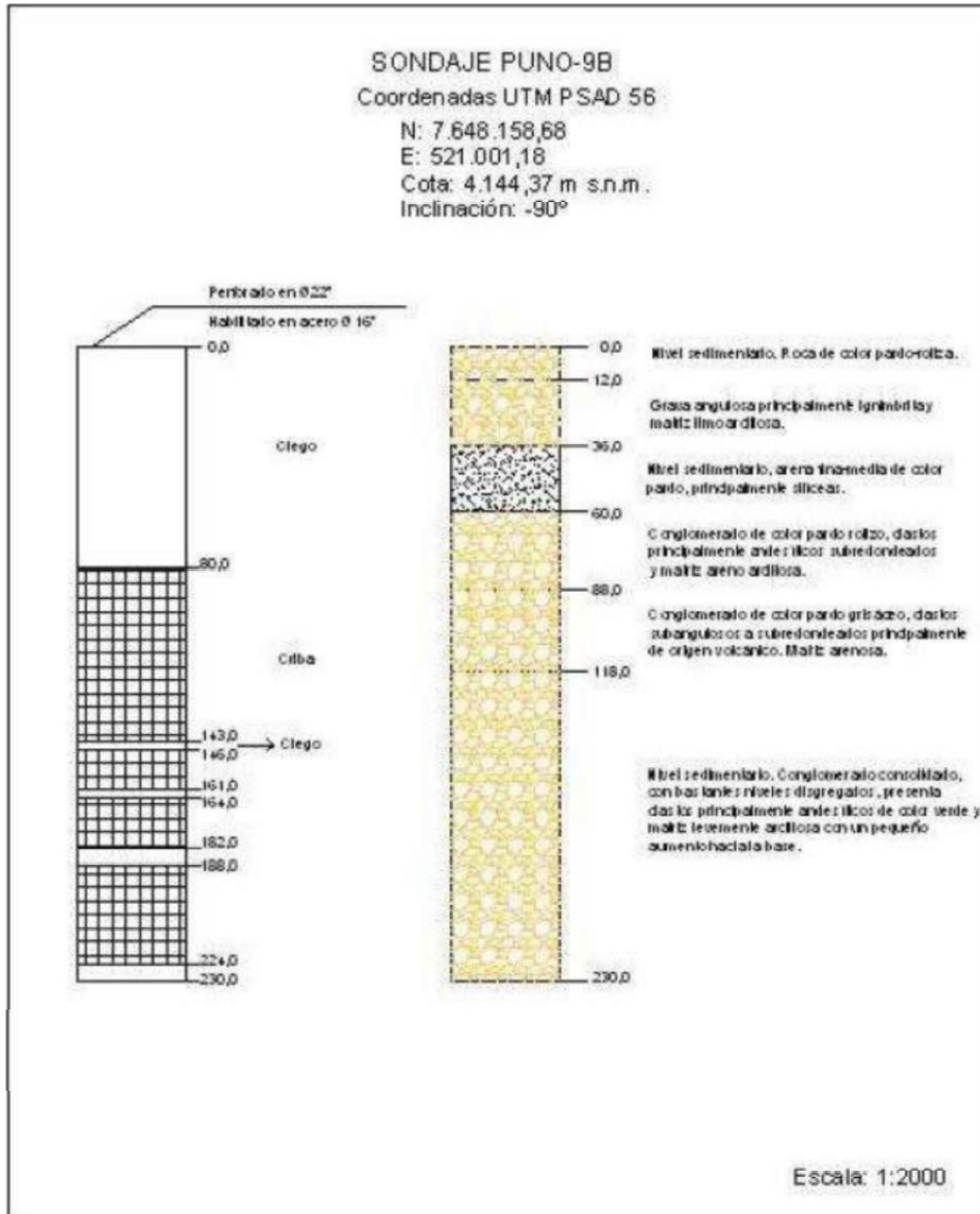
Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

**Figura B.27**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-08B**



Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

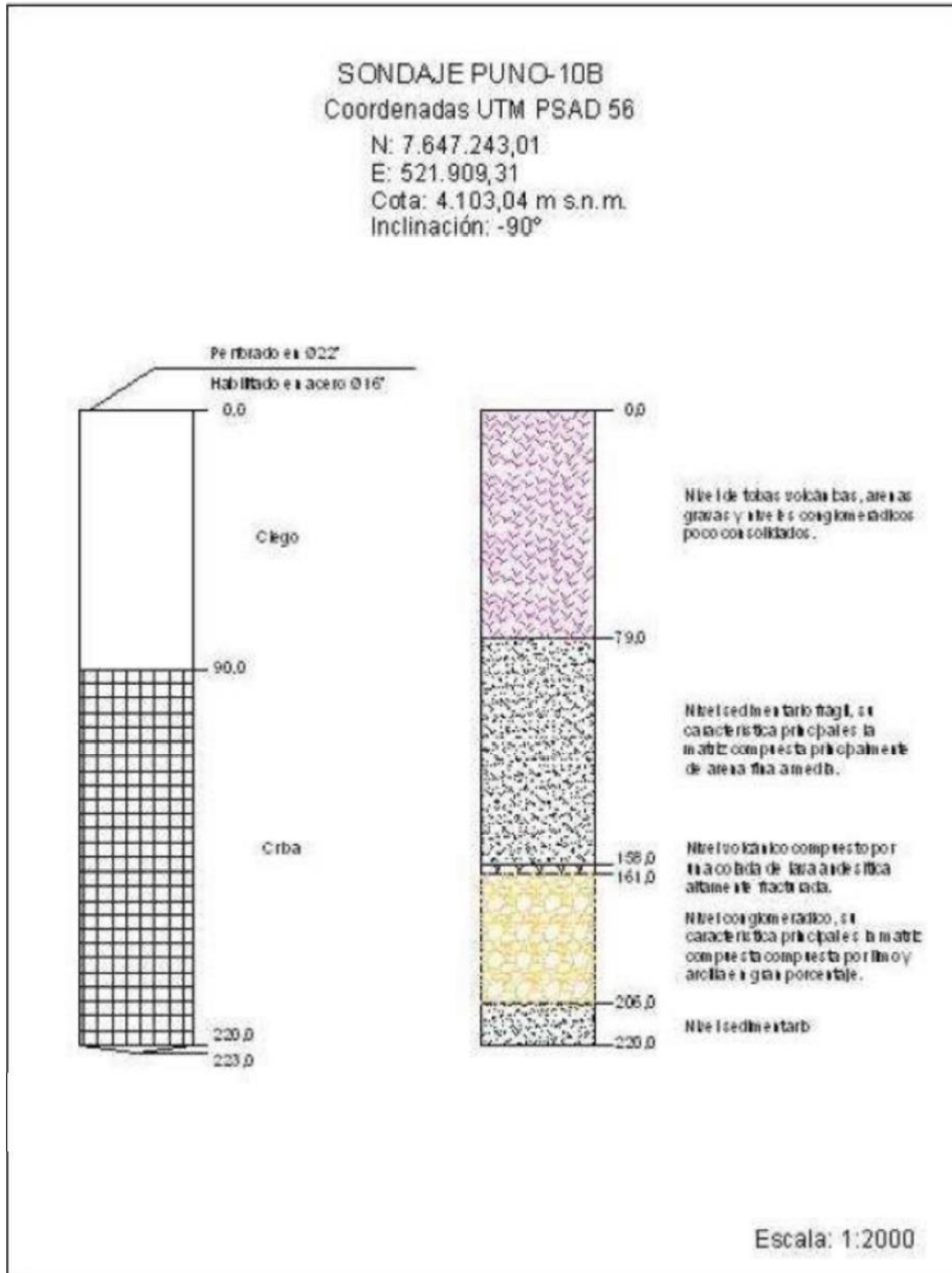
**Figura B.28**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-09B**



Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

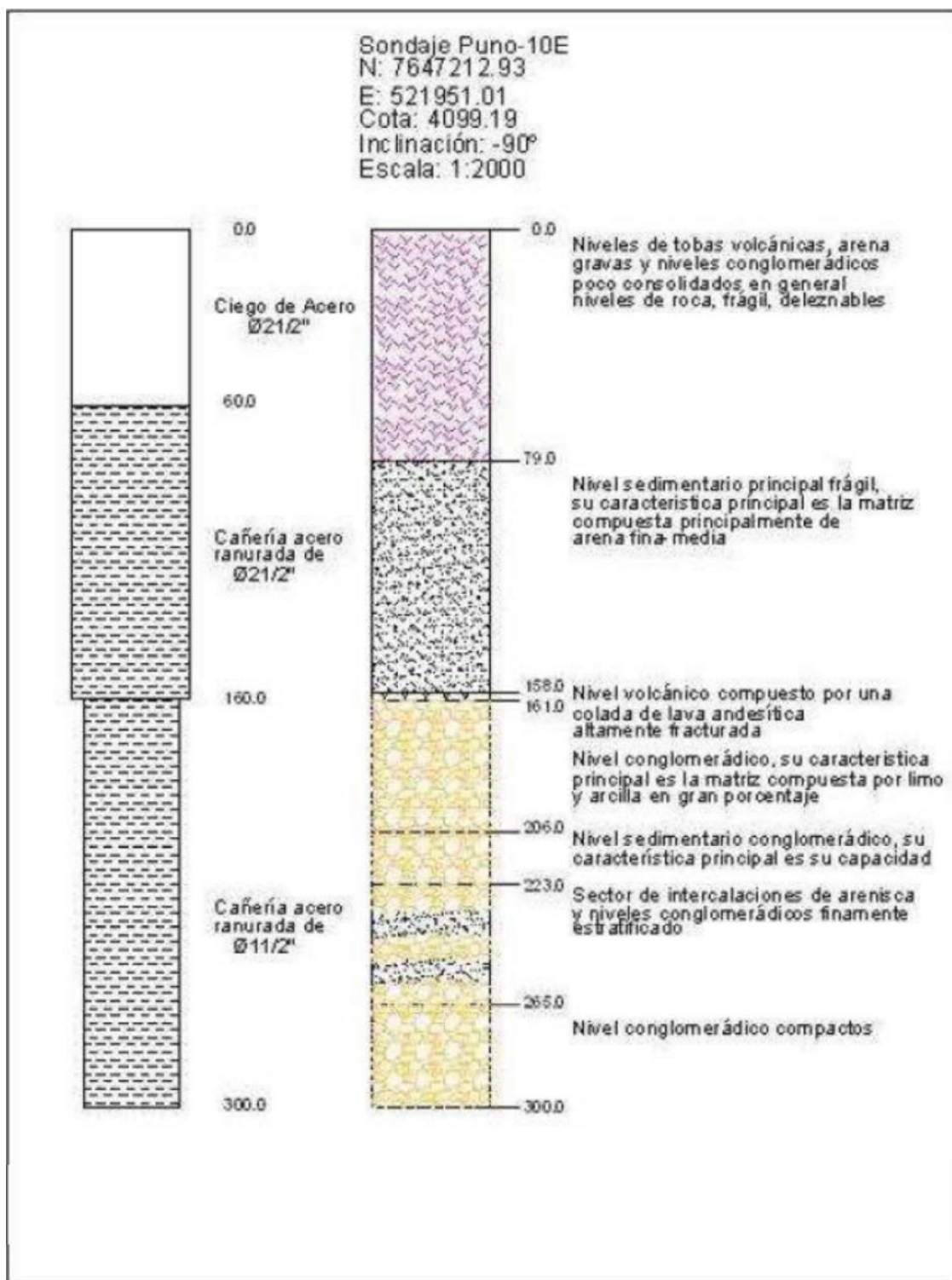


**Figura B.29**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-10B**



Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

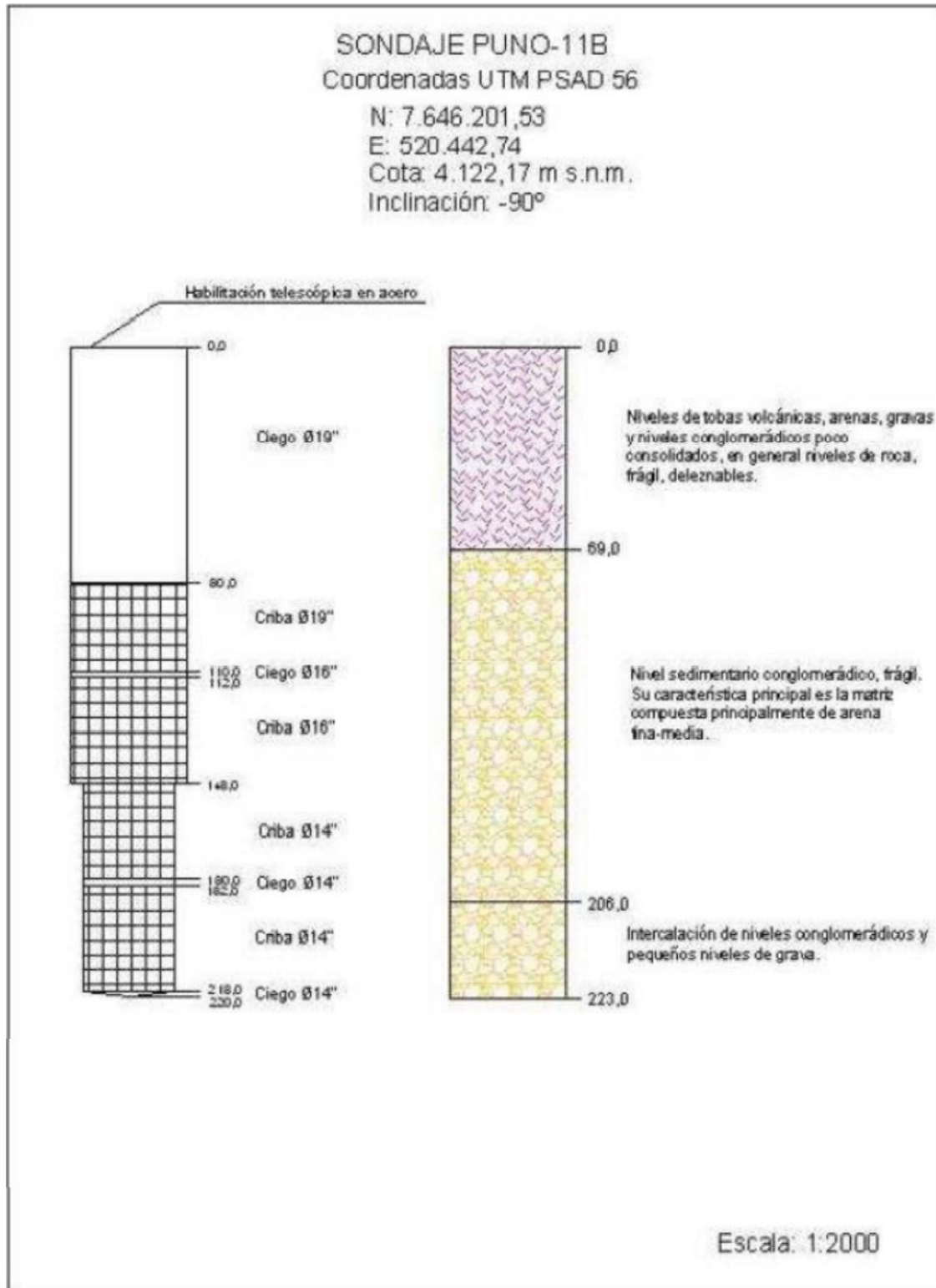
**Figura B.30**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-10E**



Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

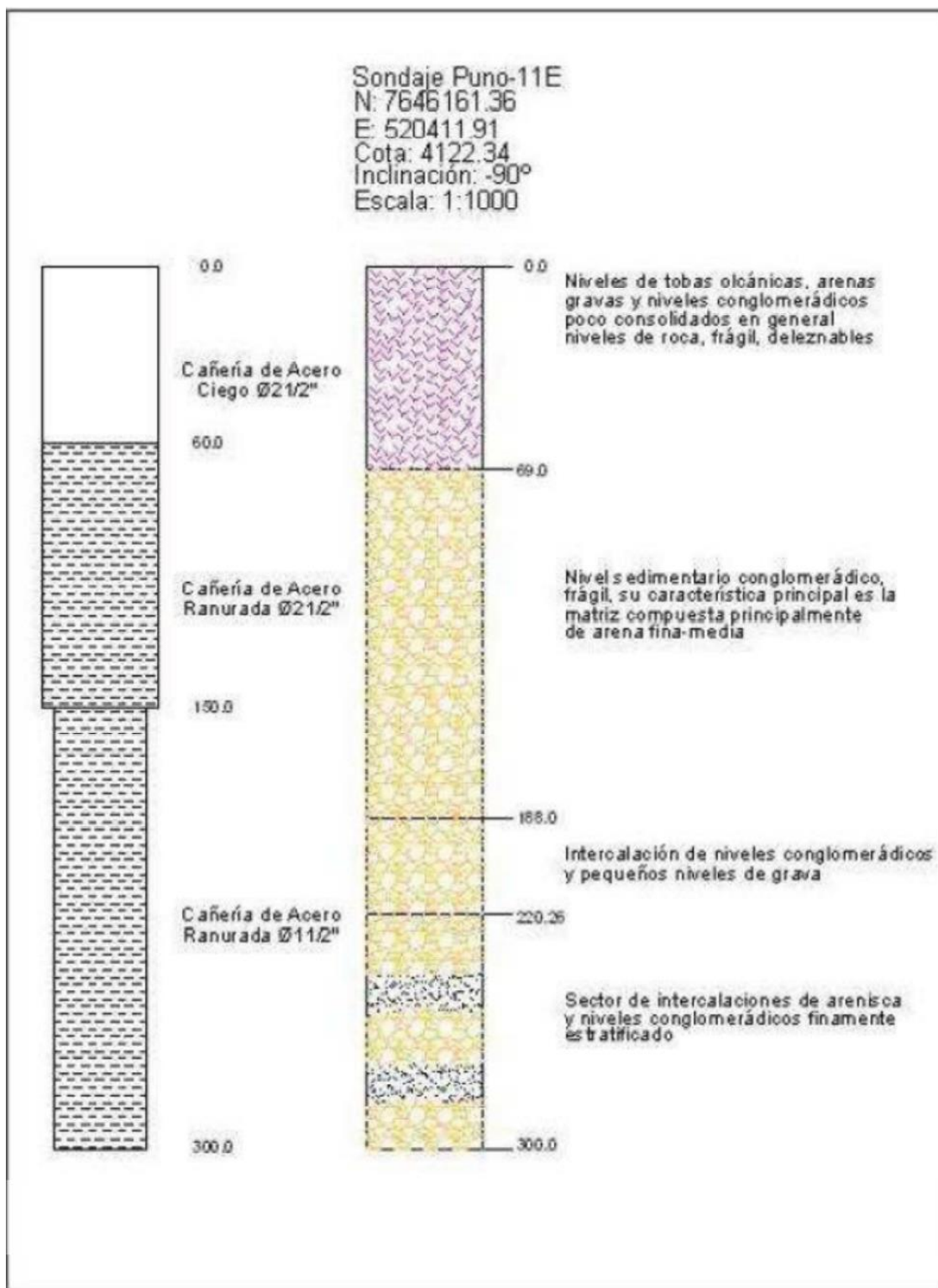


**Figura B.31**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-11B**



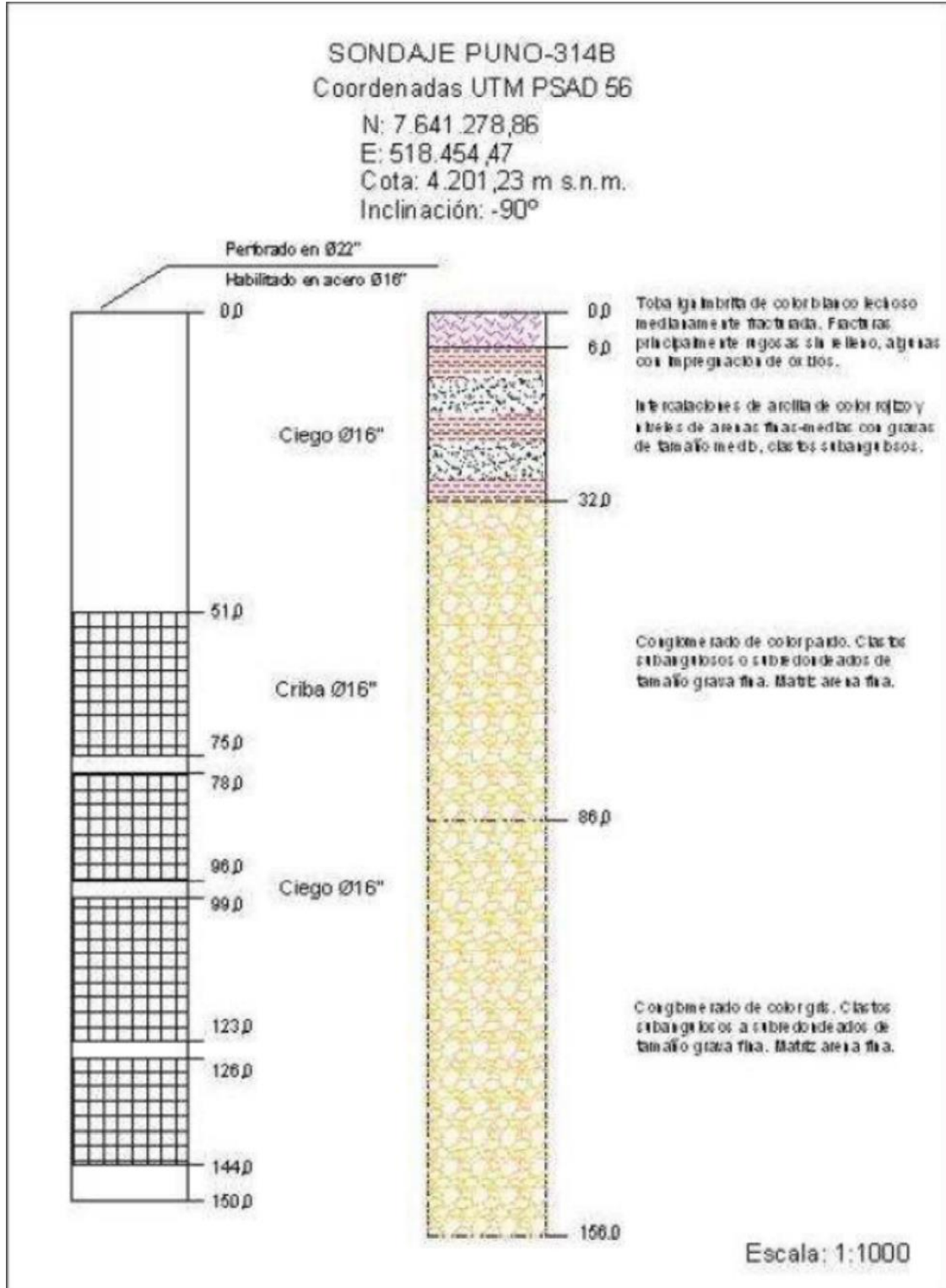
Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

**Figura B.32**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-11E**



Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

**Figura B.33**  
**Cartilla Resumen Pozo de Observación PUNO-314B**



Fuente: Informe Plan Alerta Temprana Sector Pampa Puno (2014)

## **ANEXO C**

### **CARTILLAS RESUMEN DE POZOS PAMPA PUNO**

**REV B**

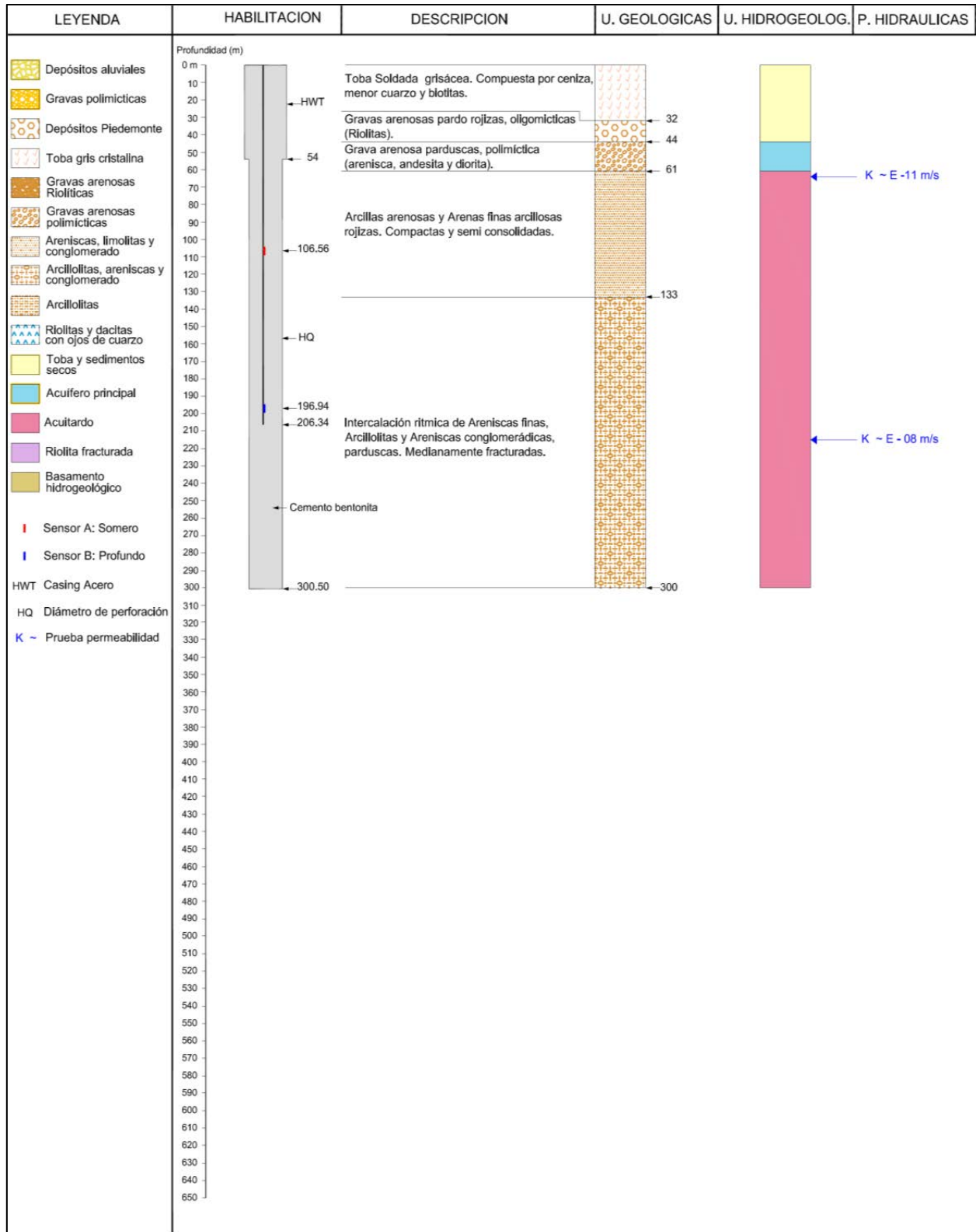
**MARZO 2015**

**PREPARADA POR**



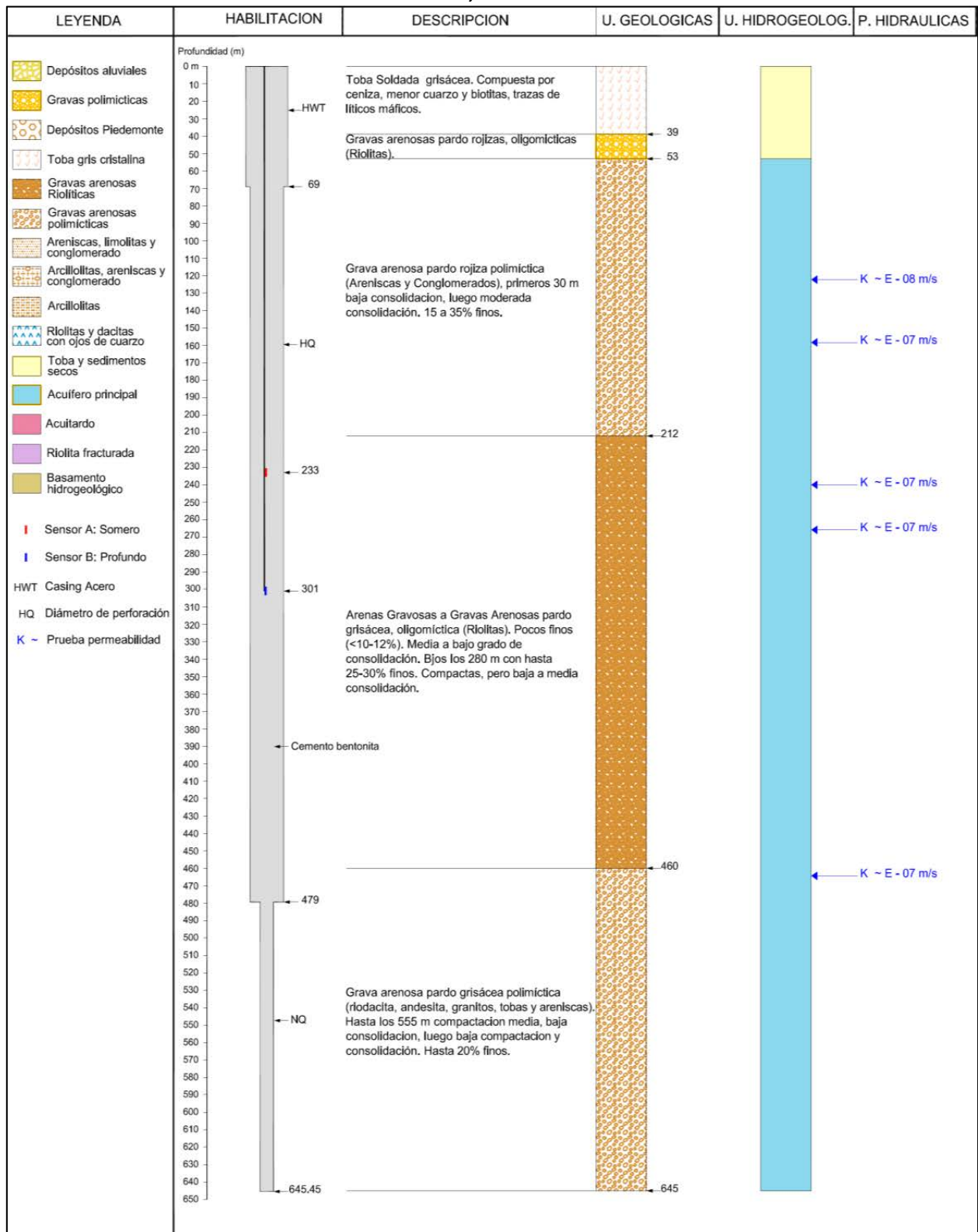
**HIDROGEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE**

**Tabla C.1**  
**Cartilla Resumen, Pozo DDH-P01**



Fuente: SWS (2012)

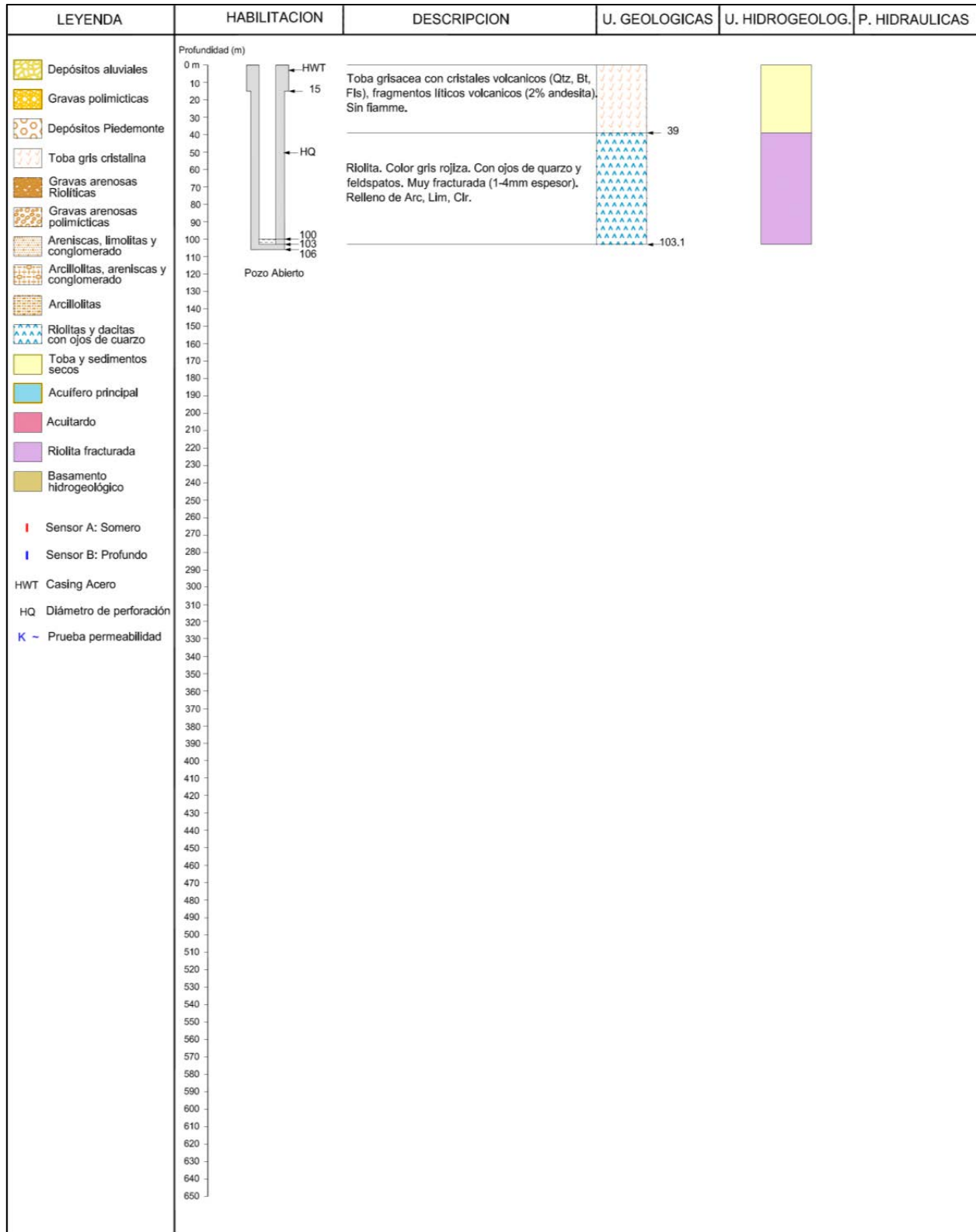
**Tabla C.2**  
**Cartilla Resumen, Pozo DDH-P02**



Fuente: SWS (2012)



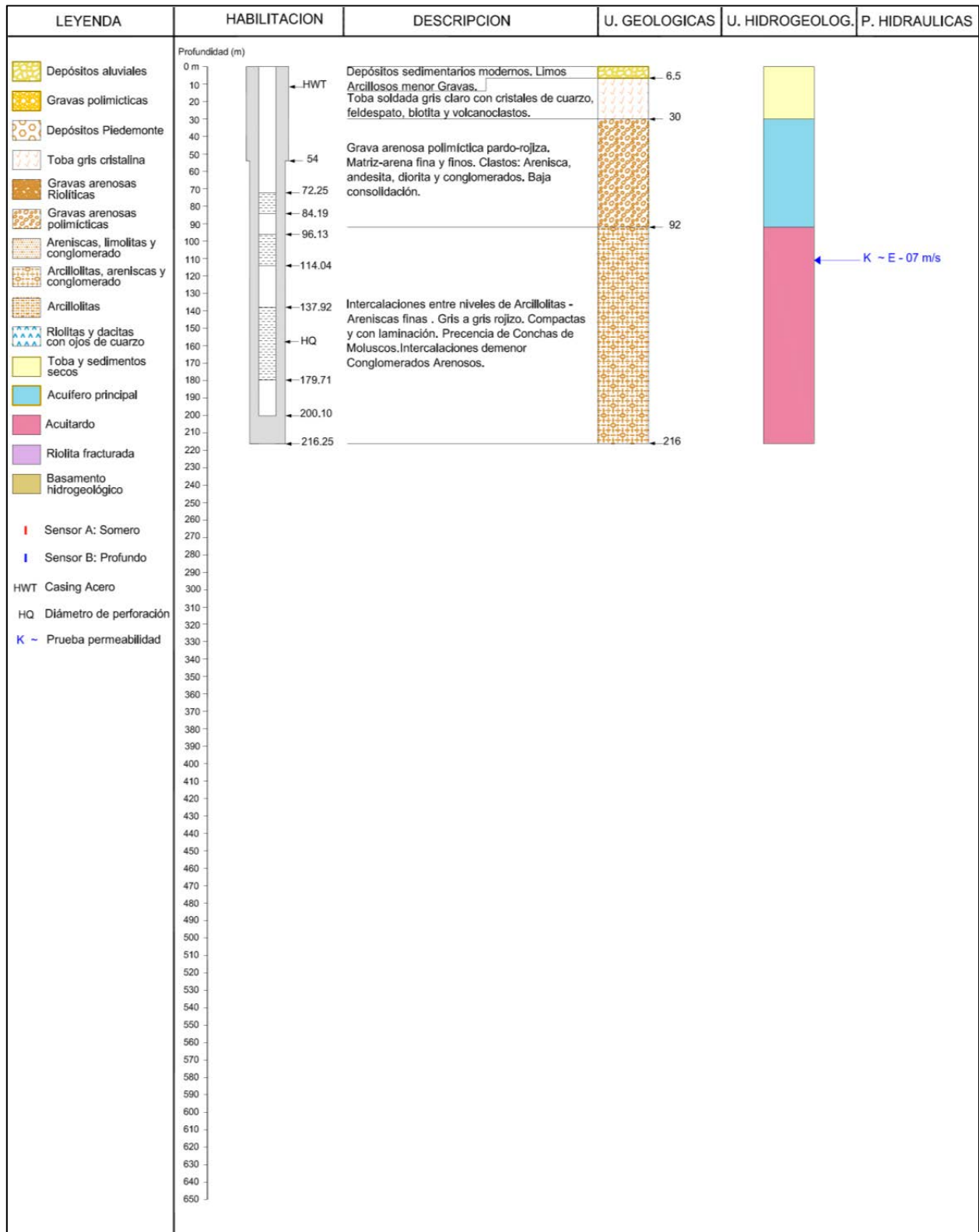
**Tabla C.3**  
**Cartilla Resumen, Pozo DDH-P03**



Fuente: SWS (2012)

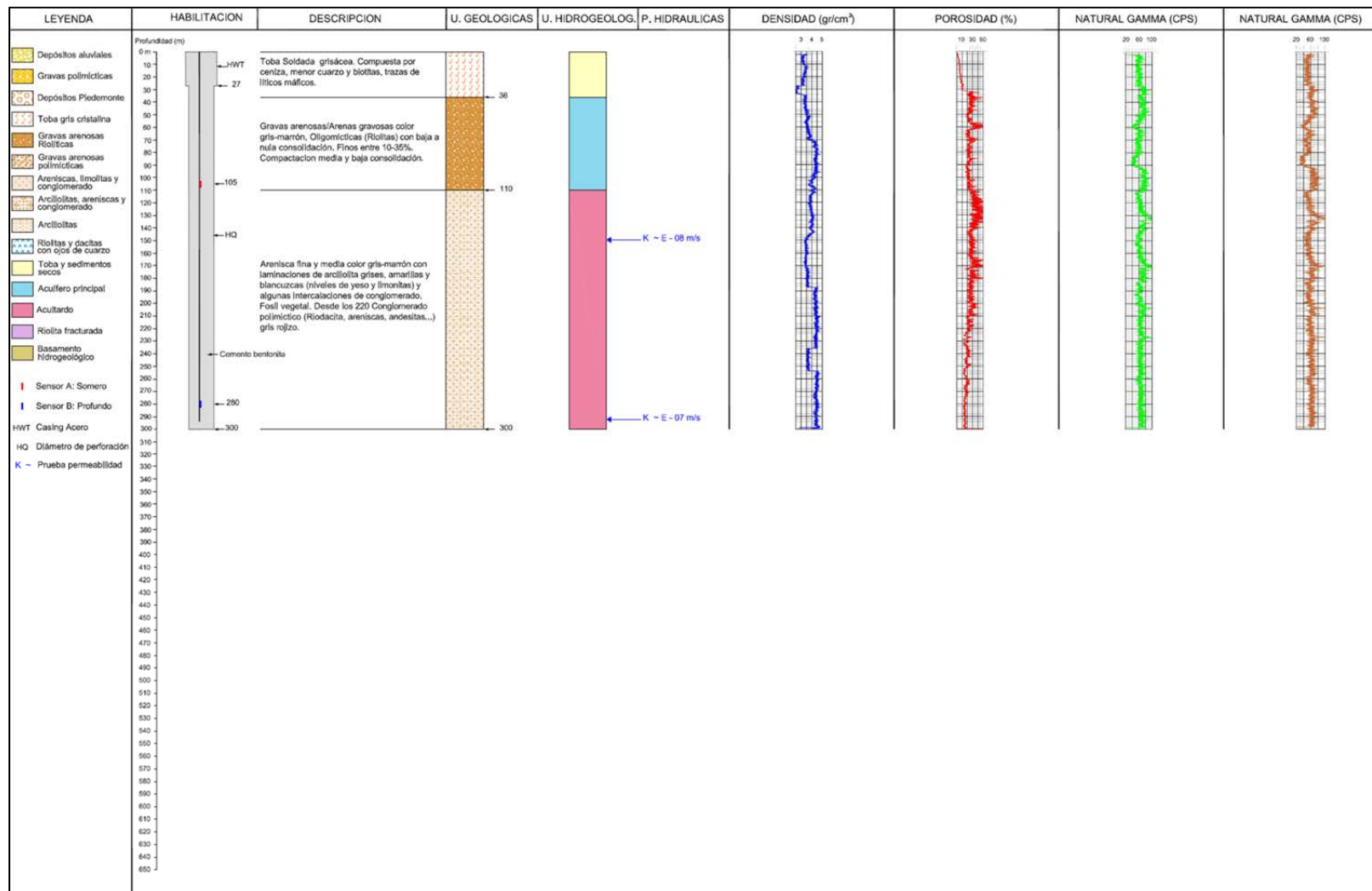


**Tabla C.4**  
**Cartilla Resumen, Pozo DDH-P04**



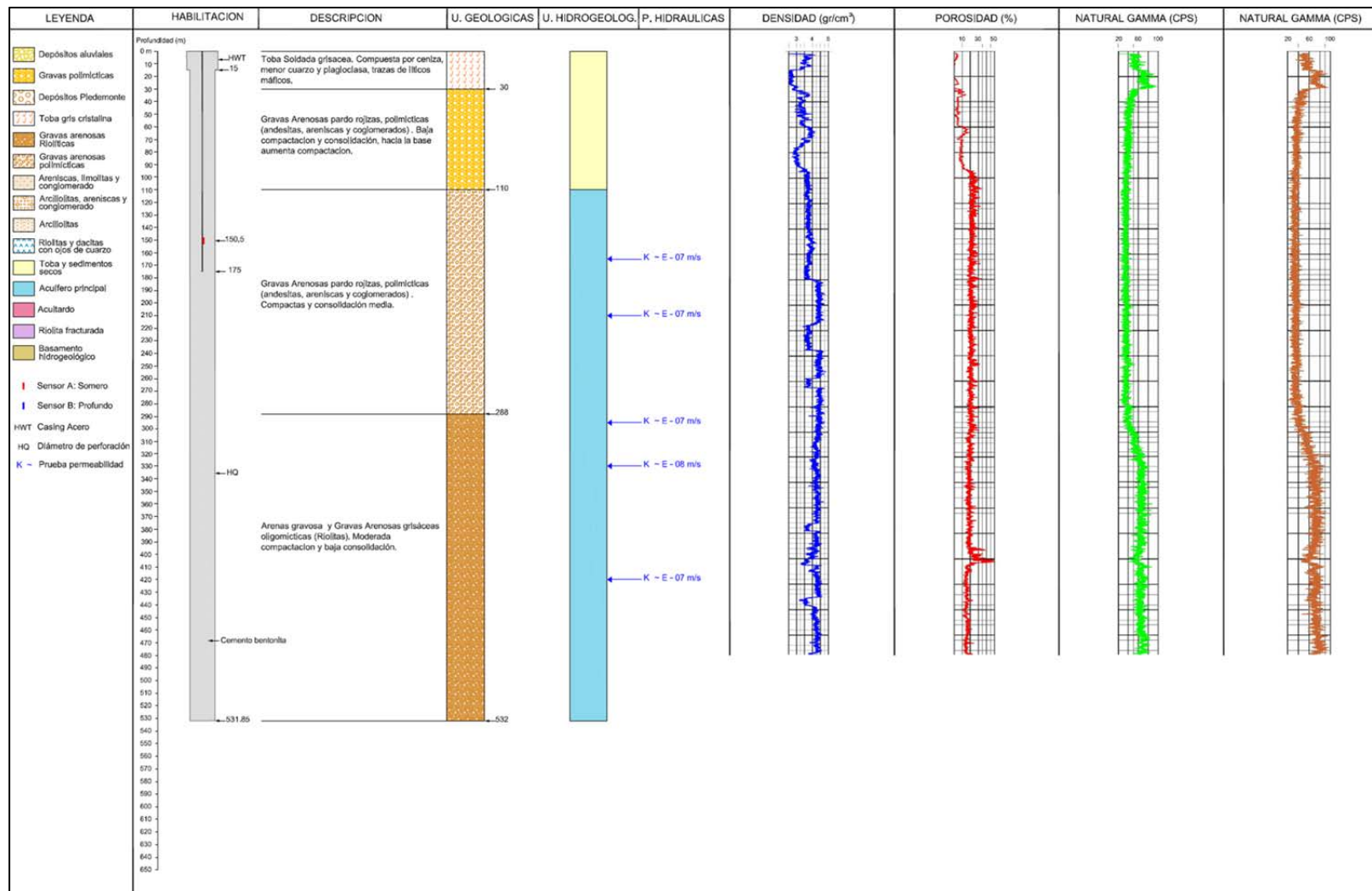
Fuente: SWS (2012)

**Tabla C.5**  
**Cartilla Resumen, Pozo DDH-P05**



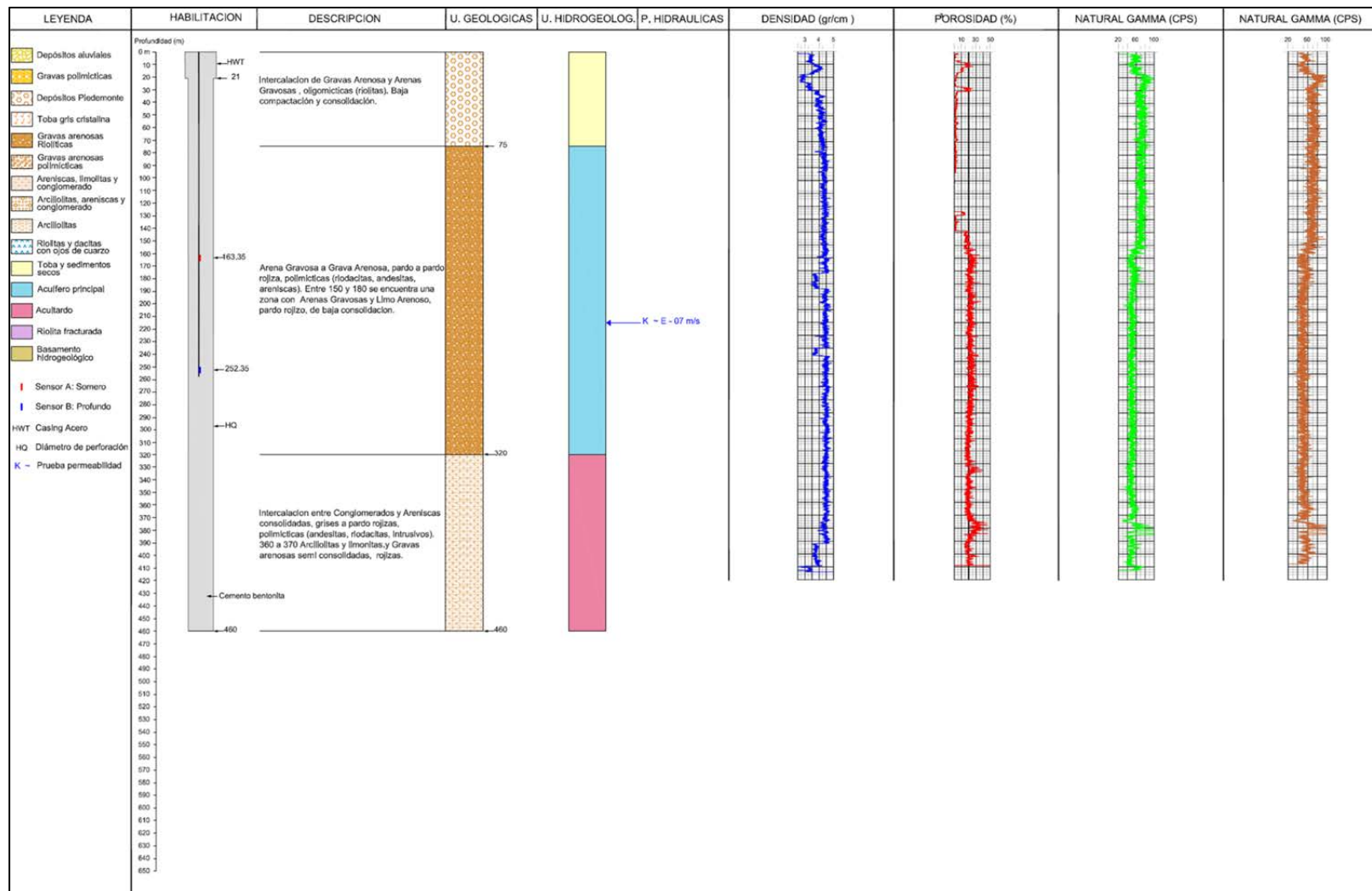
Fuente: SWS (2012)

**Tabla C.6**  
**Cartilla Resumen, Pozo DDH-P06**



Fuente: SWS (2012)

**Tabla C.7**  
**Cartilla Resumen, Pozo DDH-P07**



Fuente: SWS (2012)

## **ANEXO D**

### **GEOFÍSICA DE SONDAJES DIAMANTINA GEODATOS**

**REV**

**MARZO 2015**

**PREPARADA POR**



**HIDROGEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE**

## ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
I INTRODUCCIÓN	1
II TRABAJO DE TERRENO	1
III EQUIPO EMPLEADO	1
3.1 Unidad de Registro de Superficie	1
3.2 Software Winlogger	2
3.3 Winche 500 m	2
3.4 Sonda Neutrónica Dual y Gamma Natural	3
3.5 Sonda de Densidad Fuente Pequeña	5
IV FUNDAMENTOS GENERALES DE LAS SONDAS EMPLEADAS	7
4.1 Gamma Natural	7
4.2 Neutrón Compensada	8
4.3 Densidad Gamma	8
V COMENTARIOS GENERALES	9

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Fig. Nº 1      Ubicación General Sector de Estudio
- Fig. Nº 2      Ubicación de Pozos Perfilados sobre Imagen Google
- Fig. Nº 3      Perfil Multiparamétrico Perfilaje Pozo DDH-P05
- Fig. Nº 3`      Perfil Multiparamétrico Perfilaje Pozo DDH-P05  
(Resolución Vertical de detalle)
- Fig. Nº 4      Perfil Multiparamétrico Perfilaje Pozo DDH-P06
- Fig. Nº 4`      Perfil Multiparamétrico Perfilaje Pozo DDH-P06  
(Resolución Vertical de detalle)
- Fig. Nº 5      Perfil Multiparamétrico Perfilaje Pozo DDH-P07
- Fig. Nº 5`      Perfil Multiparamétrico Perfilaje Pozo DDH-P07  
(Resolución Vertical de detalle)



## I INTRODUCCIÓN

En este Informe se presentan los resultados obtenidos con los trabajos de Perfilaje Geofísico de los Pozos DDH-P05, DDH-P06 y DDH-P07 perforados en el Sector de Pampa Puno, II Región de Chile (Figs. 1 y 2).

Las coordenadas de ubicación de los pozos, medidas con GPS no diferencial corresponden a:

DDH-P05: E 522403 m, N 7645414 m, Cota 4073 m (Datum UTM PSAD56)  
DDH-P06: E 520016 m, N 7641200 m, Cota 4109 m (Datum UTM PSAD56)  
DDH-P07: E 519313 m, N 7650256 m, Cota 4155 m (Datum UTM PSAD56)

Las sondas empleadas en esta ocasión corresponden a Gamma Natural, Densidad Gamma y Neutrón compensada (dos detectores).

## II TRABAJO DE TERRENO

Los pozos DDH-P05 y DDH-P06 fueron perfilados los días 04 y 05 de Febrero de 2012, mientras que el pozo DDH-P07 fue perfilado el día 27 de Marzo de 2012. En todos los sondeos se usó las sondas: Gamma Natural, Densidad Gamma y Porosidad Neutrón, las sondas, por motivos de seguridad para evitar atascamientos fueron ingresadas al pozo por el interior de las barras de sondeo.

## III EQUIPO EMPLEADO

### 3.1 Unidad de Registro de Superficie



#### RG USB Micrologger 2

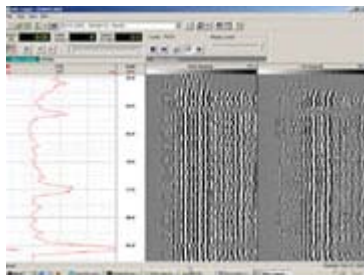
Con una interfaz USB para computador portátil y soporte de video.

Micrologger 2 es actualmente el sistema de registro portátil más poderoso del mercado.



Es liviano, más pequeño que una computadora portátil común.

### 3.2 Software Winlogger



#### RG Winlogger Software

En el centro del Micrologger 2 se encuentra el software RG-Winlogger producto obtenido del desarrollo de veinte años de trabajo, es una solución de fácil uso con base en sistema operativo Windows, para la recolección, procesamiento e informe de datos de registro.

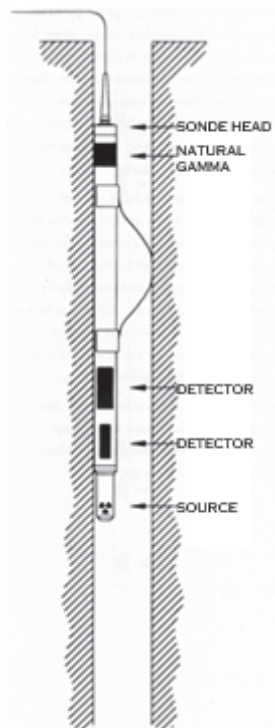
### 3.3 Winche 500 m



#### RG 500m Winch

Winche eléctrico de 500 metros de cable, con interfase digital de comunicación con sistema Micrologger 2.

### 3.4 Sonda Neutrónica Dual y Gamma Natural



#### Sonda Neutrónica Dual

La sonda neutrónica dual proporciona una medición neutrónica de porosidad compensada para la perforación y calibrada con precisión en perforaciones abiertas llenas de lodo. Es la sonda ideal para realizar estudios cuantitativos de los fluidos de las formaciones, incluyendo exploraciones poco profundas de gas y petróleo.

#### PRINCIPIO DE MEDICIÓN

La medición neutrónica dual utiliza dos detectores  $^3\text{He}$  proporcionales y una fuente neutrónica sellada desmontable. Los neutrones rápidos emitidos por la fuente se dispersan y se vuelven más lentos gracias a los elementos livianos (y principalmente al hidrógeno en la formación) hasta que alcanzan niveles de energía térmica. La relación del flujo de los neutrones térmicos que alcanzan los detectores cercanos y los lejanos depende del Índice de Hidrógeno y de la porosidad. El uso de los dos detectores y de un método de relación proporciona una medición de porosidad independiente del tamaño de la perforación en una variedad de diámetros de perforación.

#### CARACTERÍSTICAS

- Margen de porosidad amplio (0 a 60% del equivalente en arenisca).
- Compensación del diámetro de la perforación utilizando detectores duales.
- Medición de porosidad en tiempo real con los sistemas Videologger y Micrologger.
- Opción de rayos gamma naturales para correlación.
- Opción de CCL para la inspección de camisas de revestimiento.

#### MEDICIONES

- Porosidad compensada.
- Neutrón de espaciado largo en bruto.
- Neutrón de espaciado corto en bruto.

Relación de conteo.

Rayos gamma naturales.

Localizador del cuello de la camisa de revestimiento.

## APLICACIONES

AGUA, INGENIERÍA, MINERALES

Identificación de litología.  
 Ubicación de formaciones  
 acuíferas y capas  
 semipermeables. Contenido de  
 esquisto. Análisis de fractura en  
 carbón. Correlación entre  
 registros de perforaciones  
 abiertas y perforaciones con  
 camisa de revestimiento.  
 Correlación de estratos entre  
 pozos.

## CONDICIONES OPERATIVAS

Tipo de Perforación

Perforación abierta/ con camisa  
 de revestimiento, llena de agua  
 (se pueden realizar mediciones  
 cualitativas en perforaciones  
 llenas de aire).

Centralización

Excentralizado con compás de  
 muelle (bowspring)

## ESPECIFICACIONES

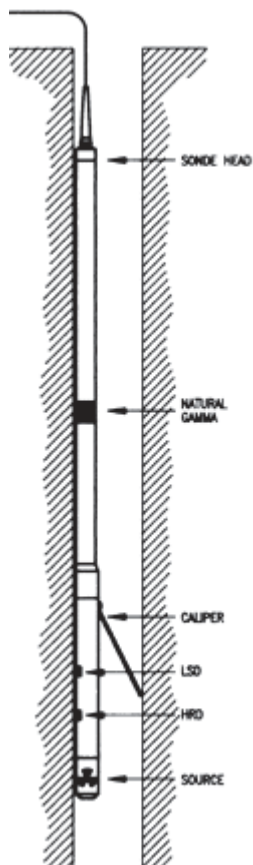
Diámetro

60mm

Longitud

1.94m

### 3.5 Sonda de Densidad Fuente Pequeña



#### Sonda de Densidad de Fuente Pequeña

La legislación cada vez más estricta respecto del transporte y manipulación de materiales radioactivos impide, cada vez en mayor medida, el uso de sondas de registro de densidad convencionales. La sonda de densidad de fuente pequeña proporciona registros de densidad calibrados, de alta densidad y compensados a velocidades de registro razonables utilizando una fuente nuclear de muy baja potencia que no requiere de una licencia para el uso de radiación en muchos territorios.

#### PRINCIPIO DE MEDICIÓN

La sonda contiene una pequeña fuente colimada de rayos gamma y dos detectores de rayos gamma de centelleo de alta sensibilidad. Los detectores están protegidos contra la radiación directa por parte de la fuente o a través de la perforación, por medio de un revestimiento de metal pesado. Las ventanas activas de la fuente y del detector están en contacto con las paredes de la perforación a través de un brazo de refuerzo motorizado que también proporciona una medición del calibre de la perforación. La radiación gamma de la fuente es retrodispersada por la formación (efecto Compton) y alcanza a los dos detectores en donde las velocidades de conteo relativas proporcionan una medición de la densidad mayor de la formación. La sonda incluye un tercer detector de rayos gamma colocado lejos de la fuente para permitir el "aislamiento" de la radiación natural de fondo.

#### CARACTERÍSTICAS

Rendimiento de la densidad compensado directamente en unidades de ingeniería (g/ cc).

Revestimiento de tungsteno que reduce la influencia de la perforación en la medición.

Aislamiento automático de la radiación de fondo.

Poderoso brazo calibrador motorizado que mantiene un buen contacto con las paredes laterales.

Detectores de corto espaciado separados para una ubicación precisa de los límites del estrato.

### **MEDICIONES**

Densidad de formación compensada para la perforación.

Densidad de alta resolución.

Calibre.

Rayos gamma naturales.

## **IV FUNDAMENTOS GENERALES DE LAS SONDAS EMPLEADAS**

### **4.1 Gamma Natural**

El perfilaje gamma natural, denominado también gamma total o de rayos gamma, se refiere a la medición de fotones gamma en un amplio espectro de energía resultante principalmente de los isótopos naturales. Las mediciones de rayos gamma detectan variaciones de la radioactividad natural originada principalmente por los productos de la serie de decaimiento de los elementos Uranio-238 (U), Torio-232 (TH) y Potasio-40 (K). El sensor gamma convencional consiste en un elemento sensible compuesto de yoduro de sodio, que es parte de la sonda que se desplaza por el interior del sondaje a una velocidad máxima de 5 m/minuto.

Los impactos de los fotones gamma sobre el elemento sensible se cuentan digitalmente y se expresan en cuentas por segundo. La herramienta de rayos gamma posee un radio de investigación de aproximadamente 0.5 m. Se puede detectar rayos gammas en pozos húmedos o secos y en pozos abiertos o entubados, incluso al perfilar por el interior de las barras de perforación. La principal aplicación del perfilaje gamma es la identificación de cambios litológicos, especialmente los asociados al cambio del contenido de potasio en las rocas (variación de contenido de arcillas).

En lo relativo a columnas sedimentarias, permite identificar con facilidad estratos de arenas con bajo contenido de potasio respecto de arcillas que normalmente son ricas en minerales y compuestos de potasio.



## 4.2 Neutrón Compensada

La sonda neutrónica dual proporciona una medición neutrónica de porosidad compensada para la perforación y calibrada con precisión en perforaciones abiertas y/o revestidas llenas de lodo o agua de perforación. Es la sonda ideal para realizar estudios cuantitativos de los fluidos de las formaciones, incluyendo exploraciones poco profundas de gas y petróleo.

La medición neutrónica dual utiliza dos detectores  $^3\text{He}$  proporcionales y una fuente neutrónica sellada desmontable. Los neutrones rápidos emitidos por la fuente se dispersan y se vuelven más lentos gracias a los elementos livianos (y principalmente al hidrógeno en la formación) hasta que alcanzan niveles de energía térmica. La relación del flujo de los neutrones térmicos que alcanzan los detectores cercanos y los lejanos depende del Índice de Hidrógeno y de la porosidad de la formación. El uso de los dos detectores y la razón de conteo entre ellos proporciona una medición de porosidad independiente del tamaño de la perforación en una variedad de diámetros de perforación.

## 4.3 Densidad Gamma

Con esta sonda es posible obtener un registro continuo de la densidad de la pared de pozo (es necesario aplicar una pequeña corrección constante por efecto del espesor y material de la cañería de habilitación), genera información complementaria para estimar la porosidad de los estratos sedimentarios cortados por el pozo.

Esta sonda además permite registrar la emisión gamma natural que es una buena herramienta para discriminar acerca de la presencia de arcillas en la columna estratigráfica. Para este caso, la sonda entrega la variación relativa de densidades ya que los valores absolutos están incrementados por efecto de la densidad de las tuberías de sondajes.

## **V COMENTARIOS GENERALES**

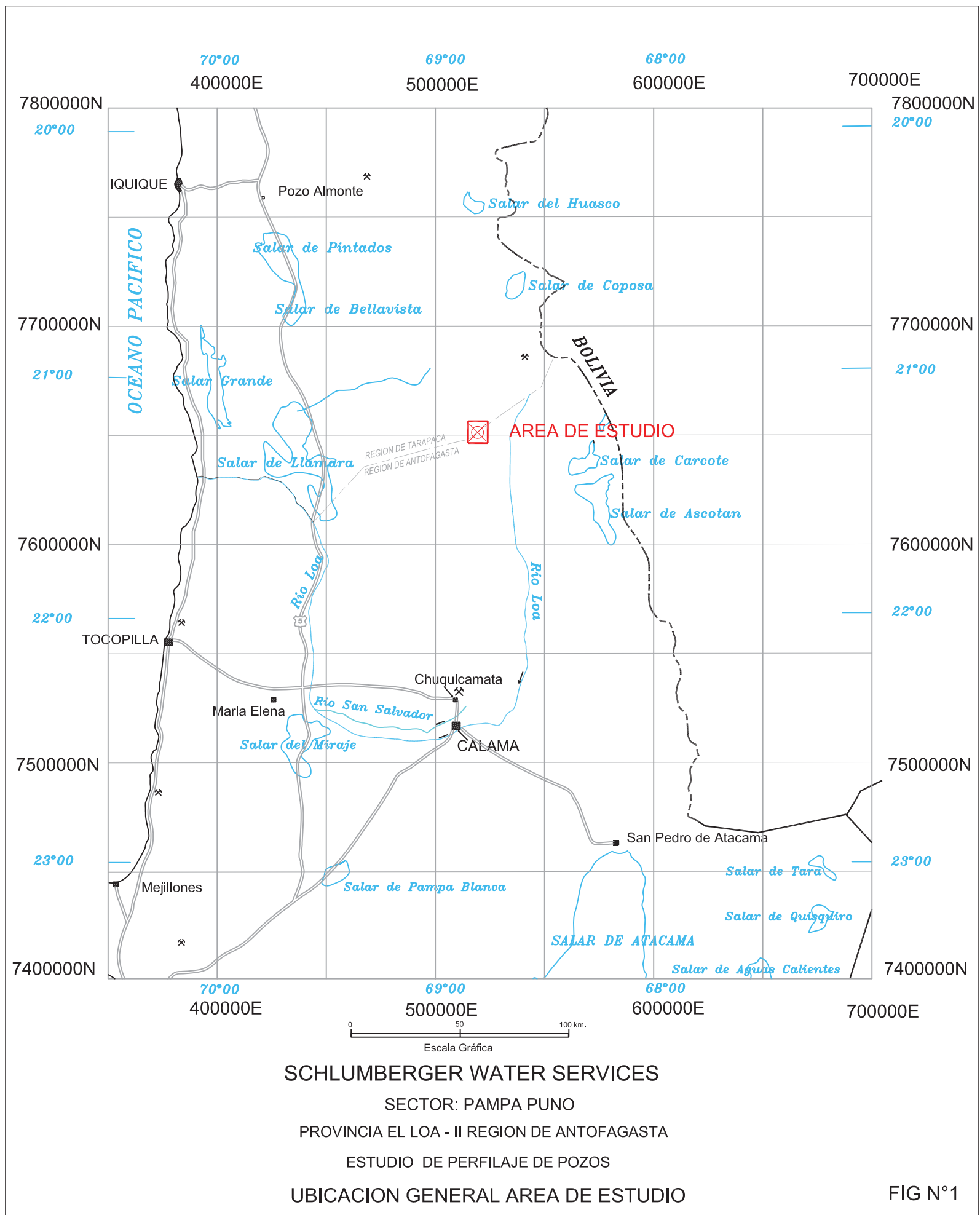
Los resultados se presentan mediante los Perfiles Multiparamétricos de las Figuras Nº 3 (3`) a Nº 5 (5`), para cada pozo se ha generado dos escalas verticales con la finalidad de mantener una resolución de alto detalle.

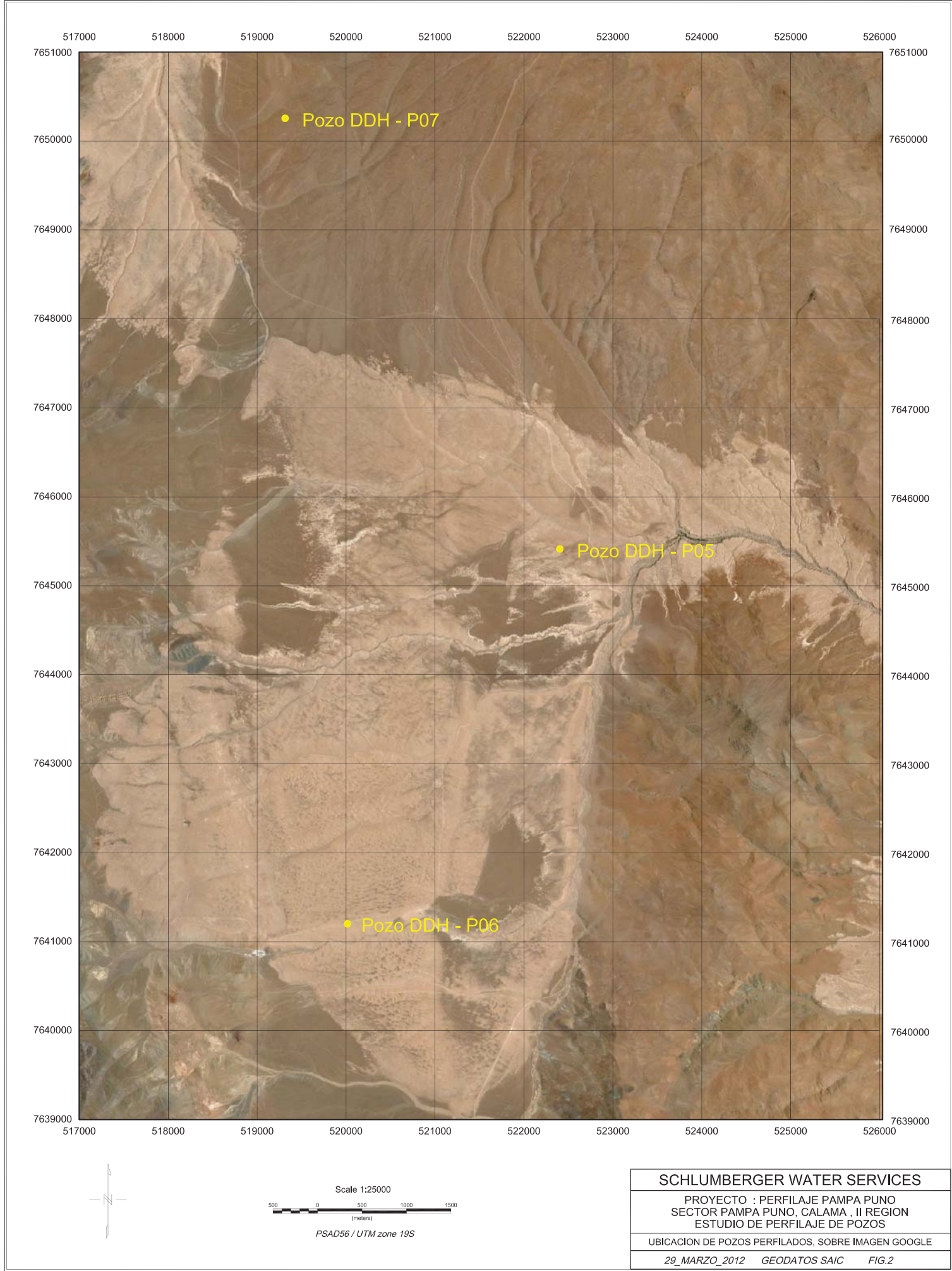
Por el hecho de perfilar por el interior de las barras de sondaje, las unidades de densidad, gamma natural y porosidad deben considerarse como relativas, ya que no se ha corregido el efecto de las barras de acero de alta densidad.

Los trabajos de perfilaje permiten identificar la presencia de estratos de mayor porosidad relativa, los que constituyen los sectores más favorables para una eventual habilitación del pozo.

Se sugiere complementar la información de perfilaje de ambos pozos con la información estratigráfica disponible.

Geodatos S.A.I.C.  
Santiago, 03 de Abril de 2012

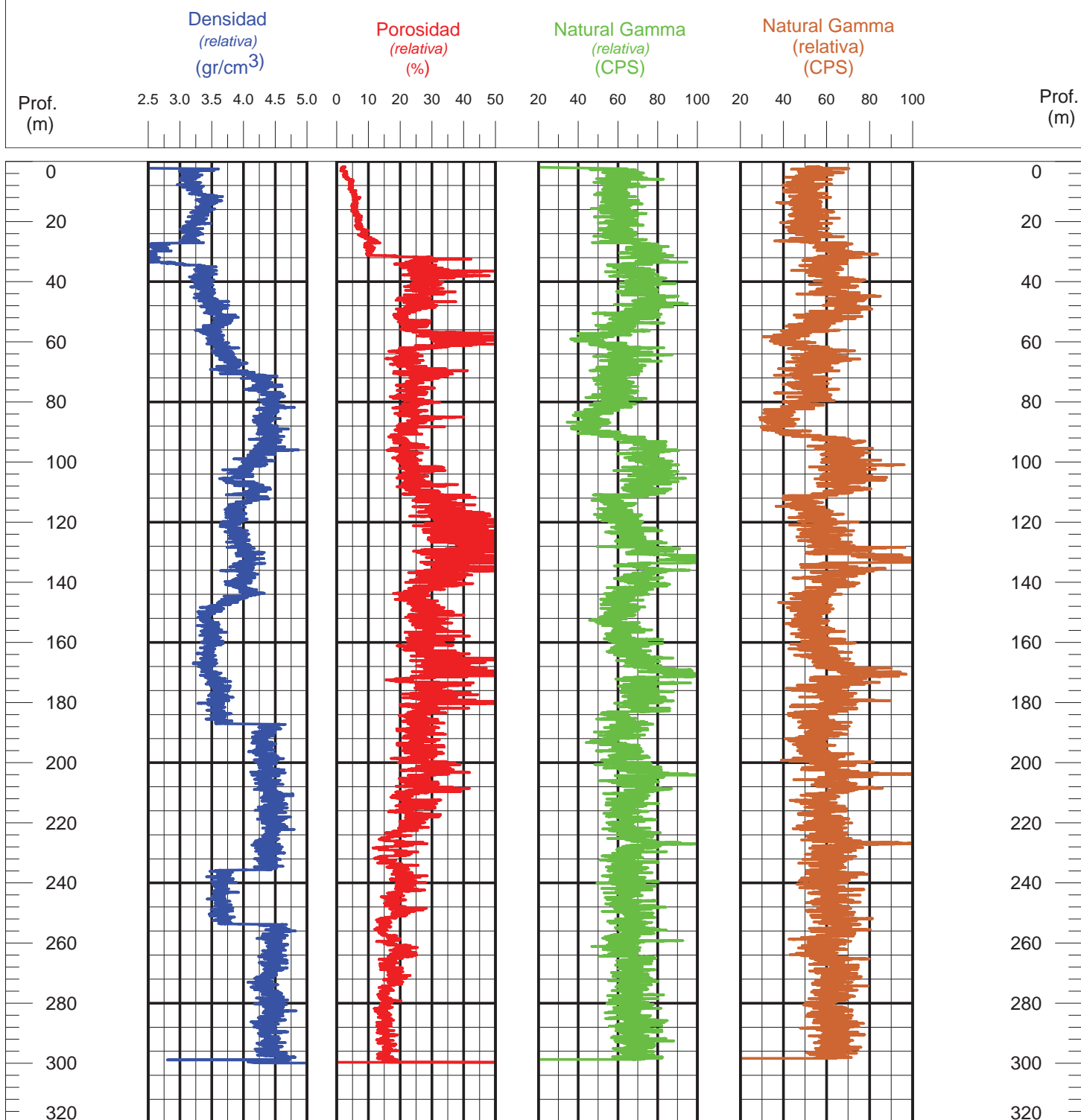






**GEODATOS**  
Geofísica de Avanzada

## POZO: DDH-P05



**Cliente:** Schlumberger Water Services.

**Proyecto:** Perfilaje de Pozo Pampa Puno

**Metodo:** Perfilaje de Pozo (Densidad, Porosidad y Gamma Natural).

**Equipo:** Robertson Geologging.

**Ubicación:** Pampa Puno, II Region

**Fecha de Registro:** 5 de Febrero de 2012

**Coordenadas (Datum PSAD56):** 522.403E, 7645414N, Cota 4073m.

(GPS No Diferencial)

Fig. (3)

ISO 9001  
ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification

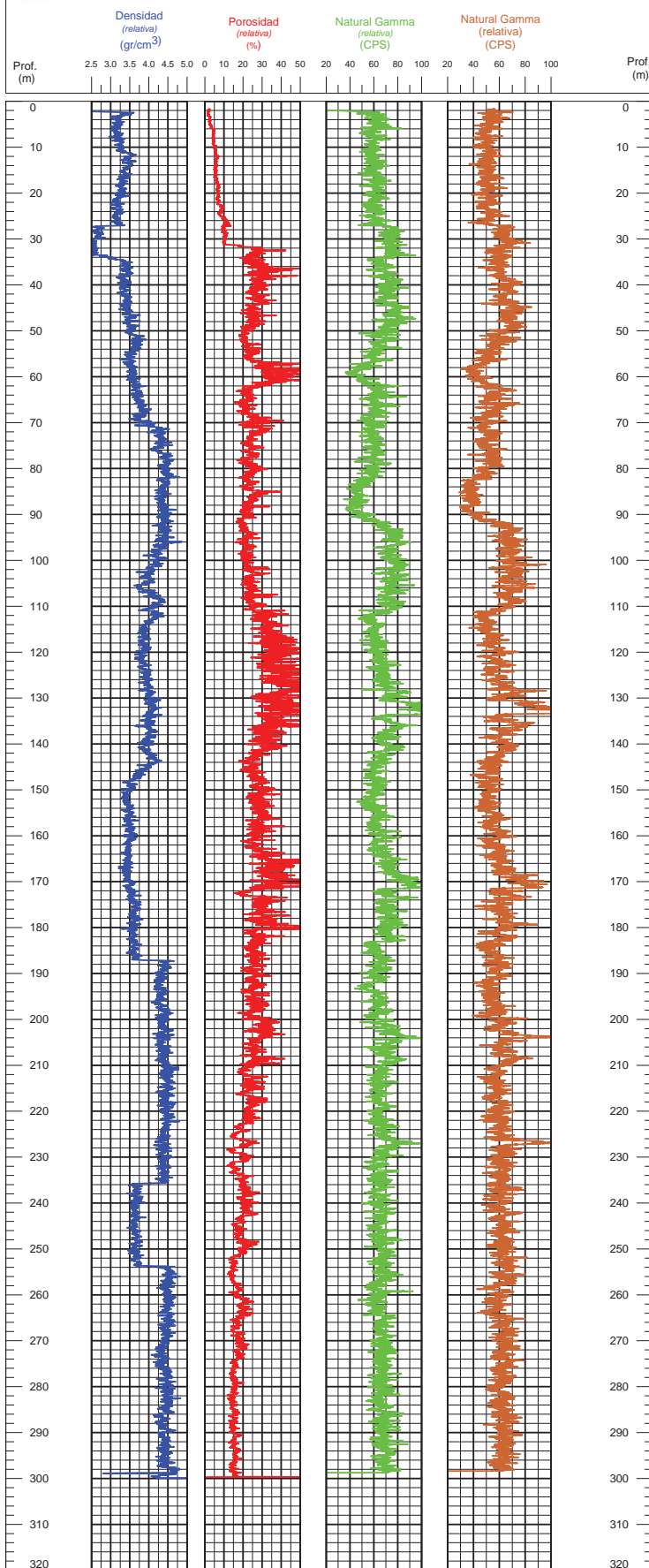






**GEODATOS**  
Geofísica de Avanzada

POZO: DDH-P05



**Cliente:** Schlumberger Water Services.  
**Proyecto:** Perfilaje de Pozo Pampa Puno  
**Método:** Perfilaje de Pozo (Densidad, Porosidad y Gamma Natural).  
**Equipo:** Robertson Geologging.  
**Ubicación:** Pampa Puno, II Region  
**Fecha de Registro:** 4 de Febrero de 2012  
**Coordenadas (Datum PSAD56):** 522403E, 7645414N, Cota 4073m.  
(GPS No Diferencial)

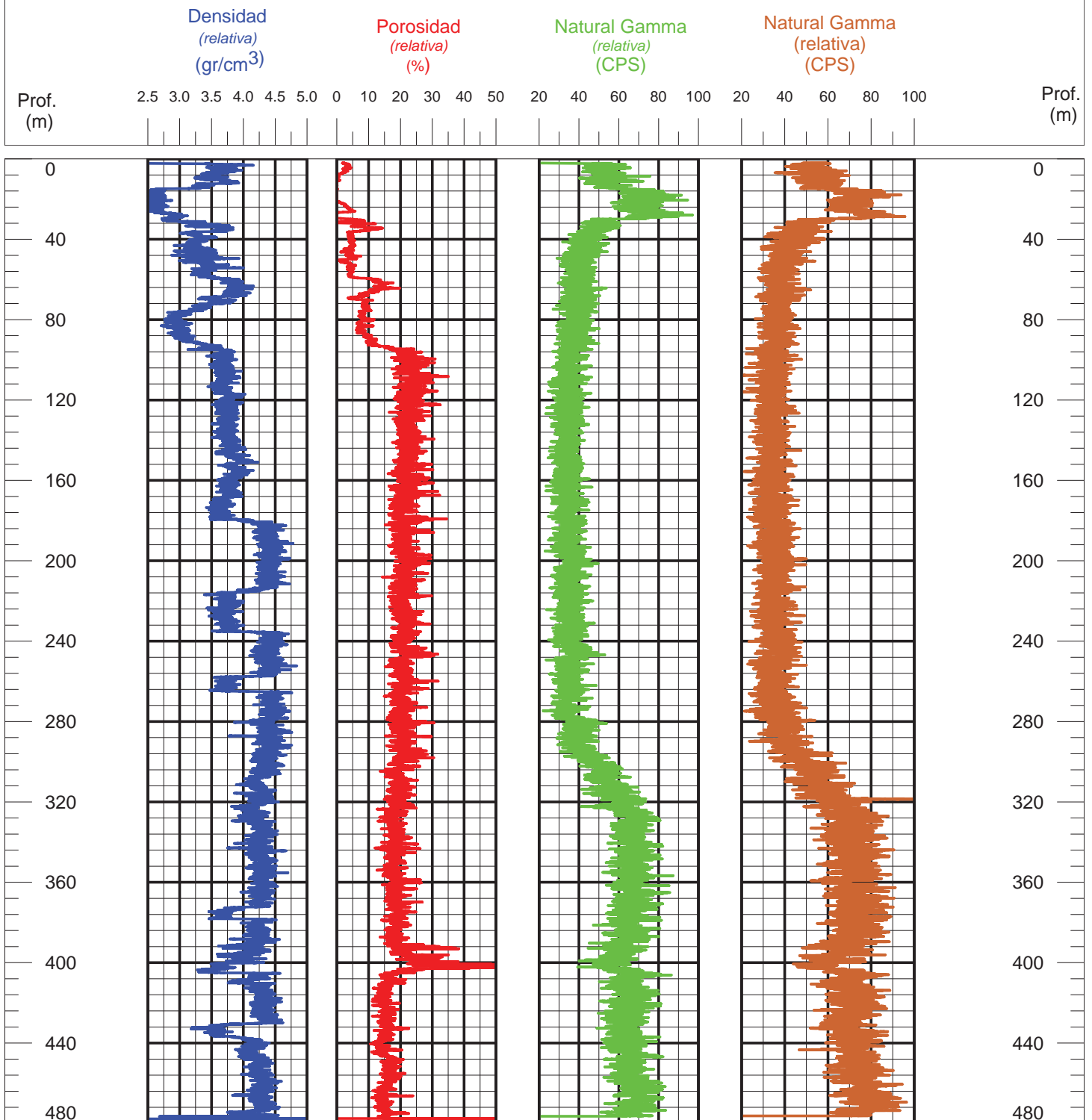
Fig. (3')





**GEODATOS**  
Geofísica de Avanzada

## POZO: DDH-P06



**Cliente:** Schlumberger Water Services.

**Proyecto:** Perfilaje de Pozo Pampa Puno

**Metodo:** Perfilaje de Pozo (Densidad, Porosidad y Gamma Natural).

**Equipo:** Robertson Geologging.

**Ubicación:** Pampa Puno, II Region

**Fecha de Registro:** 4 de Febrero de 2012

**Coordenadas (Datum PSAD56):** 520016E, 7641200N, Cota 4109m.

(GPS No Diferencial)

Fig. (4)

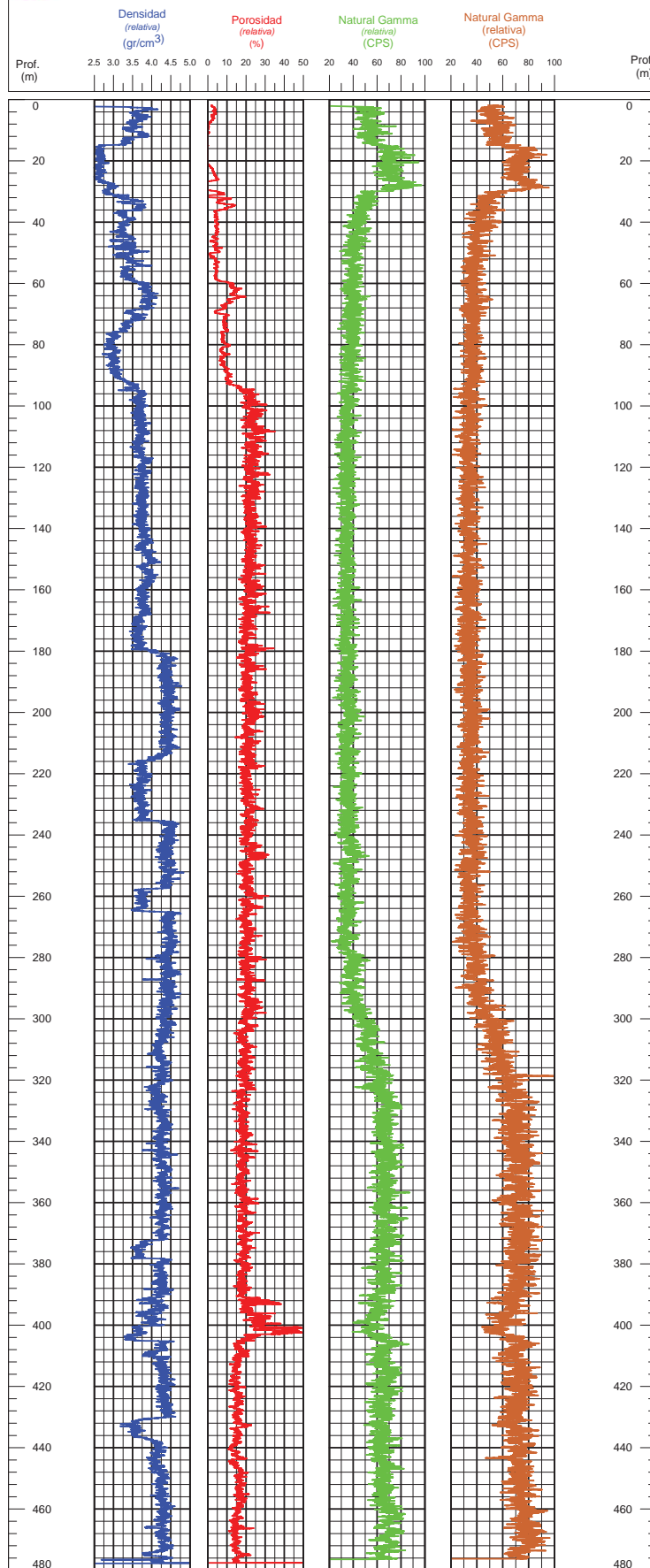






**GEODATOS**  
Geofísica de Avanzada

POZO: DDH-P06



**Cliente:** Schlumberger Water Services.  
**Proyecto:** Perfilaje de Pozo Pampa Puno  
**Método:** Perfilaje de Pozo (Densidad, Porosidad y Gamma Natural).  
**Equipo:** Robertson Geologging.  
**Ubicación:** Pampa Puno, II Region  
**Fecha de Registro:** 4 de Febrero de 2012  
**Coordenadas (Datum PSAD56):** 520016E, 7641200N, Cota 4109m.  
(GPS No Diferencial)

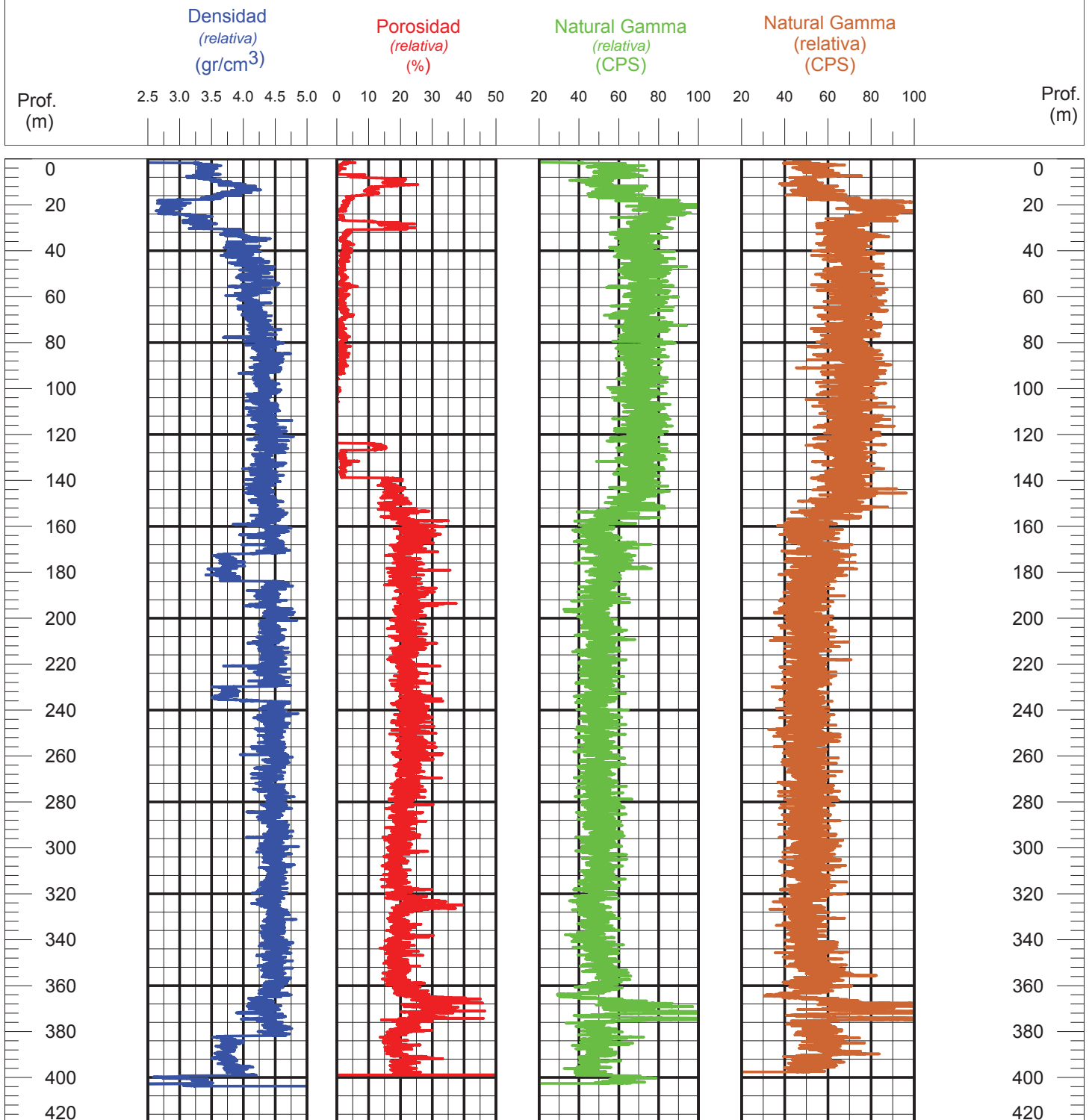
Fig. (4)





**GEODATOS**  
Geofísica de Avanzada

## POZO: DDH-P07



**Cliente:** Schlumberger Water Services.

**Proyecto:** Perfilaje de Pozo Pampa Puno

**Metodo:** Perfilaje de Pozo (Densidad, Porosidad y Gamma Natural).

**Equipo:** Robertson Geologging.

**Ubicación:** Pampa Puno, II Region

**Fecha de Registro:** 27 de Marzo de 2012

**Coordenadas (Datum PSAD56):** 519313E, 7650256N, Cota 4155m.

(GPS No Diferencial)

Fig. (5)

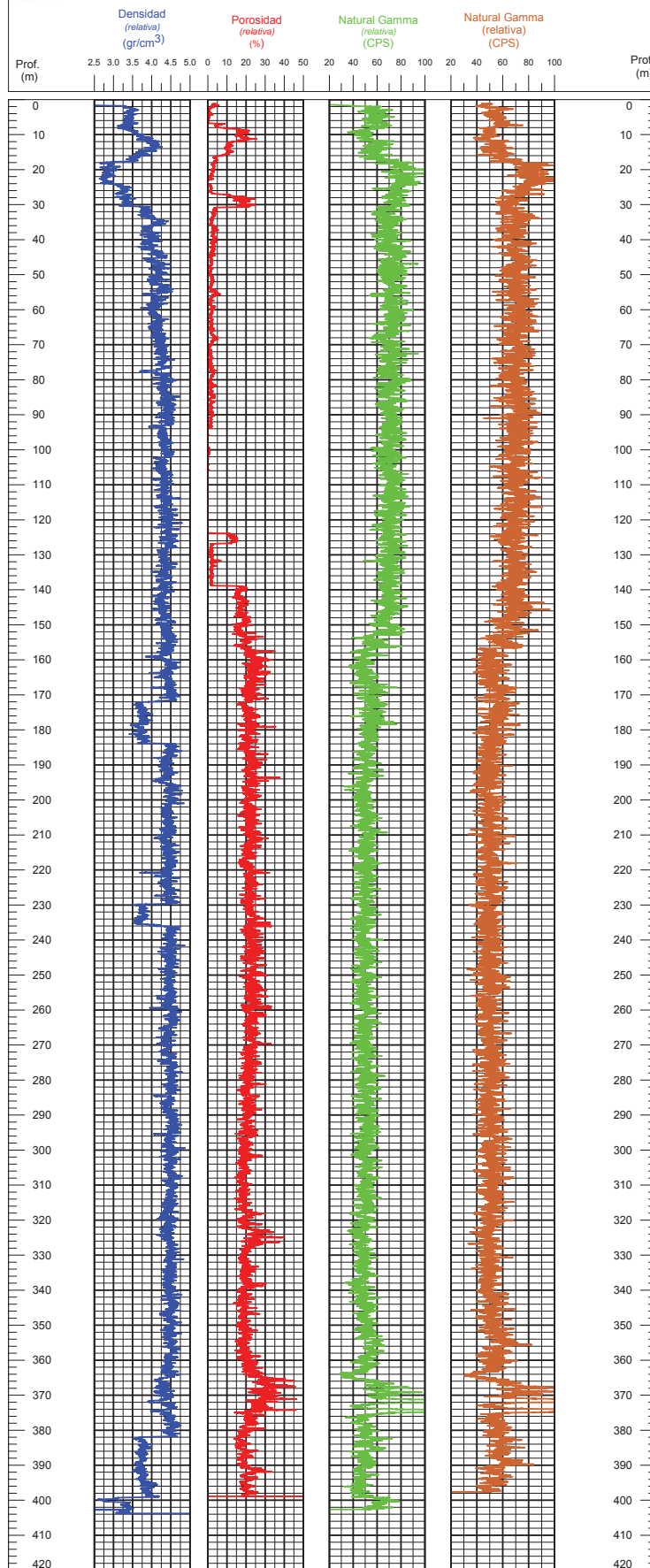
ISO 9001  
ISO 14001  
OHSAS 18001  
BUREAU VERITAS  
Certification





**GEODATOS**  
Geofísica de Avanzada

POZO: DDH-P07



**Cliente:** Schlumberger Water Services.  
**Proyecto:** Perfilaje de Pozo Pampa Puno  
**Método:** Perfilaje de Pozo (Densidad, Porosidad y Gamma Natural).  
**Equipo:** Robertson Geologging.  
**Ubicación:** Pampa Puno, II Region  
**Fecha de Registro:** 27 de Marzo de 2012  
**Coordenadas (Datum PSAD56):** 519313E, 7850256N, Cota 4155m.  
(GPS No Diferencial)

Fig. (5)



# **ANEXO E**

## **PERFILES HIDROGEOLÓGICOS PAMPA PUNO**

**REV B**

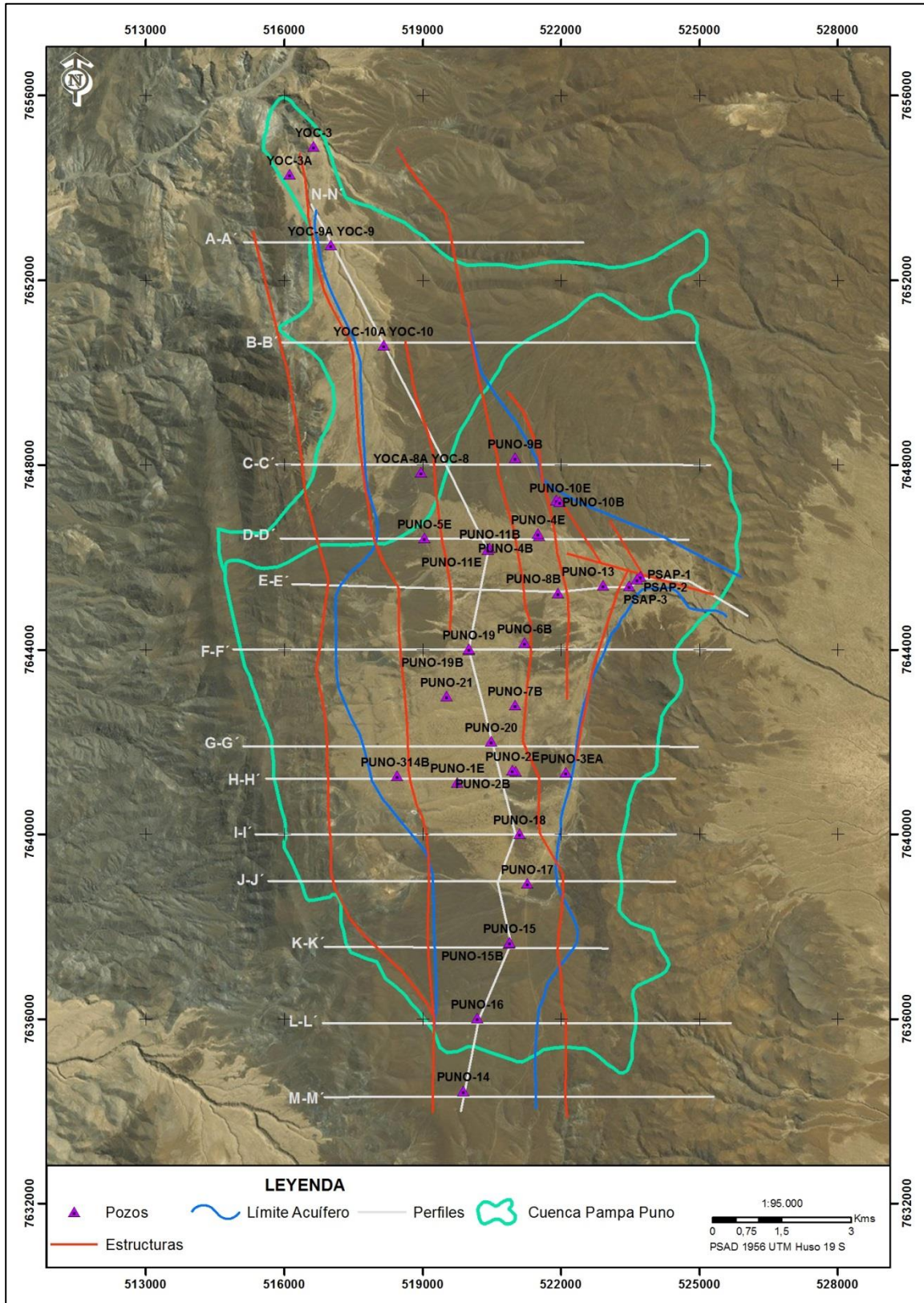
**MARZO 2015**

**PREPARADA POR**



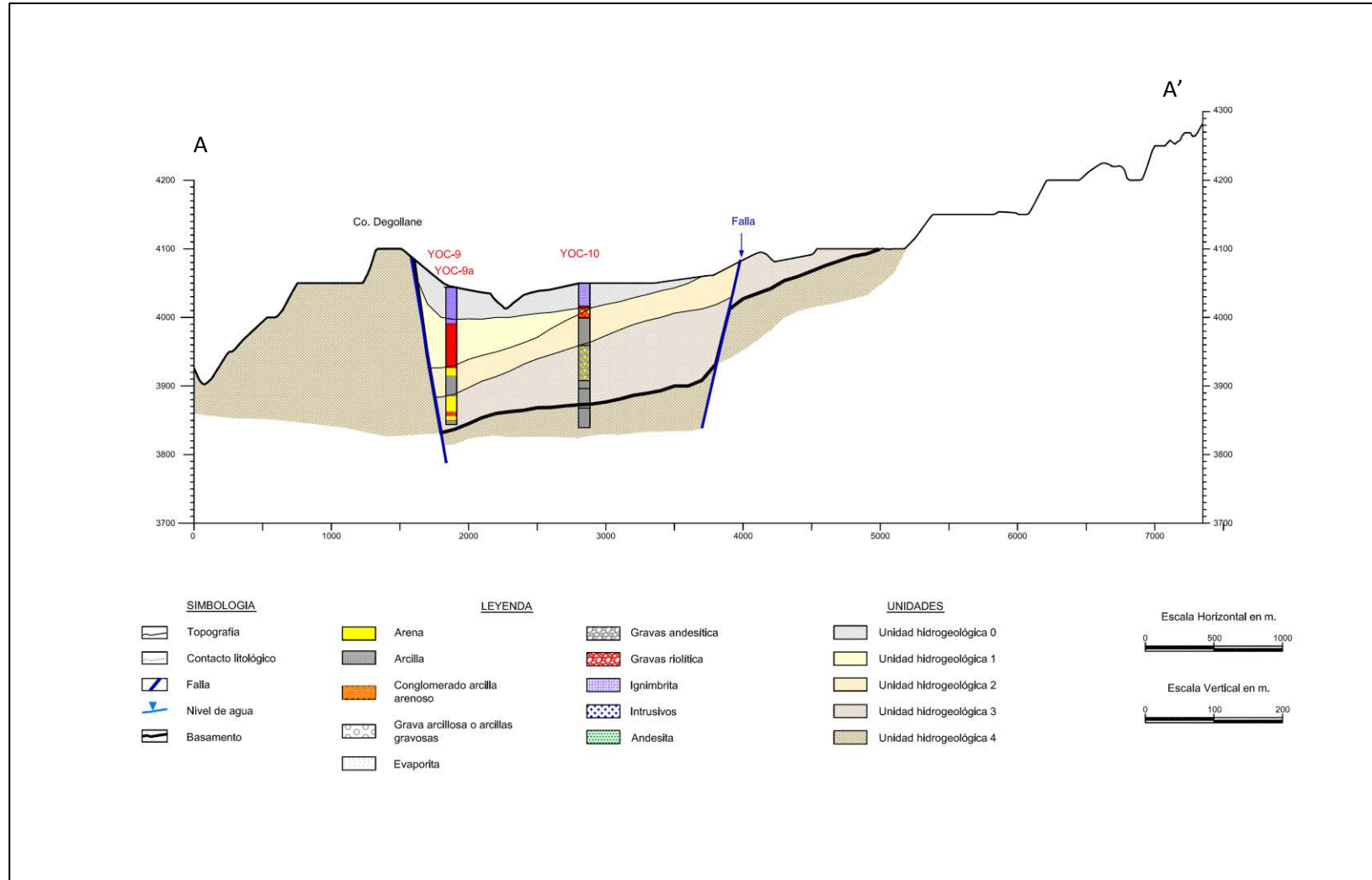
**HIDROGEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE**

**Figura E.1**  
**Ubicación de los Perfiles Hidrogeológicos**

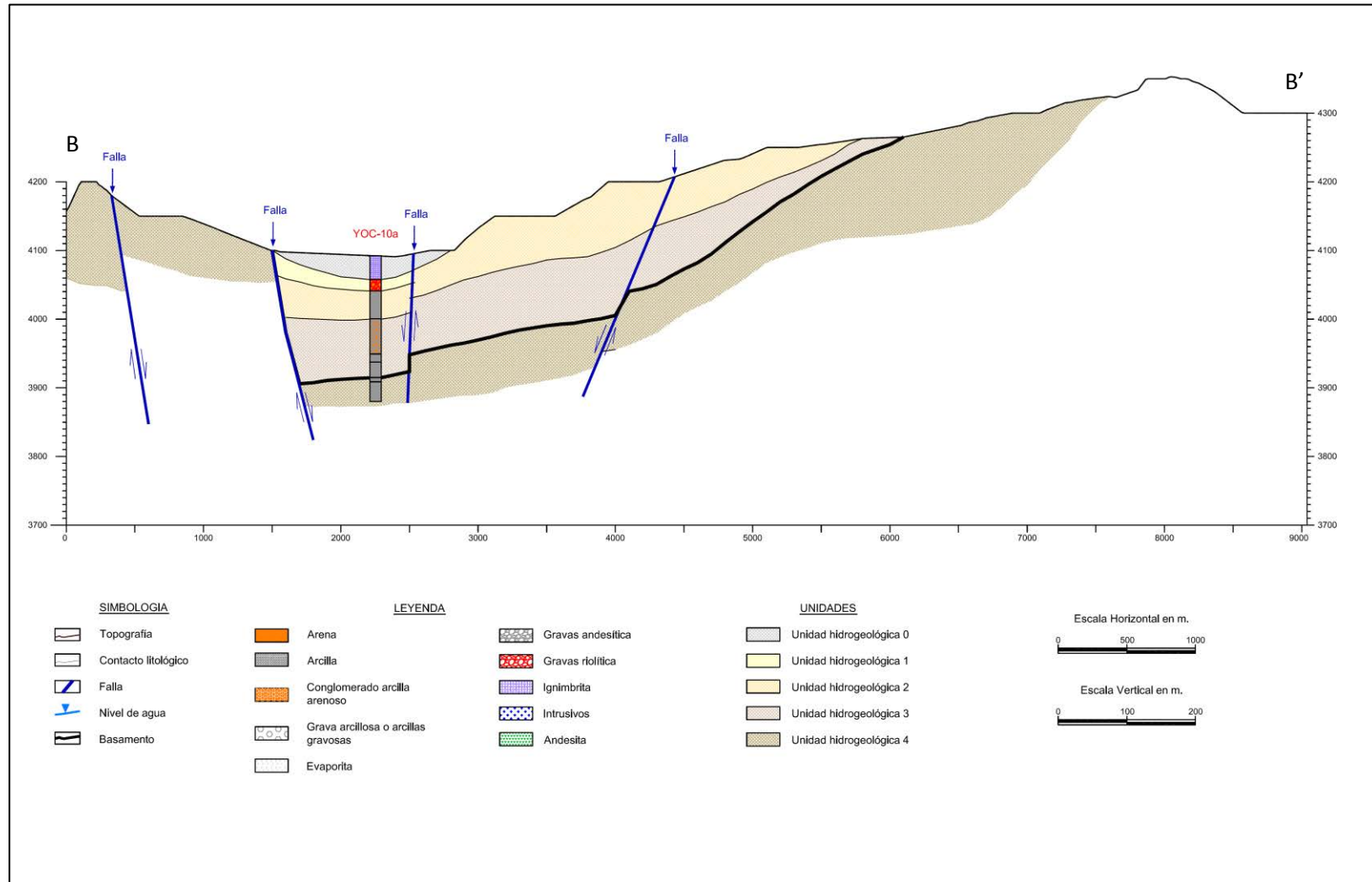




**Figura E.2**  
**Perfil Hidrogeológico A-A'**

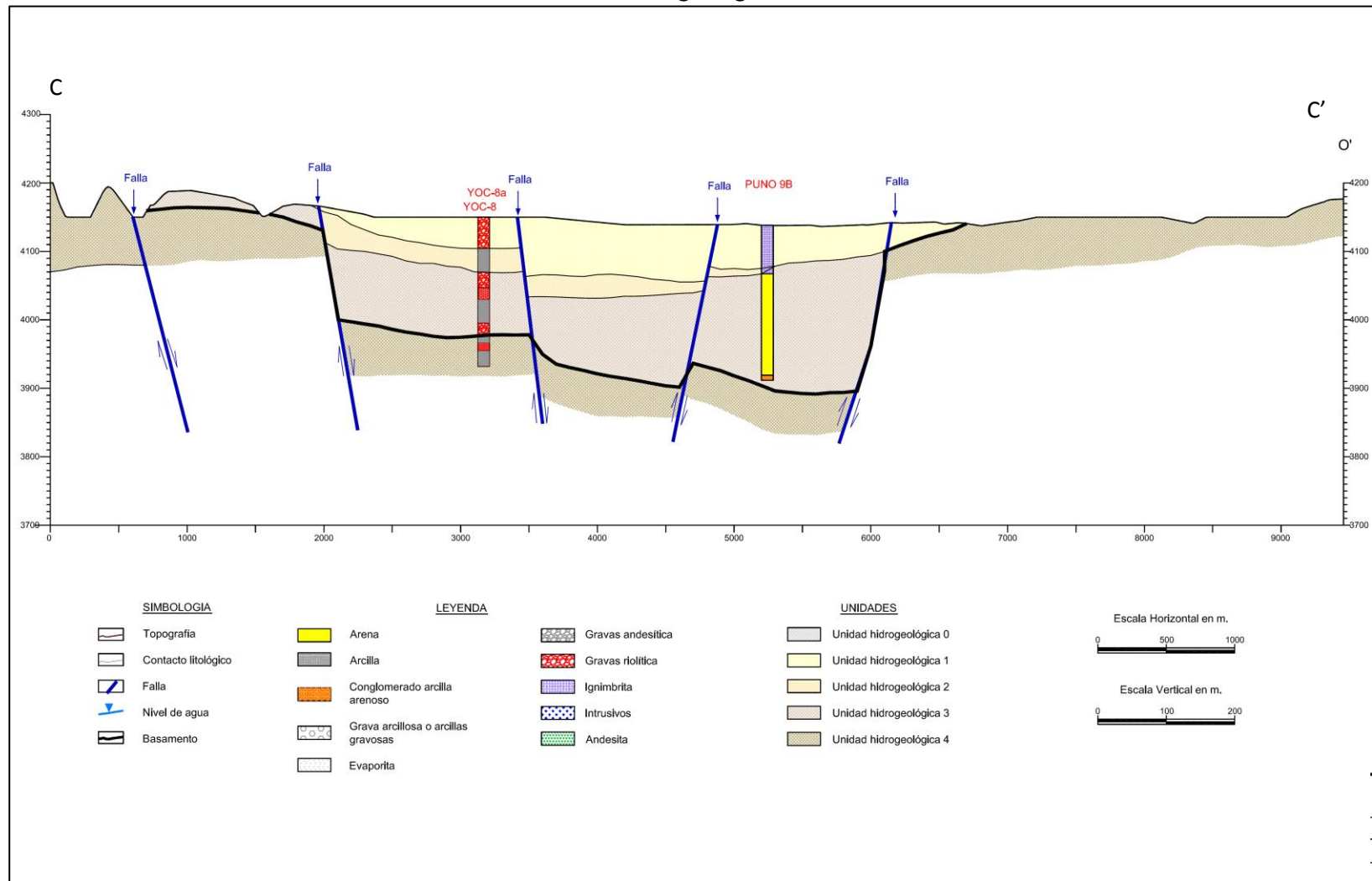


**Figura E.3**  
**Perfil Hidrogeológico B-B'**

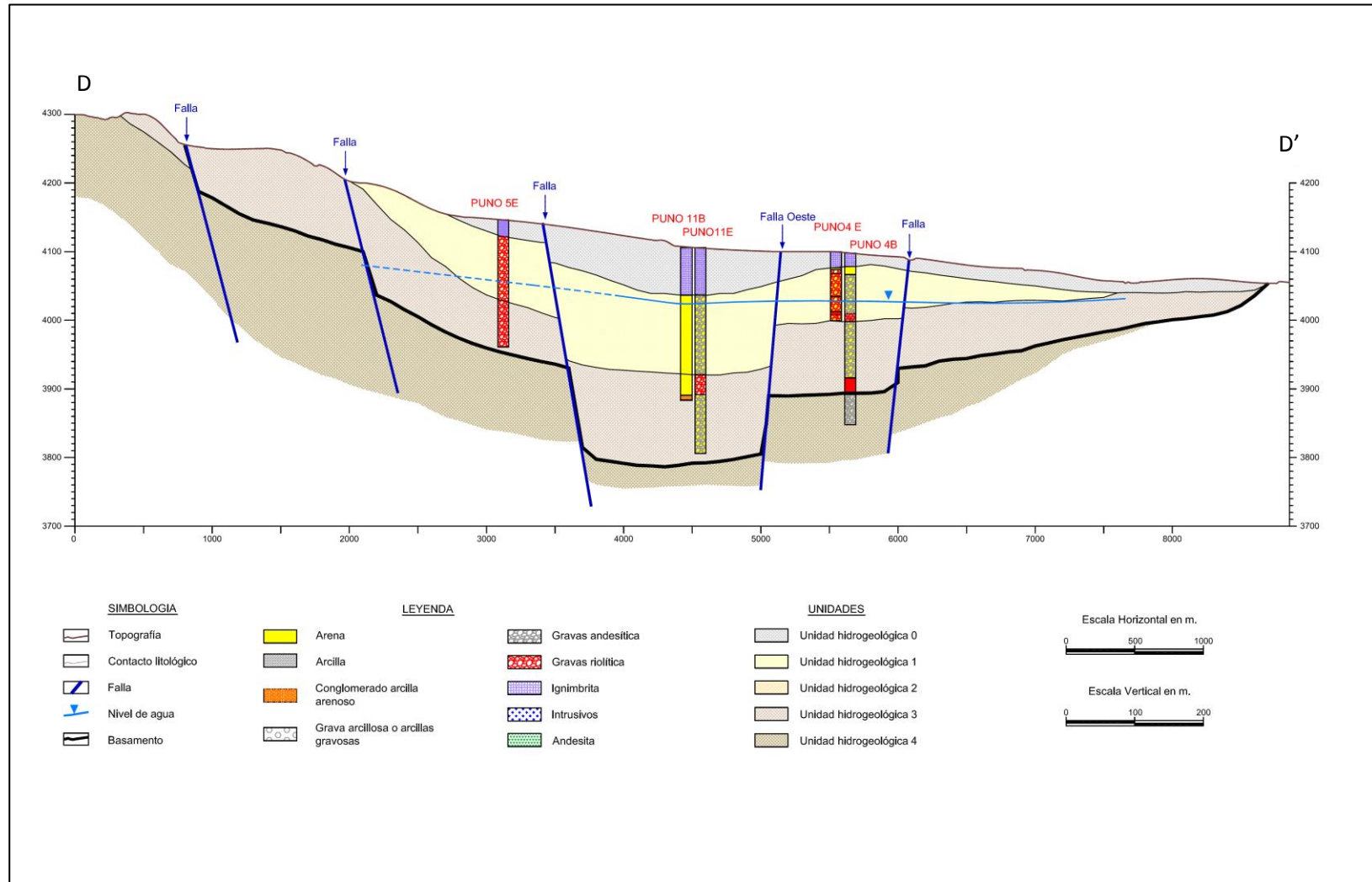




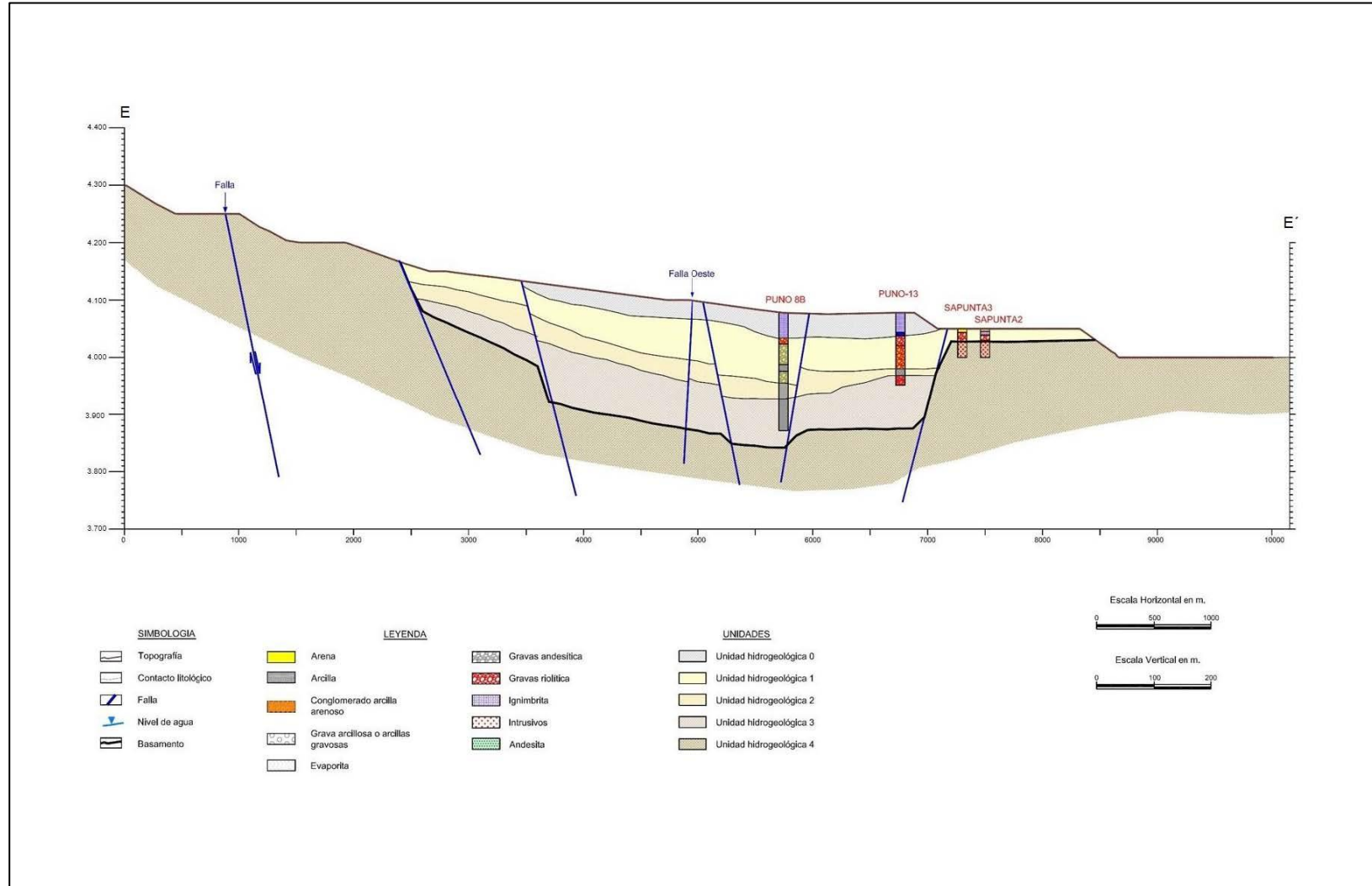
**Figura E.4**  
**Perfil Hidrogeológico C-C'**



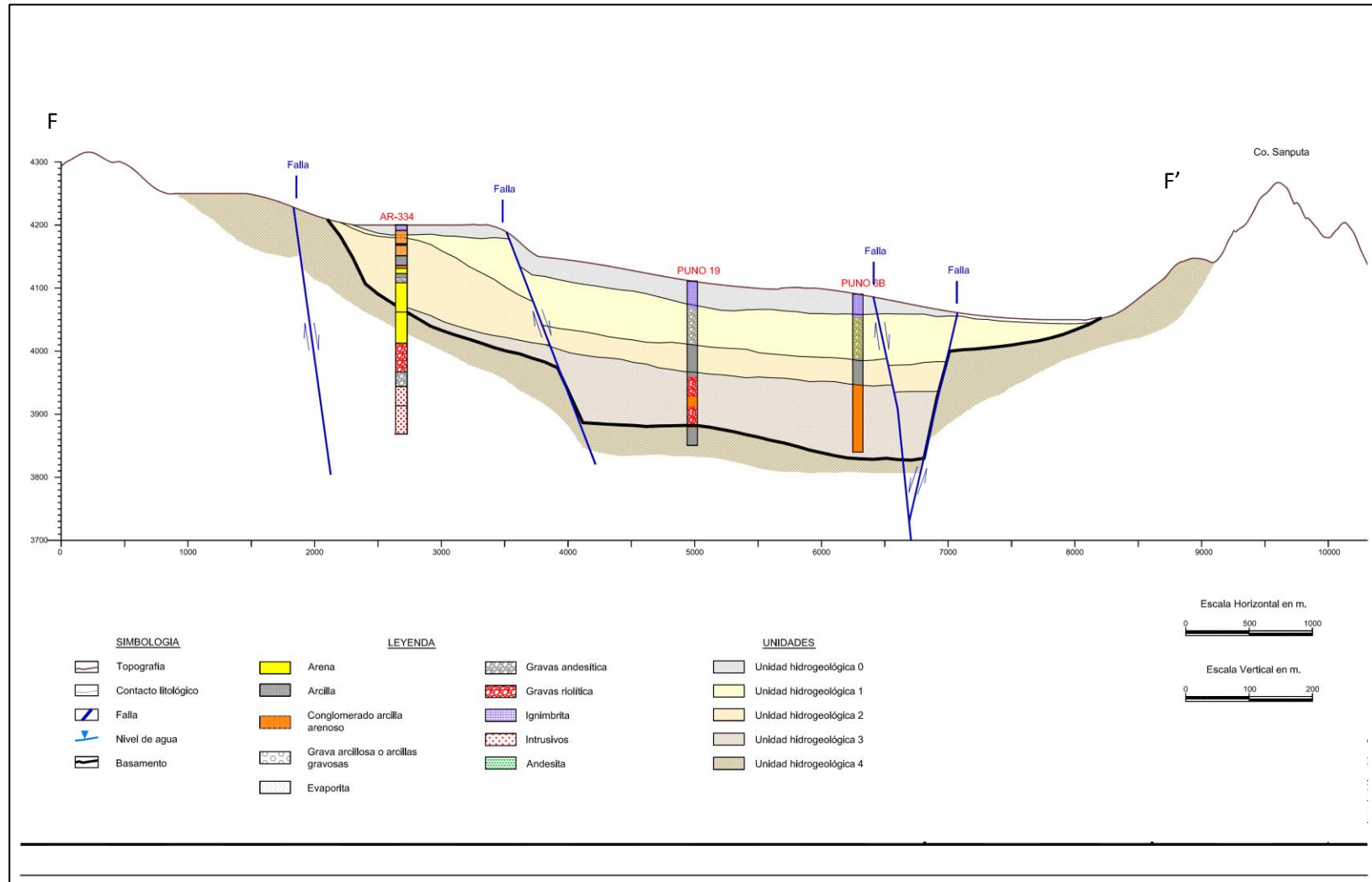
**Figura E.5**  
**Perfil Hidrogeológico D-D'**



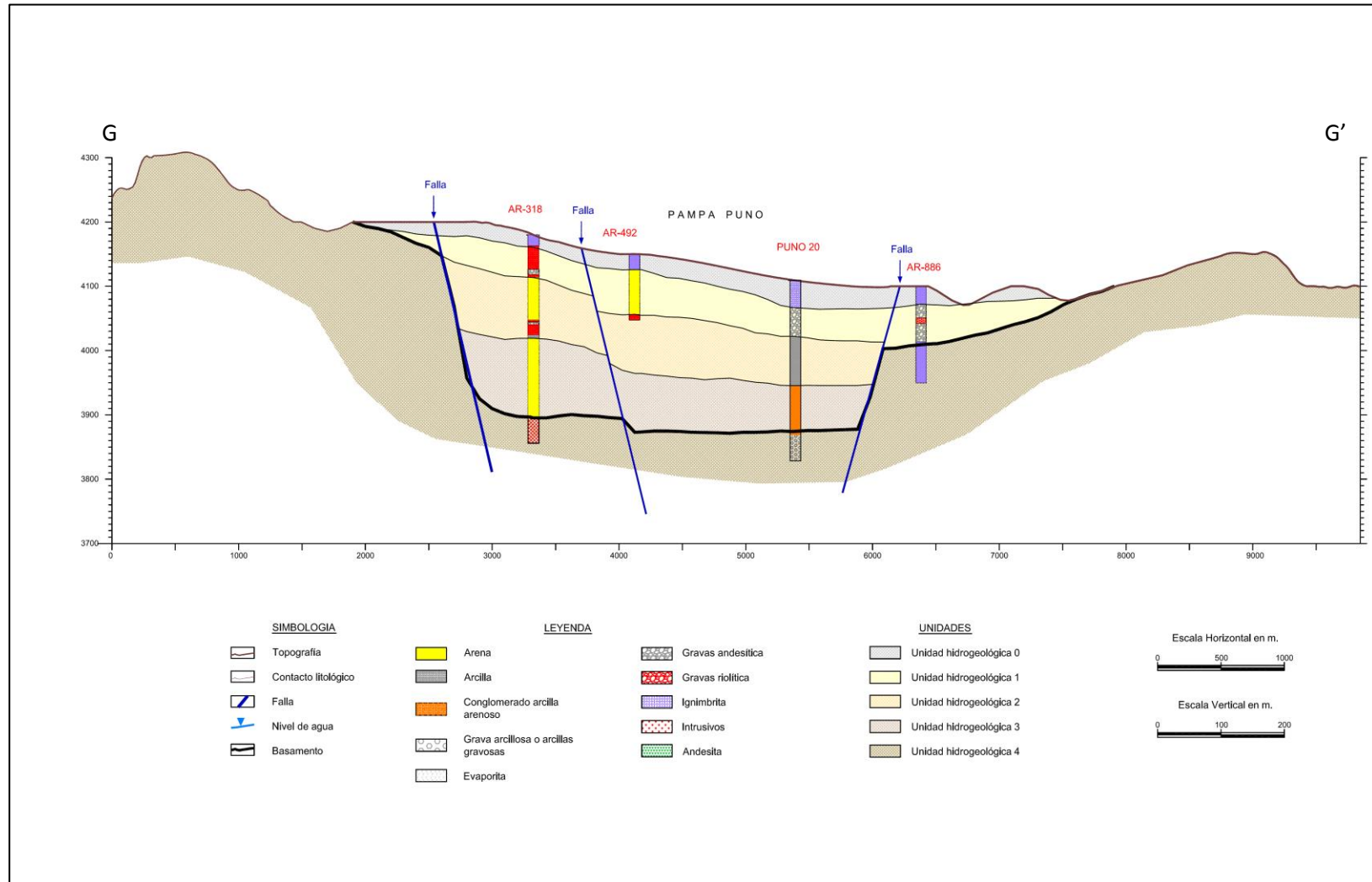
**Figura E.6**  
**Perfil Hidrogeológico E-E'**



**Figura E.7**  
**Perfil Hidrogeológico F-F'**

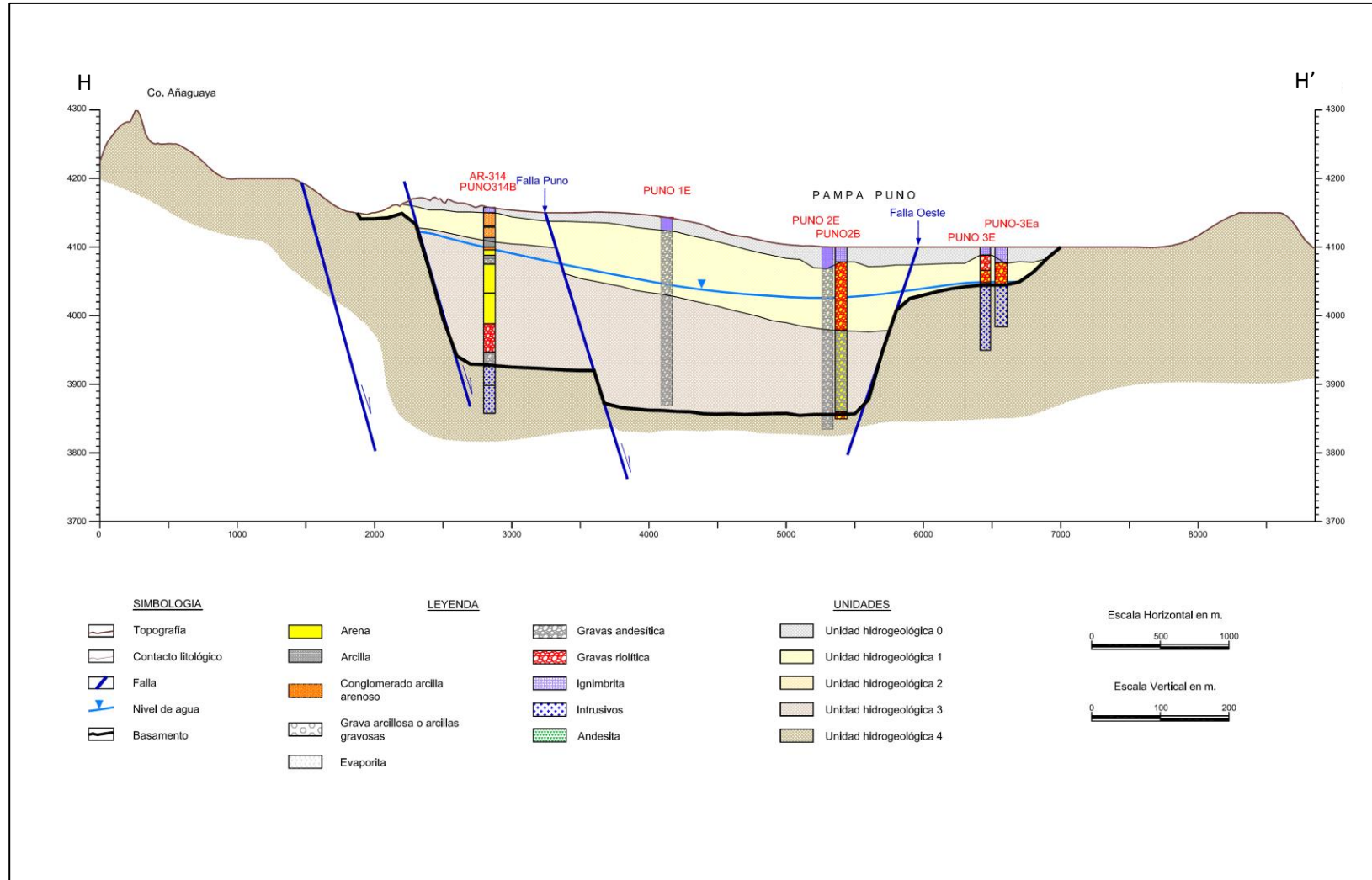


**Figura E.8**  
**Perfil Hidrogeológico G-G'**

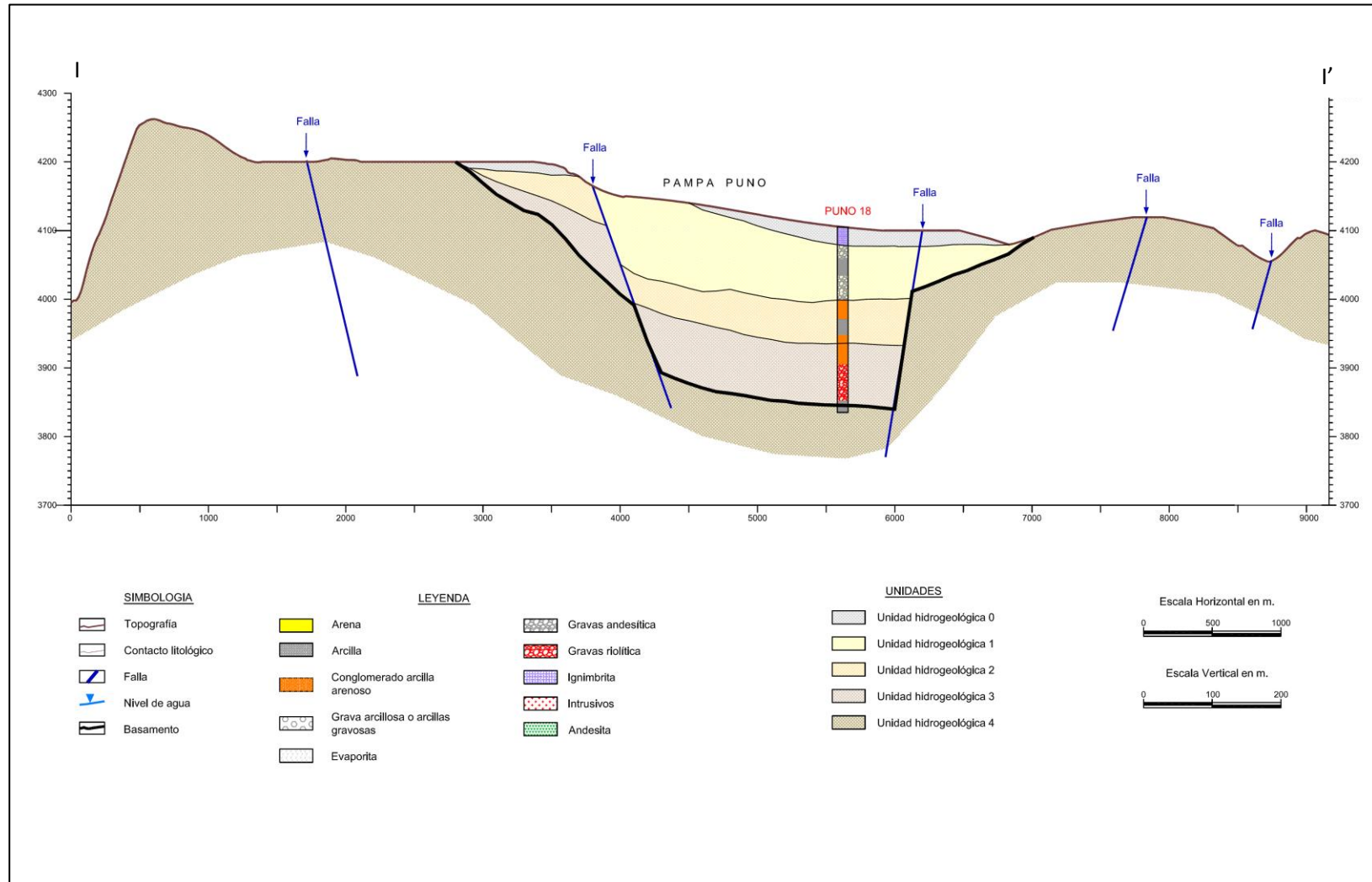




**Figura E.9**  
**Perfil Hidrogeológico H-H'**

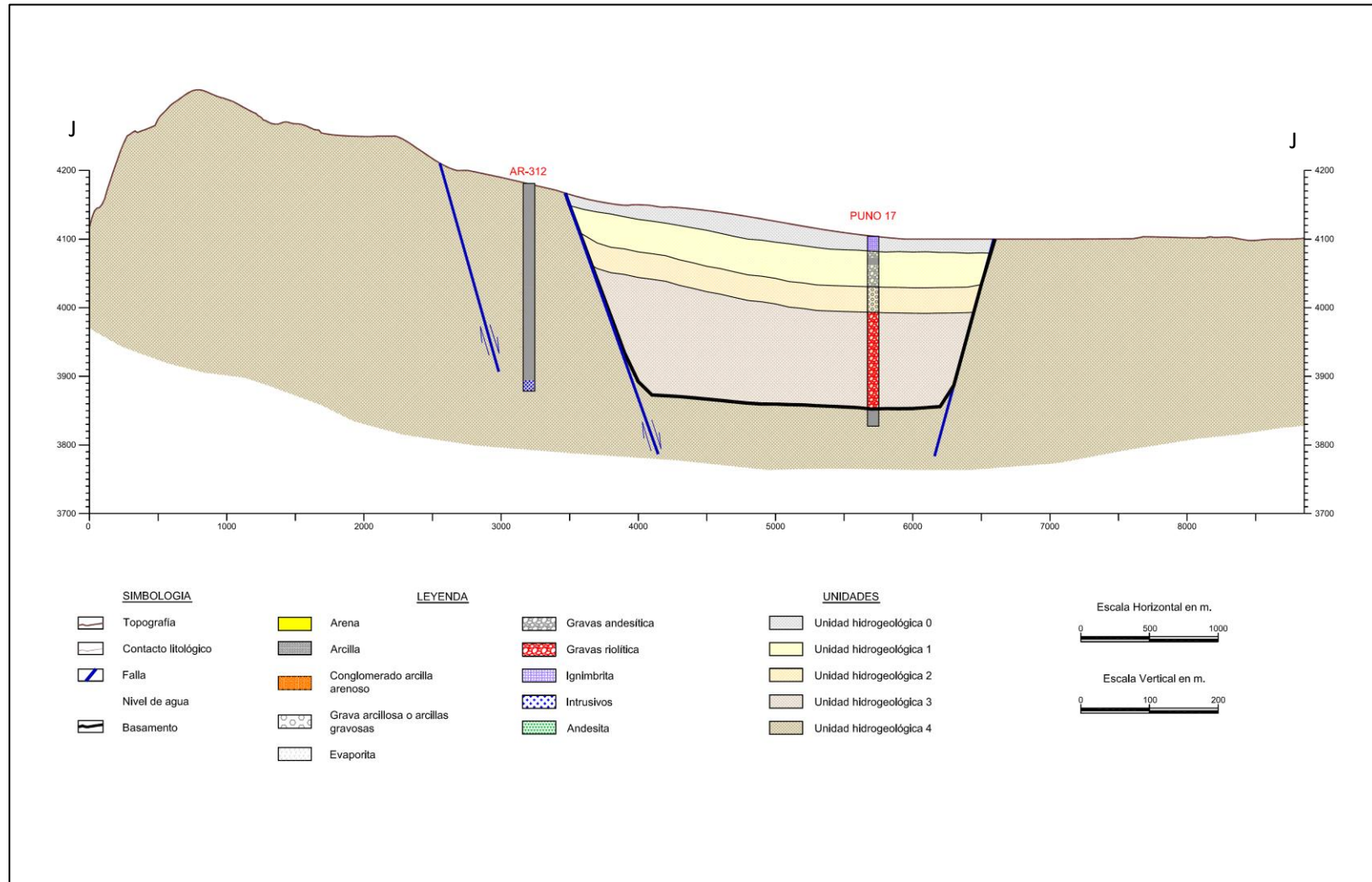


**Figura E.10**  
**Perfil Hidrogeológico I-I'**

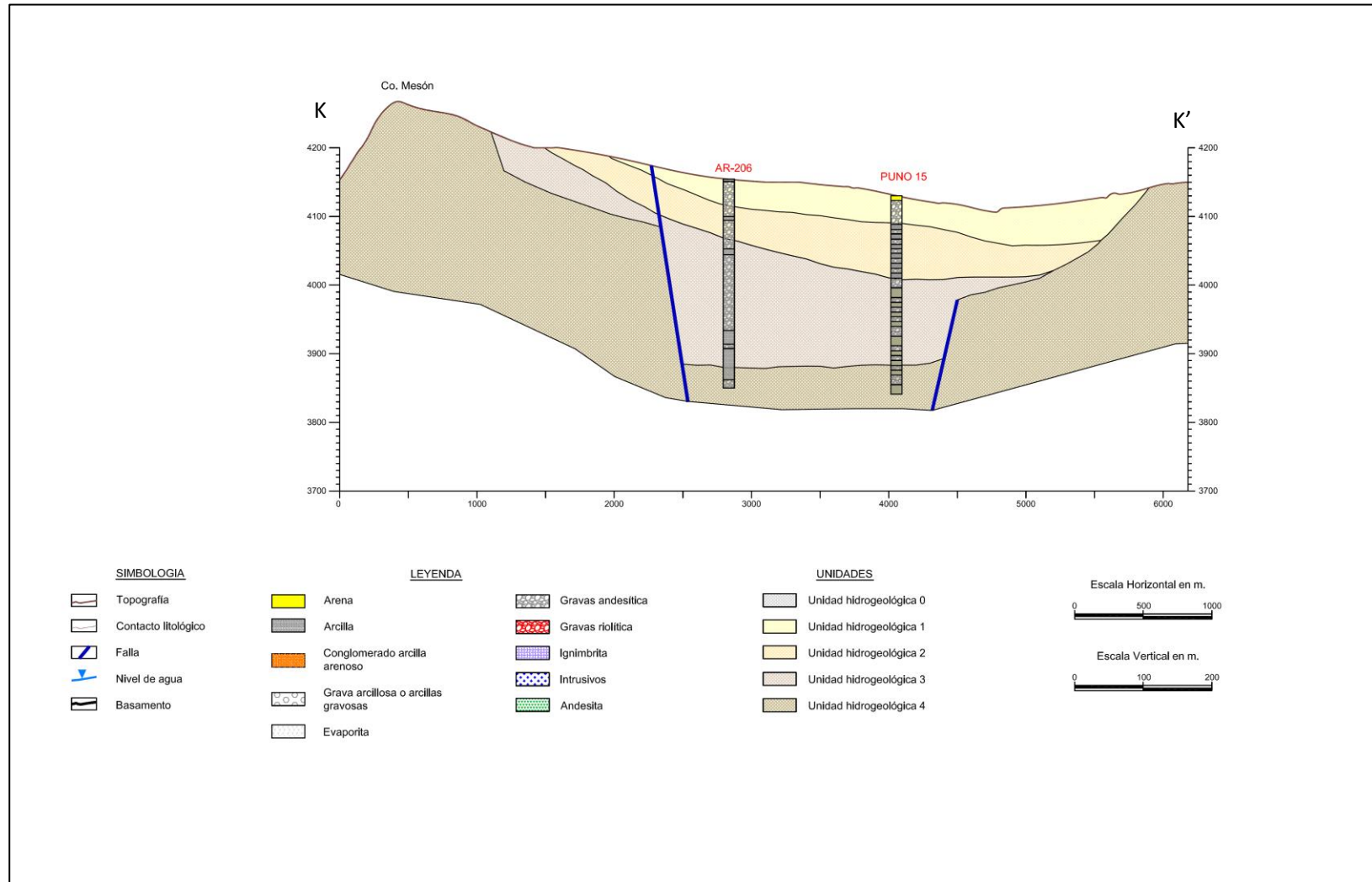




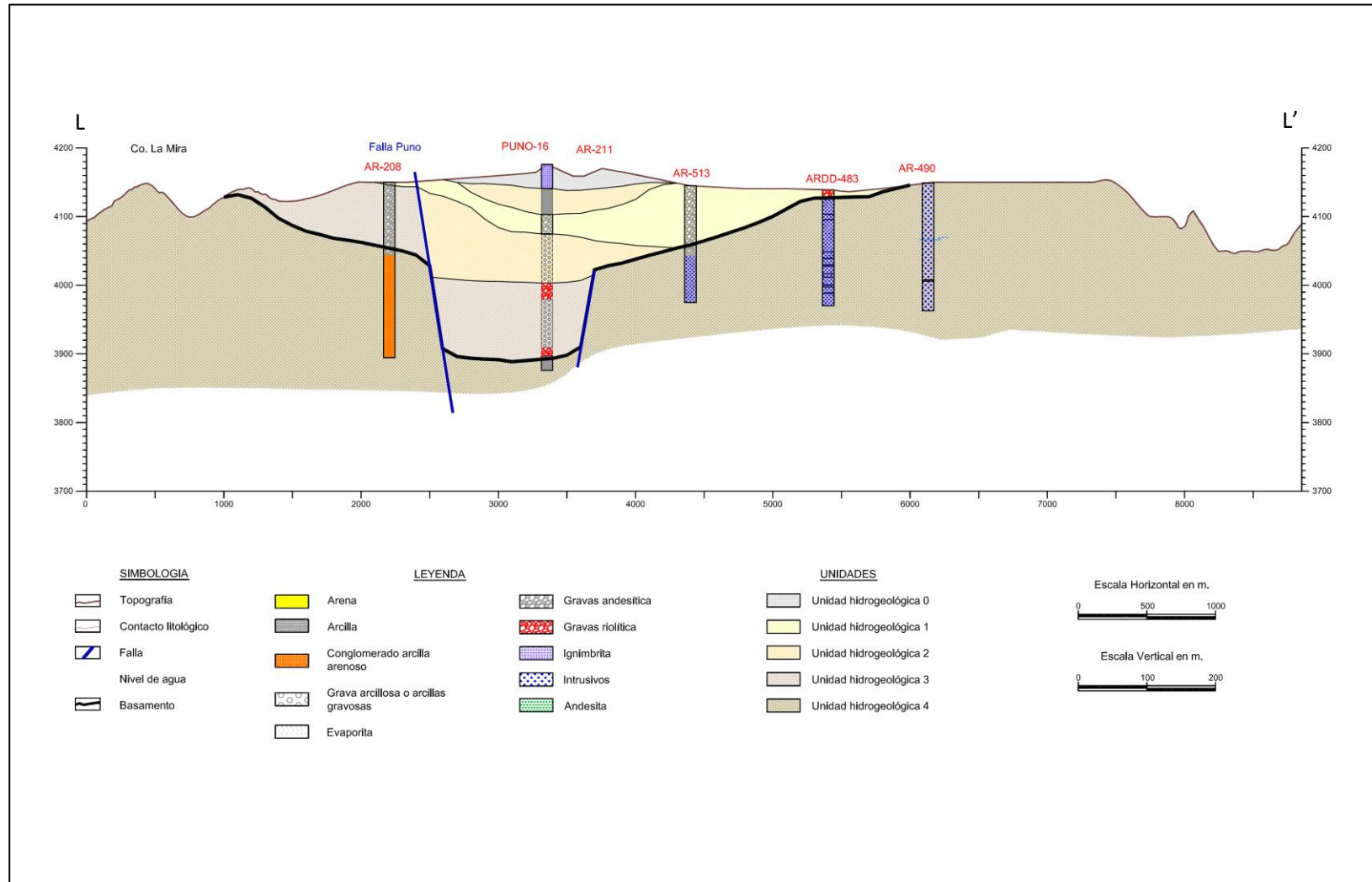
**Figura E.11**  
**Perfil Hidrogeológico J-J'**



**Figura E.12**  
**Perfil Hidrogeológico K-K'**



**Figura E.13**  
**Perfil Hidrogeológico L-L'**



**Figura E.14**  
**Perfil Hidrogeológico M-M'**

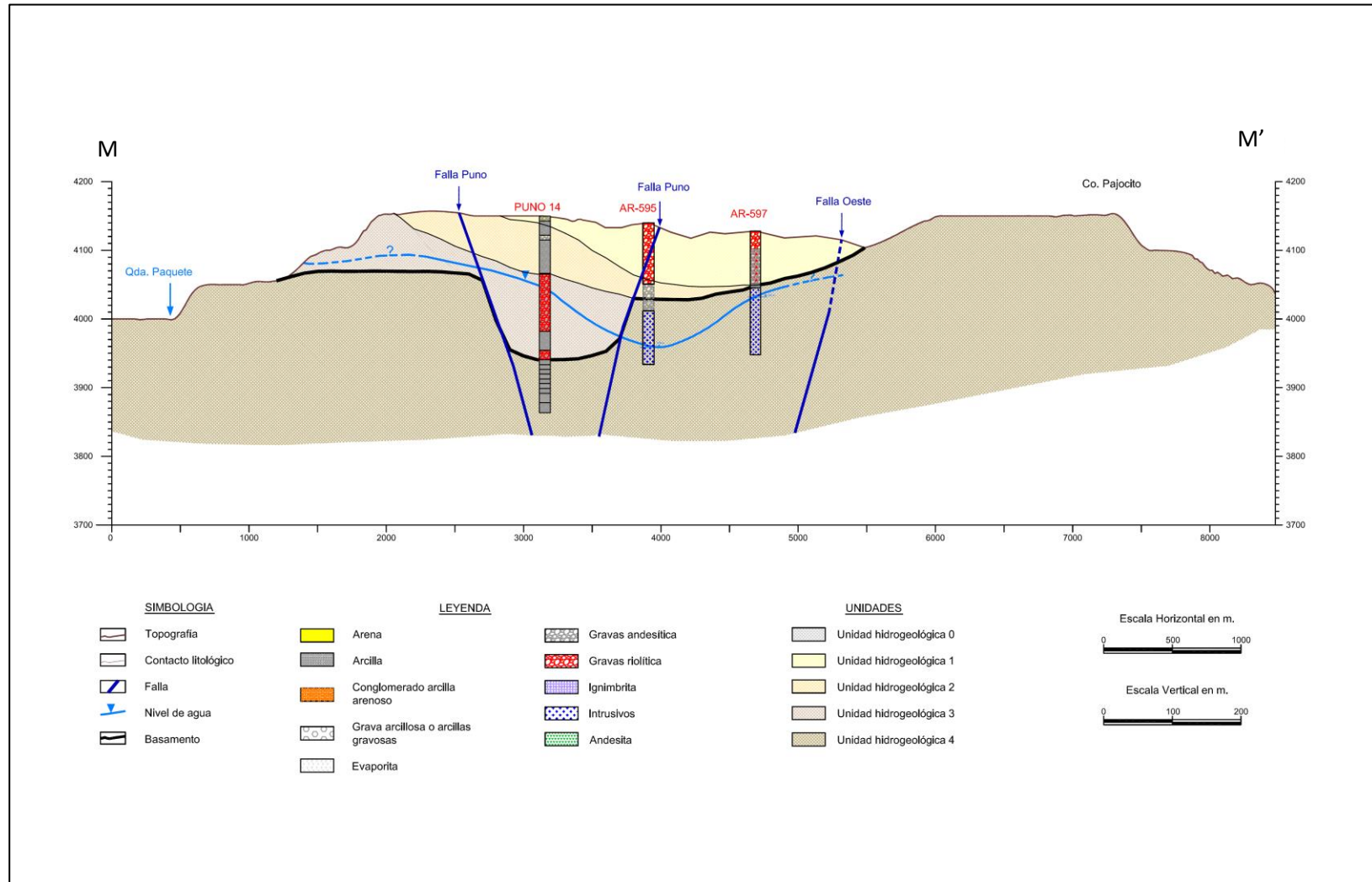
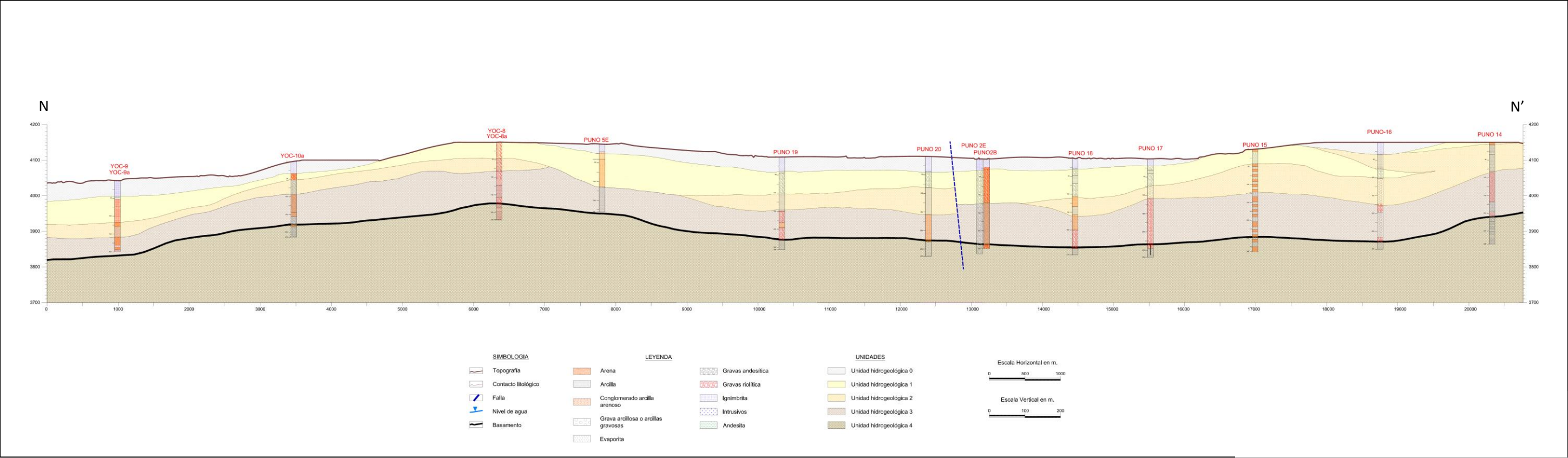




Figura E.15  
Perfil Hidrogeológico N-N'



# **ANEXO F**

## **HIDROQUÍMICA PAMPA PUNO**

**REV B**

**MARZO 2015**

**PREPARADA POR**



**HIDROGEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE**

**ANEXO F.1**

**INFORMACIÓN DISPONIBLE**



**Tabla F.1**  
**Parámetros Físico Químicos Pre Bombeo Técnico**

<b>Nombre</b>	<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>C.E (uS/cm)</b>	<b>Na (mg/l)</b>	<b>K (mg/l)</b>	<b>Mg (mg/l)</b>	<b>Ca (mg/l)</b>	<b>Cl (mg/l)</b>	<b>SO4 (mg/l)</b>	<b>HCO3 (mg/l)</b>
PUNO-9B	18-01-2012	7,4	174,4	11,2	3,52	1,87	24,0	29,3	13,2	34
PUNO-9B	26-04-2012	7,9	183,7	12,8	2,24	1,76	13,6	33,8	8,6	32
PUNO-9B	28-05-2012	7,4	176,8	8,5	1,76	1,74	15,2	30,5	4,0	34
PUNO-9B	12-09-2012	7,2	176,2	8,0	1,70	2,00	18,0	28,5	4,0	29
PUNO-9B	18-10-2012	7,3	180,3	33,0	2,10	2,10	11,7	29,2	26,3	37
PUNO-9B	27-11-2012	7,7	175,8	5,7	1,30	1,82	18,7	29,6	6,2	36
PUNO-9B	13-12-2012	6,6	188,7	12,0	1,80	2,00	20,0	30,7	6,6	35
PUNO-9B	16-01-2013	7,0	180,0	11,0	1,40	1,63	15,0	32,8	4,0	31
PUNO-9B	16-05-2013	8,5	232,0	24,6	3,66	2,00	17,2	41,6	23,0	28
PUNO-10B	18-01-2012	7,5	162,2	10,2	1,20	0,54	16,0	22,3	12,3	34
PUNO-10B	28-03-2012	7,9	187,4	14,4	1,76	1,84	16,0	22,4	18,1	37
PUNO-10B	17-04-2012	7,9	168,8	10,5	3,04	0,48	16,8	23,2	14,8	32
PUNO-10B	28-05-2012	8,2	160,5	30,4	1,36	0,58	10,2	40,0	17,3	34
PUNO-10B	26-06-2012	8,1	155,9	10,9	5,28	0,70	9,6	18,4	8,6	32
PUNO-10B	31-07-2012	8,2	162,0	16,0	1,30	0,70	13,0	18,7	19,3	36
PUNO-10B	21-08-2012	7,9	159,8	11,4	1,10	0,70	18,8	19,8	12,8	37
PUNO-10B	27-11-2012	7,6	160,4	7,3	6,80	0,39	16,3	20,6	11,5	36
PUNO-10B	13-12-2012	6,1	171,5	14,0	1,80	1,00	23,0	20,0	35,8	35
PUNO-10B	24-04-2013	7,9	163,0	12,1	3,67	2,69	18,9	19,8	15,2	31
PUNO-10B	16-05-2013	7,5	209,0	12,6	1,03	0,97	19,0	14,5	24,7	26
PUNO-4B	18-01-2012	7,4	232,0	10,4	3,60	1,94	21,6	28,6	18,1	40
PUNO-4B	28-03-2012	7,9	241,0	8,4	3,12	3,28	27,2	30,9	19,3	41
PUNO-4B	17-04-2012	7,8	241,0	7,2	4,88	2,08	26,4	32,8	17,3	41
PUNO-4B	28-05-2012	7,5	232,0	8,6	2,72	2,41	33,6	29,1	20,2	39
PUNO-4B	26-06-2012	7,8	228,0	14,4	3,44	2,30	26,4	27,6	21,8	39
PUNO-4B	31-07-2012	8,0	230,0	15,0	2,50	3,14	20,0	28,3	20,6	44
PUNO-4B	21-08-2012	7,5	230,0	7,6	3,10	2,20	20,1	28,4	9,1	43

**Tabla F.1**  
**Parámetros Físico Químicos Pre Bombeo Técnico. Continuación**

<b>Nombre</b>	<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>C.E (uS/cm)</b>	<b>Na (mg/l)</b>	<b>K (mg/l)</b>	<b>Mg (mg/l)</b>	<b>Ca (mg/l)</b>	<b>Cl (mg/l)</b>	<b>SO4 (mg/l)</b>	<b>HCO3 (mg/l)</b>
PUNO-4B	12-09-2012	7,0	230,0	8,0	2,70	2,00	27,0	28,5	18,9	35
PUNO-4B	27-11-2012	7,8	236,0	5,0	2,20	2,03	34,5	28,3	21,8	40
PUNO-4B	29-05-2013	6,2	304,0	24,5	11,60	1,47	44,6	37,8	36,6	89
PUNO-11B	18-01-2012	8,2	198,7	20,1	1,20	0,70	15,2	5,3	25,1	69
PUNO-11B	28-03-2012	8,5	771,0	96,8	4,32	18,00	24,0	73,5	160,0	58
PUNO-11B	26-04-2012	8,6	381,0	46,4	4,56	3,20	14,4	63,0	28,4	54
PUNO-11B	28-05-2012	8,7	221,0	29,6	3,68	0,81	17,6	17,2	32,9	60
PUNO-11B	26-06-2012	8,4	222,0	23,0	1,76	1,82	8,2	10,6	19,8	69
PUNO-11B	21-08-2012	8,7	191,1	21,7	0,80	0,70	10,5	6,3	21,4	60
PUNO-11B	12-09-2012	8,7	389,0	45,0	2,80	6,00	25,0	53,0	36,6	63
PUNO-11B	13-12-2012	7,7	267,0	28,0	2,70	2,00	22,0	32,9	21,4	61
PUNO-11B	16-01-2013	8,6	181,2	22,5	9,00	1,20	13,0	15,5	21,4	48
PUNO-11B	24-04-2013	8,7	141,4	10,0	7,52	0,84	14,2	18,1	11,9	29
PUNO-11B	16-05-2013	8,5	169,0	12,5	4,04	1,12	21,0	17,2	28,8	33
PSAP-1	26-03-2012	9,1	409,0	25,6	4,24	3,28	58,4	28,4	117,0	22
PSAP-1	22-05-2012	9,1	462,0	32,0	4,24	1,60	69,6	63,5	126,8	25
PSAP-1	23-07-2012	9,4	406,0	29,0	8,00	11,00	43,0	25,6	110,0	24
PSAP-1	21-08-2012	7,8	426,0	12,8	2,80	4,00	65,0	23,4	119,0	51
PSAP-1	12-09-2012	7,3	412,0	12,0	2,60	4,00	61,0	20,5	116,5	39
PSAP-1	18-10-2012	7,7	419,0	14,0	15,00	4,00	63,0	21,2	129,6	54
PSAP-1	16-01-2013	8,8	382,0	22,0	11,00	3,50	50,0	20,0	106,6	22
PSAP-1	13-02-2013	8,6	382,0	20,0	2,00	2,10	55,0	16,8	103,7	25
PSAP-1	24-04-2013	8,8	362,0	21,0	3,14	1,61	58,0	22,0	109,1	22
PSAP-1	15-05-2013	8,7	358,0	20,6	4,23	1,87	41,2	22,0	92,6	20
PSAP-2	22-05-2012	7,5	469,0	16,0	3,04	4,00	69,6	33,3	128,0	42
PSAP-2	23-07-2012	8,0	529,0	22,0	3,20	5,60	87,0	21,9	146,0	121
PSAP-2	21-08-2012	7,7	440,0	11,3	2,60	3,70	71,0	22,5	131,0	42

**Tabla F.1**  
**Parámetros Físico Químicos Pre Bombeo Técnico. Continuación**

<b>Nombre</b>	<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>C.E (uS/cm)</b>	<b>Na (mg/l)</b>	<b>K (mg/l)</b>	<b>Mg (mg/l)</b>	<b>Ca (mg/l)</b>	<b>Cl (mg/l)</b>	<b>SO4 (mg/l)</b>	<b>HCO3 (mg/l)</b>
PSAP-2	13-12-2012	6,2	453,0	17,0	8,00	4,00	73,0	20,0	147,7	43
PSAP-2	16-01-2013	7,5	439,0	12,0	15,00	4,30	75,0	25,3	123,5	44
PSAP-2	13-02-2013	7,5	438,0	30,0	2,00	6,20	61,0	21,3	124,3	47
PSAP-2	24-04-2013	7,5	414,0	12,0	4,98	3,76	64,6	20,3	117,3	46
PUNO-13	18-01-2012	7,7	332,0	23,7	2,88	1,68	33,6	29,4	60,9	66
PUNO-13	26-03-2012	7,8	338,0	28,8	2,80	2,16	28,8	27,0	63,8	70
PUNO-13	17-04-2012	7,7	354,0	29,6	3,20	1,92	35,2	22,8	66,7	72
PUNO-13	22-05-2012	7,5	352,0	32,0	2,72	1,60	38,4	29,1	64,2	66
PUNO-13	21-08-2012	7,5	339,0	22,2	2,40	2,20	40,0	26,1	69,1	63
PUNO-13	12-09-2012	7,2	334,0	23,0	2,30	2,00	37,0	24,9	62,6	60
PUNO-13	18-10-2012	7,3	318,0	23,0	13,00	1,80	36,0	25,2	67,1	61
PUNO-13	27-11-2012	7,5	351,0	16,0	7,70	1,97	40,0	30,1	65,0	61
PUNO-13	13-12-2012	6,2	339,0	22,0	2,80	1,00	41,0	24,9	70,8	60
PUNO-13	16-01-2013	7,3	340,0	18,0	13,00	1,81	37,0	24,8	72,8	59
PUNO-13	13-02-2013	7,5	333,0	30,0	3,00	2,10	25,0	24,8	53,9	60
PUNO-13	24-04-2013	7,5	324,0	29,0	1,58	2,58	40,8	26,4	53,1	63
PUNO-13	16-05-2013	7,3	313,0	23,7	11,32	1,99	37,8	23,8	67,9	61
PSAP-3	16-01-2013	7,3	596,0	20,0	4,90	6,60	102,0	16,8	202,5	64
PSAP-3	24-04-2013	7,4	567,0	23,6	2,97	5,30	99,7	19,8	202,5	63
PUNO-8B	18-01-2012	7,8	277,0	24,8	2,40	1,65	23,2	27,2	8,6	113
PUNO-8B	17-04-2012	7,9	277,0	24,0	2,16	1,76	27,2	27,8	8,6	118
PUNO-8B	21-06-2012	7,8	290,0	21,6	2,00	2,08	30,4	26,6	9,5	111
PUNO-8B	31-07-2012	7,6	271,0	30,0	1,90	1,70	20,0	26,5	11,9	115
PUNO-8B	21-08-2012	6,3	269,0	23,2	2,20	1,80	19,9	26,1	4,0	110
PUNO-8B	27-11-2012	7,6	303,0	22,0	10,00	2,80	30,3	27,4	16,1	119
PUNO-8B	16-01-2013	7,3	270,0	23,0	1,60	1,51	24,0	27,1	4,0	104
PUNO-7B	31-07-2012	8,0	308,0	36,0	3,60	2,50	28,0	23,7	75,7	44
PUNO-7B	21-08-2012	7,8	323,0	20,8	2,90	2,40	25,3	28,8	58,4	21

**Tabla F.1**  
**Parámetros Físico Químicos Pre Bombeo Técnico. Continuación**

<b>Nombre</b>	<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>C.E (uS/cm)</b>	<b>Na (mg/l)</b>	<b>K (mg/l)</b>	<b>Mg (mg/l)</b>	<b>Ca (mg/l)</b>	<b>Cl (mg/l)</b>	<b>SO4 (mg/l)</b>	<b>HCO3 (mg/l)</b>
PUNO-7B	13-12-2012	6,6	379,0	20,0	24,00	0,19	44,0	42,7	69,1	98
PUNO-7B	29-05-2013	8,6	287,0	7,4	0,10	1,31	41,2	12,0	72,8	17
PUNO-2B	28-03-2012	8,1	321,0	18,4	3,92	4,08	39,2	8,5	84,4	60
PUNO-2B	26-07-2012	8,1	334,0	24,0	3,40	2,82	41,0	8,2	92,6	60
PUNO-2B	12-09-2012	7,6	363,0	80,0	7,00	4,40	33,0	9,8	160,5	99
PUNO-2B	18-10-2012	7,9	352,0	44,0	15,00	4,00	40,0	15,5	115,2	66
PUNO-2B	29-05-2013	8,3	295,0	43,1	0,79	1,42	17,4	16,9	54,7	59
PUNO-314B	18-01-2012	7,2	340,0	15,2	1,52	1,30	36,8	62,4	30,9	25
PUNO-314B	28-03-2012	8,3	396,0	15,2	1,68	3,28	52,8	72,1	37,9	29
PUNO-314B	26-04-2012	8,1	336,0	11,2	1,44	16,80	32,8	62,3	34,6	26
PUNO-314B	21-06-2012	8,1	354,0	11,9	1,20	1,60	42,4	60,2	40,7	26
PUNO-314B	21-08-2012	7,4	351,0	15,3	1,40	1,60	42,0	63,0	28,8	33
PUNO-314B	12-09-2012	7,7	360,0	15,0	1,70	1,00	39,0	68,6	32,9	25
PUNO-314B	18-10-2012	7,3	558,0	52,0	11,00	3,20	45,0	116,2	75,7	27
PUNO-314B	27-11-2012	8,5	386,0	6,7	7,80	1,77	51,6	60,6	42,0	27
PUNO-314B	13-12-2012	6,1	393,0	20,0	18,00	0,23	45,0	65,0	41,2	87
PUNO-314B	16-01-2013	6,9	378,0	14,0	39,00	1,73	40,0	64,7	41,6	51
PUNO-314B	23-04-2013	7,4	434,0	27,6	5,44	3,85	47,2	81,1	57,2	53
PUNO-314B	15-05-2013	7,0	403,0	16,4	6,63	2,12	39,5	72,3	27,2	47
SAPUNTA-1	22-05-2012	7,3	1238,0	24,0	4,96	13,60	272,0	28,4	404,1	347
SAPUNTA-1	21-06-2012	7,4	1249,0	20,6	6,72	17,60	287,2	29,7	419,4	349
SAPUNTA-1	12-09-2012	7,3	1242,0	90,0	8,00	14,80	208,0	17,8	422,7	322
SAPUNTA-1	13-12-2012	7,1	968,0	25,0	4,10	10,50	171,0	27,6	325,1	120
SAPUNTA-1	24-04-2013	7,5	1045,0	25,7	3,55	12,32	237,2	19,8	381,1	257
SAPUNTA-2	26-03-2012	8,2	578,0	15,0	3,92	7,12	97,6	25,6	158,0	155
SAPUNTA-2	22-05-2012	7,9	576,0	24,0	3,60	6,40	93,6	19,0	140,8	122
SAPUNTA-2	23-07-2012	7,7	470,0	27,0	3,00	4,10	69,0	25,1	151,0	46

**Tabla F.1**  
**Parámetros Físico Químicos Pre Bombeo Técnico. Continuación**

Nombre	Fecha	pH	C.E (uS/cm)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)
SAPUNTA-2	21-08-2012	8,0	630,0	14,8	3,30	7,00	101,0	24,3	155,0	181
SAPUNTA-2	12-09-2012	7,7	707,0	70,0	6,00	9,70	98,0	27,6	171,6	213
SAPUNTA-2	13-12-2012	7,1	918,0	60,0	9,70	14,00	115,0	42,7	246,5	134
SAPUNTA-2	16-01-2013	7,6	456,0	17,0	3,30	4,20	63,0	26,3	65,4	158
SAPUNTA-2	13-02-2013	7,1	620,0	40,6	7,20	11,90	84,0	46,1	149,8	136
SAPUNTA-2	24-04-2013	7,8	522,0	22,9	5,32	6,11	78,9	11,0	82,3	183
SAPUNTA-2	15-05-2013	7,7	566,0	15,5	8,07	5,68	96,2	22,0	109,9	187

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla F.2**  
**Parámetros Físico Químicos Bombeo Productivo**

<b>Nombre</b>	<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>C.E (uS/cm)</b>	<b>Na (mg/l)</b>	<b>K (mg/l)</b>	<b>Mg (mg/l)</b>	<b>Ca (mg/l)</b>	<b>Cl (mg/l)</b>	<b>SO4 (mg/l)</b>	<b>HCO3 (mg/l)</b>
PUNO-9B	05-12-2013	8,1	302,0	41,7	4,88	1,34	10,6	46,8	18,5	51
PUNO-9B	09-01-2014	9,5	361,0	45,8	3,61	2,57	18,6	58,7	38,7	47
PUNO-9B	06-02-2014	9,2	330,0	37,2	4,26	1,90	19,3	30,4	29,6	52
PUNO-9B	11-03-2014	7,6	189,2	17,4	1,63	1,58	19,6	26,5	12,3	38
PUNO-9B	08-04-2014	7,9	195,5	7,0	2,54	2,22	22,4	27,3	6,2	38
PUNO-9B	10-06-2014	7,5	199,0	10,9	2,45	2,43	14,4	27,8	4,1	38
PUNO-9B	12-08-2014	2,9	198,0	0,0	2,60	2,29	21,0	28,2	9,1	5
PUNO-9B	10-09-2014	7,1	193,8	30,0	5,00	2,40	22,0	20,4	47,3	39
PUNO-9B	08-10-2014	7,1	191,9	8,4	21,00	2,00	14,1	32,5	7,0	38
PUNO-9B	03-11-2014	6,8	196,8	9,1	2,10	1,84	18,2	27,3	8,6	36
PUNO-10B	05-12-2013	6,3	230,0	18,7	2,84	1,90	22,0	29,9	45,7	52
PUNO-10B	11-03-2014	7,5	174,0	22,3	1,31	0,87	17,6	17,0	21,8	38
PUNO-10B	20-05-2014	7,5	174,8	12,0	1,00	0,30	17,0	16,0	11,1	38
PUNO-10B	12-08-2014	1,9	173,5	0,0	2,20	0,69	20,0	16,5	23,0	5
PUNO-10B	10-09-2014	7,3	1844,0	4,0	2,00	1,00	20,0	8,4	16,1	39
PUNO-10B	08-10-2014	3,7	175,3	10,9	1,10	0,60	12,3	15,8	16,1	38
PUNO-10B	05-11-2014	2,1	218,0	9,1	2,11	1,61	20,7	20,4	19,8	36
PUNO-4B	05-12-2013	7,4	527,0	60,2	5,26	2,90	36,9	50,4	100,8	68
PUNO-4B	16-01-2014	8,1	337,0	39,7	2,67	3,40	26,6	46,4	32,9	46
PUNO-4B	19-02-2014	8,2	229,0	27,2	3,45	0,88	21,7	14,0	31,7	58
PUNO-4B	11-03-2014	7,8	231,0	37,8	0,81	0,18	15,1	17,0	38,7	61
PUNO-4B	08-04-2014	7,7	257,0	17,3	3,98	1,74	27,0	26,9	25,5	46
PUNO-4B	20-05-2014	7,8	205,0	16,0	1,00	0,60	22,0	28,8	9,1	41
PUNO-4B	03-06-2014	7,0	216,0	14,0	1,79	1,25	23,0	22,1	18,1	33
PUNO-4B	01-07-2014	7,7	202,0	0,0	3,06	6,30	16,7	18,5	18,1	42
PUNO-4B	08-10-2014	7,4	215,0	15,5	13,00	0,90	14,4	24,6	20,2	44
PUNO-4B	03-11-2014	6,9	200,0	13,0	0,10	0,83	18,3	22,3	16,9	42

**Tabla F.2**  
**Parámetros Físico Químicos Bombeo Productivo. Continuación**

Nombre	Fecha	pH	C.E (uS/cm)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)
PUNO-11B	05-12-2013	7,5	241,0	15,0	1,93	1,26	29,8	21,4	28,8	48
PUNO-11B	09-01-2014	8,0	243,0	13,3	1,45	1,13	27,8	23,0	24,3	45
PUNO-11B	11-03-2014	7,7	233,0	11,0	1,82	1,05	30,3	21,2	20,2	46
PUNO-11B	10-06-2014	7,8	295,0	17,6	1,72	1,80	21,3	38,8	27,2	44
PUNO-11B	01-07-2014	7,7	241,0	0,0	0,50	0,89	30,3	21,6	11,5	43
PUNO-11B	12-08-2014	6,2	239,0	10,0	1,50	0,90	28,0	22,1	23,9	29
PUNO-11B	10-09-2014	7,3	232,0	6,0	0,10	0,80	27,0	15,5	15,2	46
PUNO-11B	08-10-2014	5,6	235,0	12,4	0,90	0,70	18,0	22,4	35,4	5
PUNO-11B	03-11-2014	7,3	269,0	15,3	0,56	0,65	27,4	25,0	25,9	44
PSAP-1	11-03-2014	9,0	376,0	27,8	4,94	1,08	58,2	23,3	132,5	19
PSAP-1	08-04-2014	8,7	373,0	15,8	3,25	1,53	62,9	21,9	116,1	20
PSAP-1	03-06-2014	9,1	403,0	16,0	30,00	1,50	60,0	23,8	119,4	24
PSAP-1	01-07-2014	9,1	409,0	79,0	2,93	1,08	6,0	26,9	112,8	19
PSAP-1	05-11-2014	3,1	407,0	10,7	0,63	41,93	0,0	20,4	113,0	30
PSAP-2	05-12-2013	7,4	499,0	19,6	5,35	4,42	72,5	31,7	142,4	46
PSAP-2	09-01-2014	7,9	515,0	26,0	3,91	5,92	67,2	38,6	142,0	45
PSAP-2	11-03-2014	7,6	518,0	32,6	2,97	3,62	71,1	37,1	149,8	50
PSAP-2	03-09-2014	7,6	421,0	13,0	2,60	2,90	62,0	16,8	116,0	40
PSAP-3	11-03-2014	6,9	1401,0	179,7	12,09	16,64	124,7	237,0	302,1	55
PSAP-3	08-04-2014	7,4	640,0	28,4	4,34	6,34	104,3	37,9	207,4	64
PUNO-8B	05-12-2013	7,6	270,0	23,9	3,09	1,80	24,6	25,0	6,6	107
PUNO-8B	11-03-2014	8,0	256,0	21,3	0,83	0,89	26,7	20,2	25,9	101
PUNO-8B	20-05-2014	8,1	395,0	46,0	1,00	1,80	31,0	33,3	47,3	97
PUNO-8B	01-07-2014	8,0	370,0	30,0	11,00	1,80	24,1	46,3	21,0	96
PUNO-8B	03-09-2014	8,0	303,0	22,0	2,90	2,00	30,0	19,0	30,5	86
PUNO-8B	01-10-2014	8,0	324,0	20,0	0,10	2,50	31,0	27,8	41,2	83
PUNO-8B	05-11-2014	3,2	389,0	27,6	2,07	2,60	26,9	50,7	38,3	5



**Tabla F.2**  
**Parámetros Físico Químicos Bombeo Productivo. Continuación**

<b>Nombre</b>	<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>C.E (uS/cm)</b>	<b>Na (mg/l)</b>	<b>K (mg/l)</b>	<b>Mg (mg/l)</b>	<b>Ca (mg/l)</b>	<b>Cl (mg/l)</b>	<b>SO4 (mg/l)</b>	<b>HCO3 (mg/l)</b>
PUNO-6B	05-12-2013	7,5	289,0	35,9	0,87	0,70	17,6	10,0	53,5	60
PUNO-6B	09-01-2014	8,1	279,0	35,3	0,26	0,75	20,3	8,5	69,1	55
PUNO-6B	06-02-2014	8,1	282,0	34,3	1,42	0,42	18,7	8,9	65,0	60
PUNO-6B	11-03-2014	7,9	275,0	42,5	0,58	0,05	19,9	8,8	61,3	60
PUNO-6B	08-04-2014	8,1	271,0	31,6	2,30	0,51	20,8	7,8	56,0	58
PUNO-6B	20-05-2014	8,1	278,0	35,0	2,00	0,50	19,0	8,9	49,0	56
PUNO-6B	03-06-2014	7,2	482,0	68,0	3,76	3,76	28,0	49,4	83,1	46
PUNO-6B	01-07-2014	7,9	268,0	20,0	2,98	4,20	17,0	8,4	51,9	55
PUNO-6B	05-11-2014	3,4	264,0	24,2	0,38	0,42	15,1	13,3	49,4	5
PUNO-7B	05-12-2013	7,5	356,0	13,2	2,14	2,28	48,5	11,8	93,0	49
PUNO-7B	11-03-2014	7,9	339,0	22,9	1,28	1,32	47,1	11,0	101,7	47
PUNO-7B	08-04-2014	8,0	347,0	15,6	2,80	2,26	51,5	10,6	91,4	47
PUNO-7B	12-08-2014	2,7	348,0	10,0	2,30	1,91	49,0	12,6	102,9	5
PUNO-2B	08-04-2014	7,9	462,0	24,3	8,63	4,46	67,9	10,6	154,3	47
PUNO-2B	03-06-2014	7,0	471,0	35,0	4,35	4,36	60,0	11,0	160,5	28
PUNO-314B	05-12-2013	6,8	383,0	19,3	2,15	2,41	42,3	72,5	35,0	26
PUNO-314B	09-01-2014	7,3	366,0	16,8	1,04	2,27	43,2	70,0	37,0	25
PUNO-314B	06-02-2014	7,5	363,0	17,0	1,83	1,38	27,3	21,3	57,6	25
PUNO-314B	11-03-2014	7,0	333,0	24,2	0,78	0,91	40,5	65,1	41,6	22
PUNO-314B	08-04-2014	7,2	407,0	21,8	2,73	1,82	48,1	75,0	47,3	27
PUNO-314B	20-05-2014	6,9	360,0	18,0	2,00	1,40	41,0	69,6	28,0	22
PUNO-314B	03-06-2014	6,6	367,0	37,0	1,61	2,06	40,0	68,4	39,5	17
PUNO-314B	01-07-2014	7,0	406,0	0,0	3,16	25,40	32,6	70,6	45,7	23
PUNO-314B	03-09-2014	6,8	359,0	17,0	1,40	1,70	55,0	57,5	78,6	22
PUNO-314B	05-11-2014	3,9	374,0	11,8	0,81	2,06	43,4	69,3	41,2	5
SAPUNTA-1	05-12-2013	7,0	1142,0	28,1	7,28	12,59	229,9	36,4	401,7	241
SAPUNTA-1	06-02-2014	7,8	1238,0	38,0	7,98	14,47	238,1	8,9	433,8	300
SAPUNTA-1	11-03-2014	7,3	1388,0	39,7	13,86	14,52	307,5	41,4	448,2	404

**Tabla F.2**  
**Parámetros Físico Químicos Bombeo Productivo. Continuación**

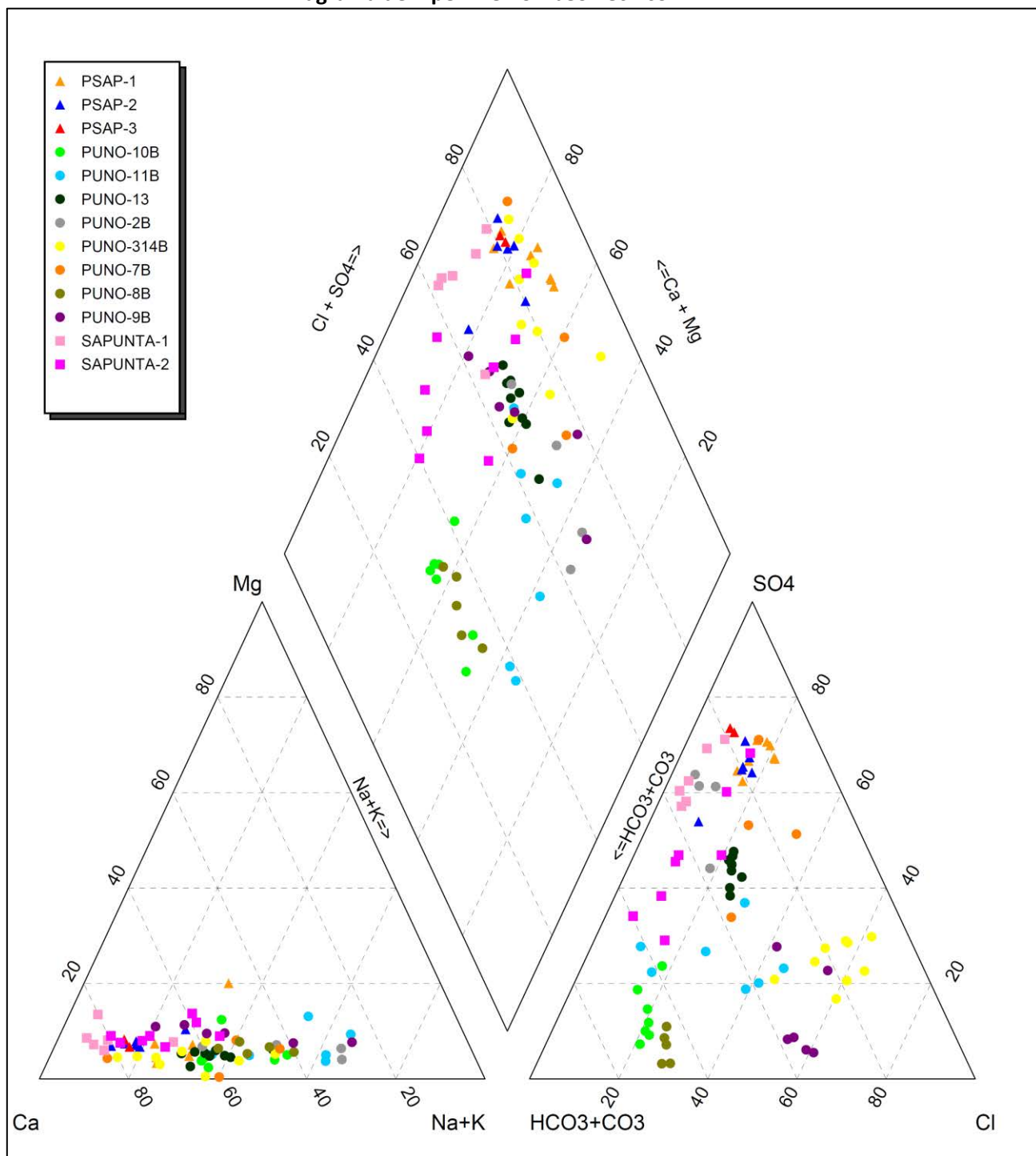
Nombre	Fecha	pH	C.E (uS/cm)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	HCO3 (mg/l)
SAPUNTA-1	08-04-2014	7,5	1302,0	25,6	13,22	11,72	266,6	42,2	394,7	381
SAPUNTA-1	03-06-2014	7,6	1640,0	30,0	14,45	23,40	352,0	41,5	621,4	427
SAPUNTA-1	08-10-2014	8,1	987,0	19,8	5,10	8,10	201,0	30,7	282,7	319
SAPUNTA-1	05-11-2014	8,1	988,0	23,7	1,20	1,54	205,0	29,3	233,0	271
SAPUNTA-2	09-01-2014	7,6	1029,0	62,7	10,48	15,30	146,5	79,6	300,0	163
SAPUNTA-2	08-04-2014	7,9	1258,0	82,6	12,44	24,50	191,7	113,5	411,6	224
SAPUNTA-2	03-09-2014	7,9	723,0	26,0	4,30	9,00	120,0	26,1	192,0	182
SAPUNTA-2	05-11-2014	8,0	1143,0	52,0	16,33	25,02	202,0	72,9	430,0	166

Fuente: Elaboración Propia

## **ANEXO F.2**

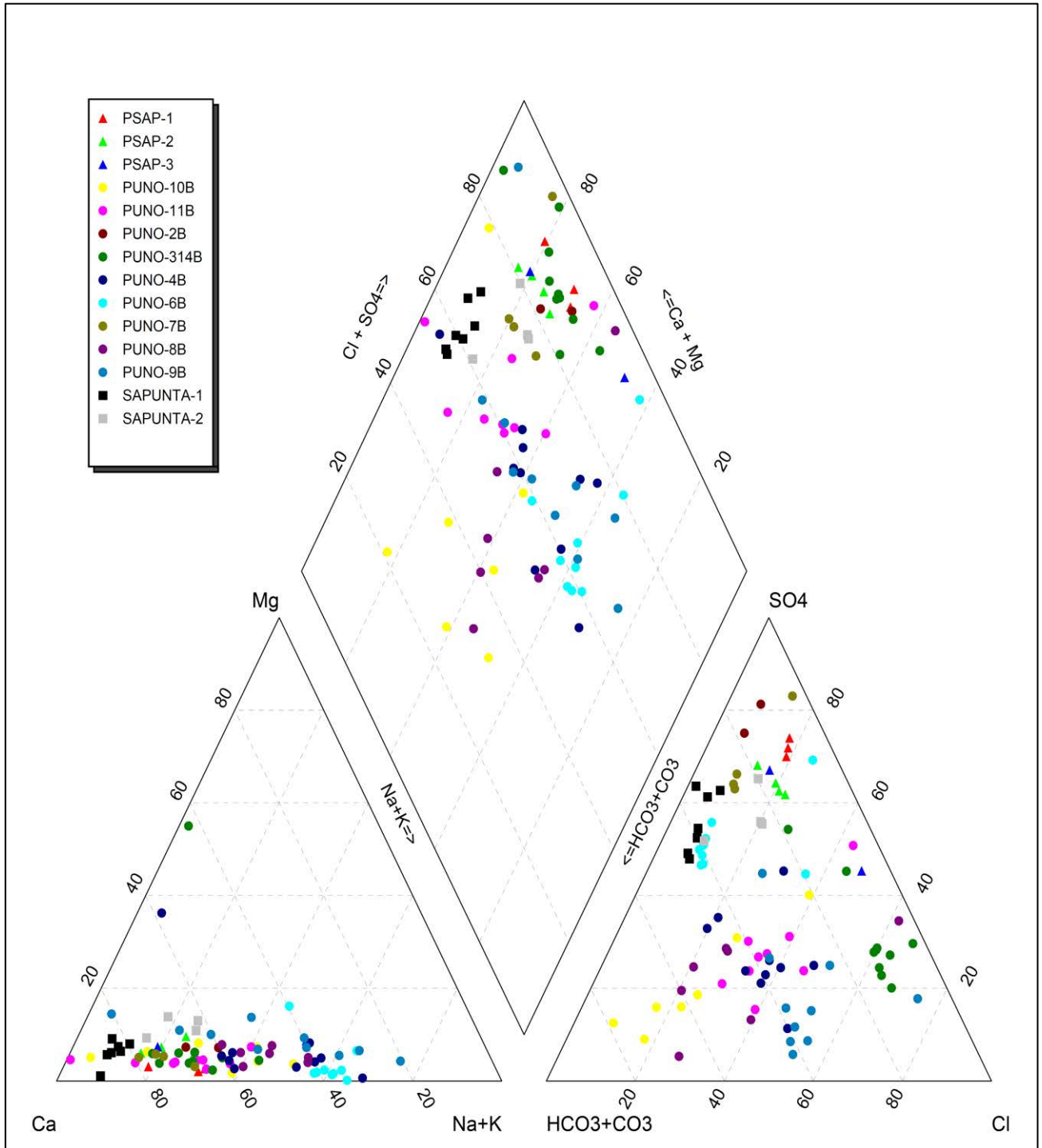
### **DIAGRAMAS DE PIPER**

**Figura F.1**  
**Diagrama de Piper Pre Bombeo Técnico**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura F.2**  
**Diagrama de Piper Bombeo Productivo**

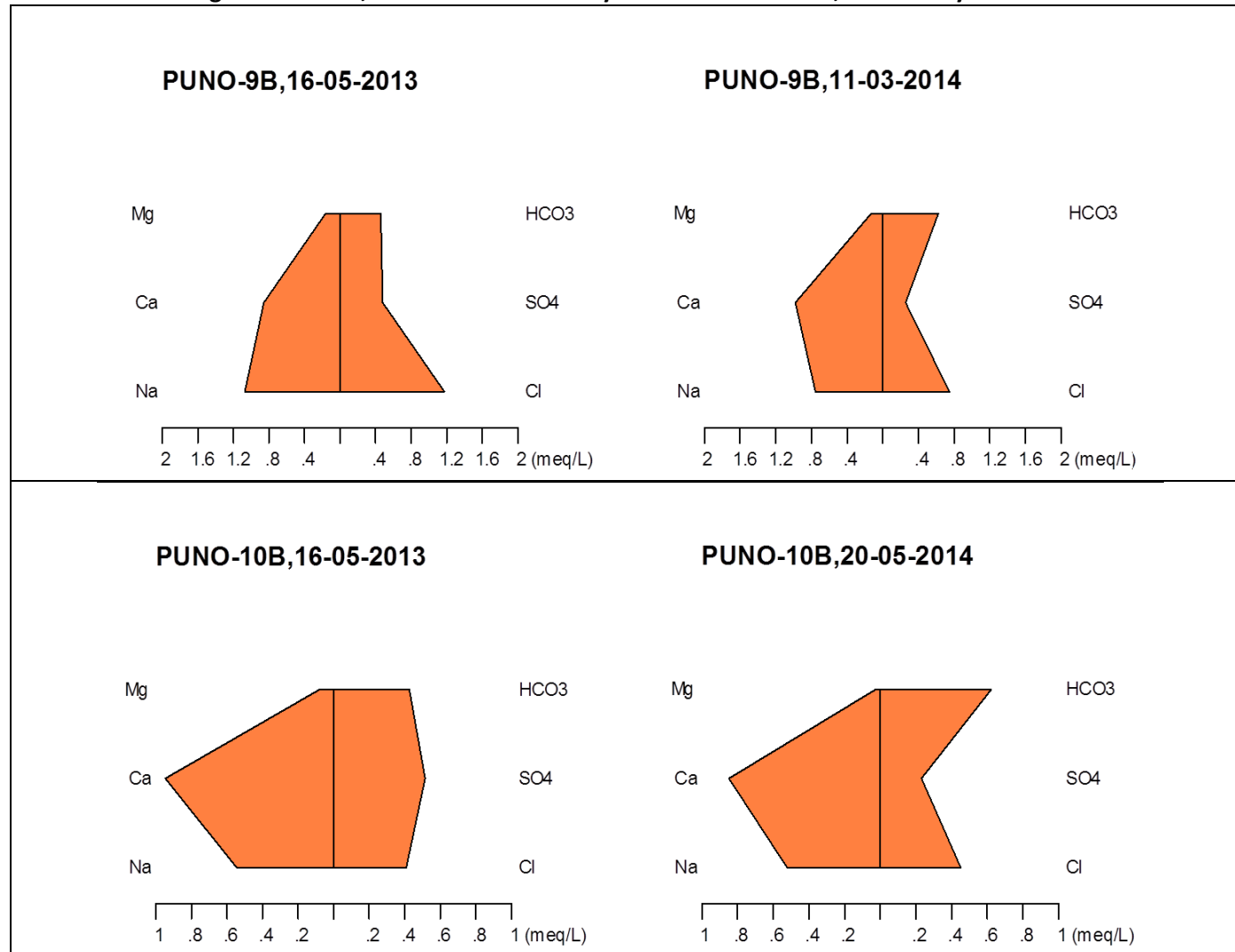


Fuente: Elaboración Propia

## **ANEXO F.3**

### **DIAGRAMAS DE STIFF**

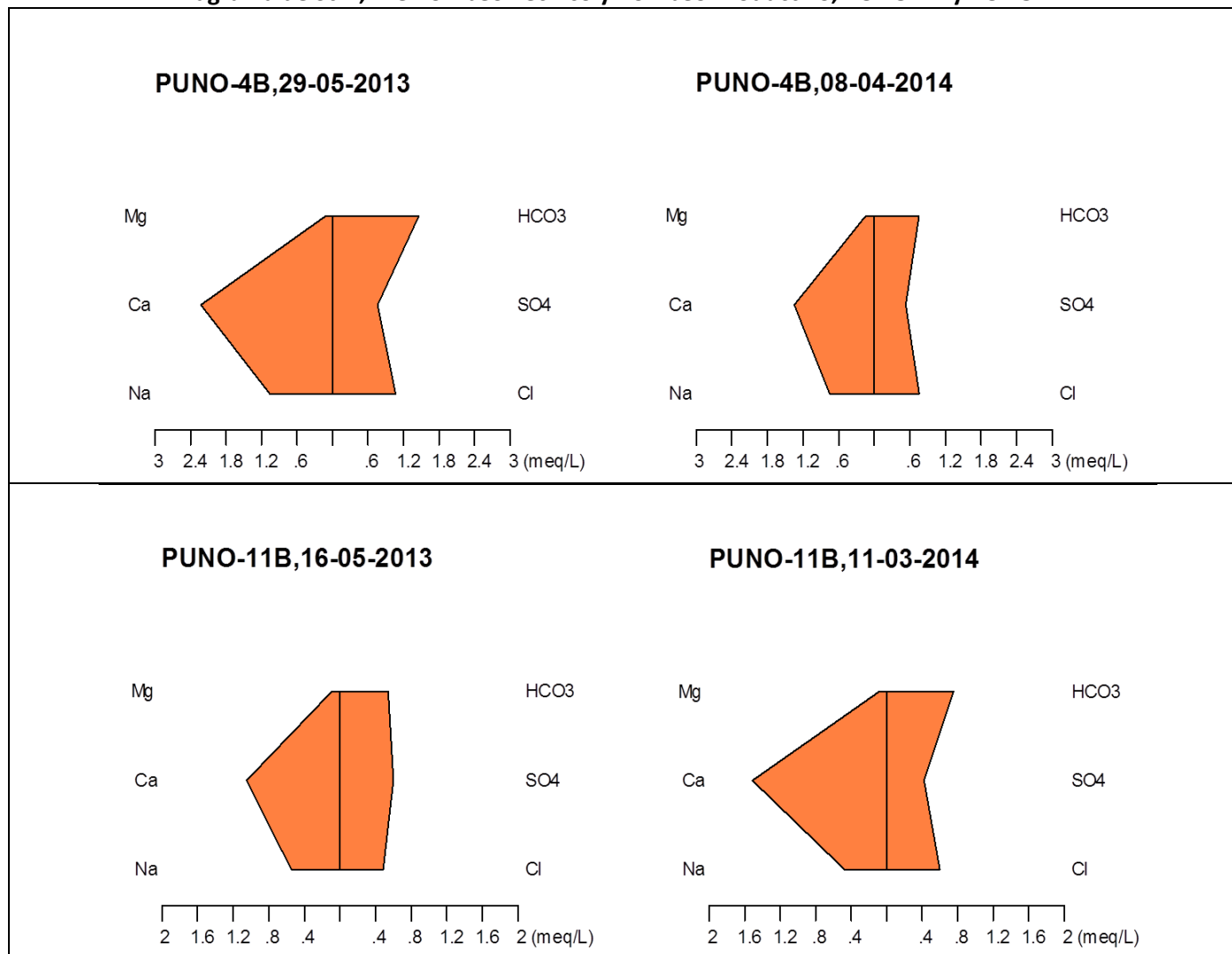
**Figura F.3**  
**Diagrama de Stiff, Pre Bombeo Técnico y Bombeo Productivo, PUNO-9B y PUNO-10B**



Fuente: Elaboración Propia

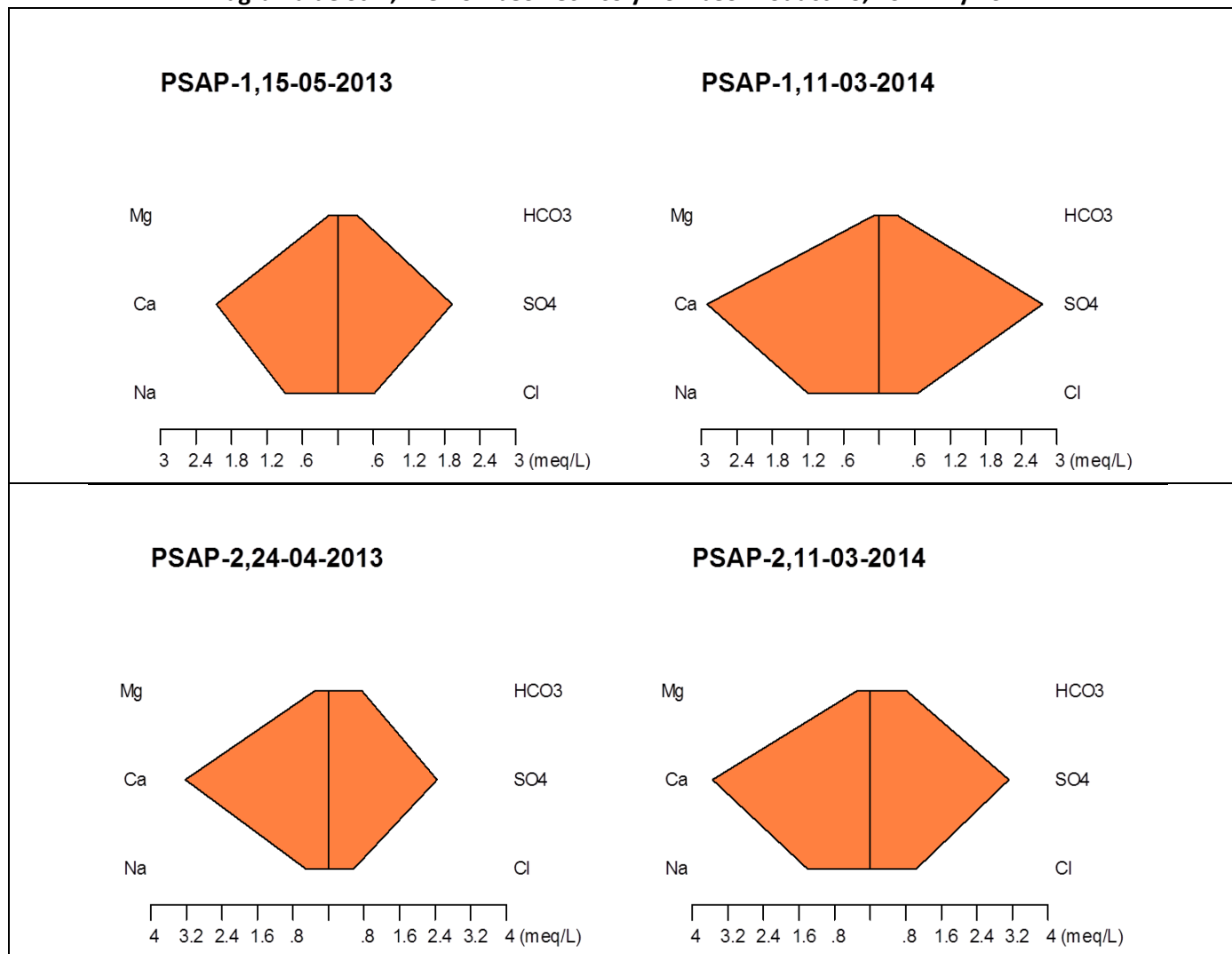


**Figura F.4**  
**Diagrama de Stiff, Pre Bombeo Técnico y Bombeo Productivo, PUNO-4B y PUNO-11B**



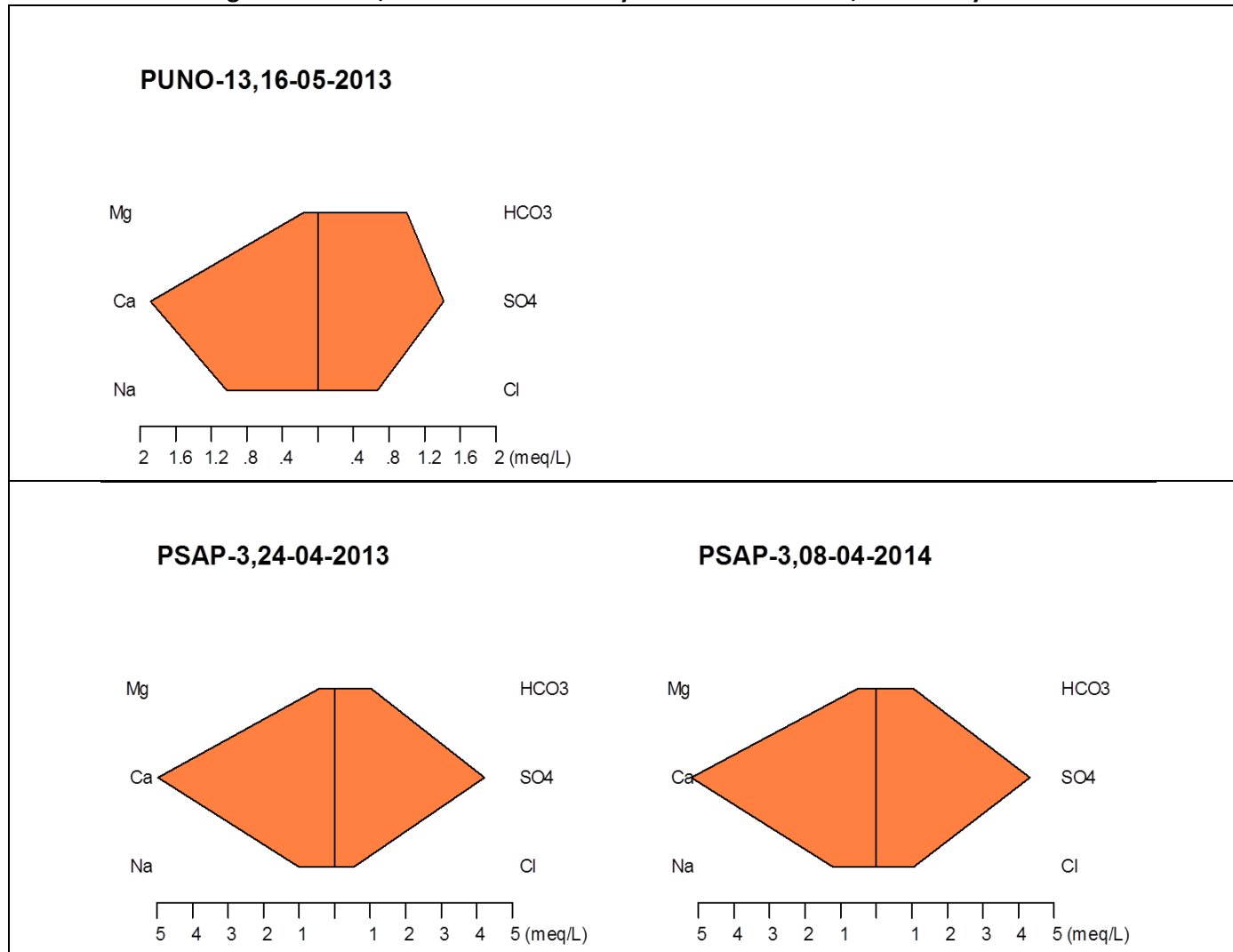
Fuente: Elaboración Propia

**Figura F.5**  
**Diagrama de Stiff, Pre Bombeo Técnico y Bombeo Productivo, PSAP-1 y PSAP-2**



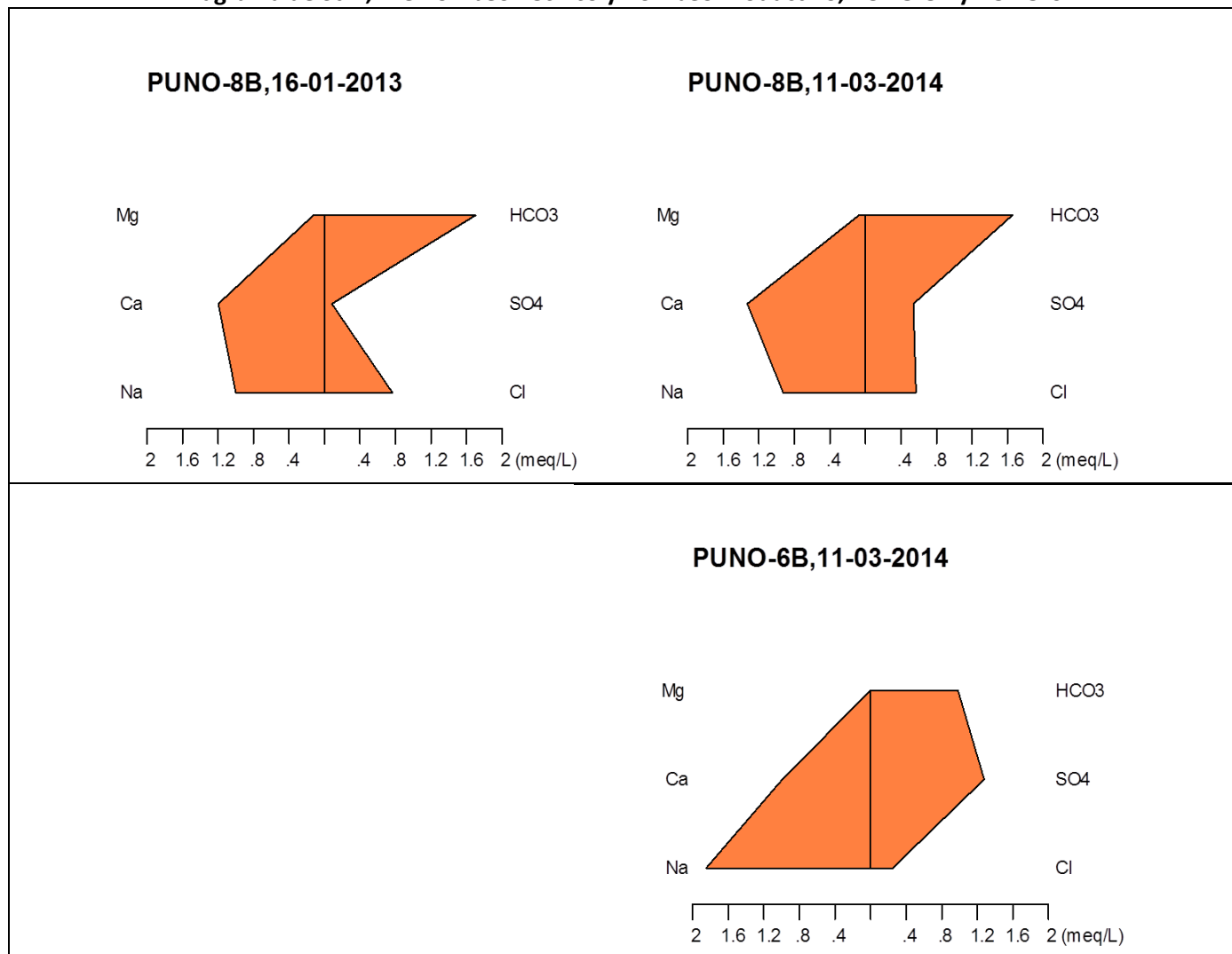
Fuente: Elaboración Propia

**Figura F.6**  
**Diagrama de Stiff, Pre Bombeo Técnico y Bombeo Productivo, PUNO-13 y PSAP-3**



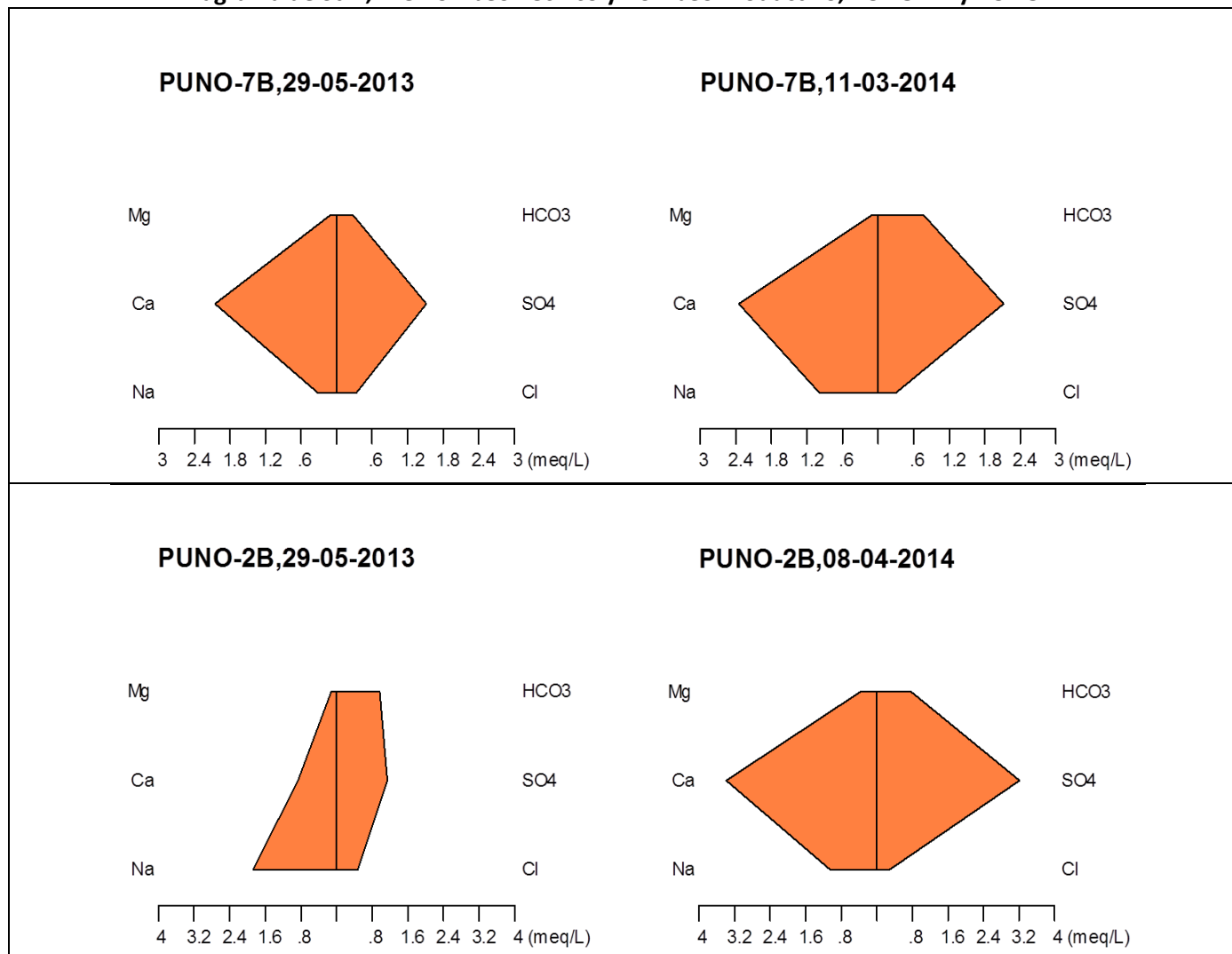
Fuente: Elaboración Propia

**Figura F.7**  
**Diagrama de Stiff, Pre Bombeo Técnico y Bombeo Productivo, PUNO-8B y PUNO-6B**



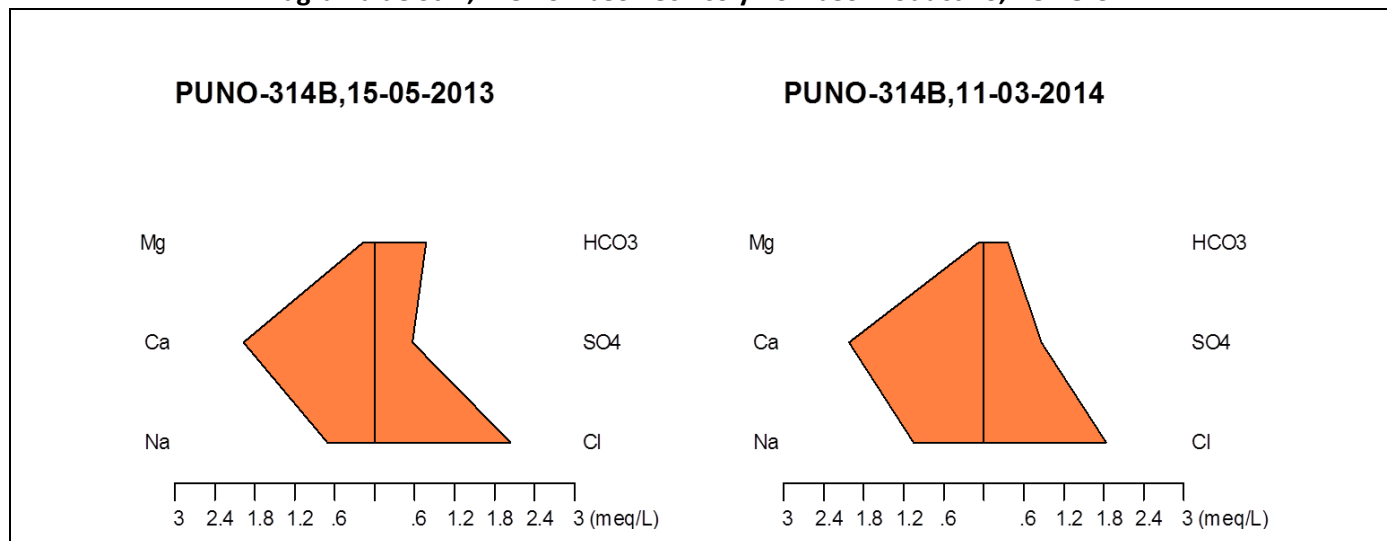
Fuente: Elaboración Propia

**Figura F.8**  
**Diagrama de Stiff, Pre Bombeo Técnico y Bombeo Productivo, PUNO-7B y PUNO-2B**



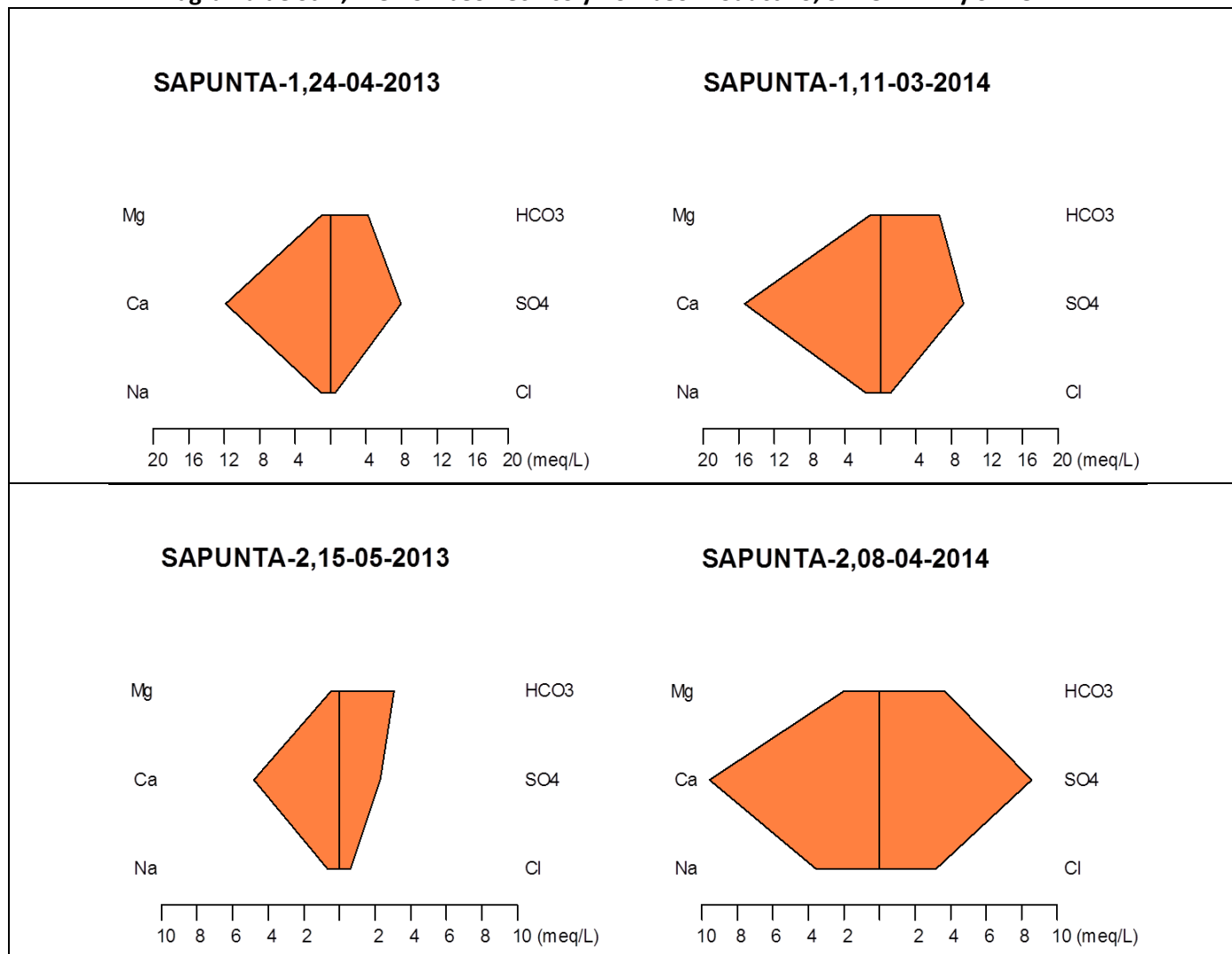
Fuente: Elaboración Propia

**Figura F.9**  
**Diagrama de Stiff, Pre Bombeo Técnico y Bombeo Productivo, PUNO-314B**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura F.10**  
**Diagrama de Stiff, Pre Bombeo Técnico y Bombeo Productivo, SAPUNTA-1 y SAPUNTA-2**



Fuente: Elaboración Propia



## **ANEXO G**

### **NIVELES FREÁTICOS PAMPA PUNO**

**REV B**

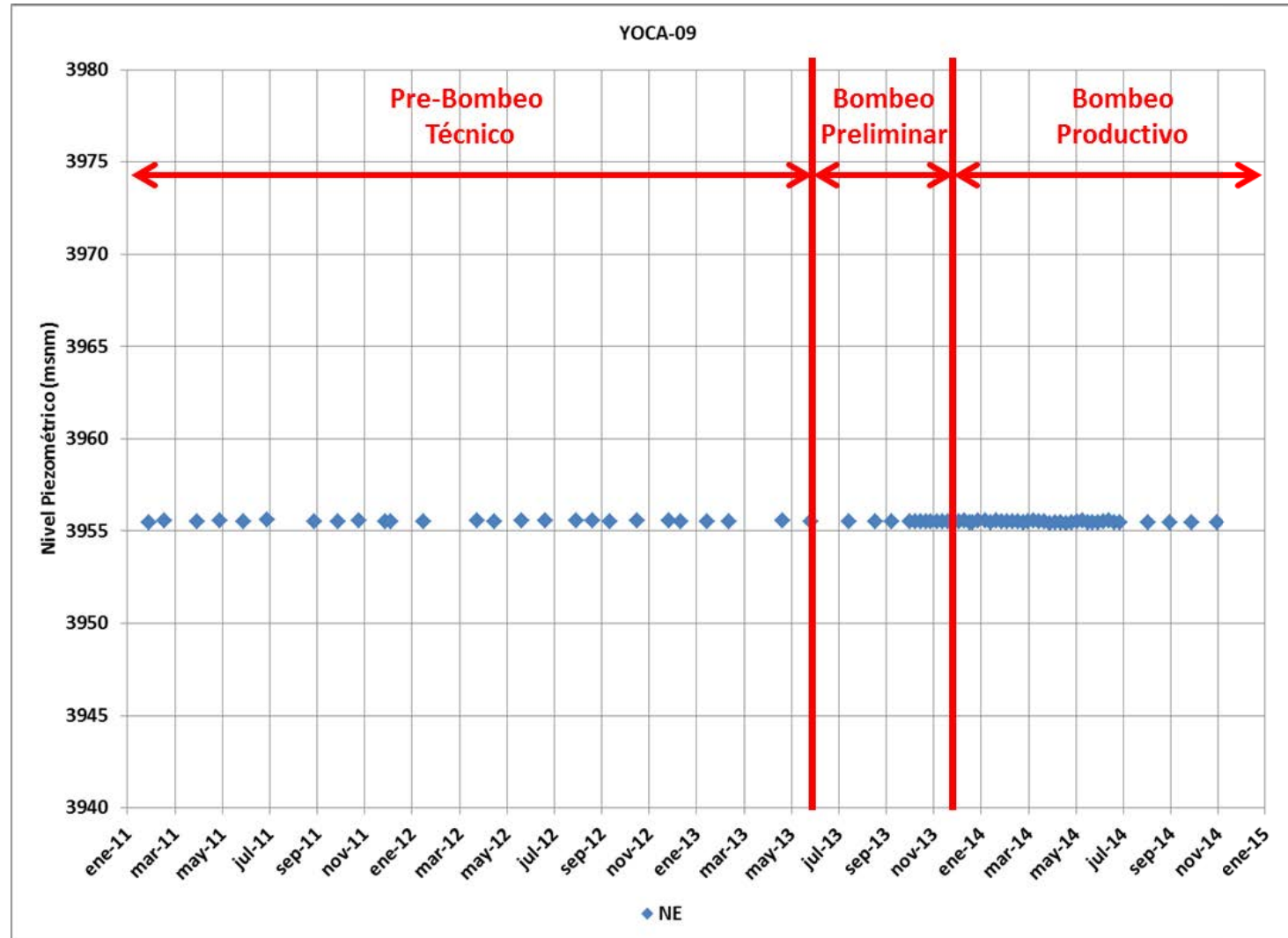
**MARZO 2015**

**PREPARADA POR**



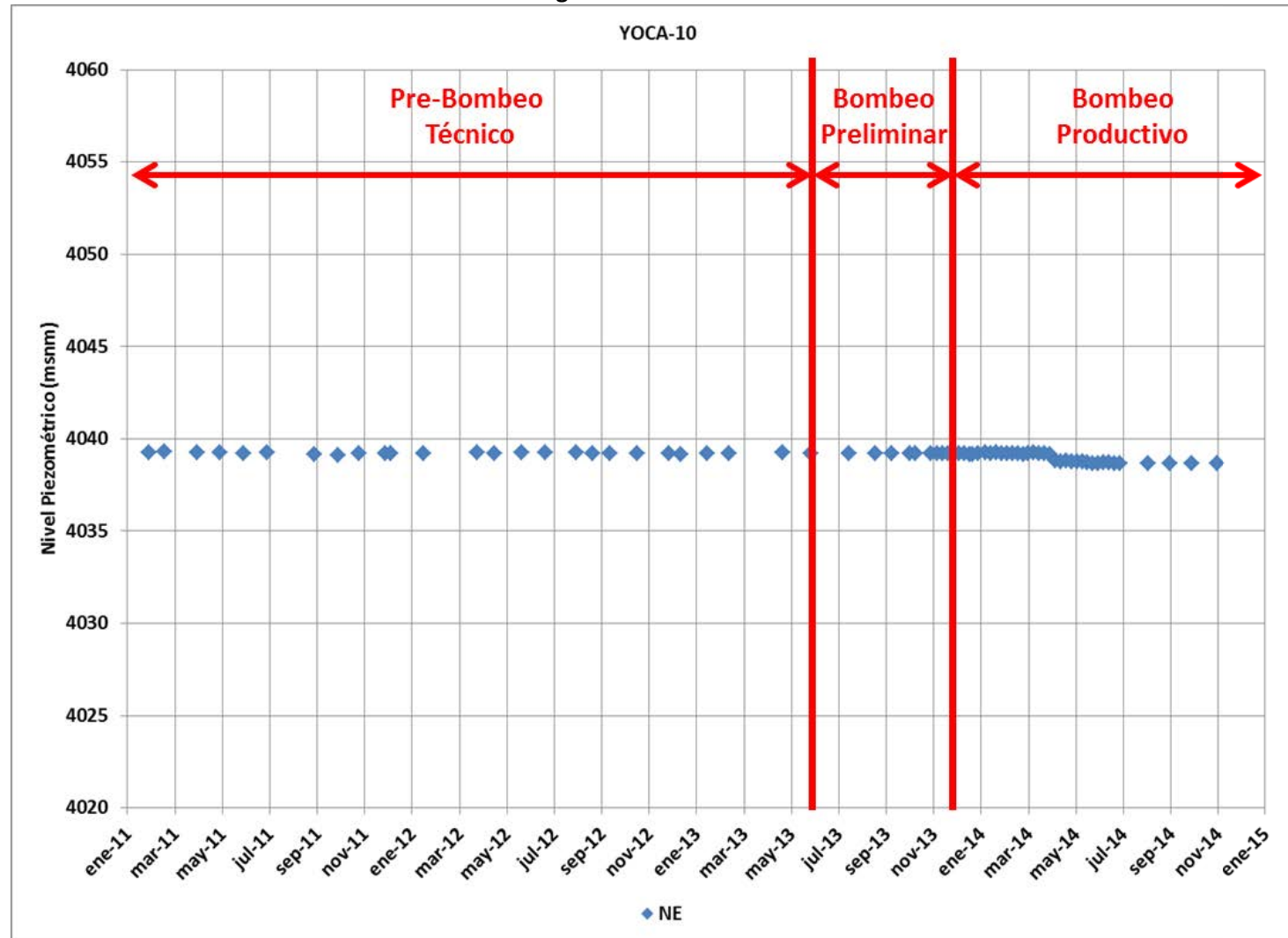
**HIDROGEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE**

**Figura G.1**  
**Niveles de Agua Subterránea Pozo YOCA-09**



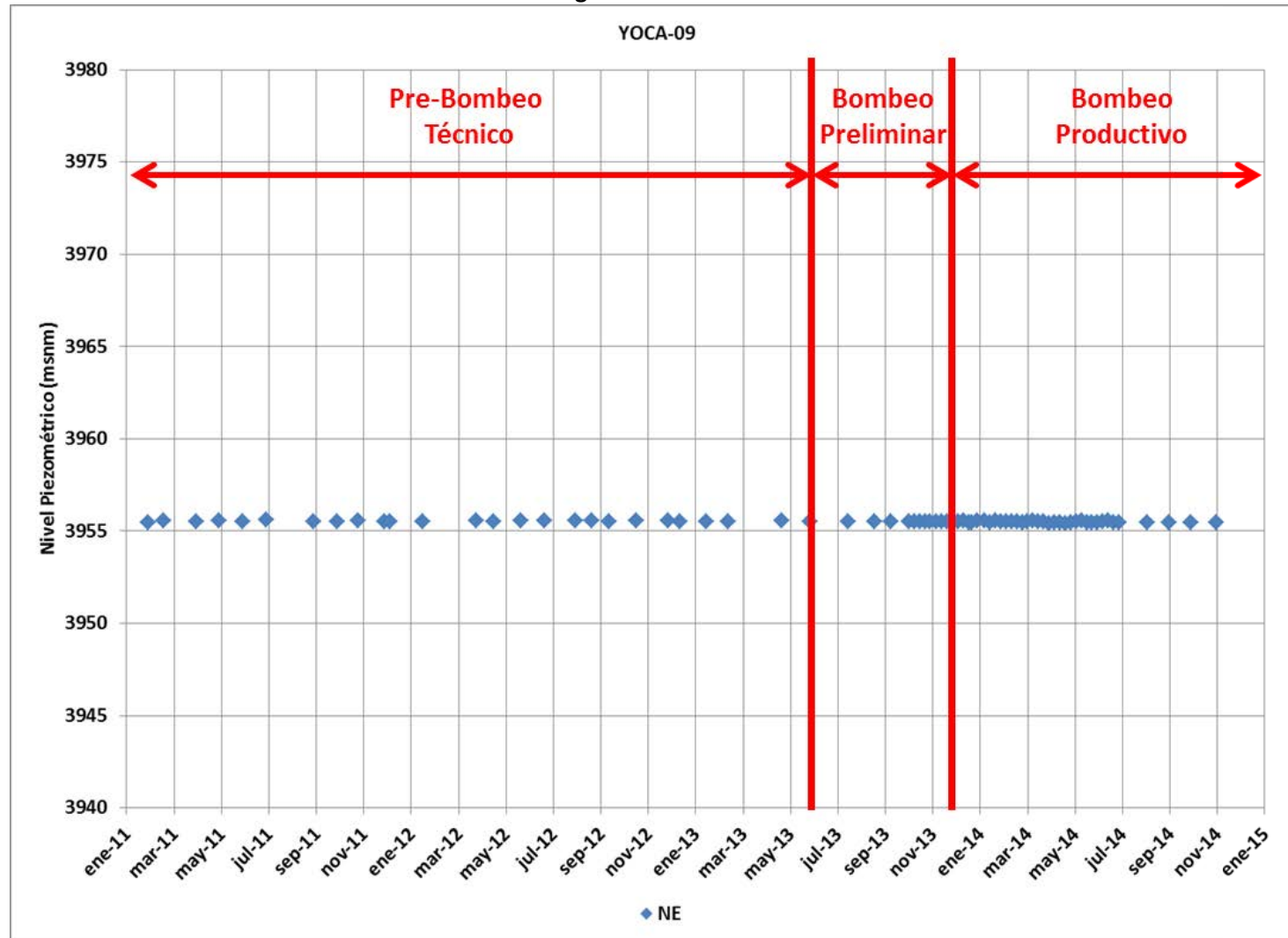
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.2  
Niveles de Agua Subterránea Pozo YOCA-10



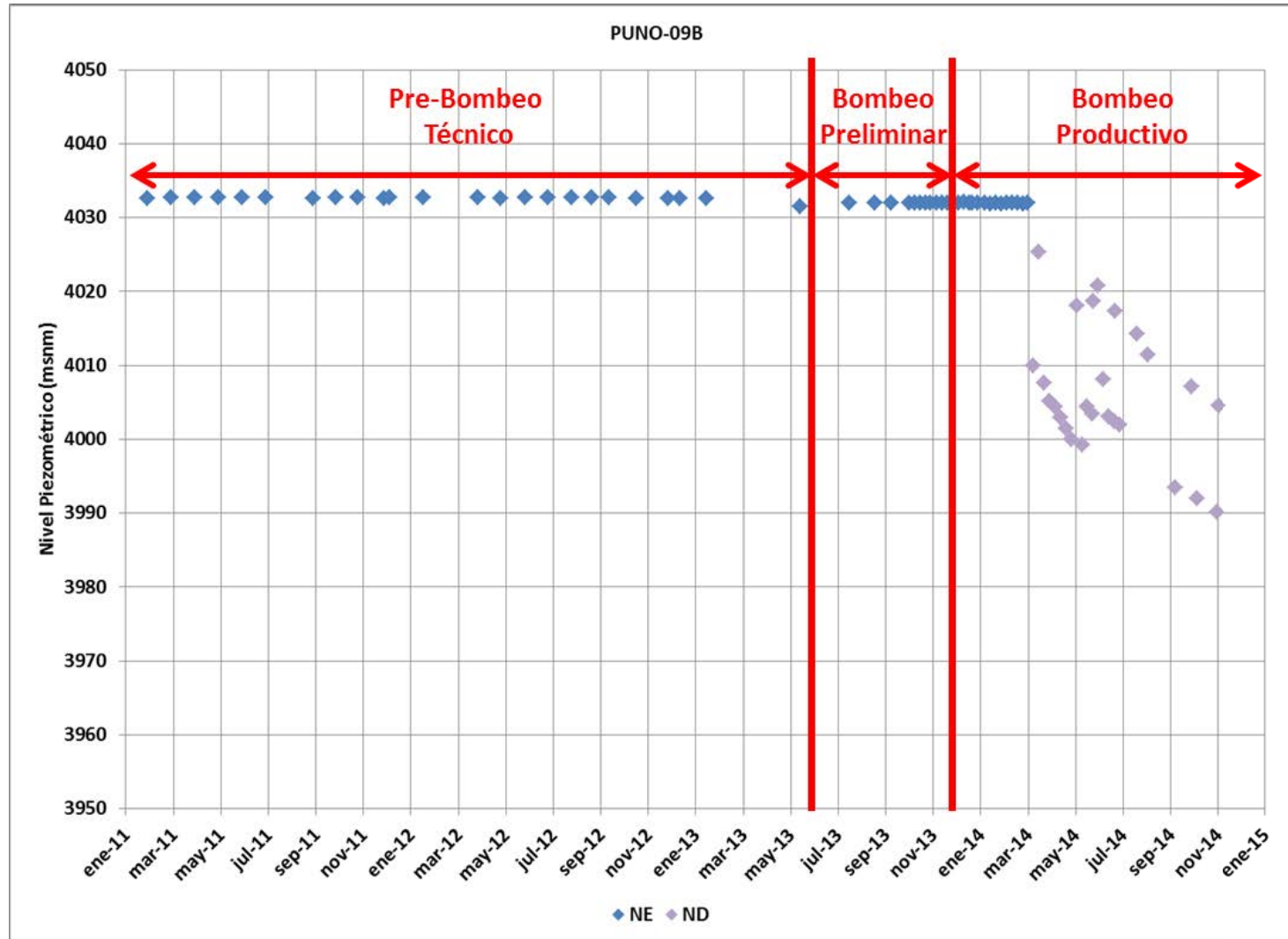
Fuente: Elaboración Propia

**Figura G.3**  
**Niveles de Agua Subterránea Pozo PIB-2**



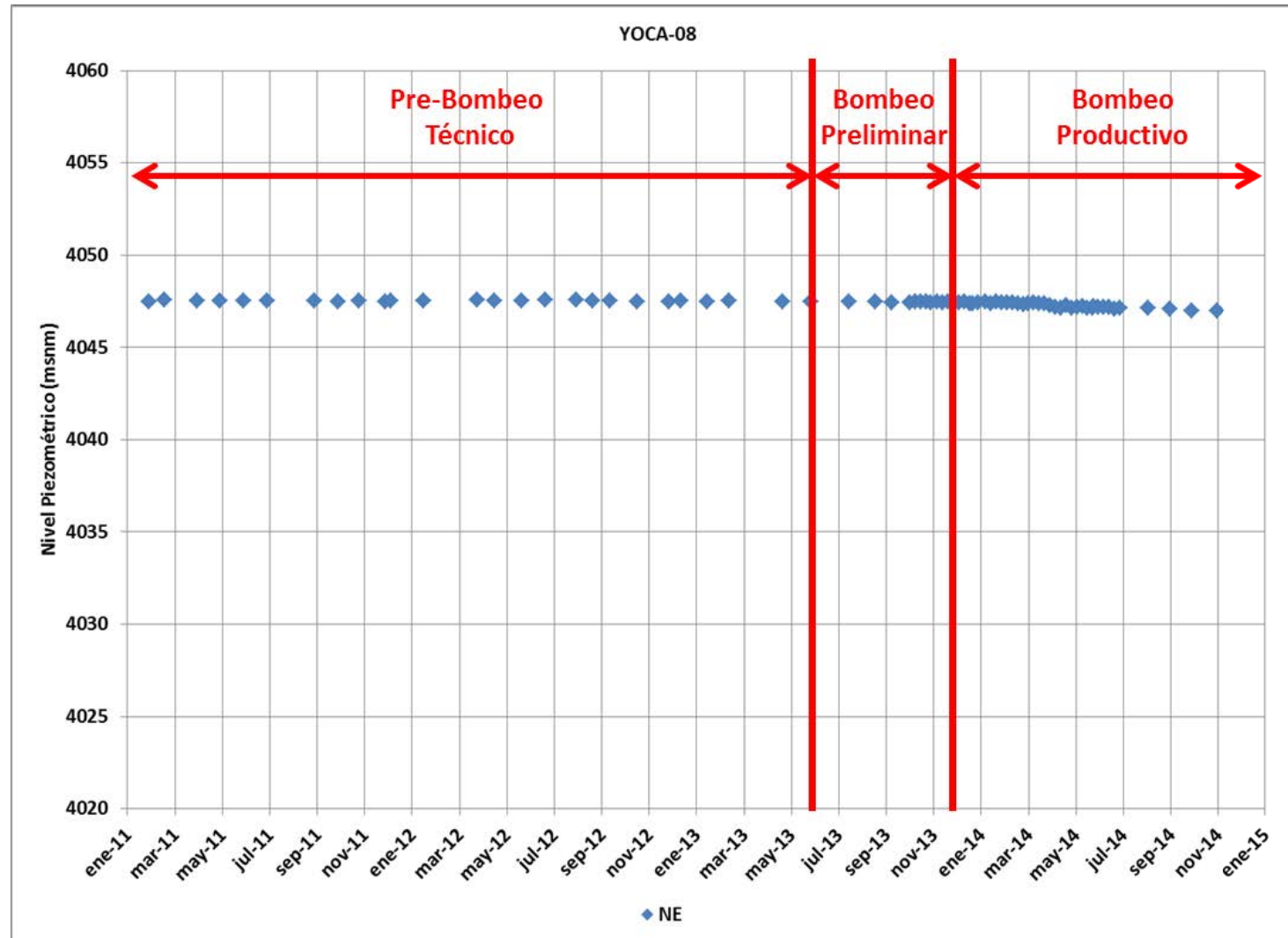
Fuente: Elaboración Propia

**Figura G.4**  
**Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-09B**



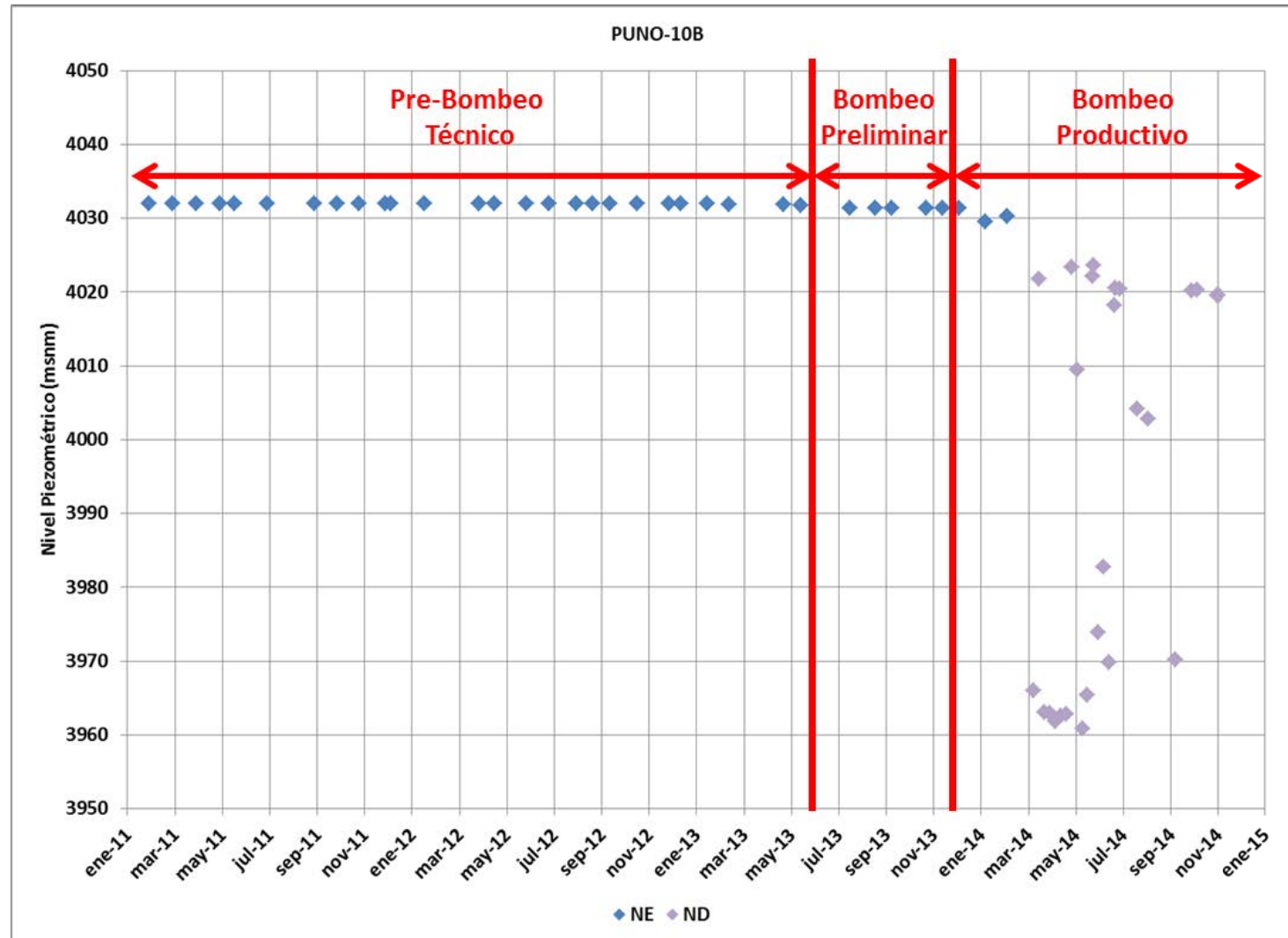
Fuente: Elaboración Propia

**Figura G.5**  
**Niveles de Agua Subterránea Pozo YOCA-08**



Fuente: Elaboración Propia

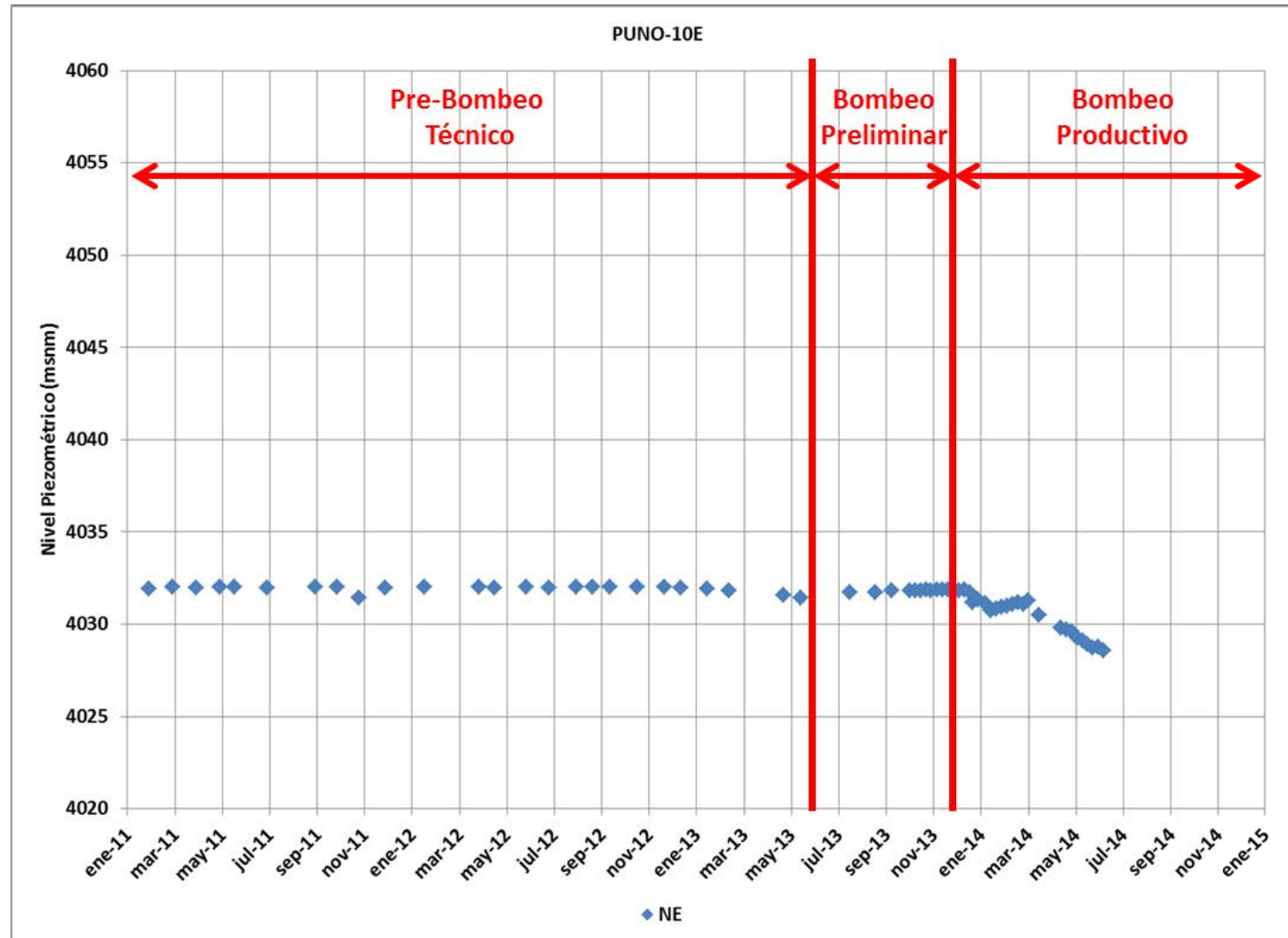
Figura G.6  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-10B



Fuente: Elaboración Propia



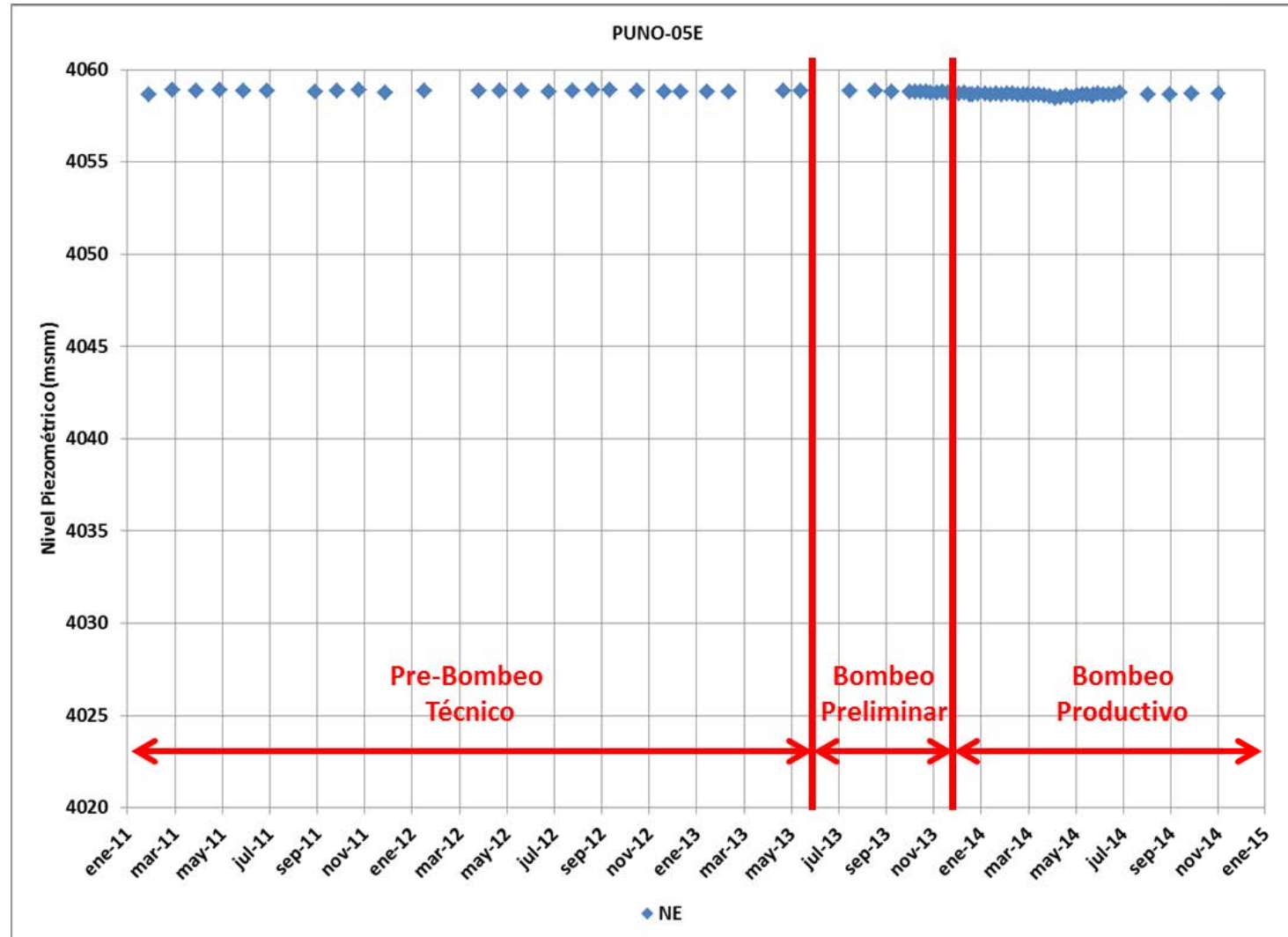
**Figura G.7**  
**Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-10E**



Fuente: Elaboración Propia

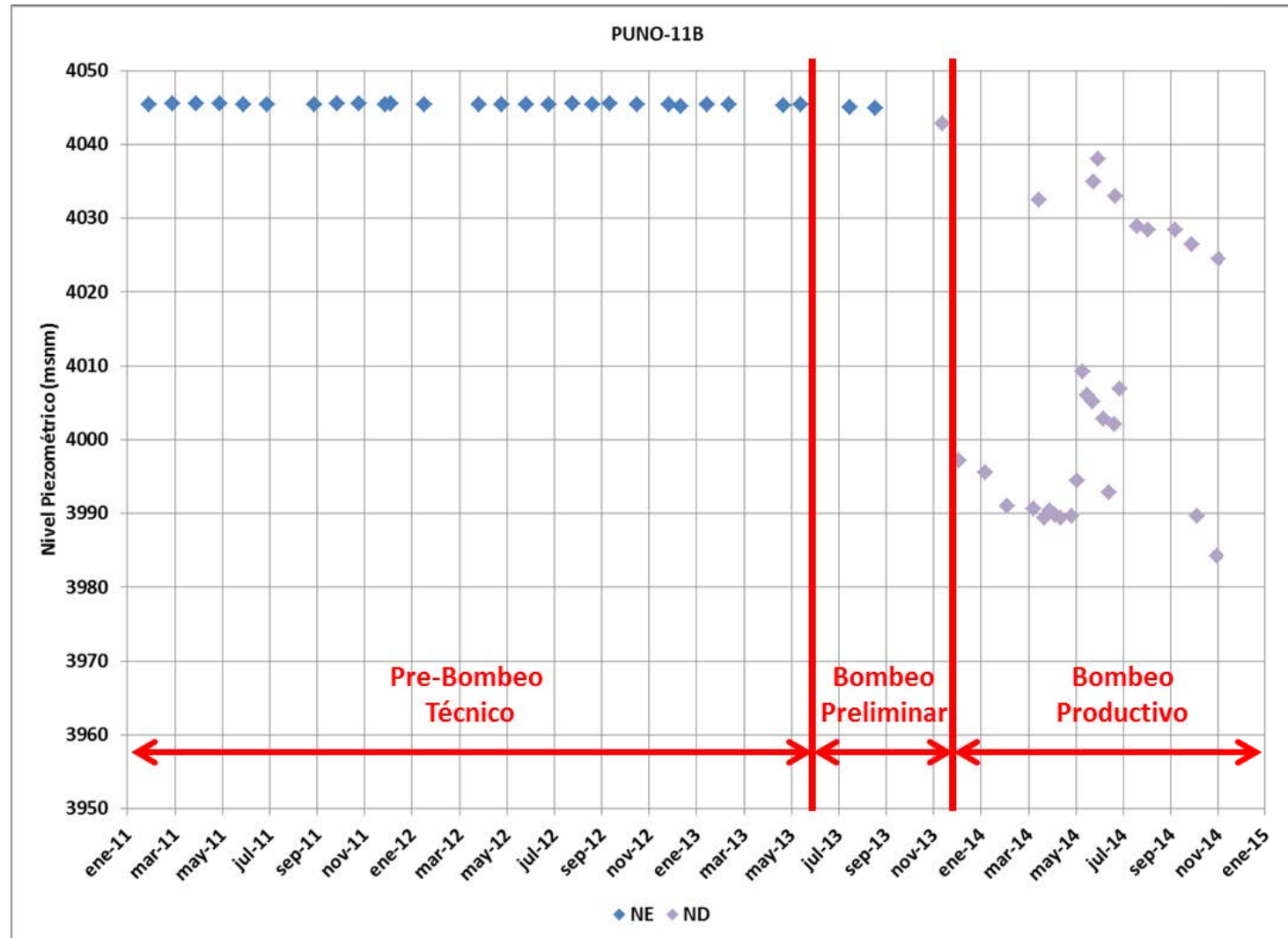


**Figura G.9**  
**Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-05E**



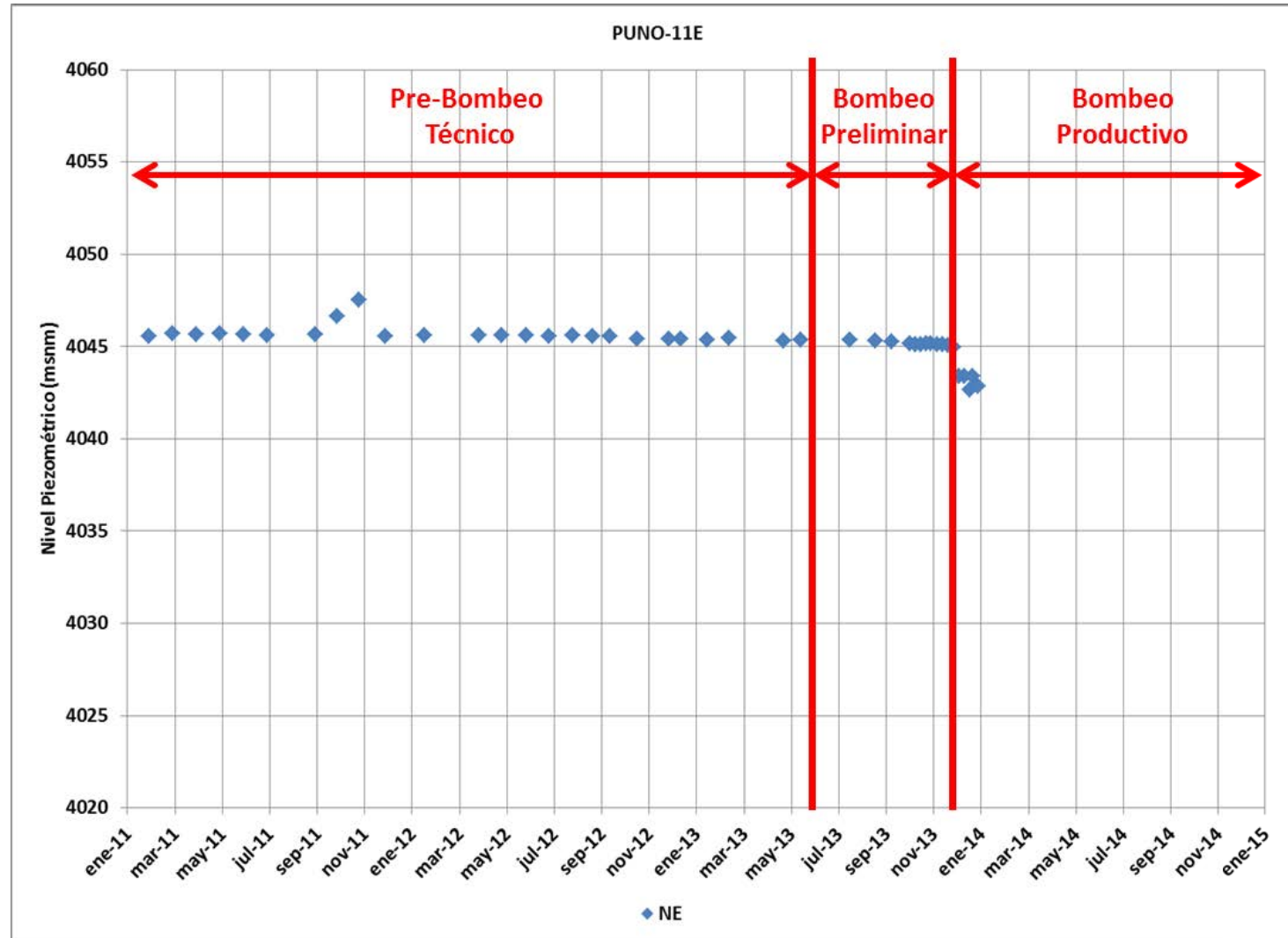
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.10  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-11B



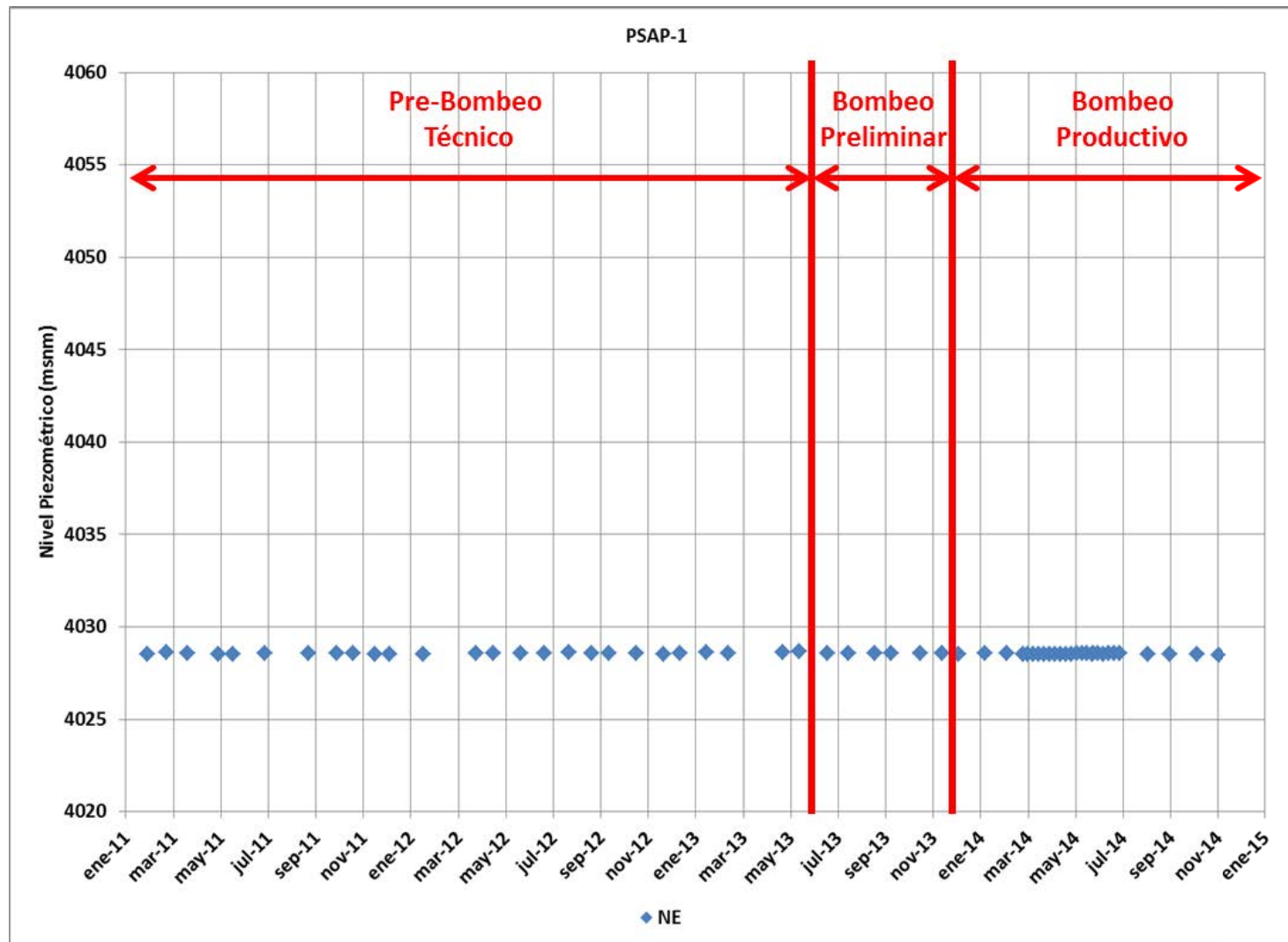
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.11  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-11E



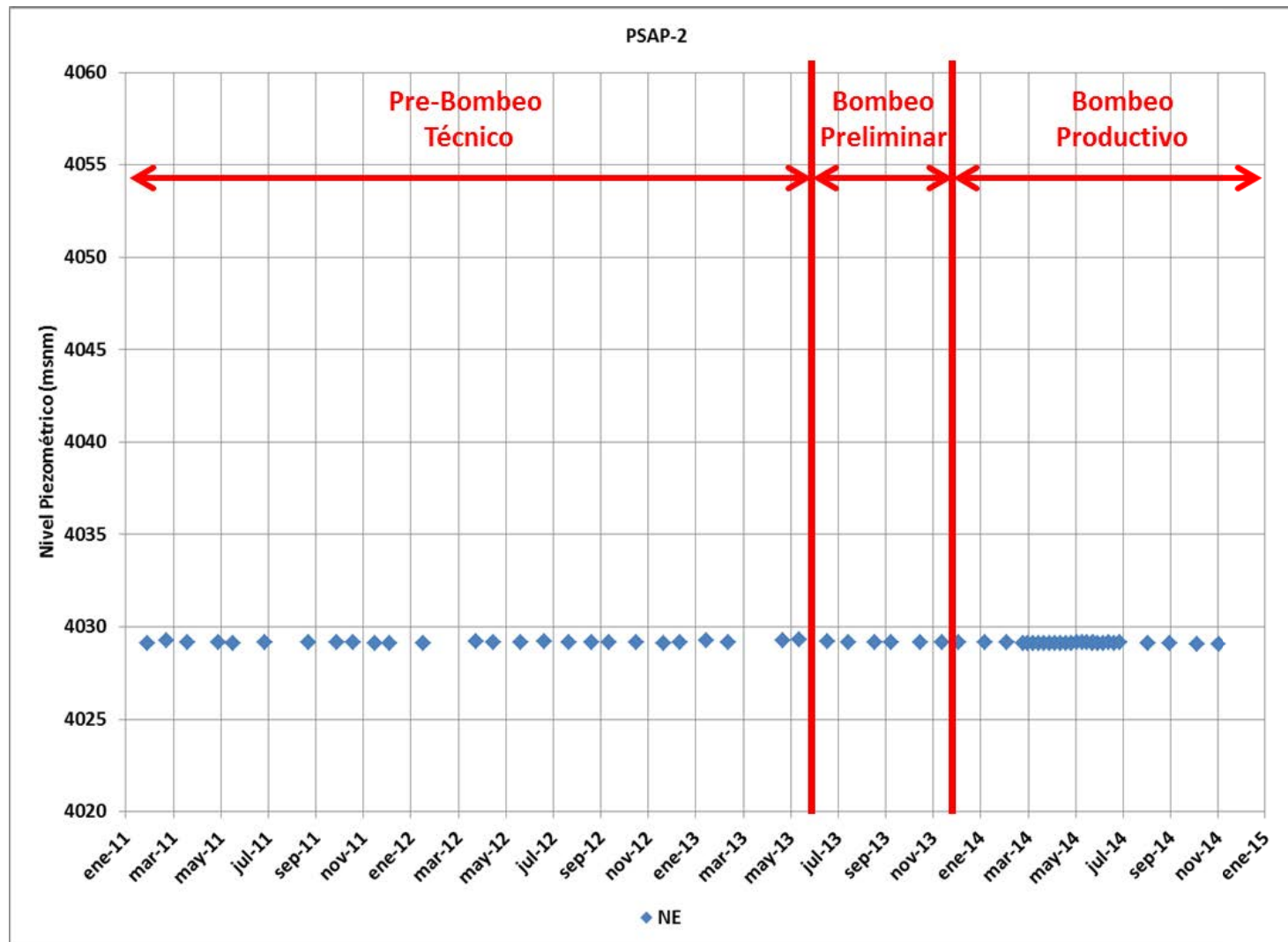
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.12  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PSAP-1



Fuente: Elaboración Propia

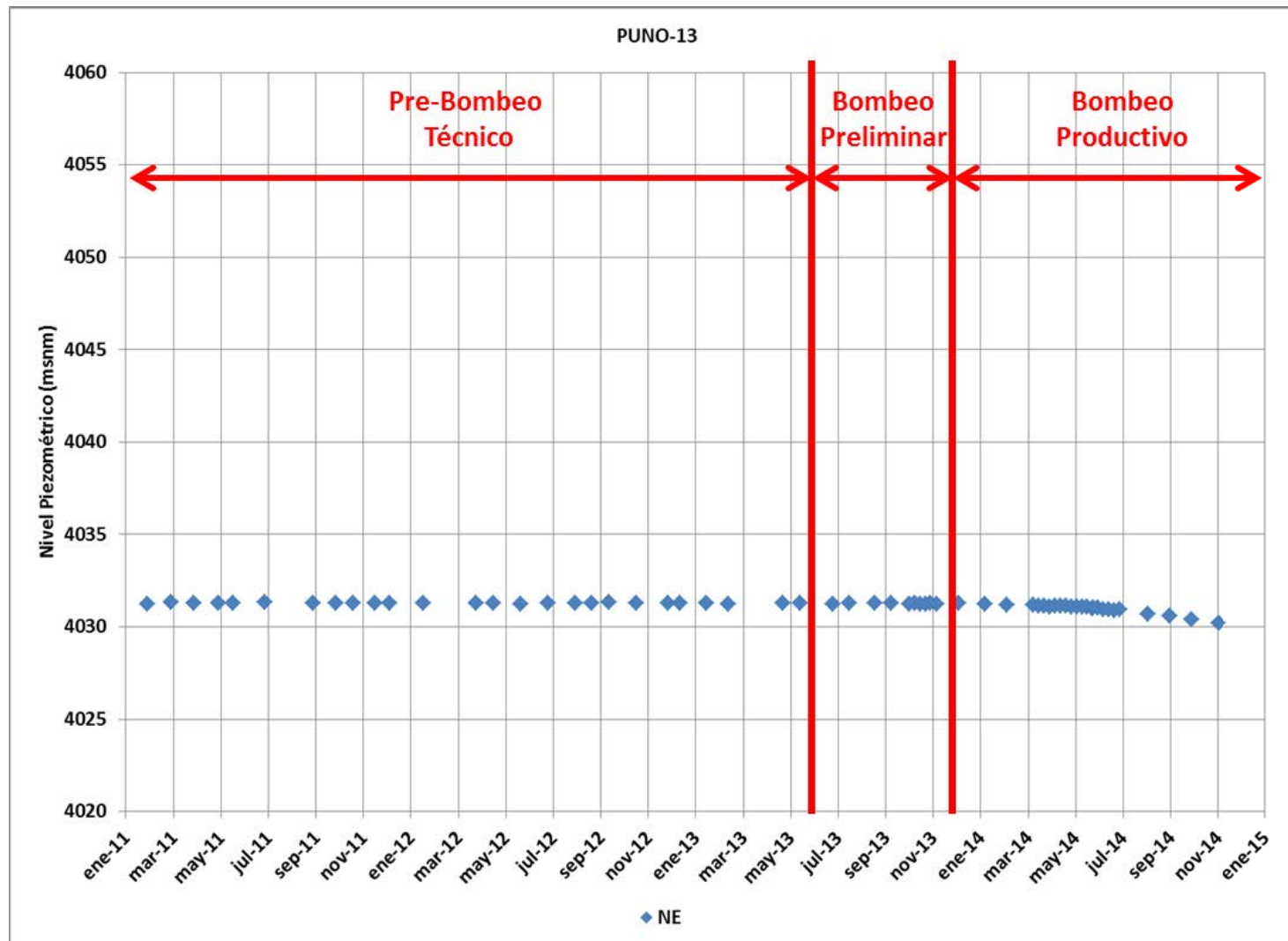
Figura G.13  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PSAP-2



Fuente: Elaboración Propia

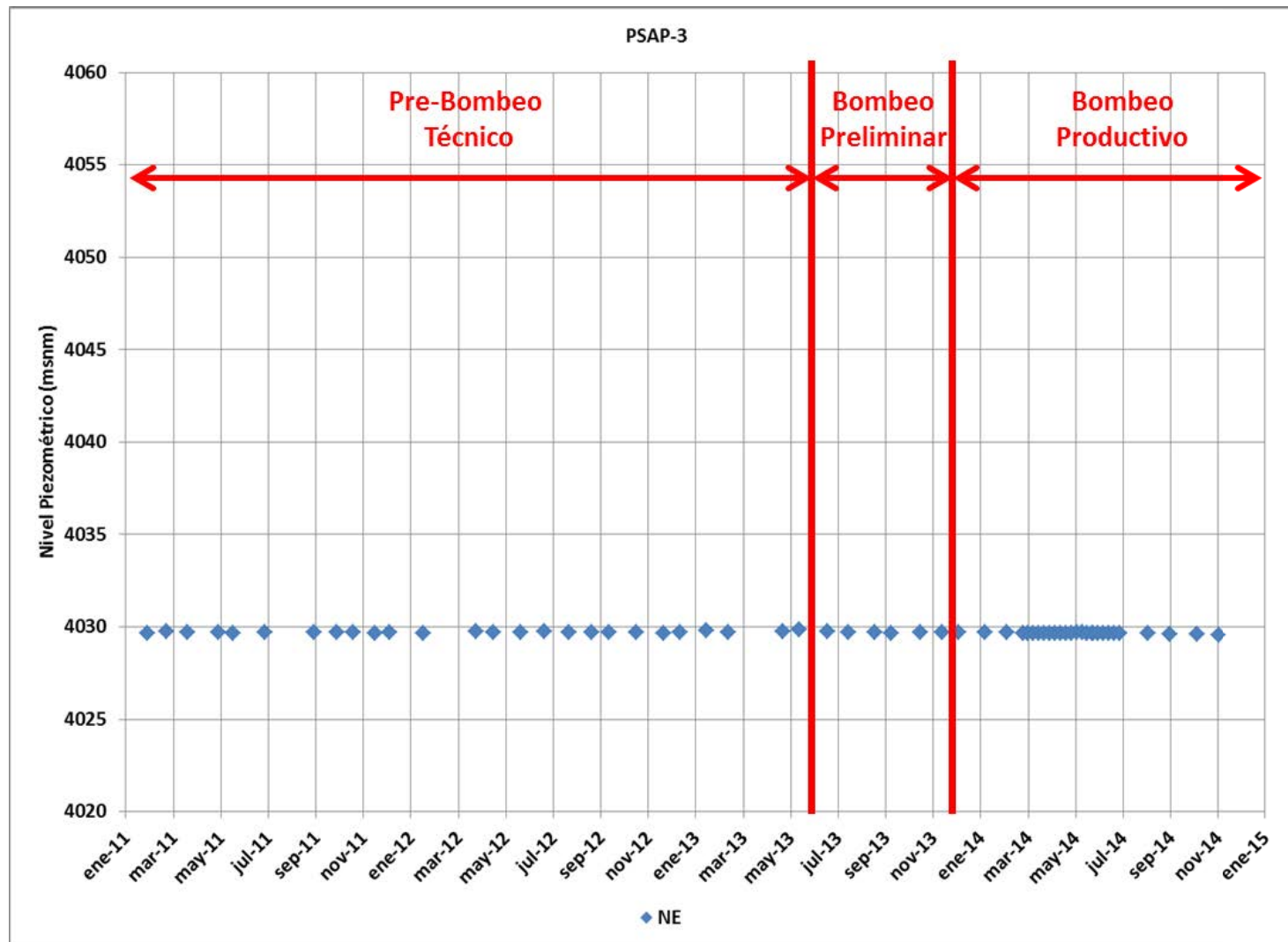


Figura G.14  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-13



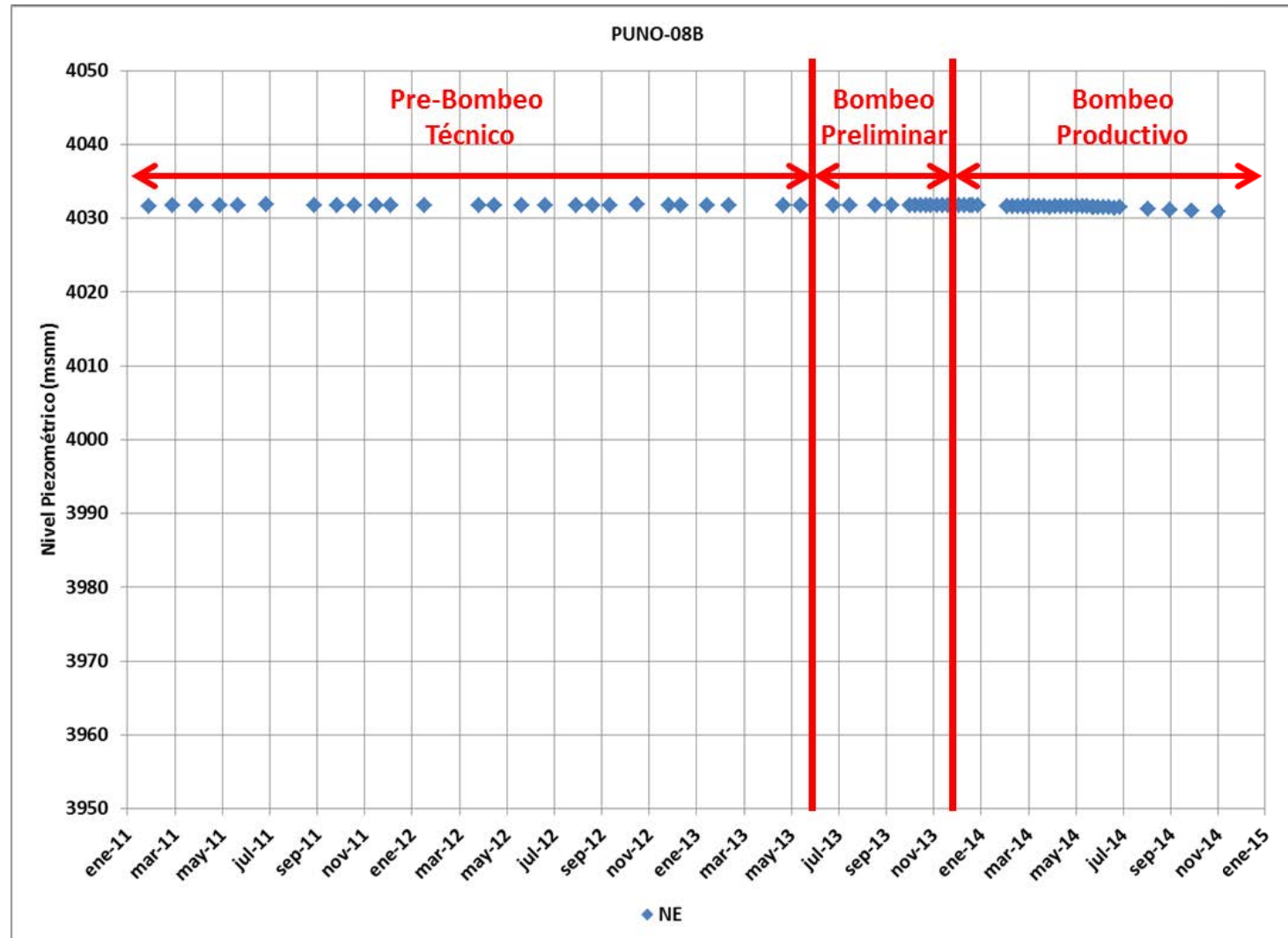
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.15  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PSAP-3



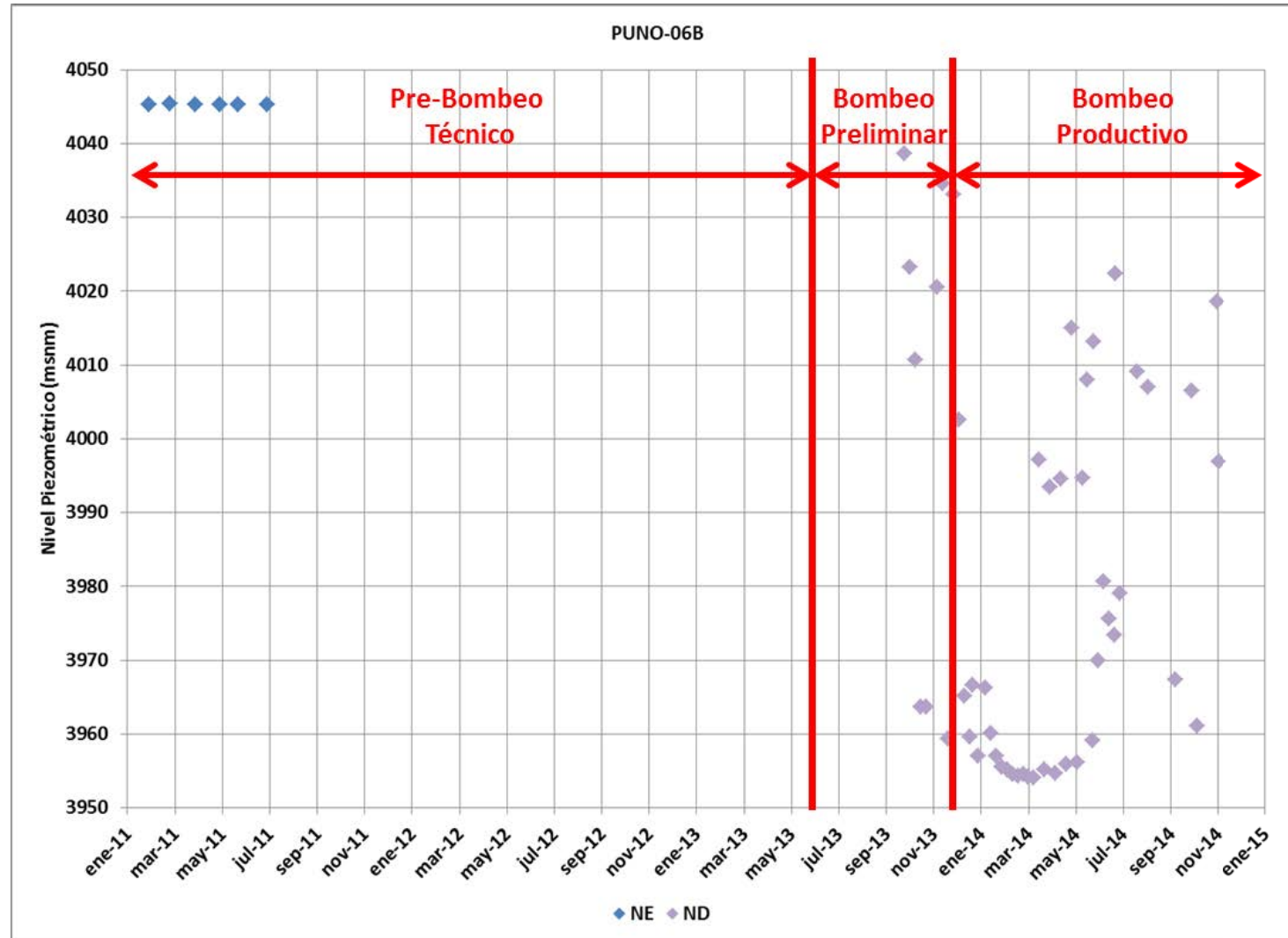
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.16  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-08B



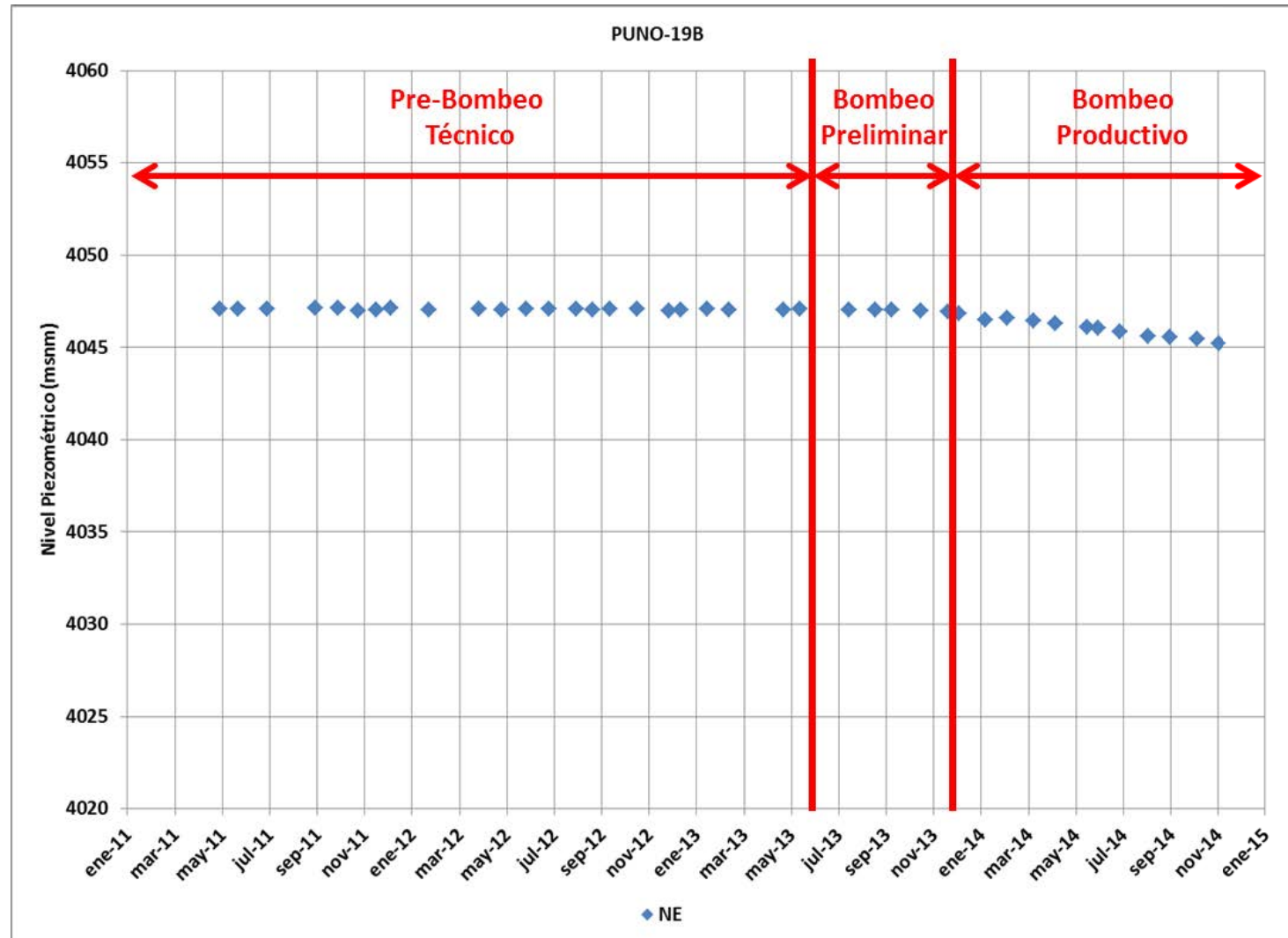
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.17  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-06B



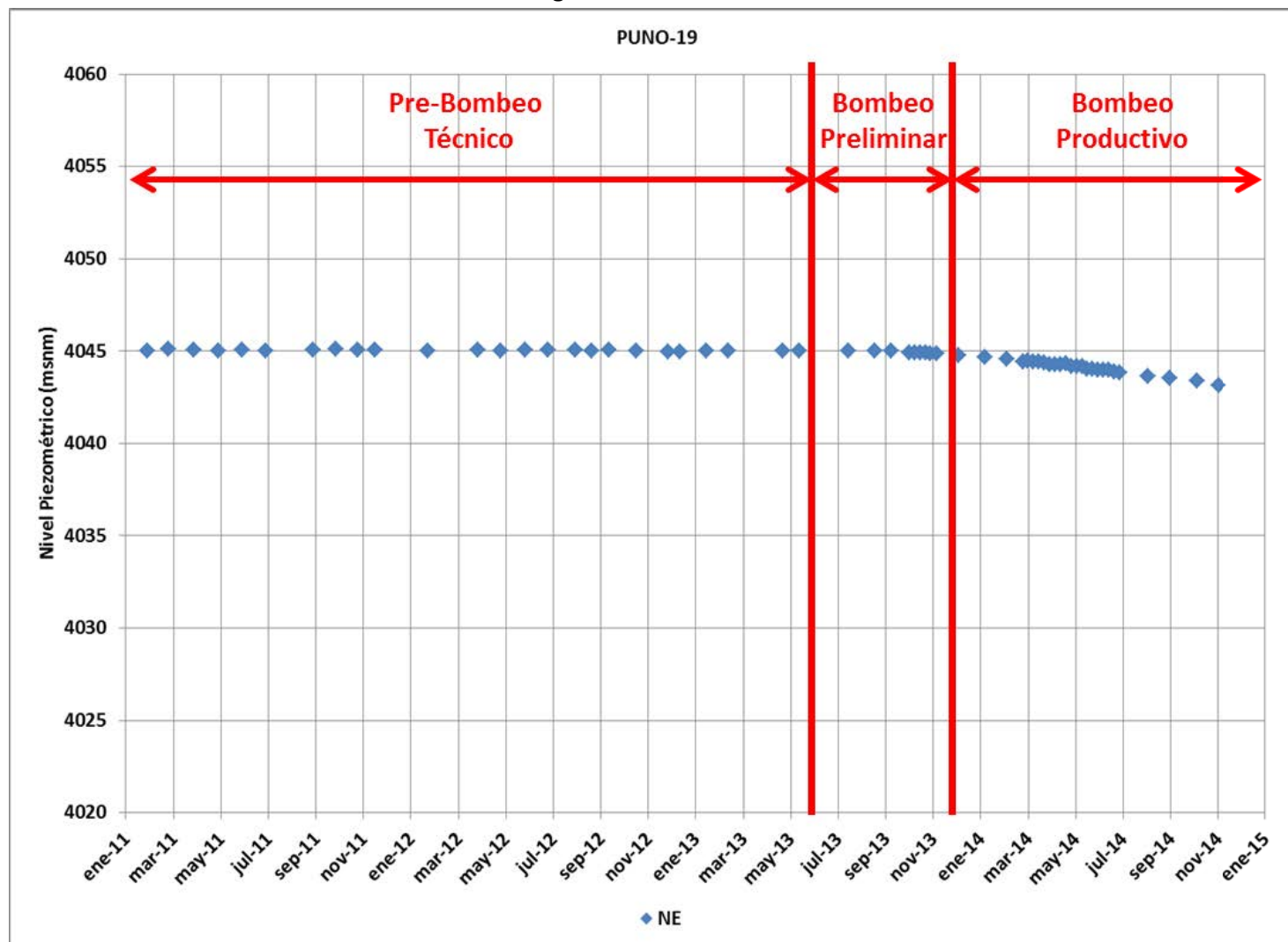
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.18  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-19B



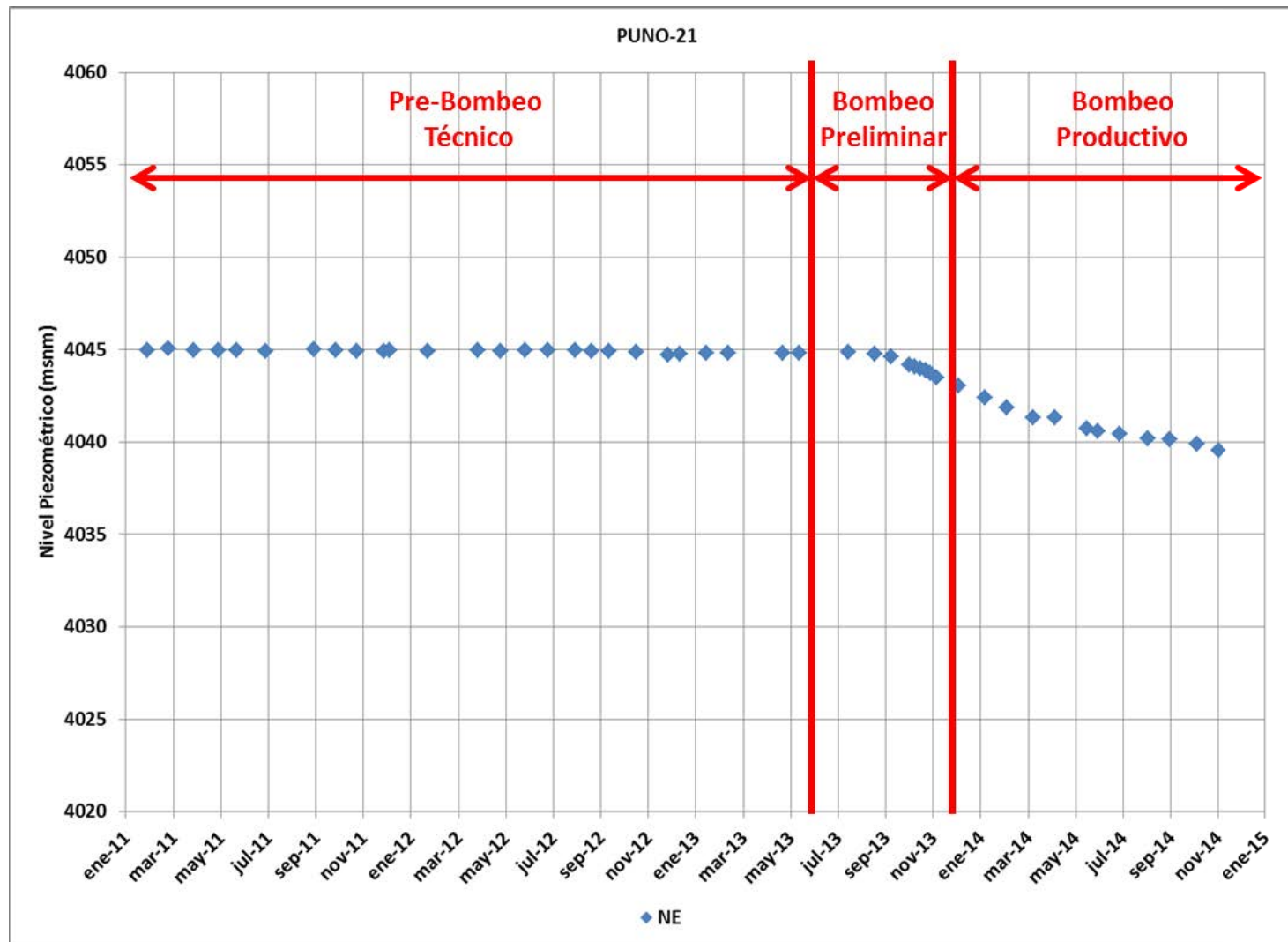
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.19  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-19



Fuente: Elaboración Propia

Figura G.20  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-21

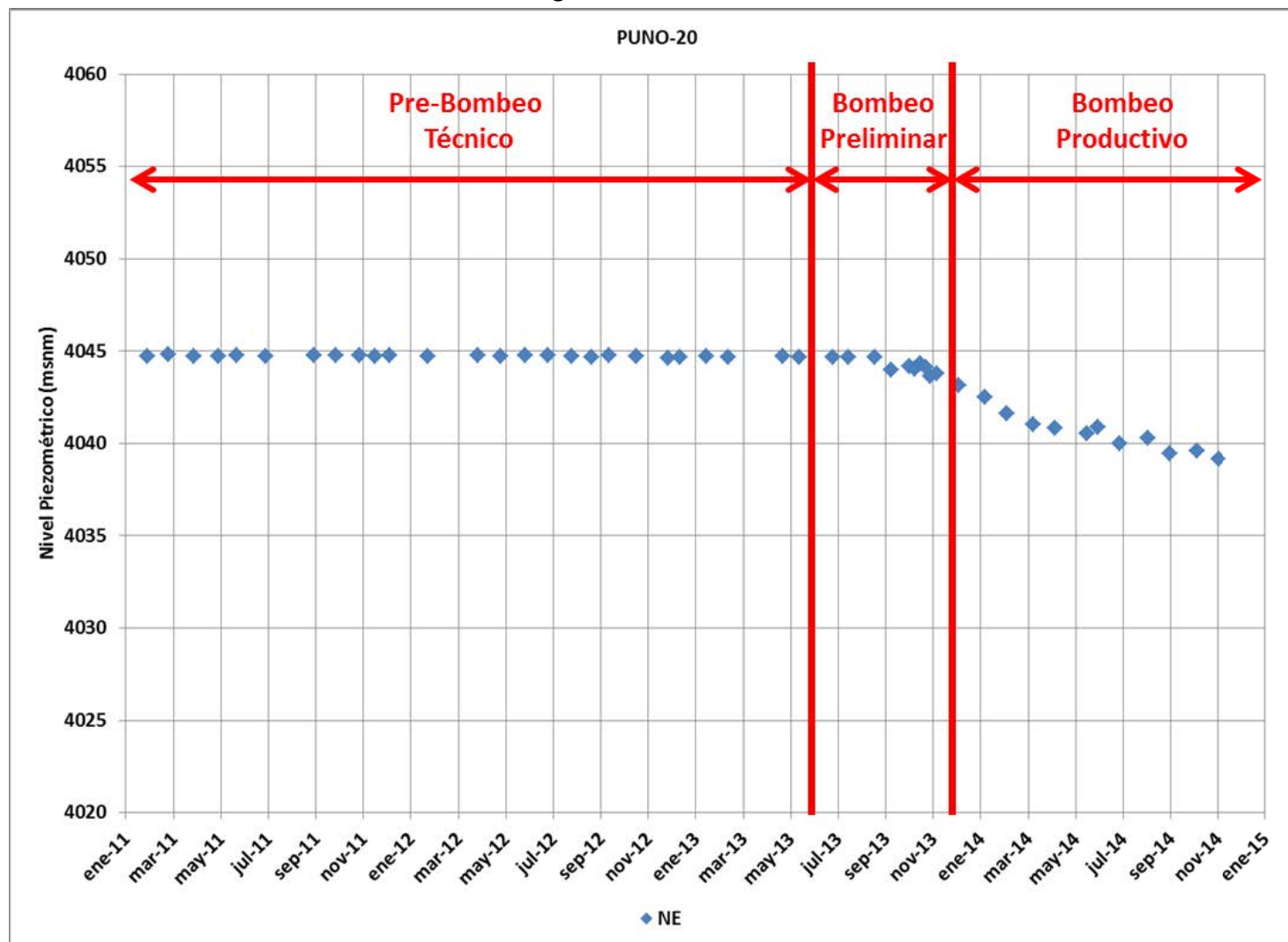


Fuente: Elaboración Propia



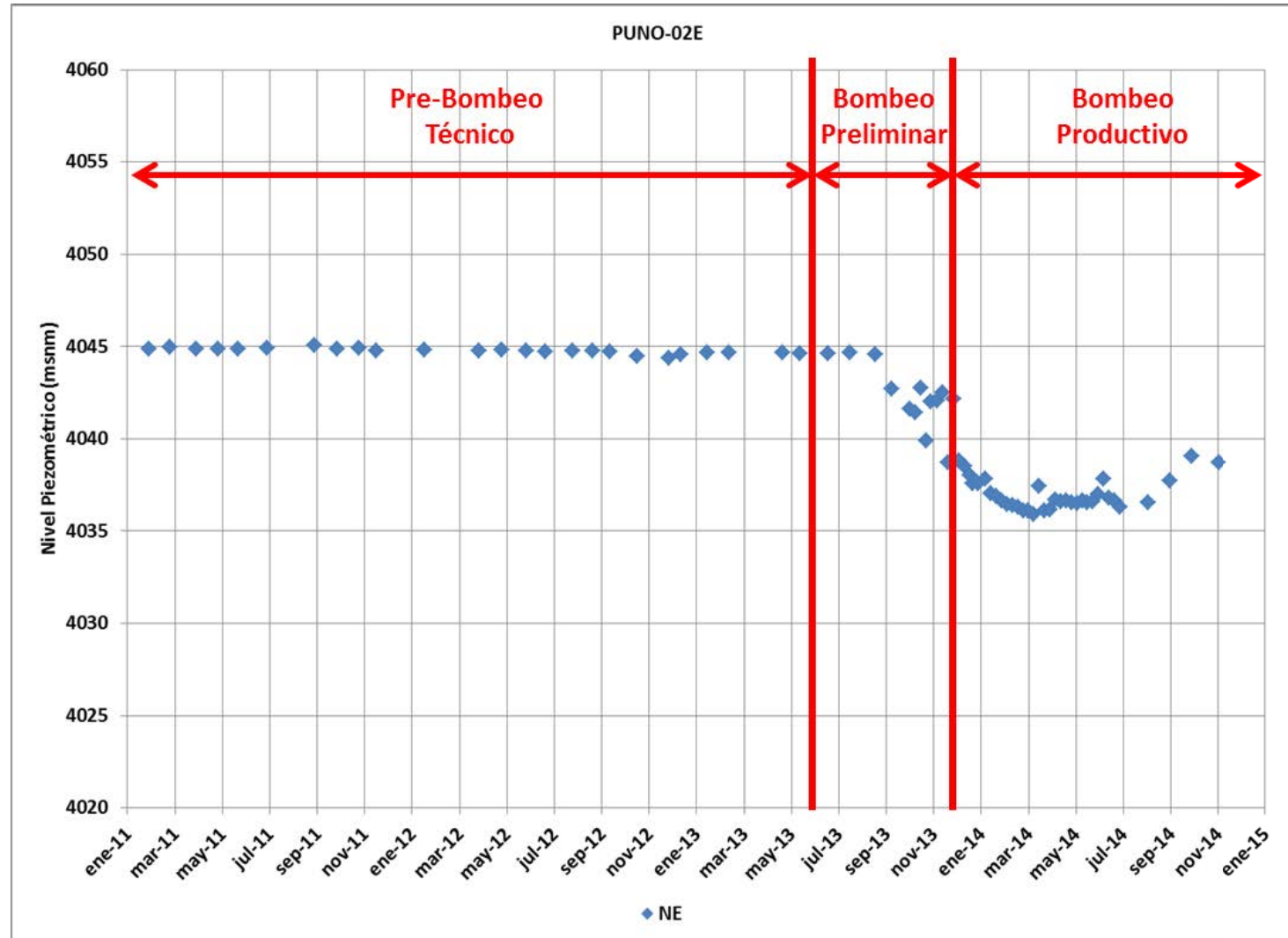


Figura G.22  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-20



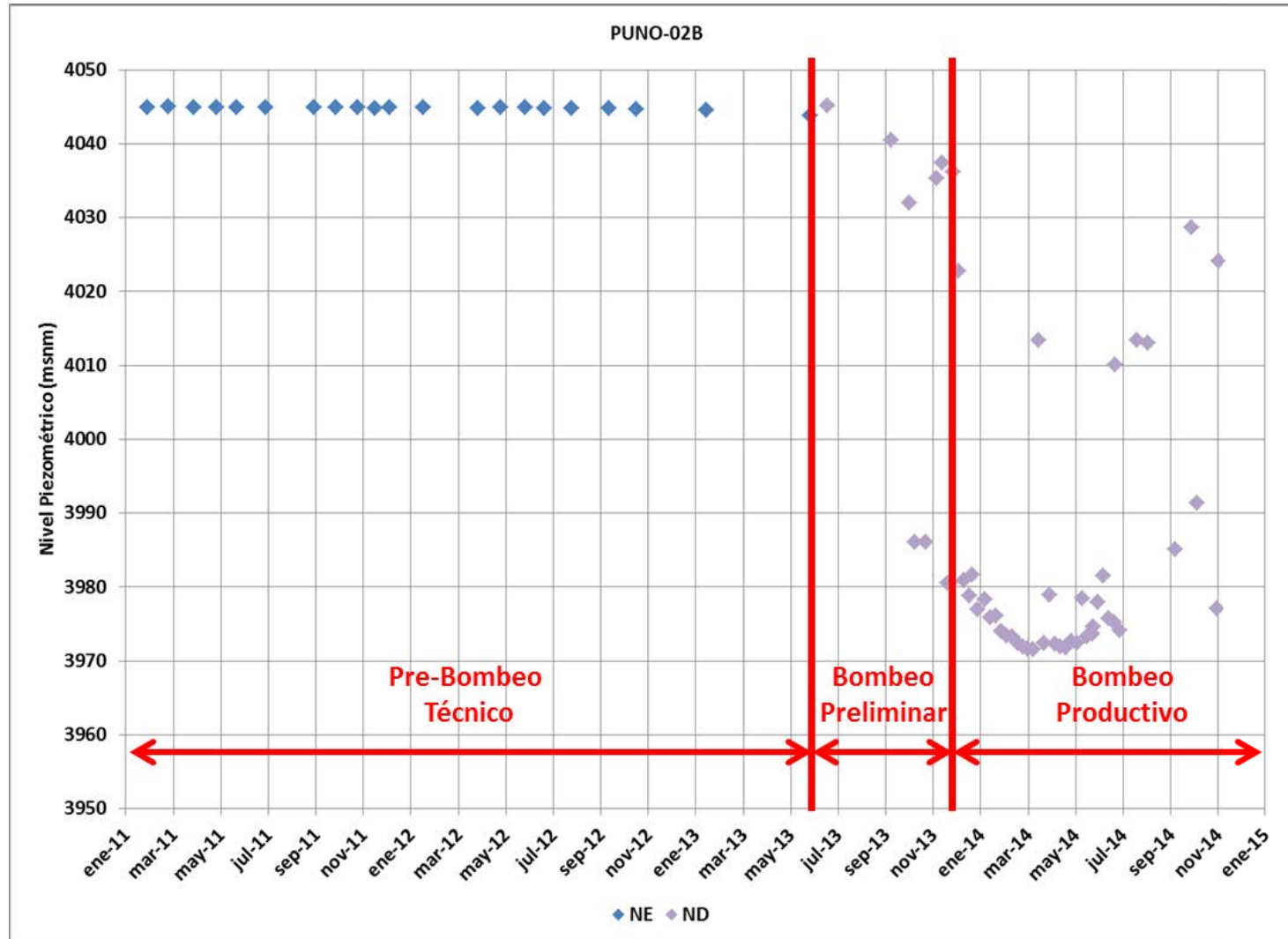
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.23  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-02E



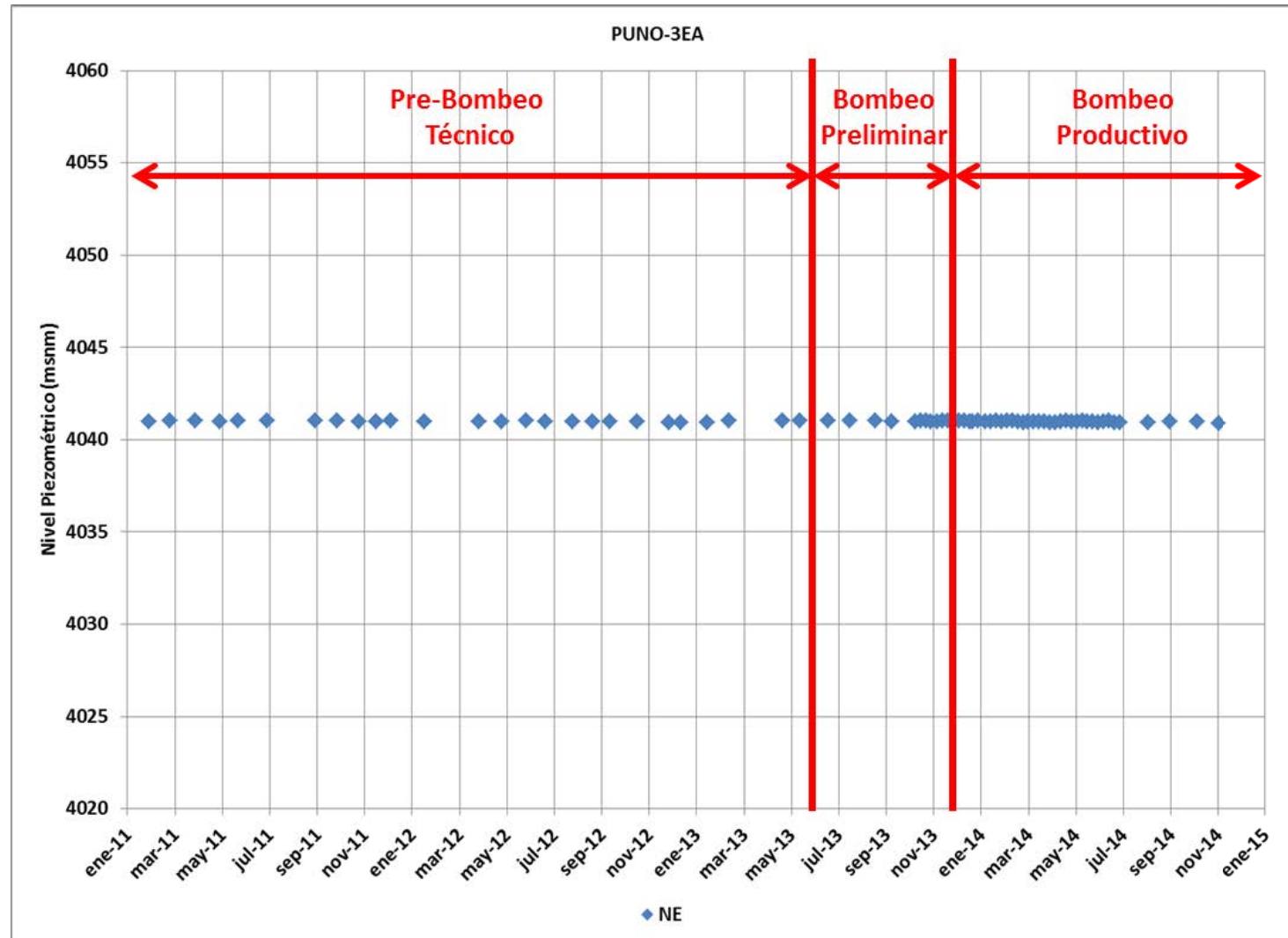
Fuente: Elaboración Propia

**Figura G.24**  
**Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-02B**



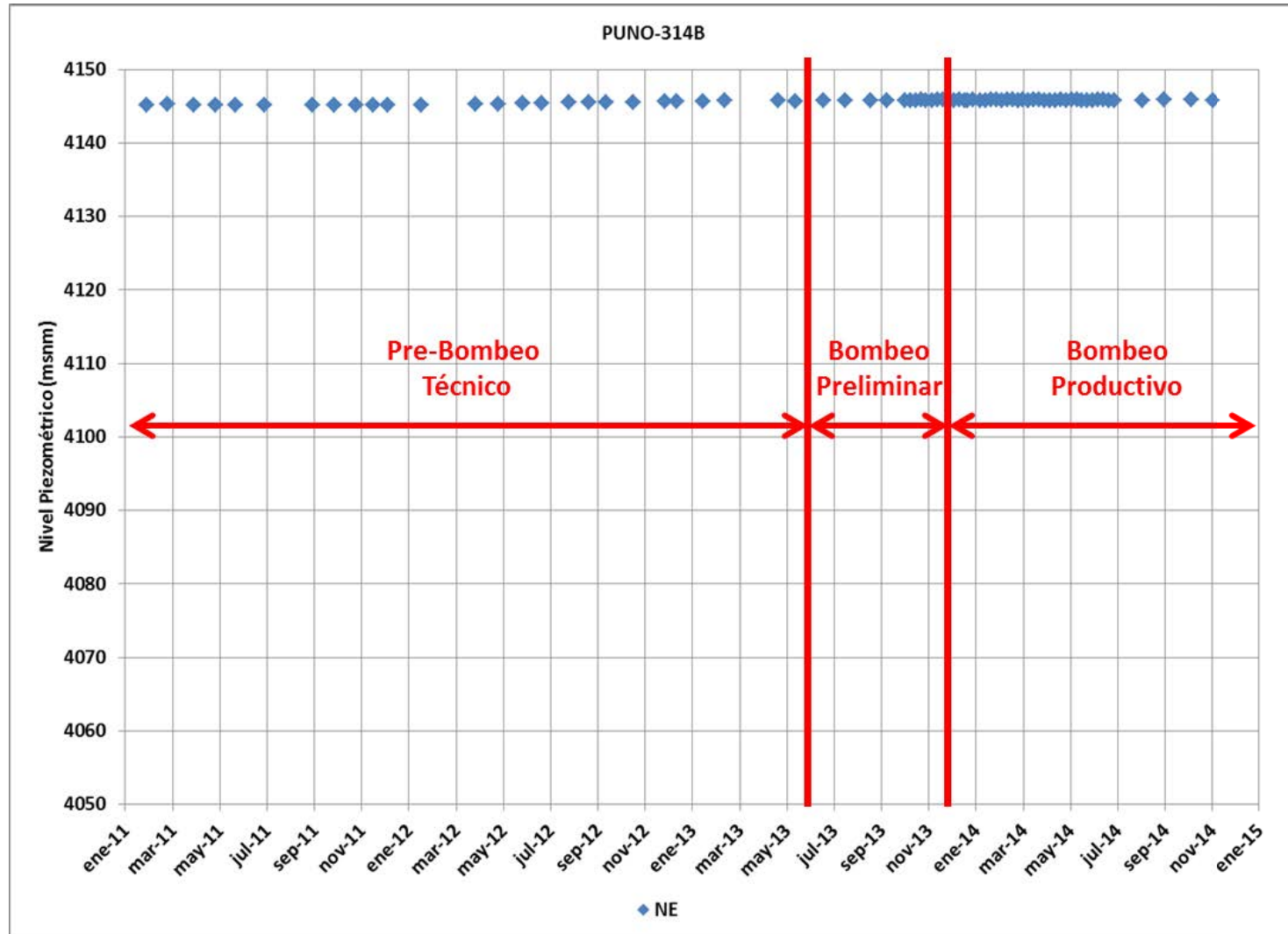
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.25  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-3EA



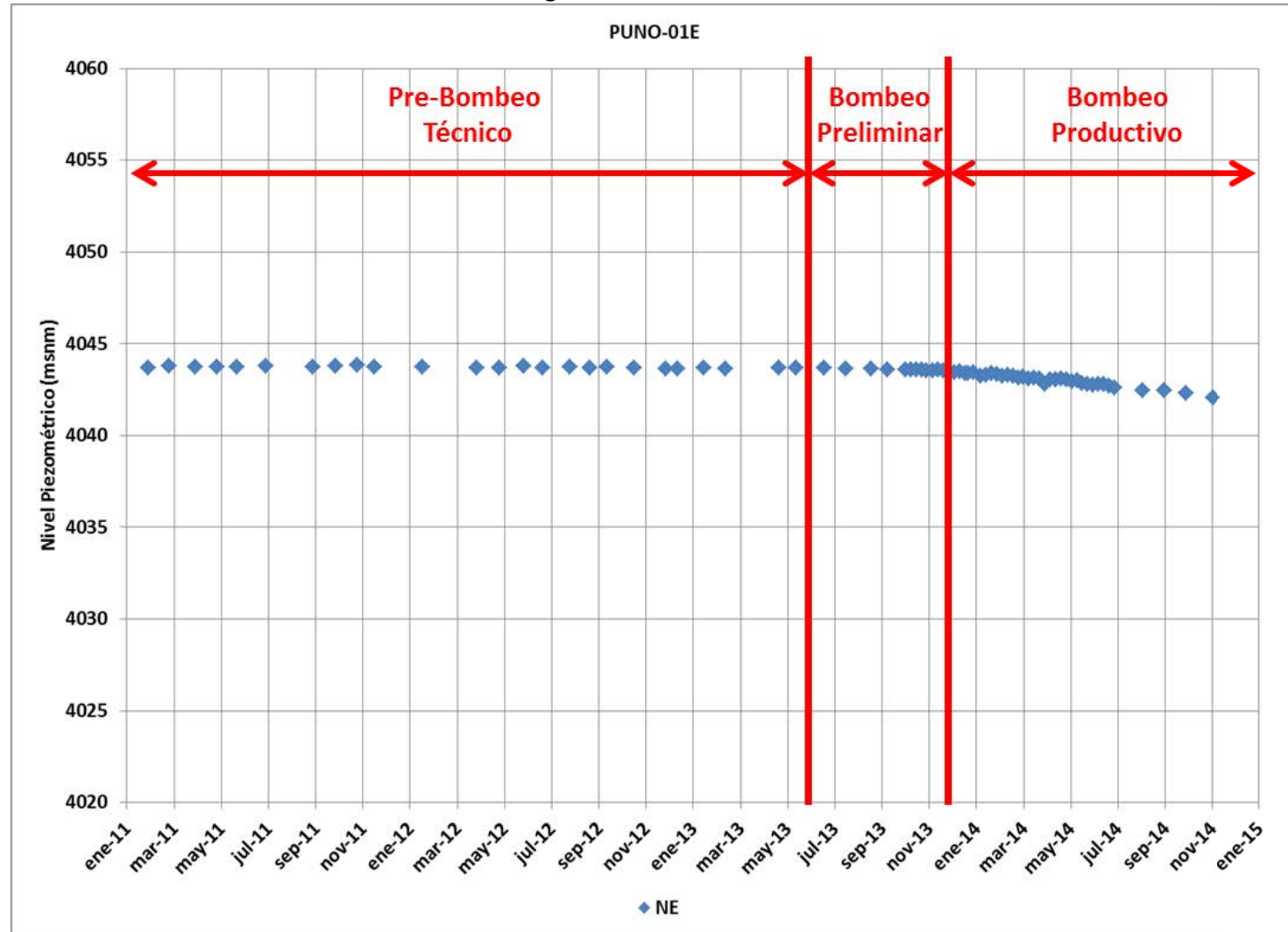
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.26  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-314B



Fuente: Elaboración Propia

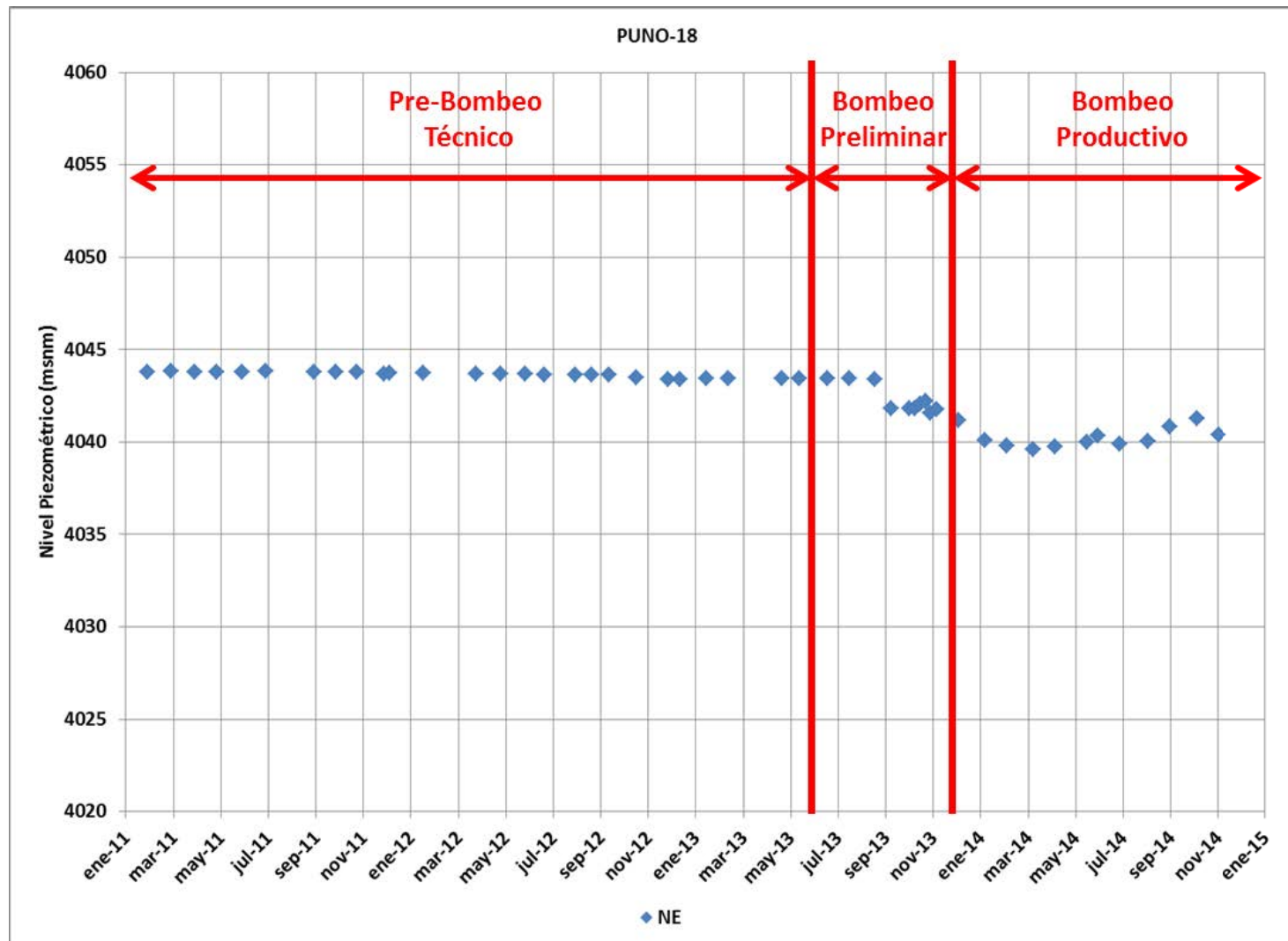
Figura G.27  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-01E



Fuente: Elaboración Propia

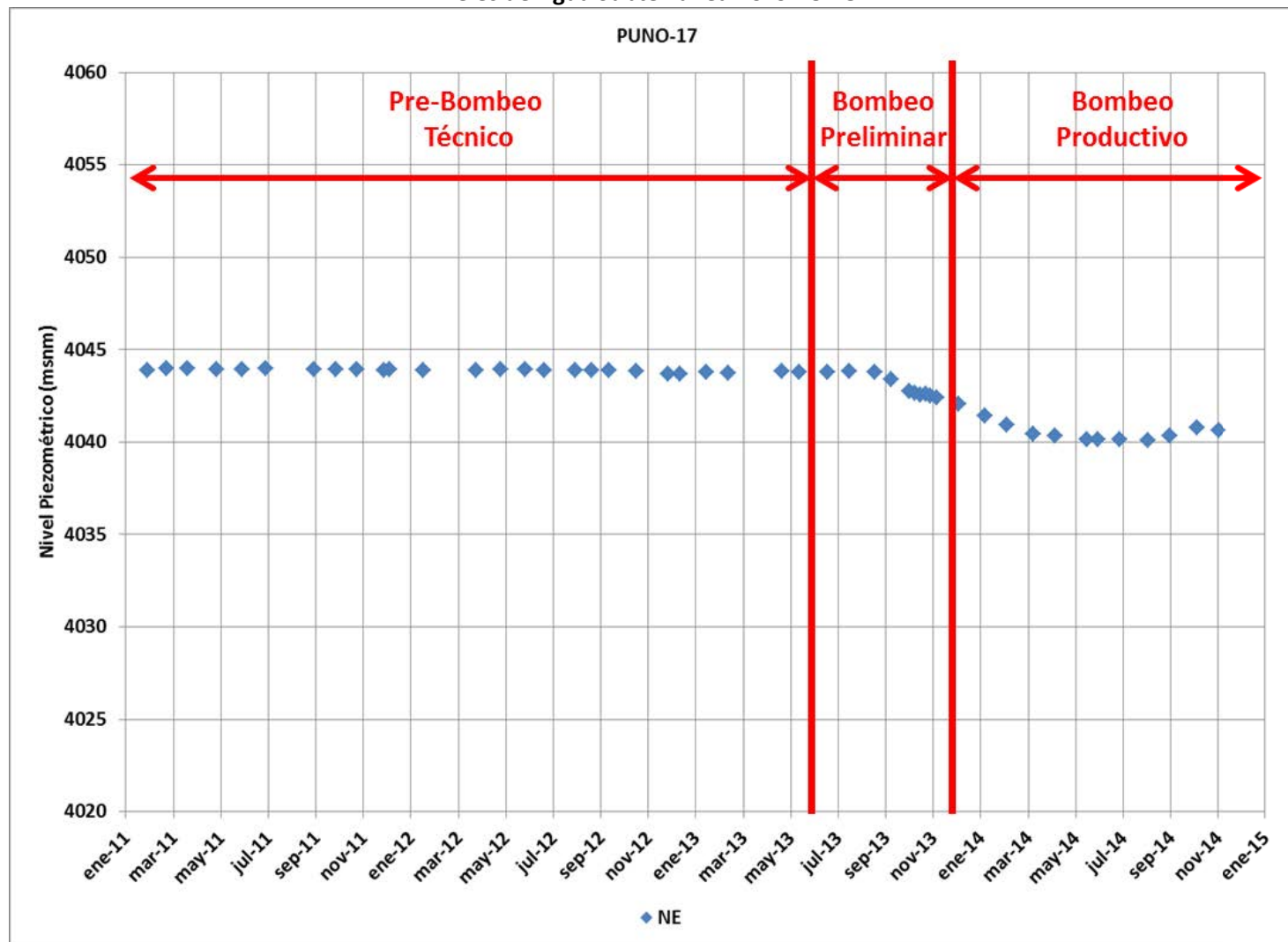


Figura G.28  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-18



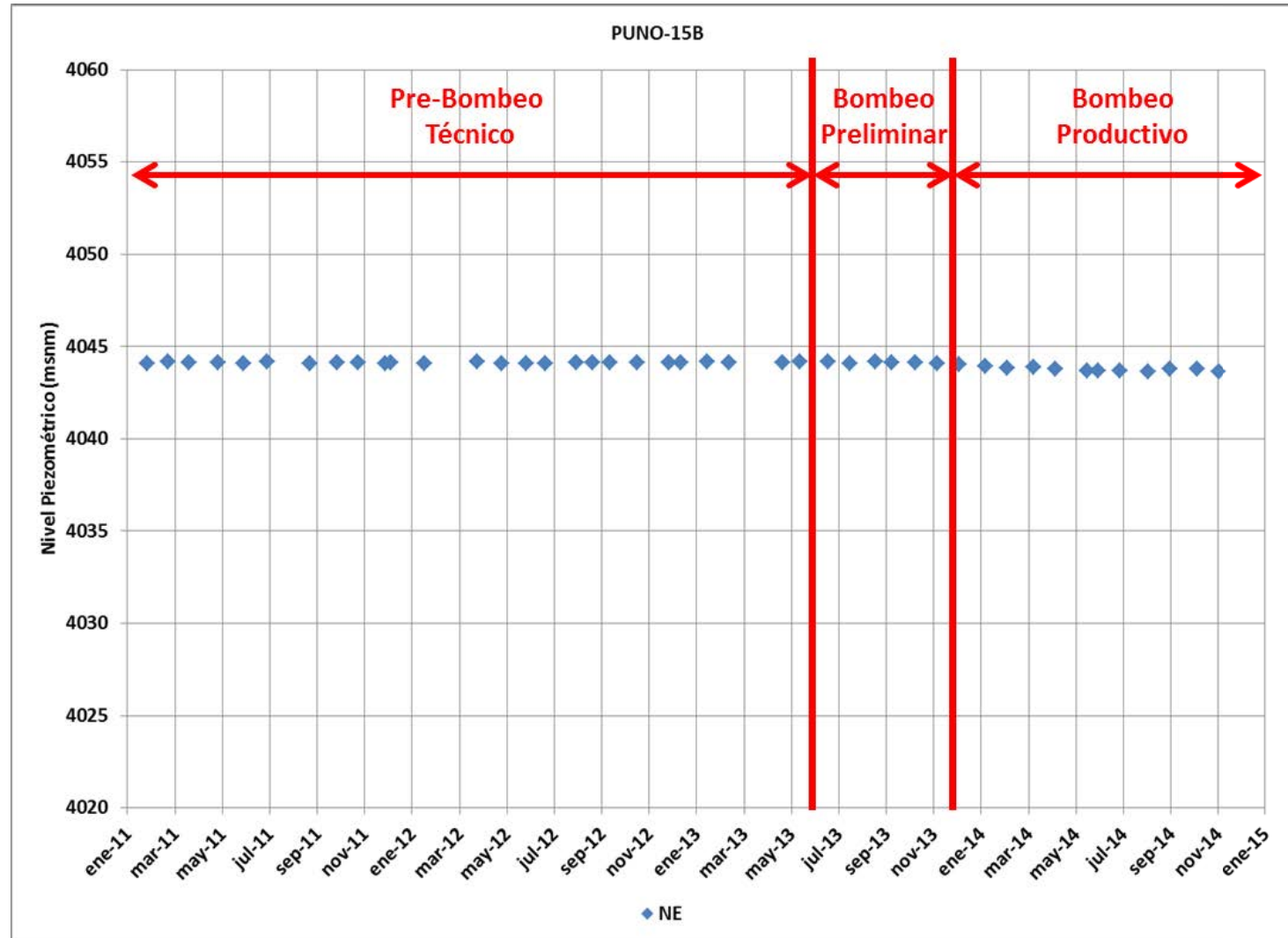
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.29  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-17



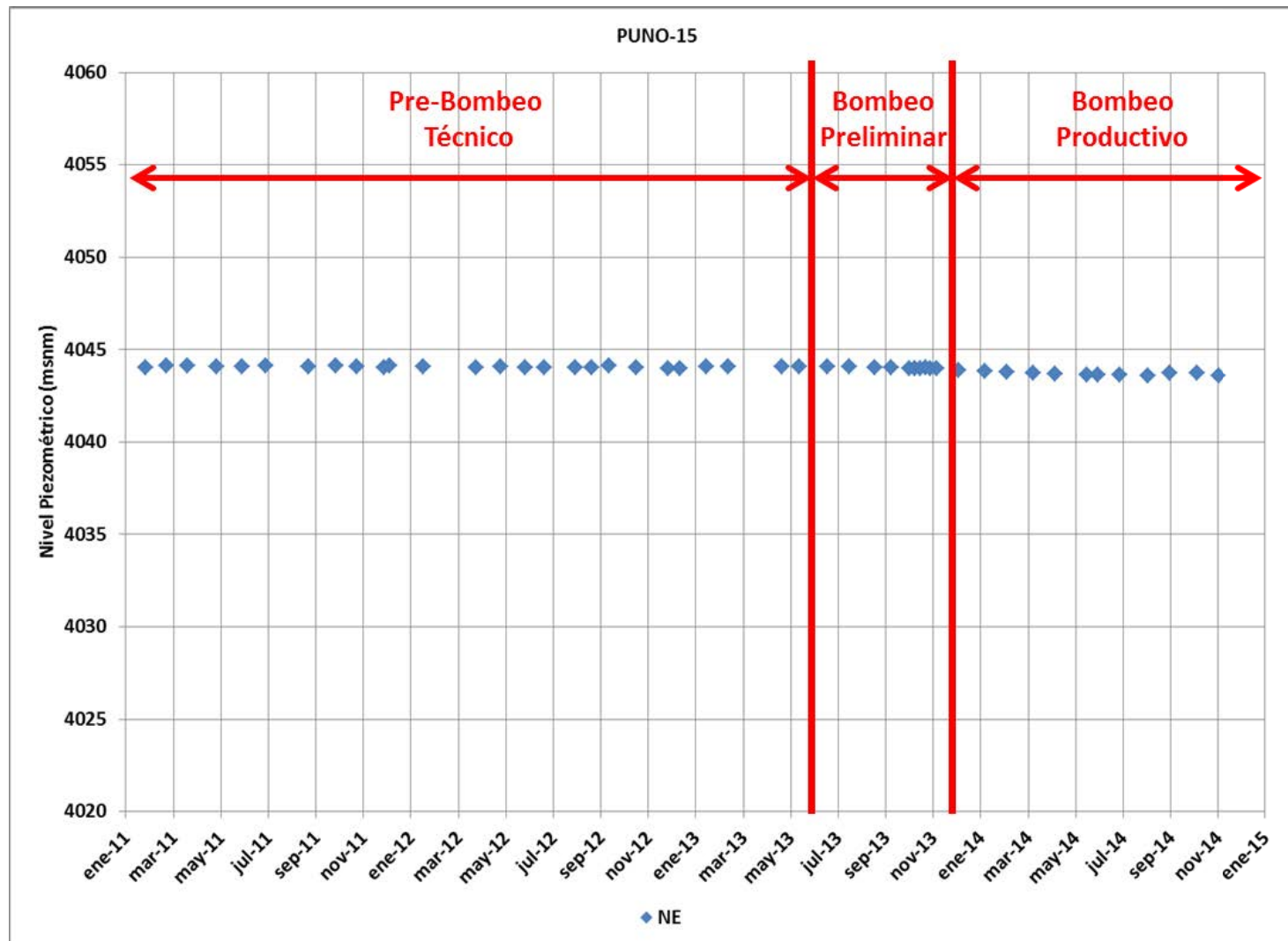
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.30  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-15B



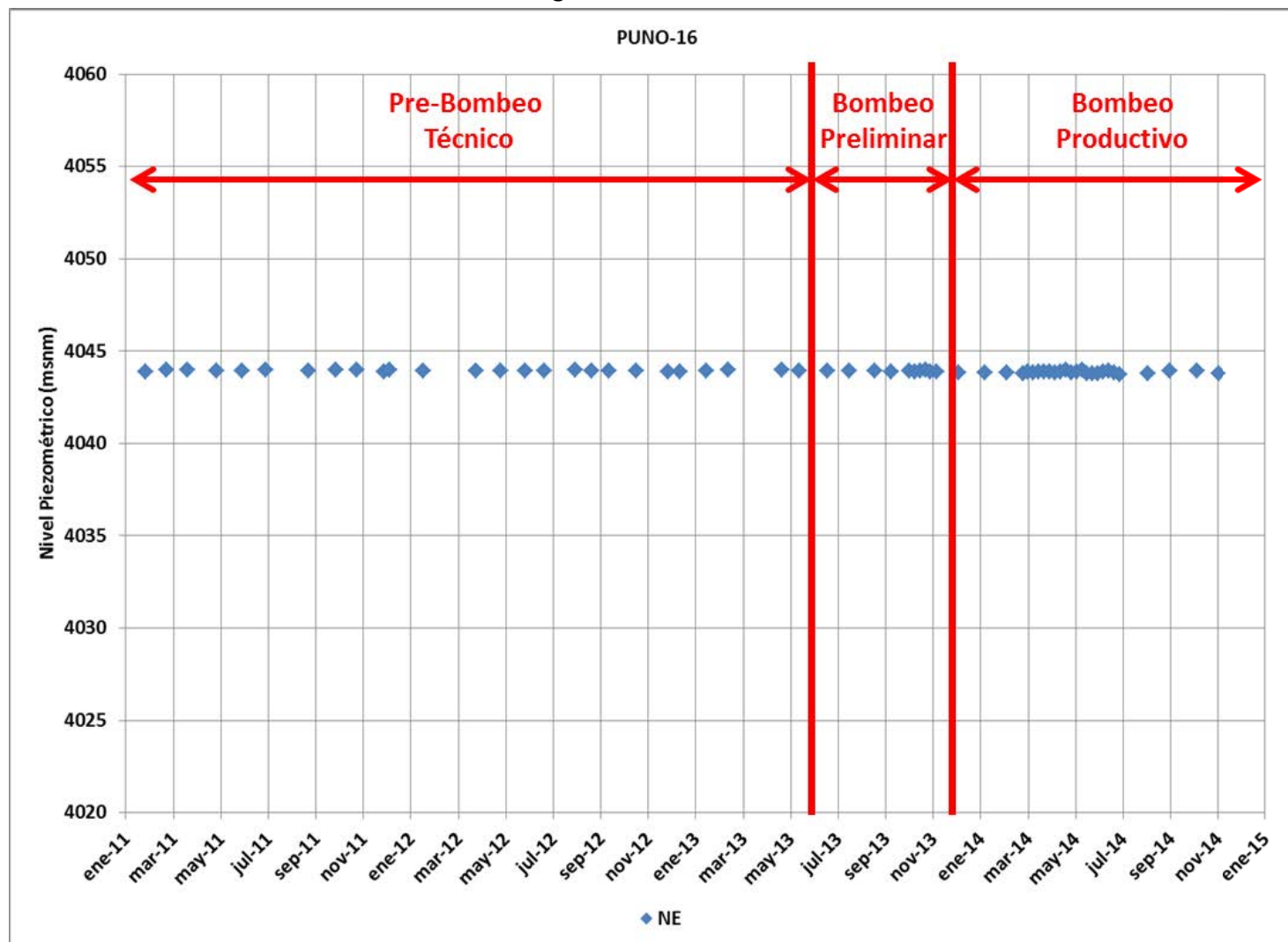
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.31  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-15



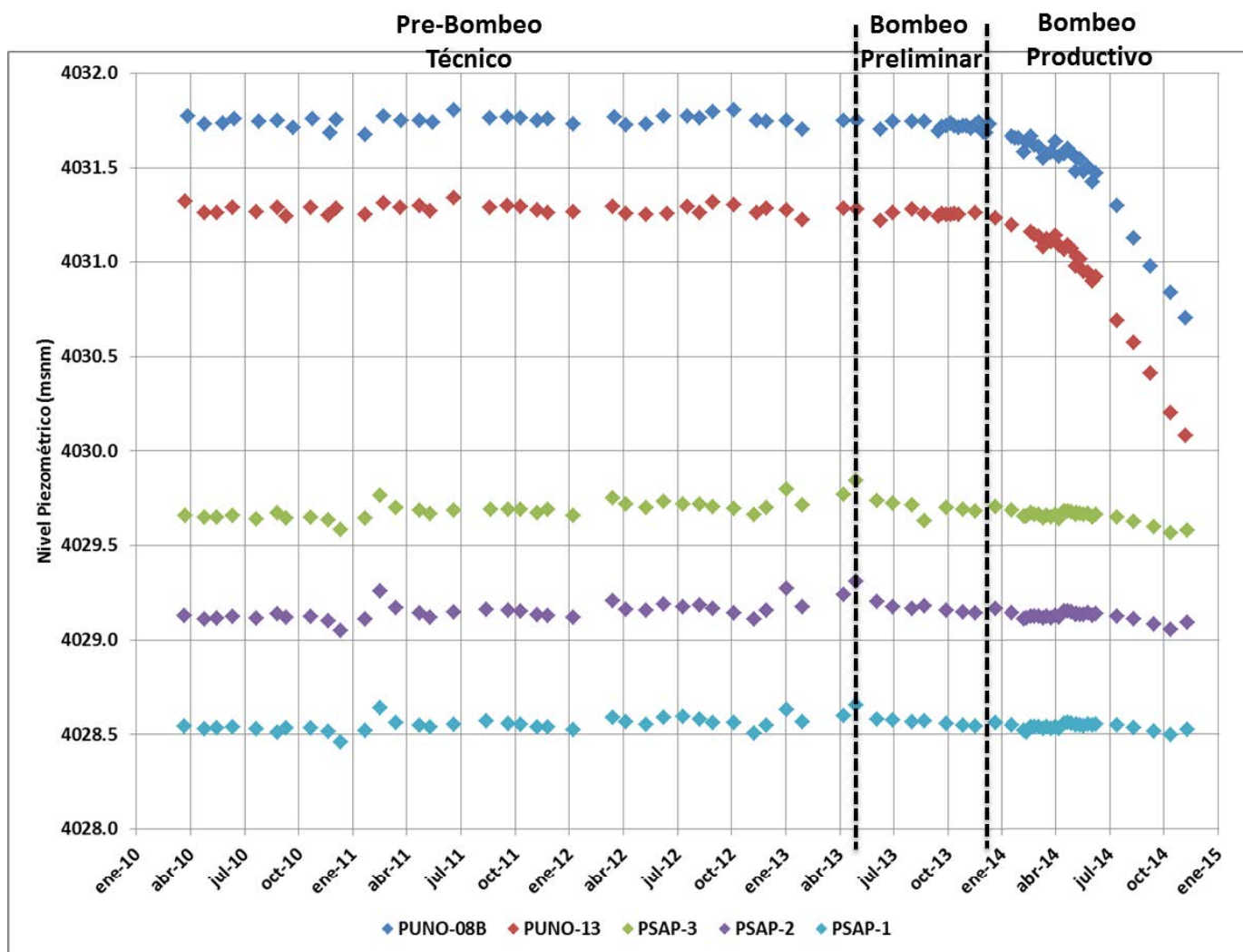
Fuente: Elaboración Propia

Figura G.32  
Niveles de Agua Subterránea Pozo PUNO-16



Fuente: Elaboración Propia

Figura G.33  
Niveles Agua Subterránea Sector Sapunta



Fuente: Elaboración Propia

## **ANEXO H**

# **RESULTADOS CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DESCENSOS PAMPA PUNO**

**REV B**

**MARZO 2015**

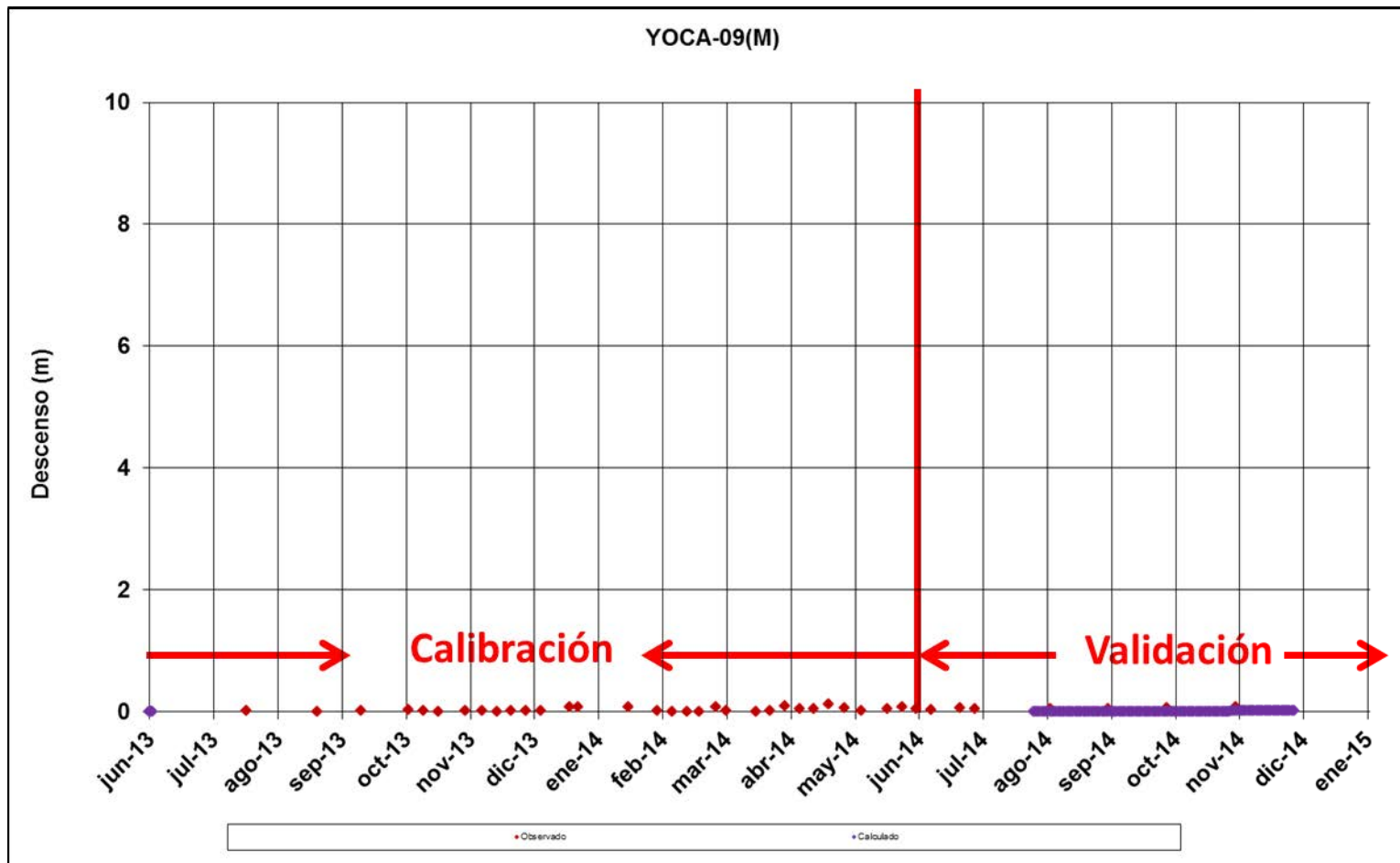
**PREPARADA POR**



**HIDROGEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE**

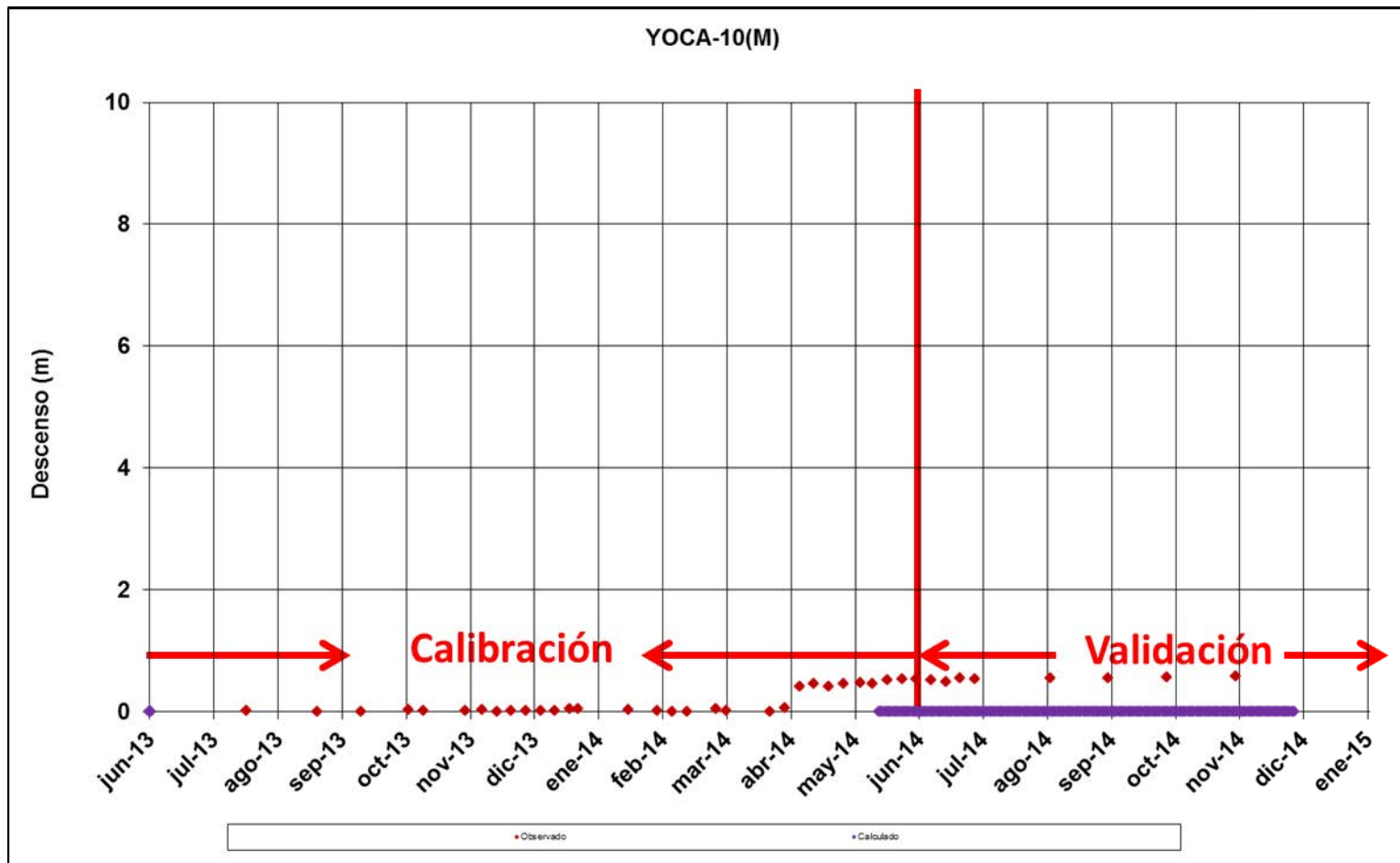


Figura H.1  
Descensos de Niveles Simulados y Observados YOCA-09 – Sector Norte



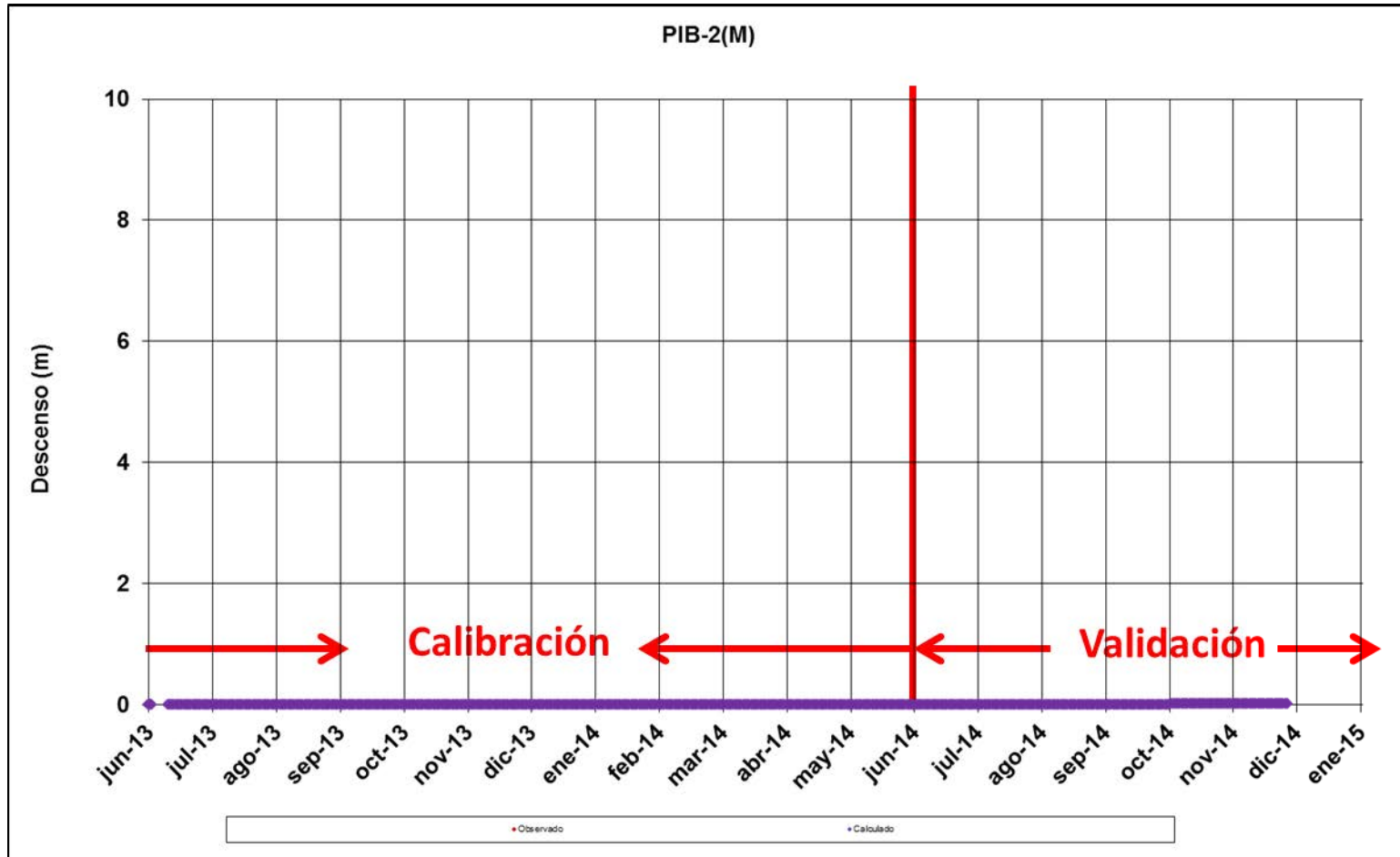
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.2  
Descensos de Niveles Simulados y Observados YOCA-10 – Sector Norte



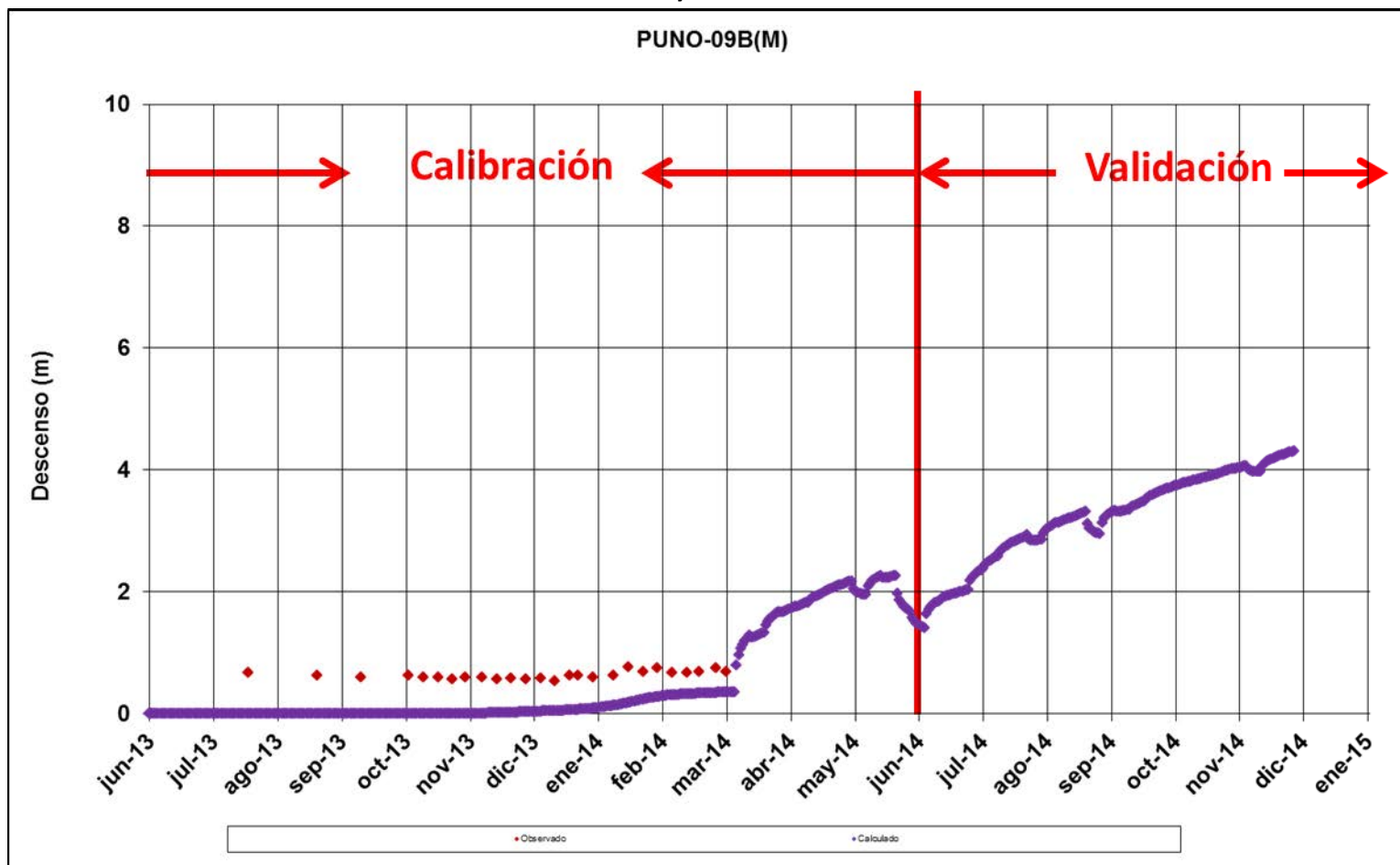
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.3  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PIB-2 – Sector Norte



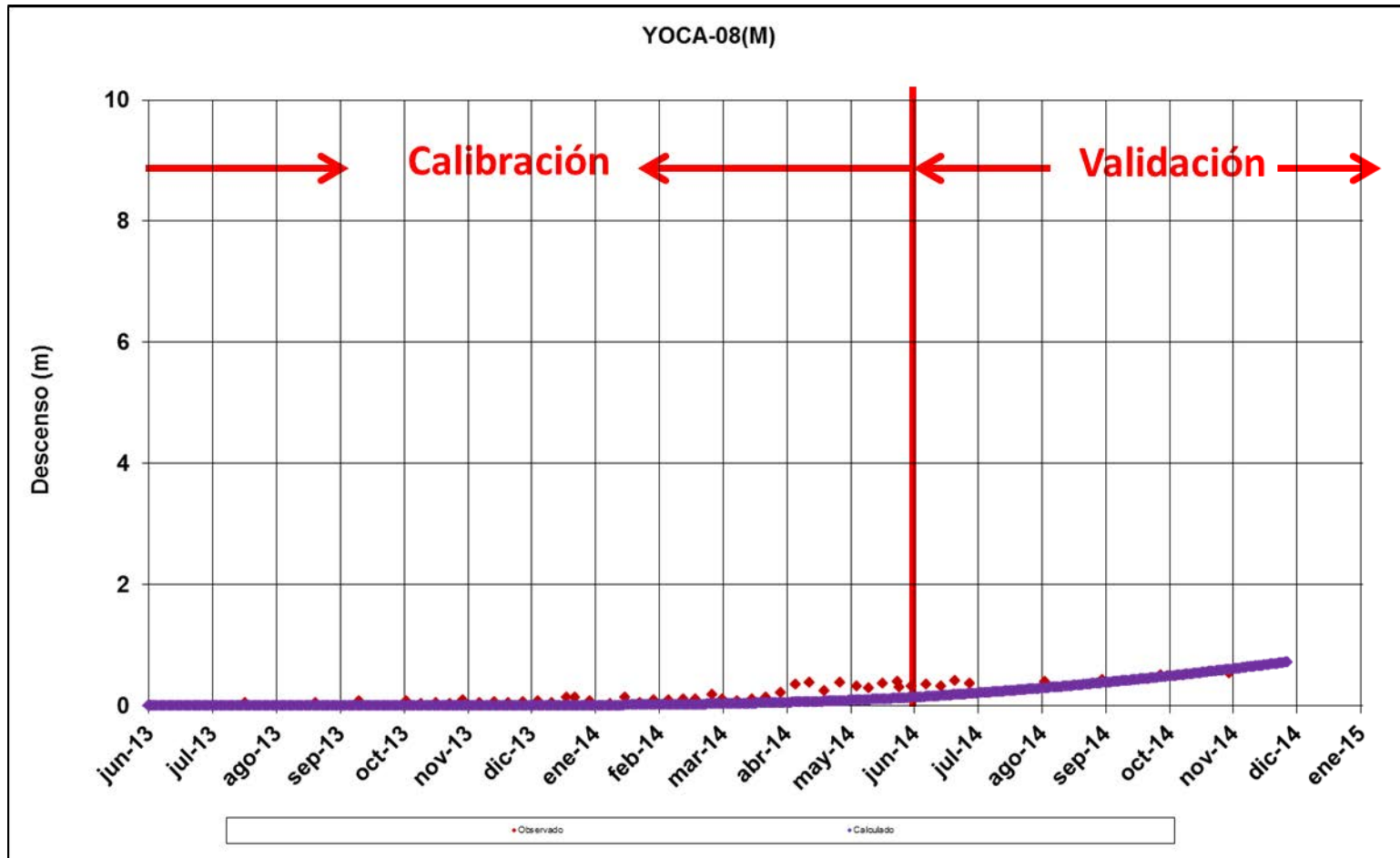
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.4  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-09B – Sector Norte



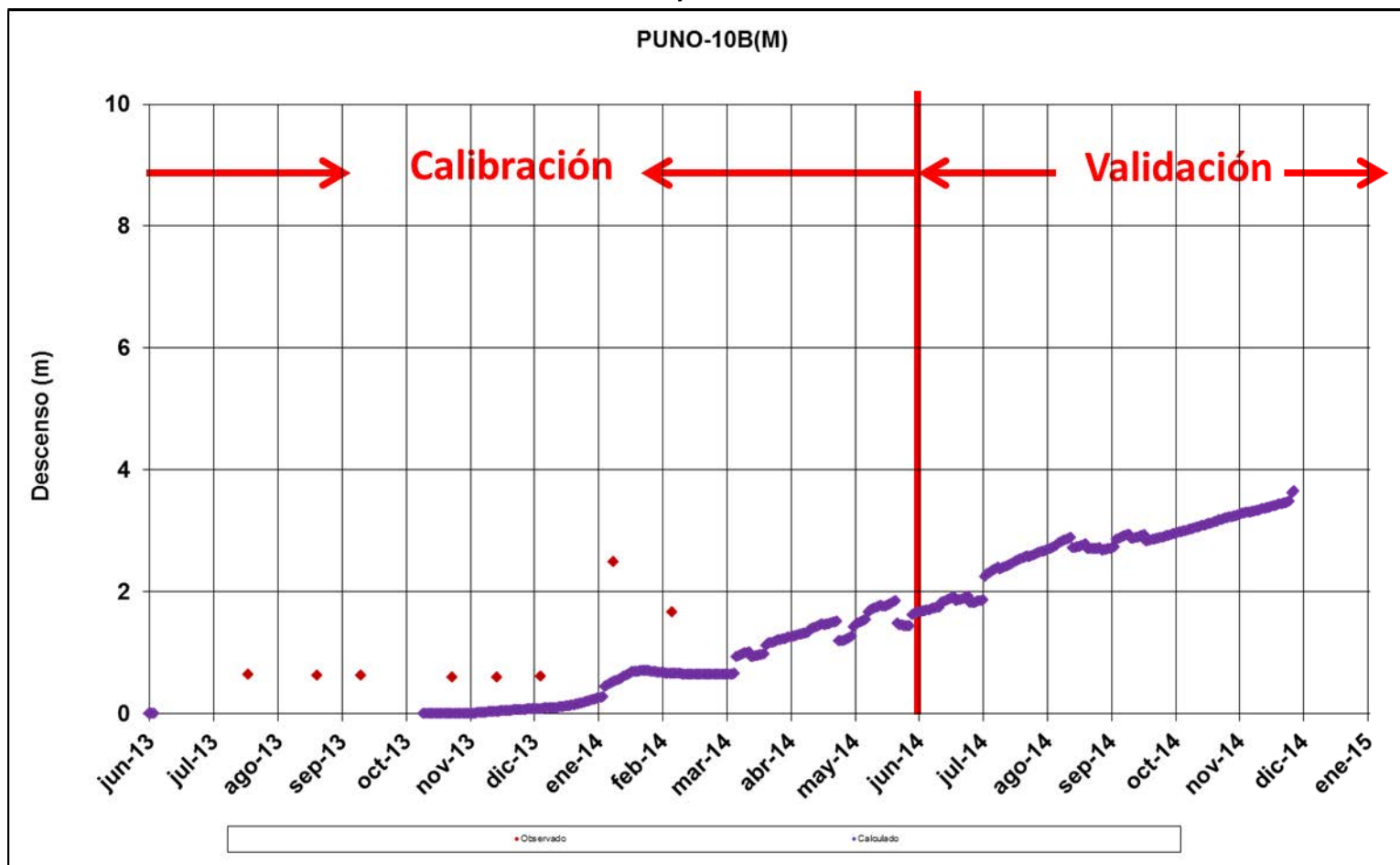
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.5  
Descensos de Niveles Simulados y Observados YOCA-08 – Sector Norte



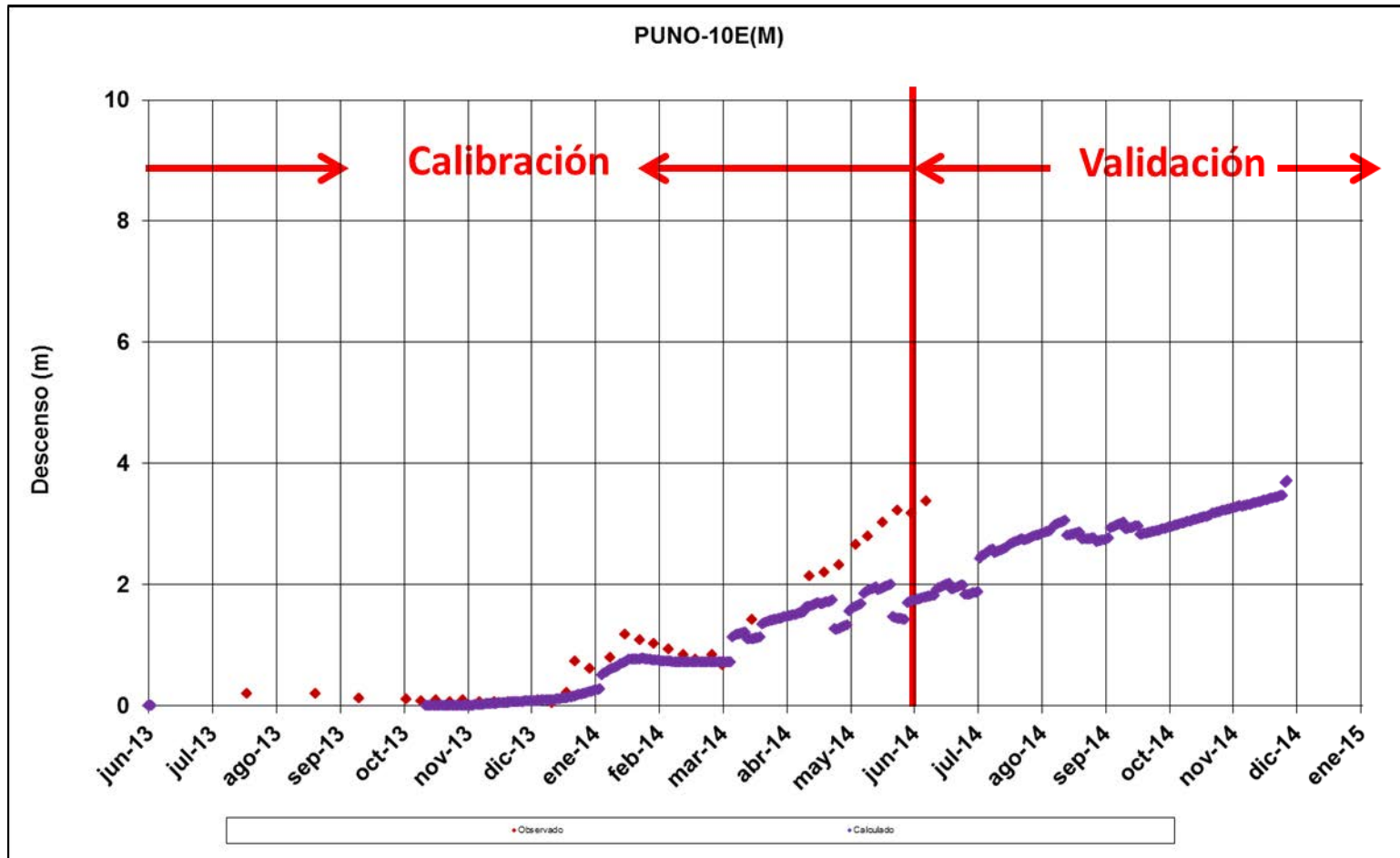
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.6  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-10B – Sector Norte



Fuente: Elaboración Propia

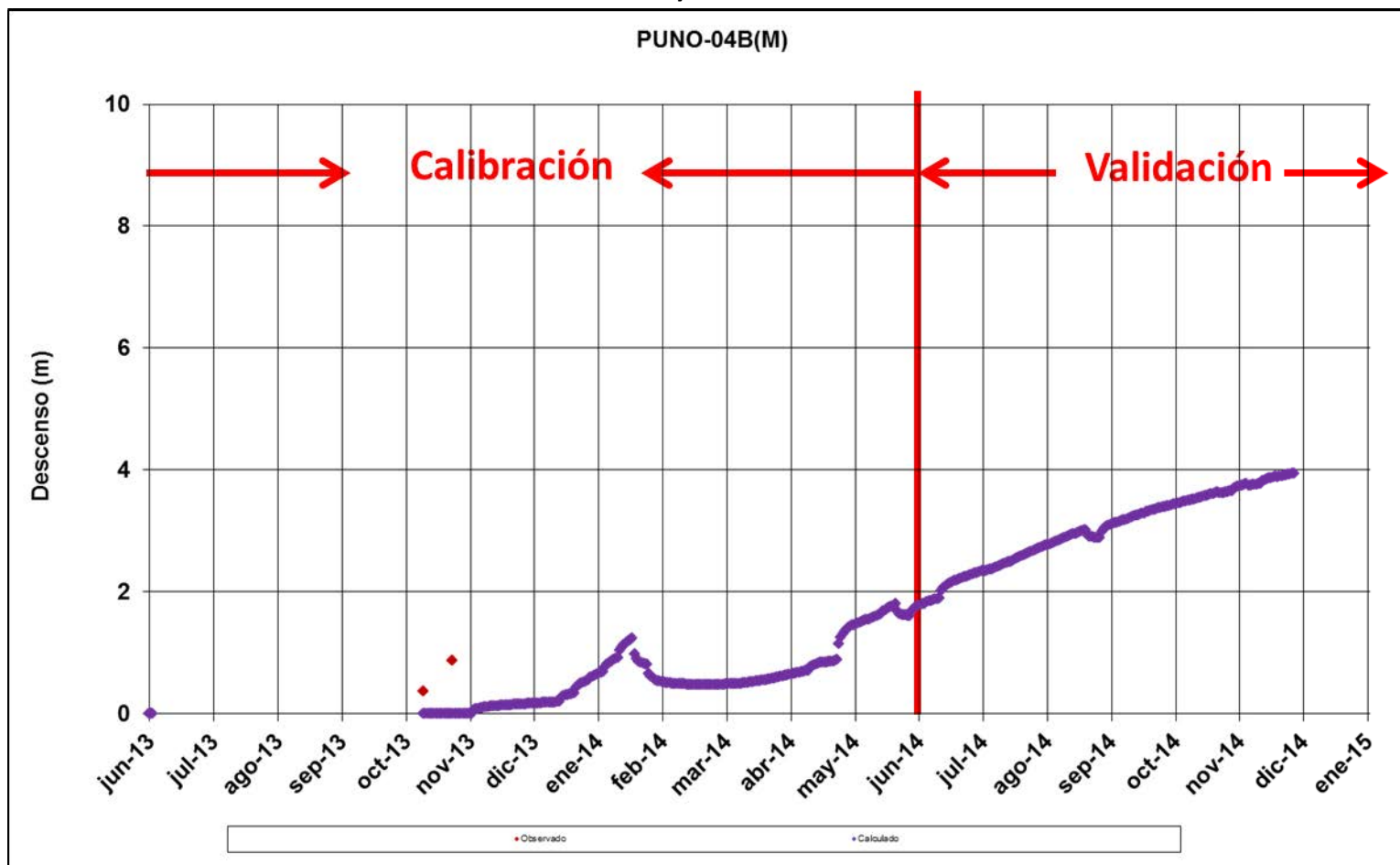
Figura H.7  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-10E – Sector Norte



Fuente: Elaboración Propia

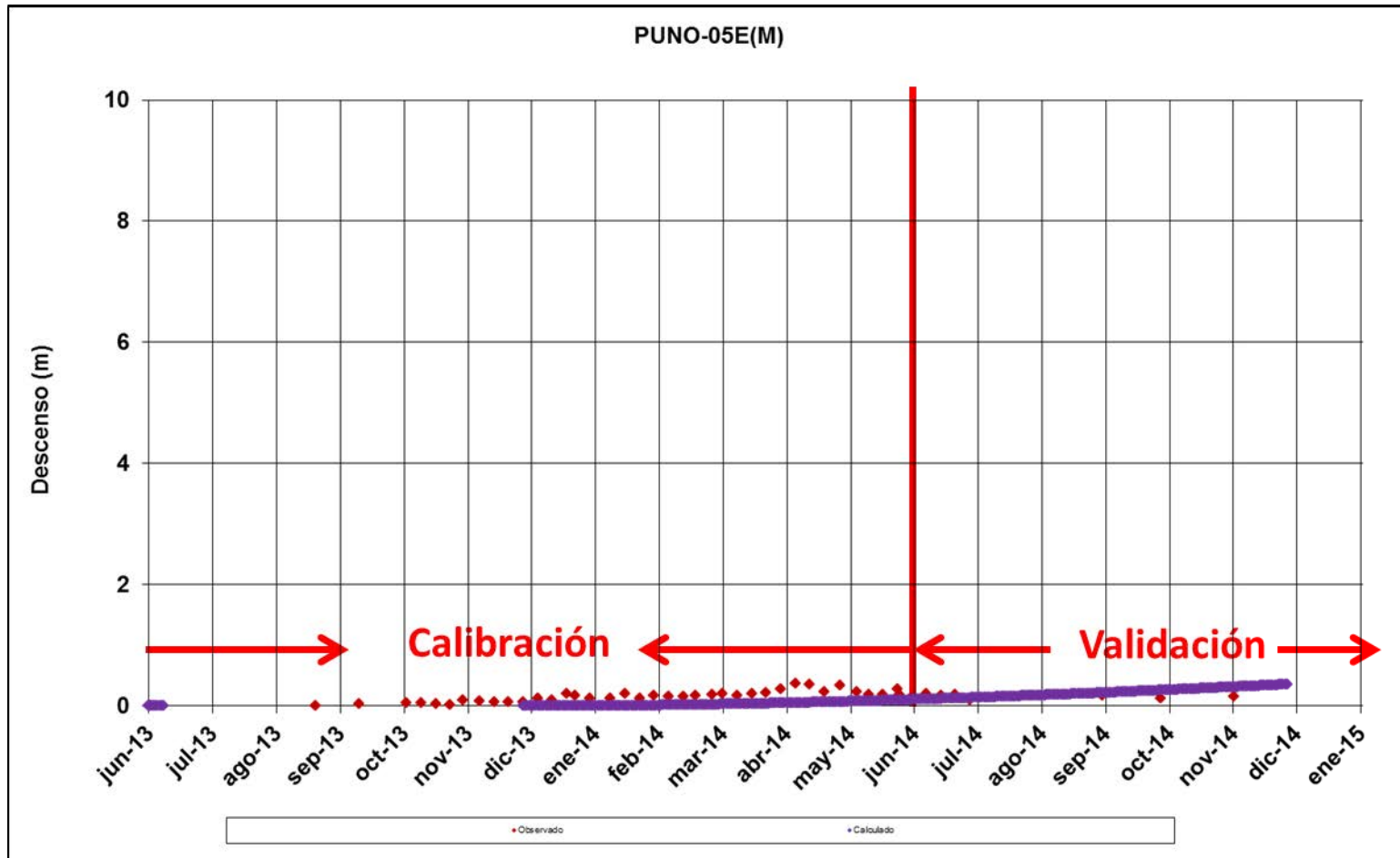


Figura H.8  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-04B – Sector Norte



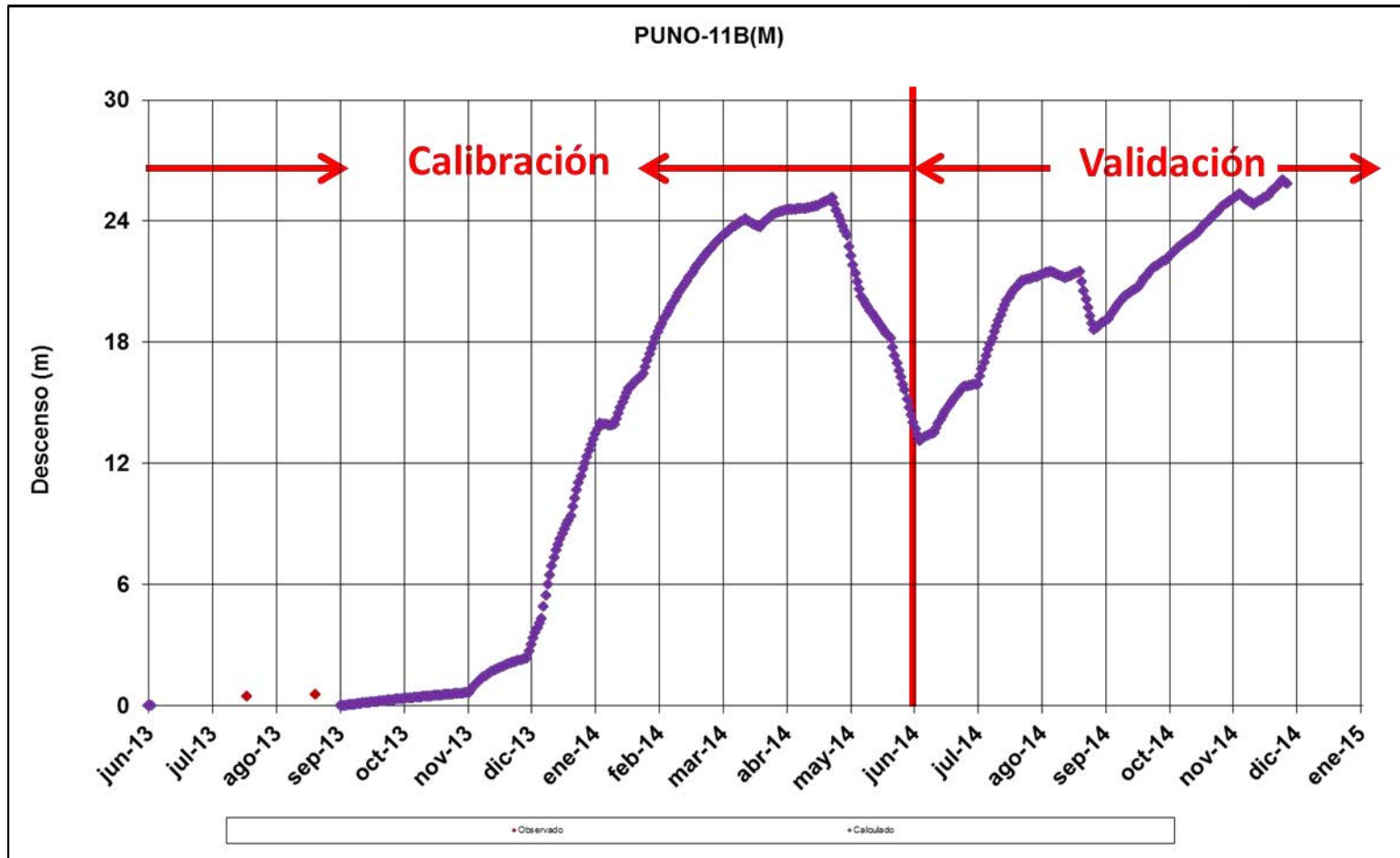
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.9  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-05E – Sector Norte



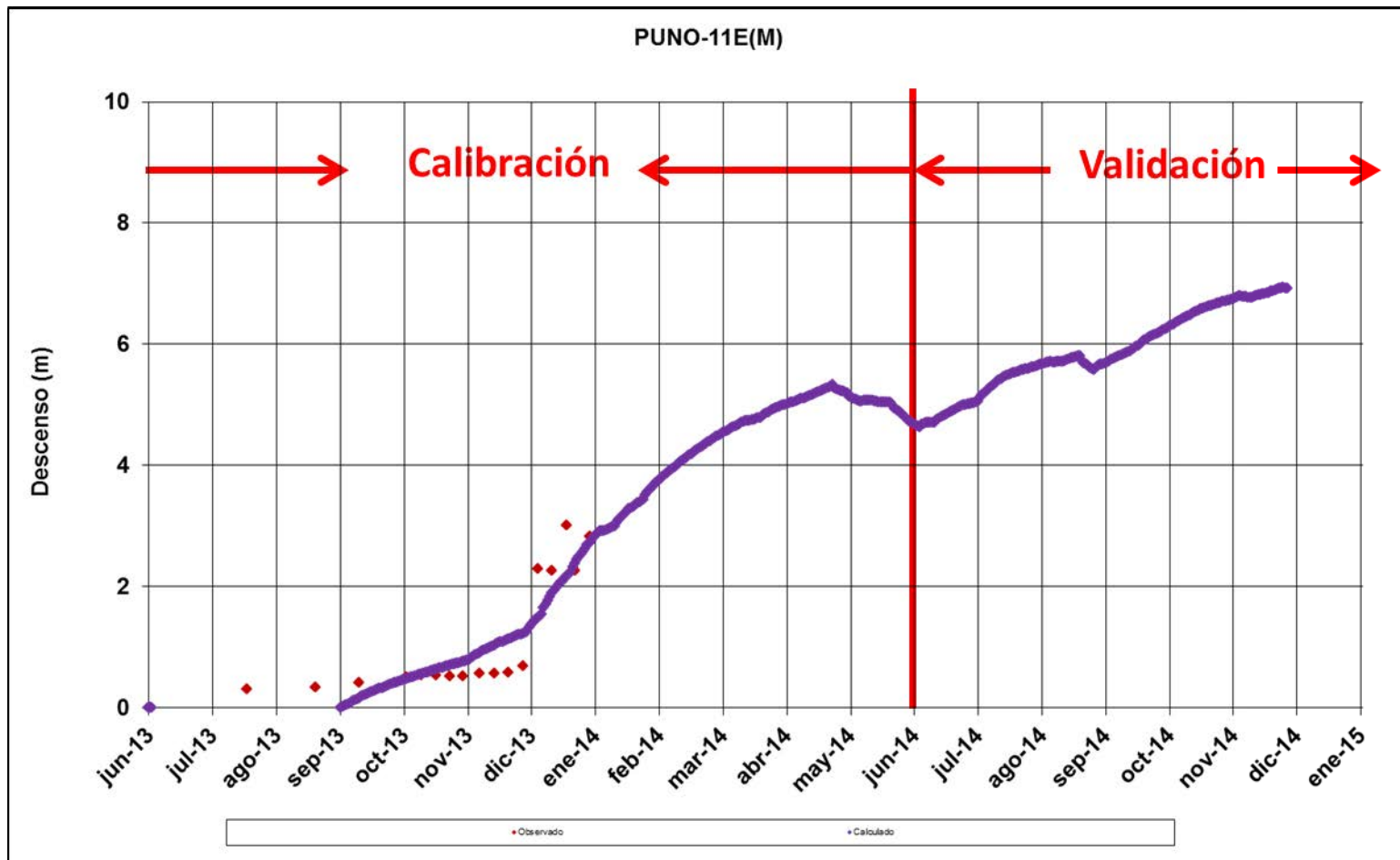
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.10  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-11B – Sector Norte



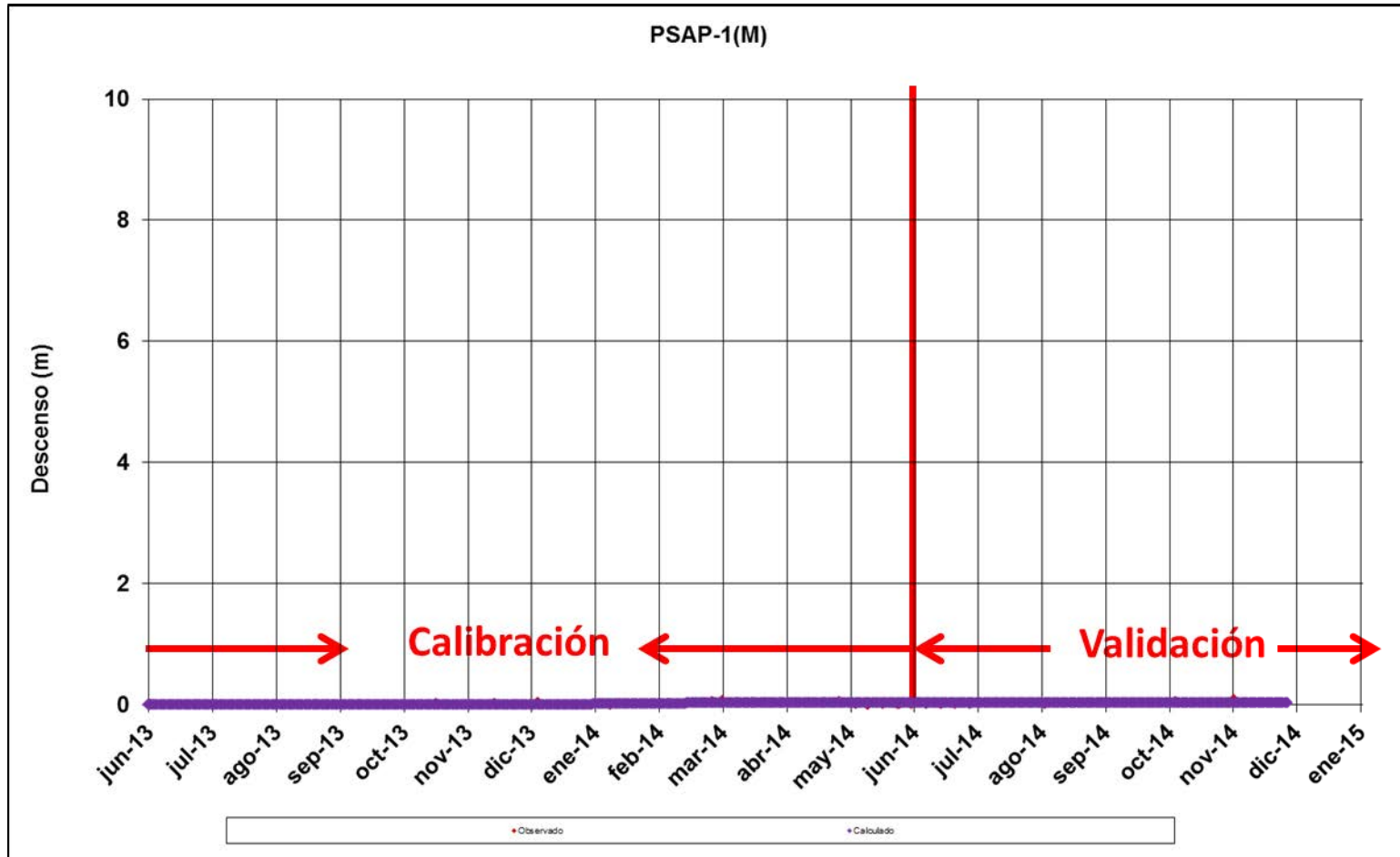
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.11  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-11E – Sector Norte



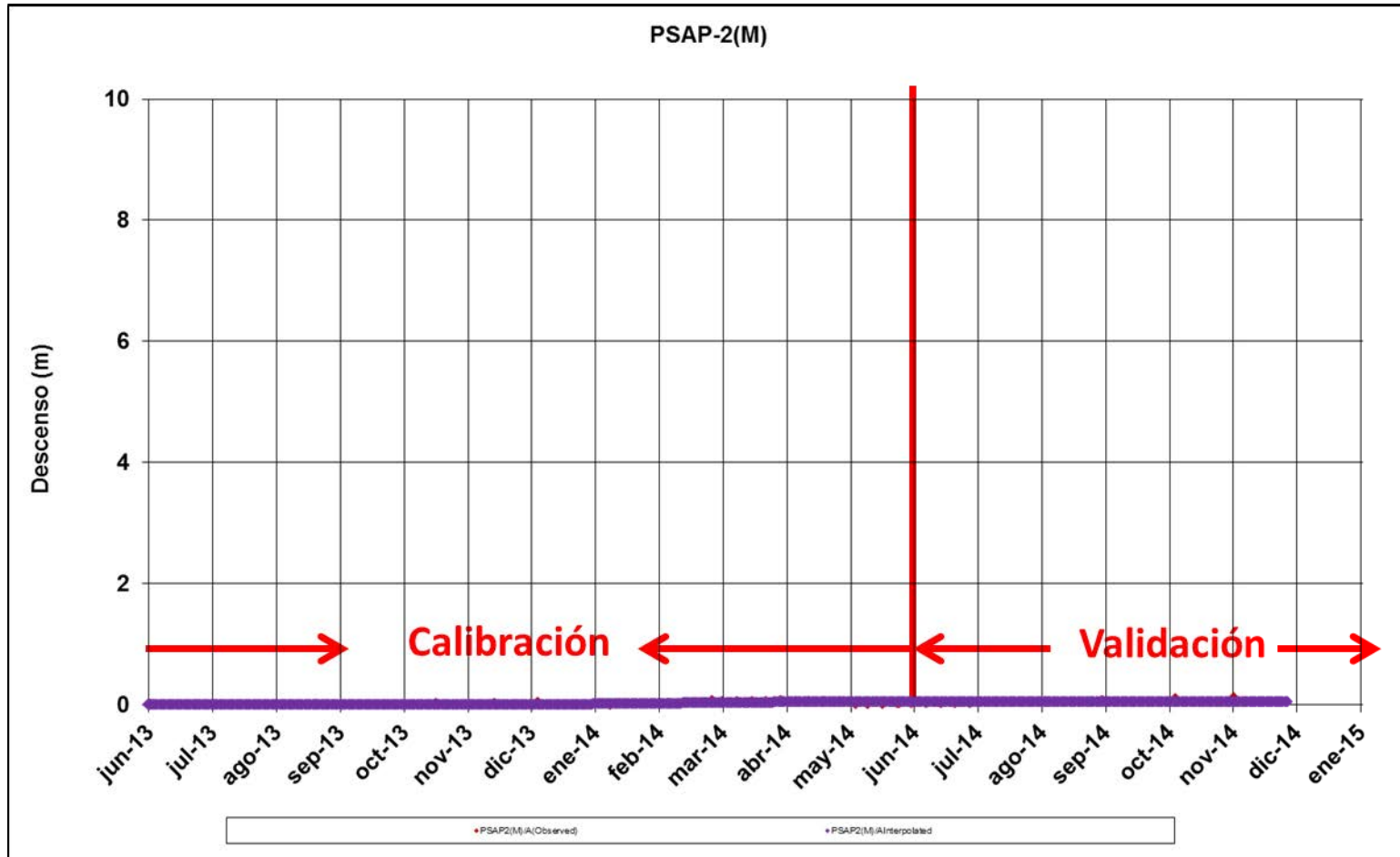
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.12  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PSAP-1 – Sector Norte



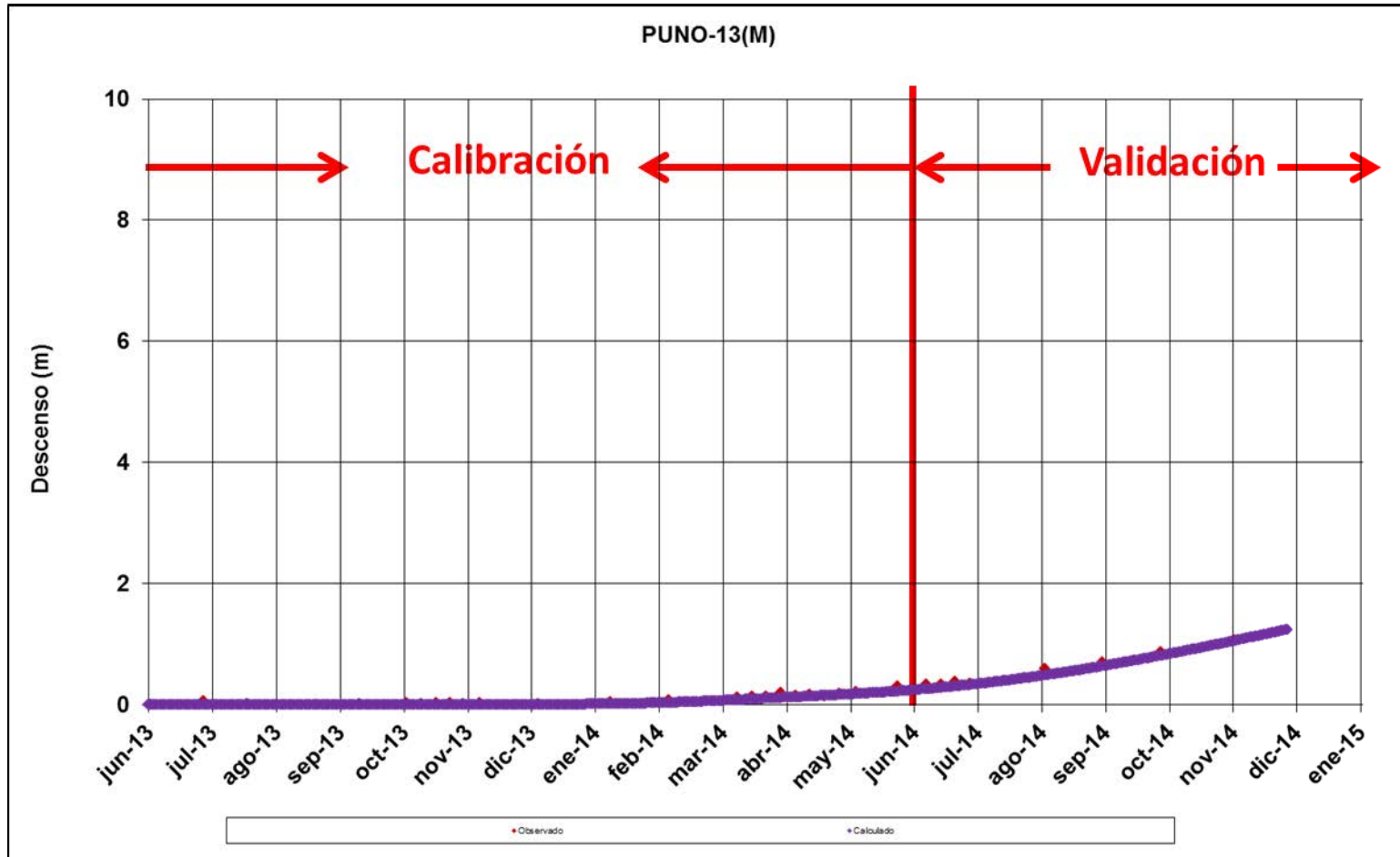
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.13  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PSAP-2 – Sector Norte



Fuente: Elaboración Propia

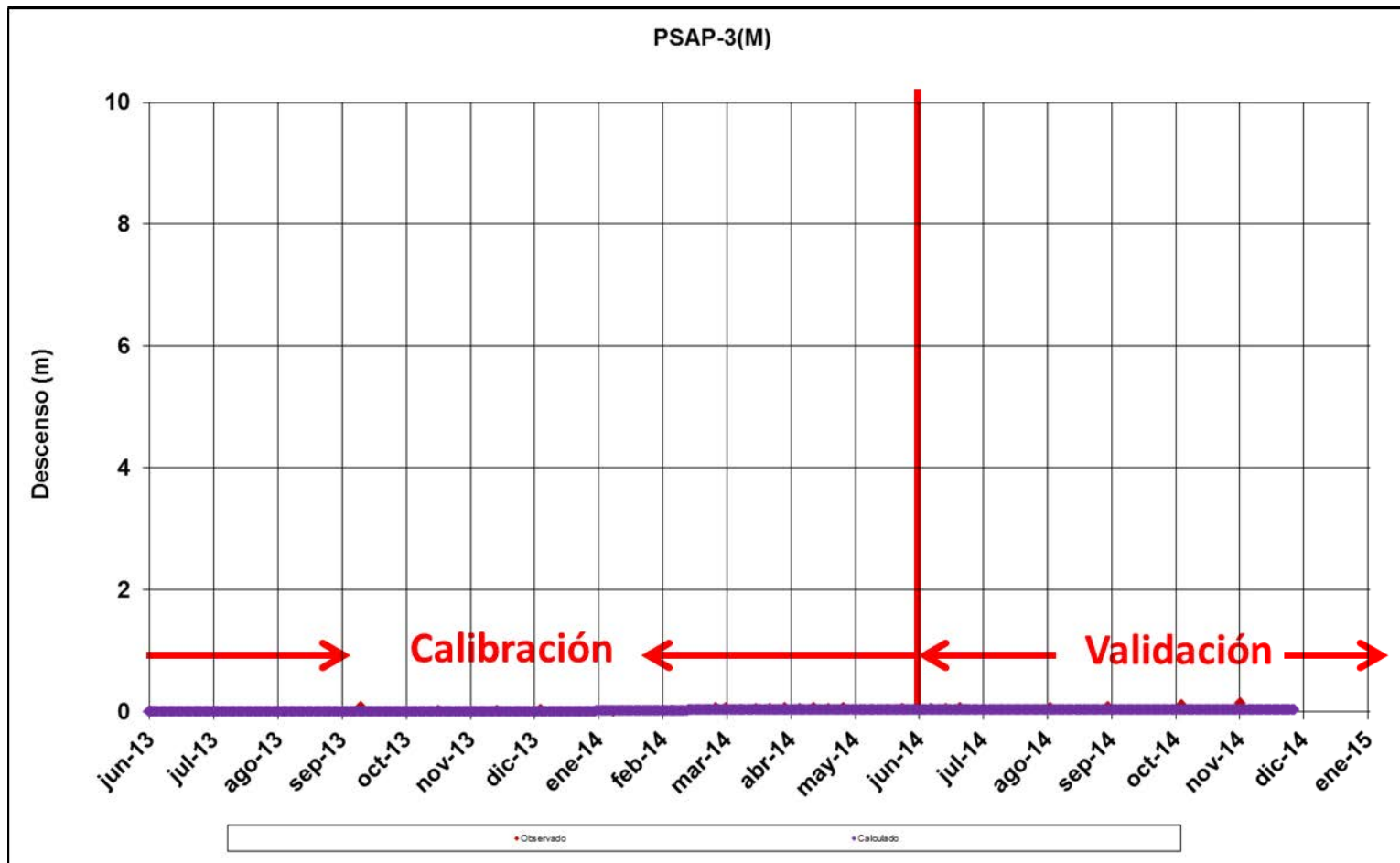
Figura H.14  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-13 – Sector Norte



Fuente: Elaboración Propia

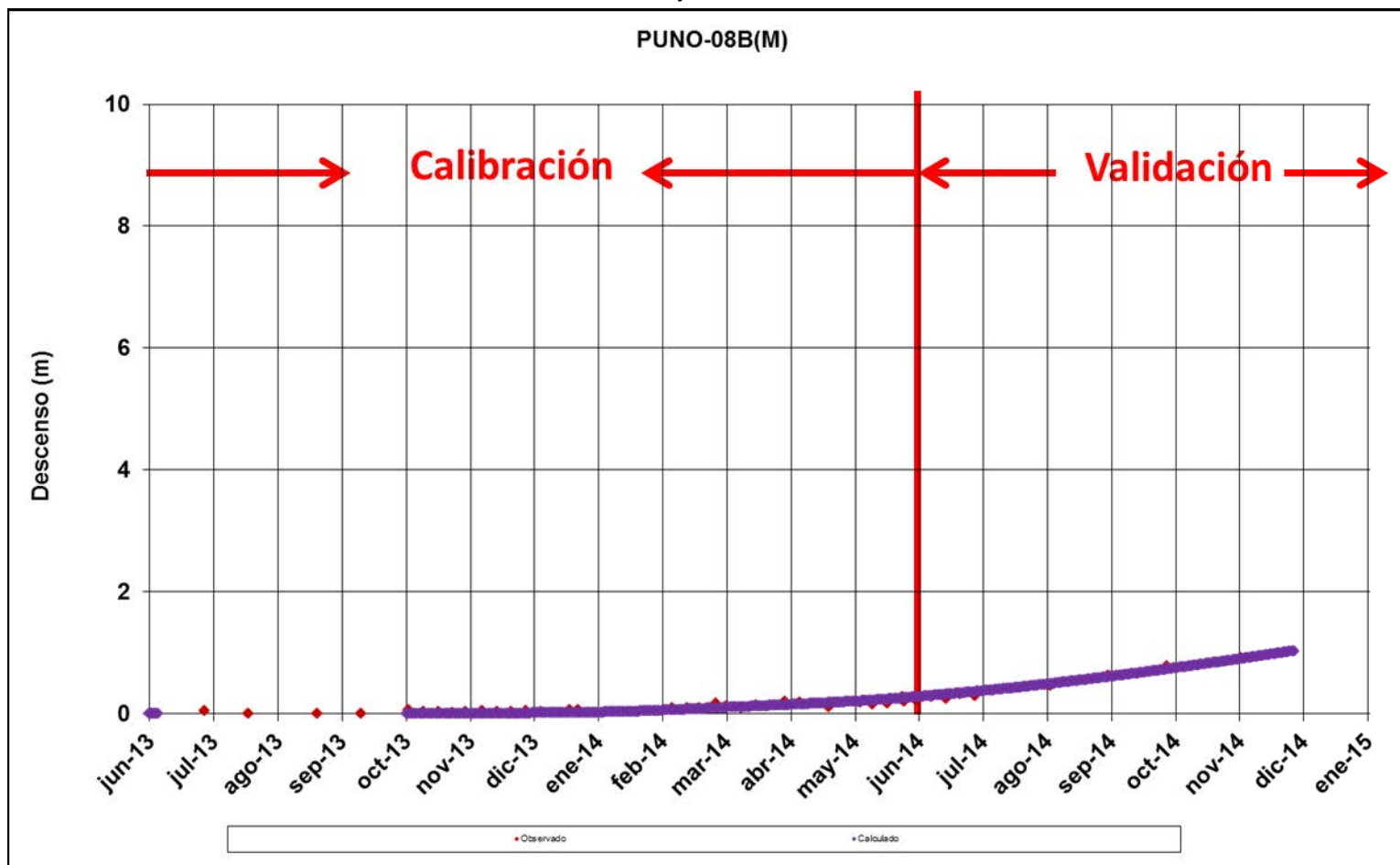


Figura H.15  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PSAP-3 – Sector Norte



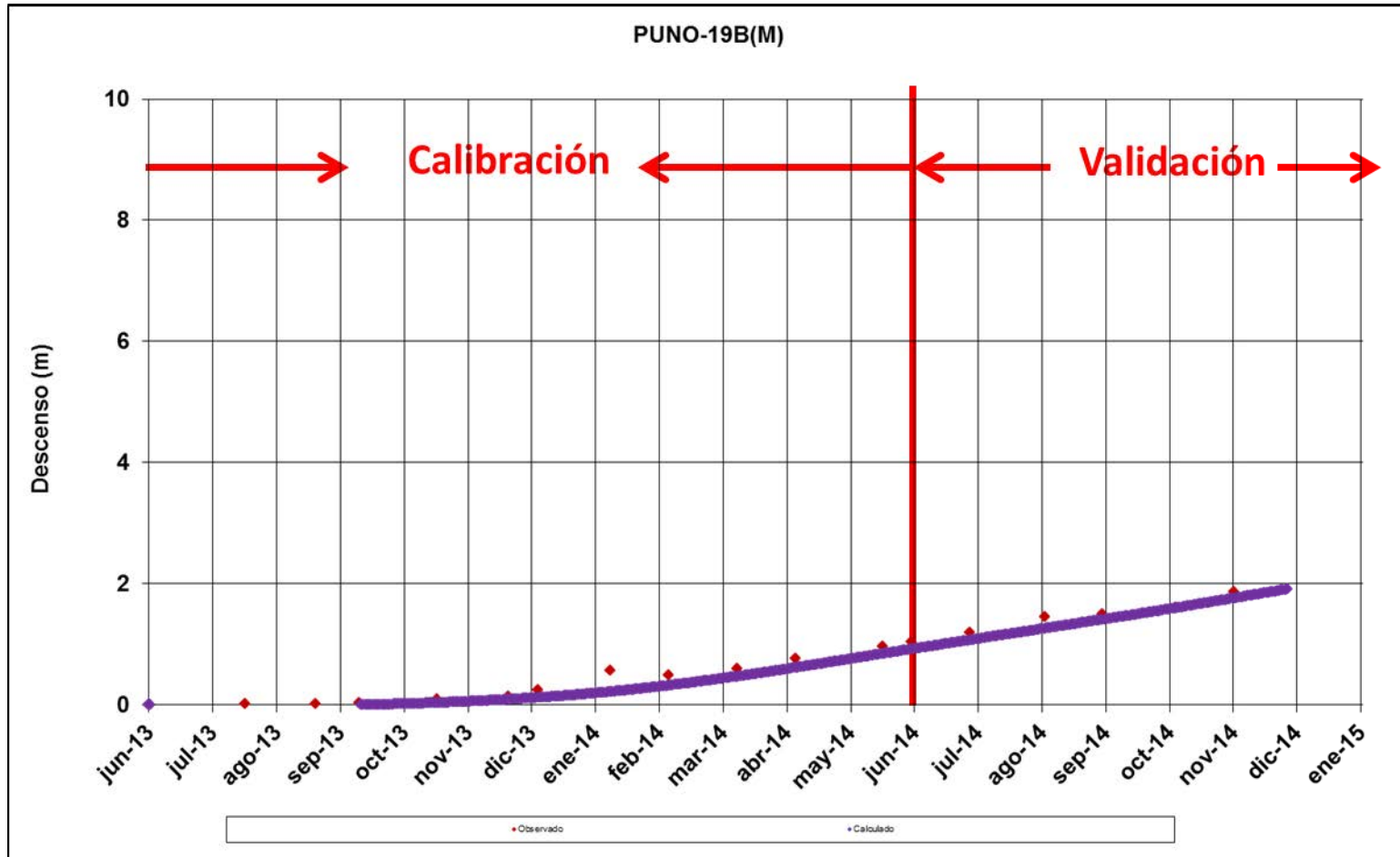
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.16  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-08B – Sector Norte



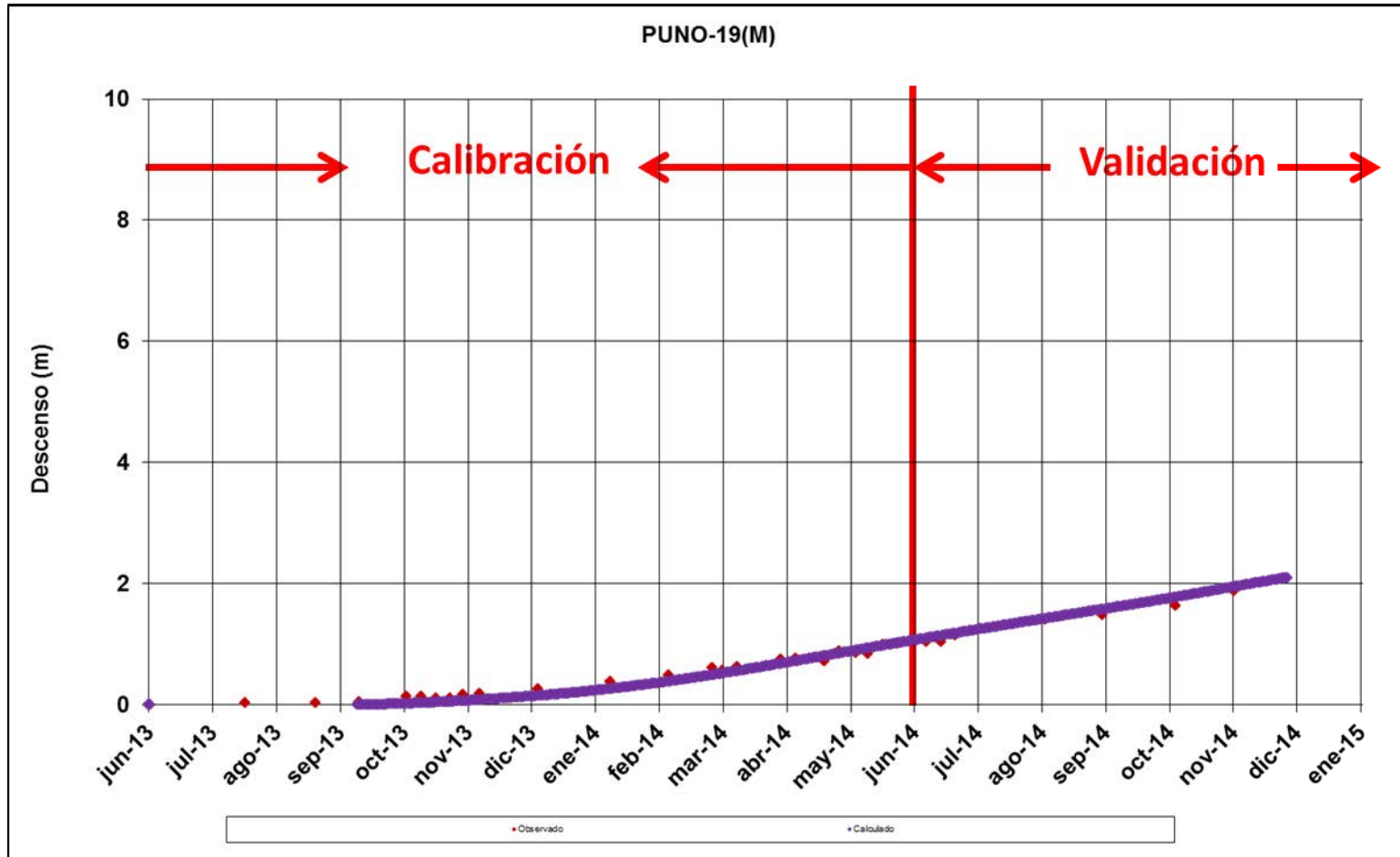
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.17  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-19B – Sector Centro



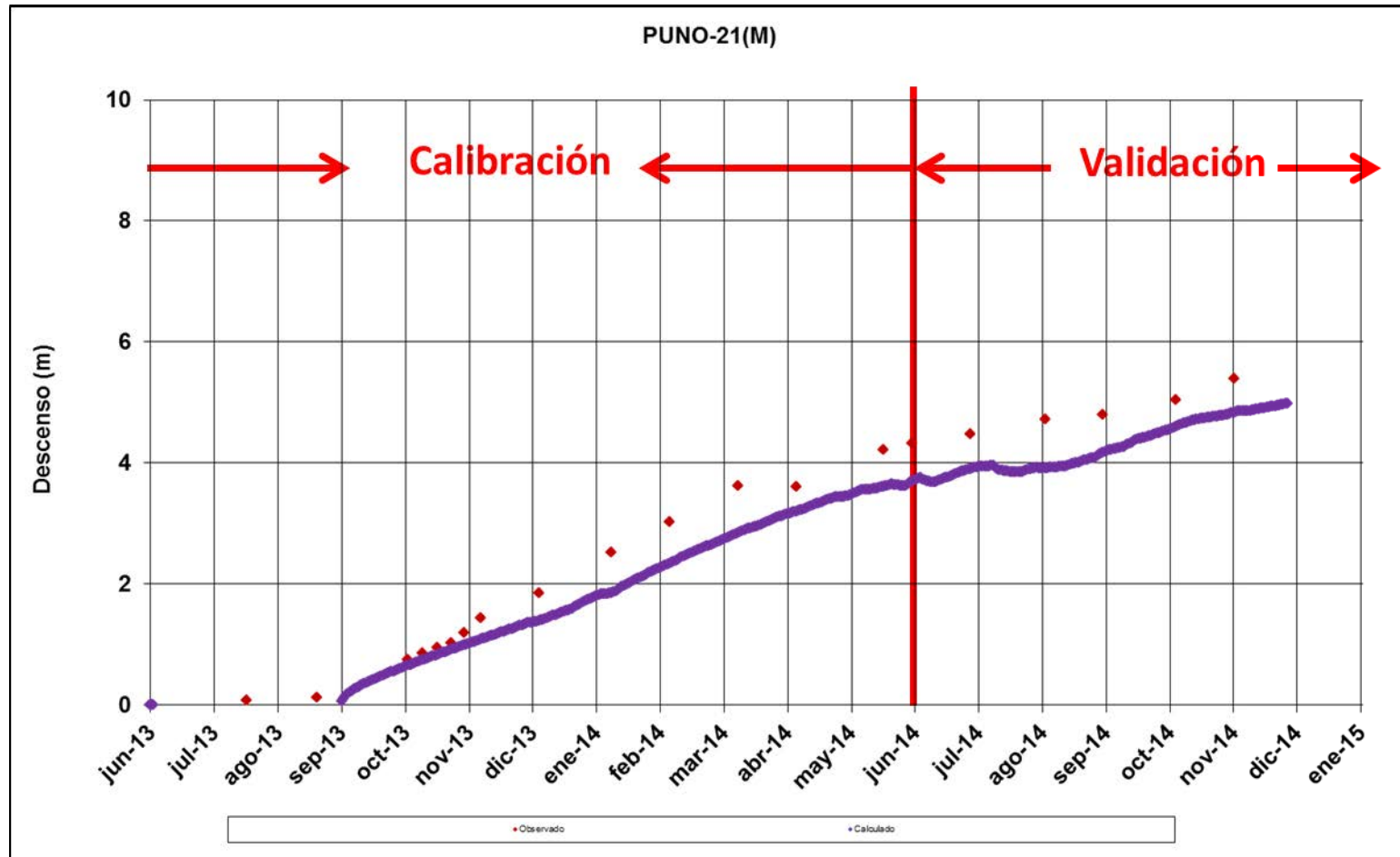
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.18  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-19 – Sector Centro



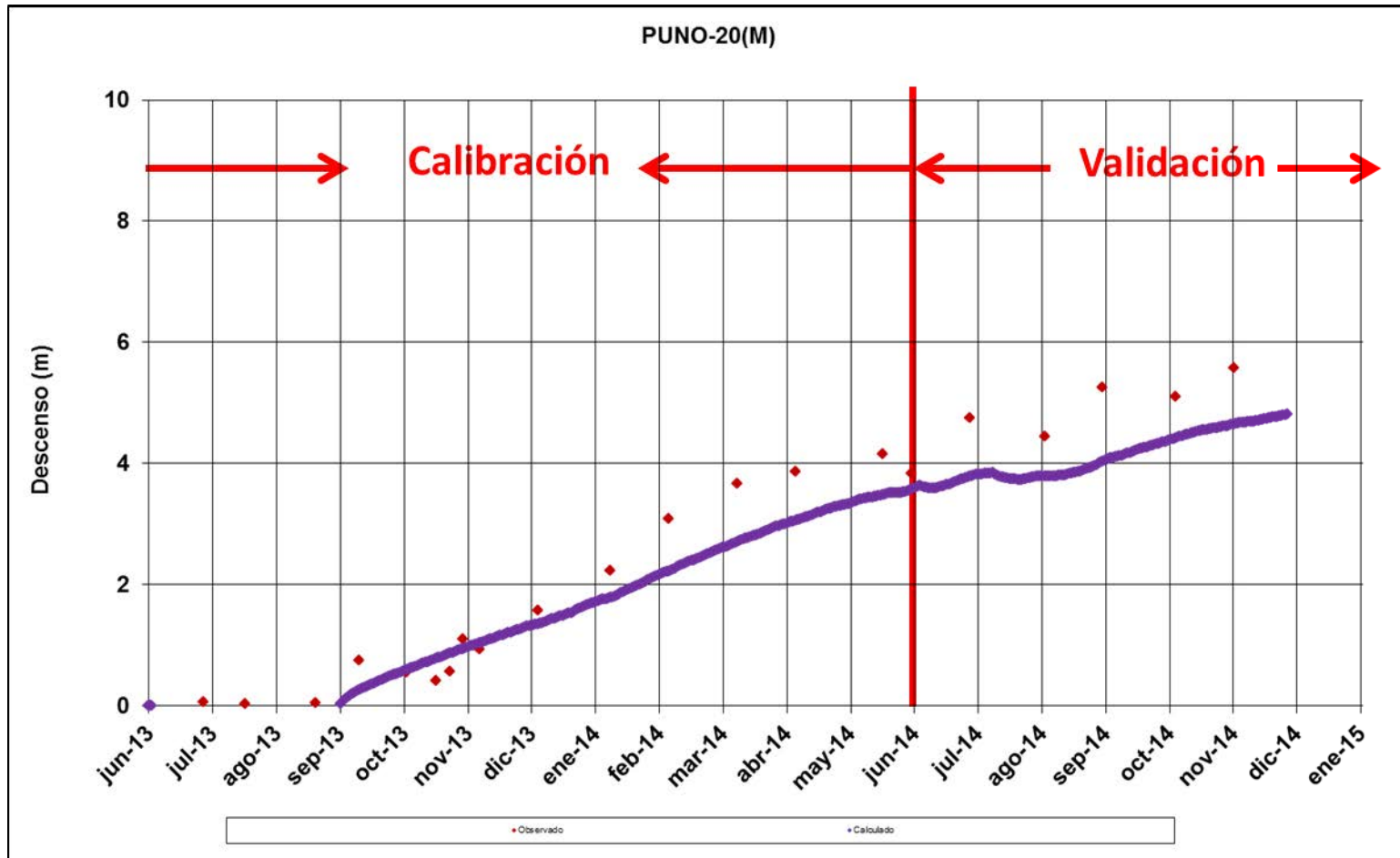
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.19  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-21 – Sector Centro



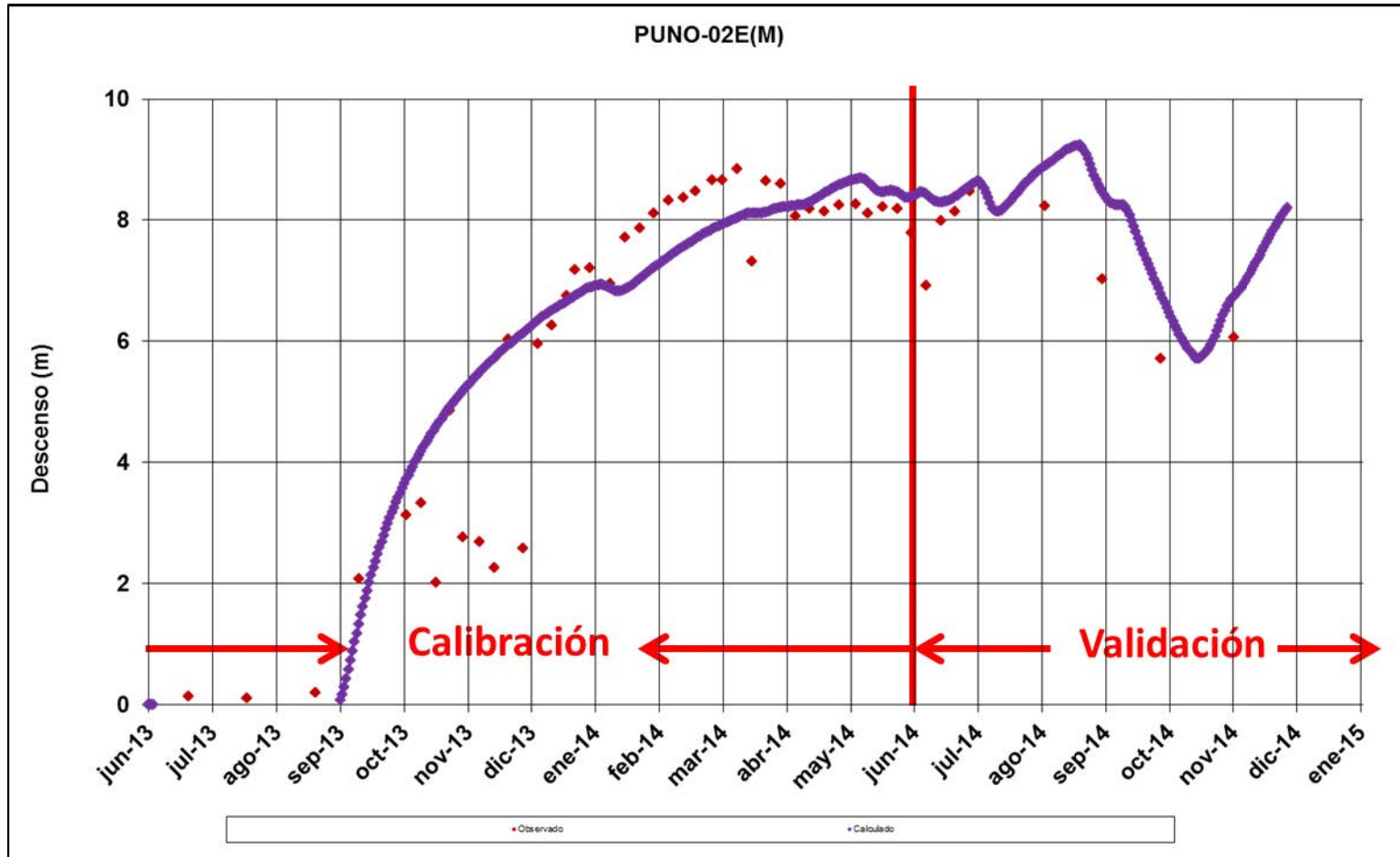
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.20  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-20 – Sector Centro



Fuente: Elaboración Propia

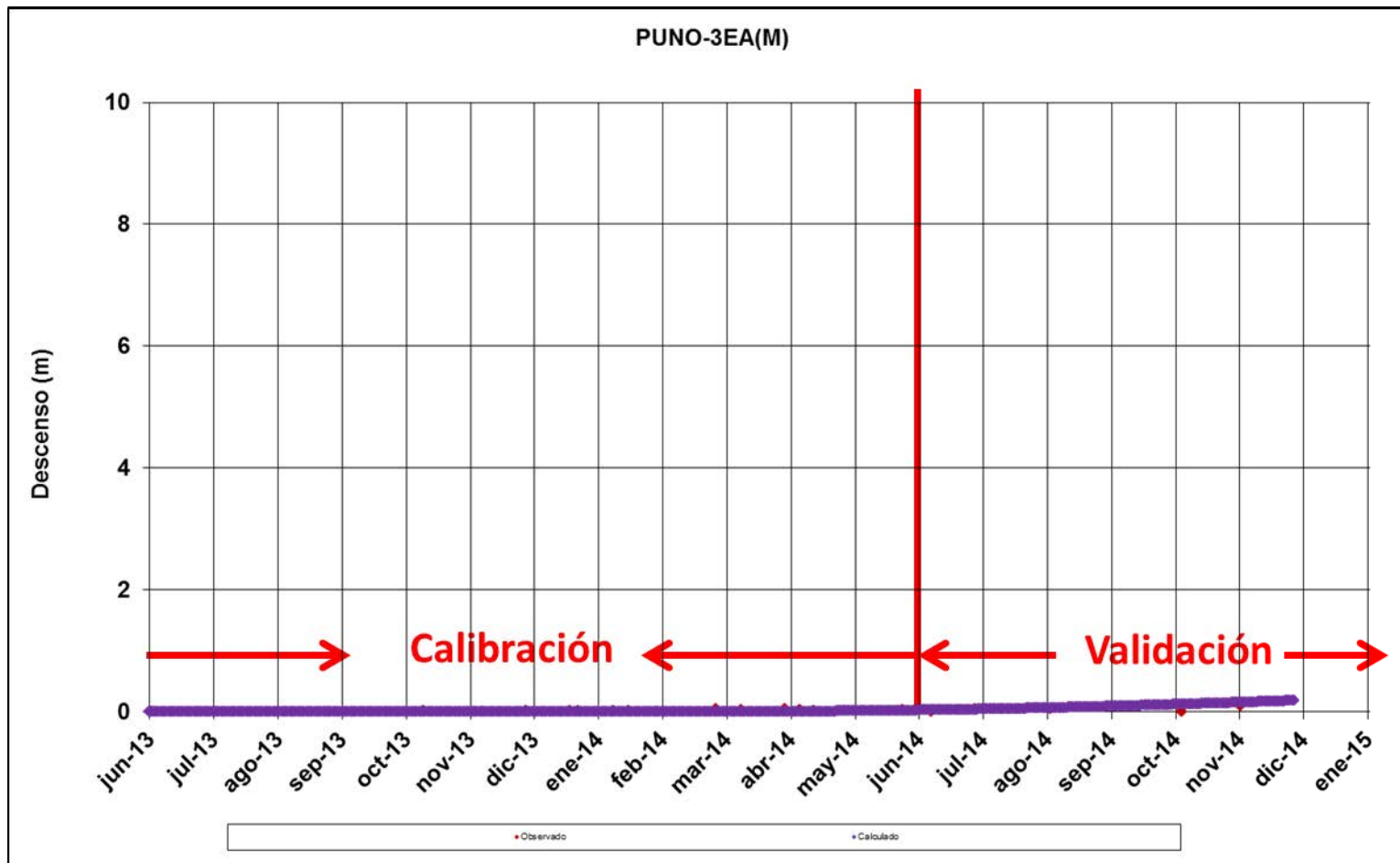
Figura H.21  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-02E – Sector Sur



Fuente: Elaboración Propia

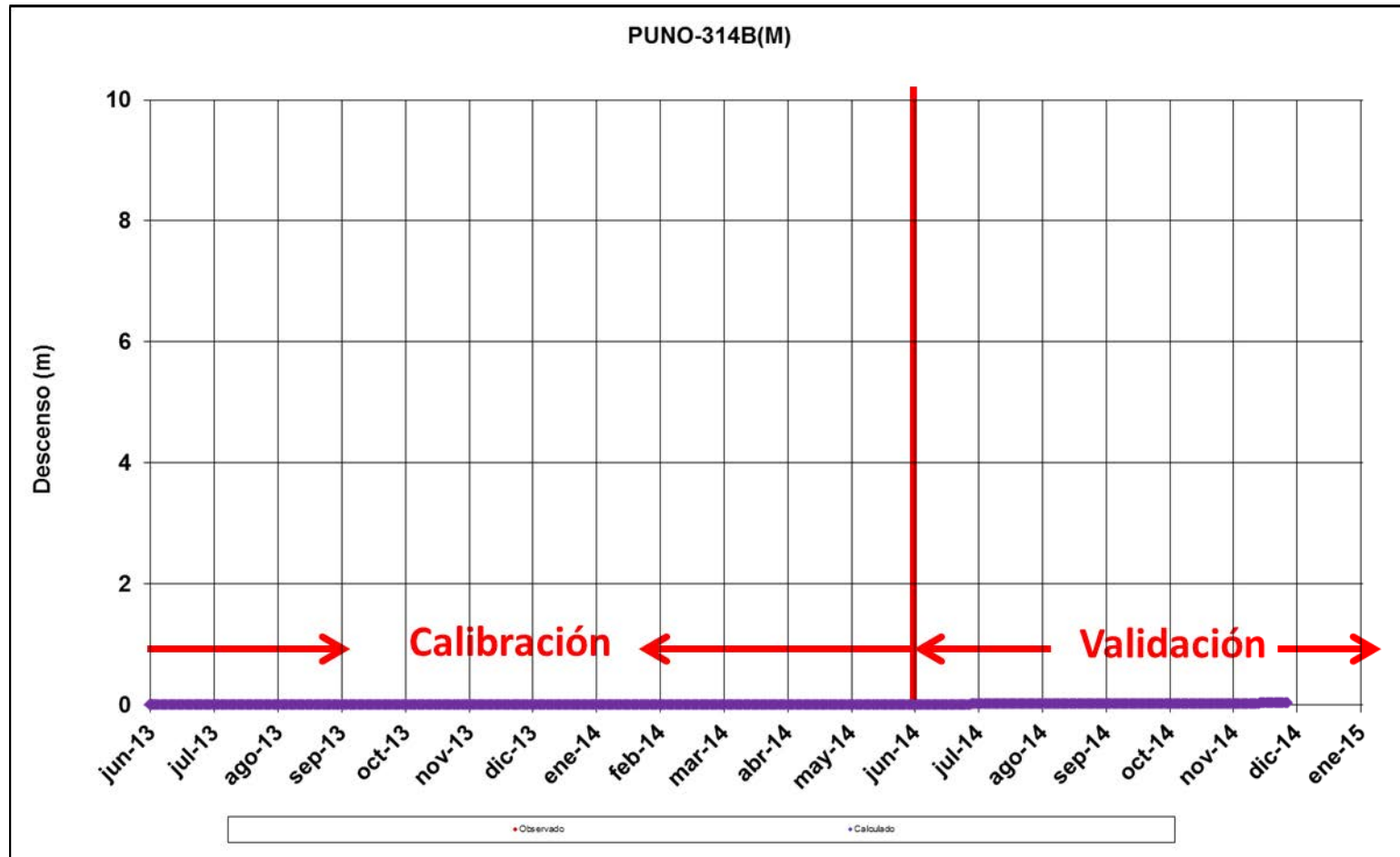


Figura H.22  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-3EA – Sector Sur



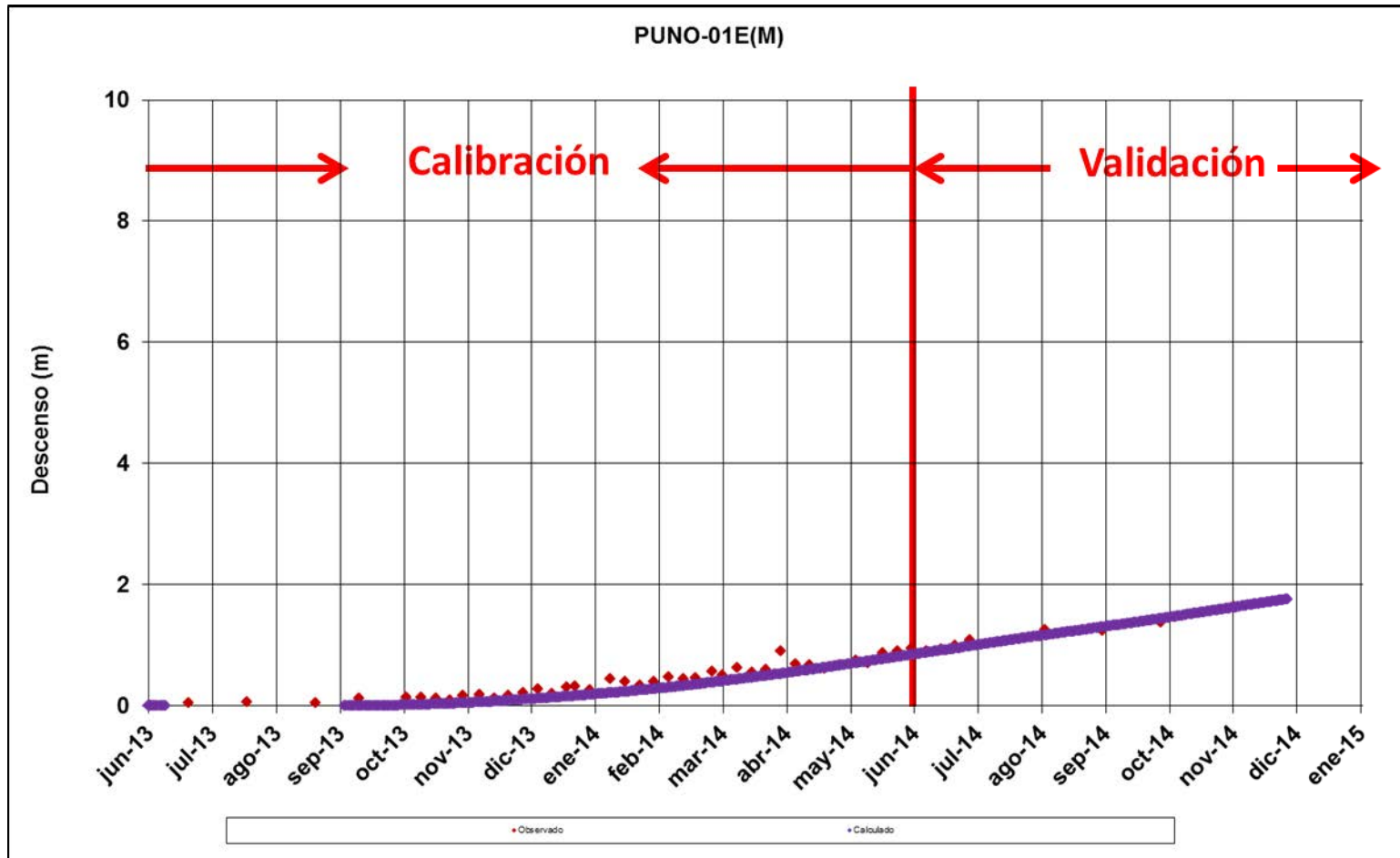
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.23  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-314B – Sector Sur



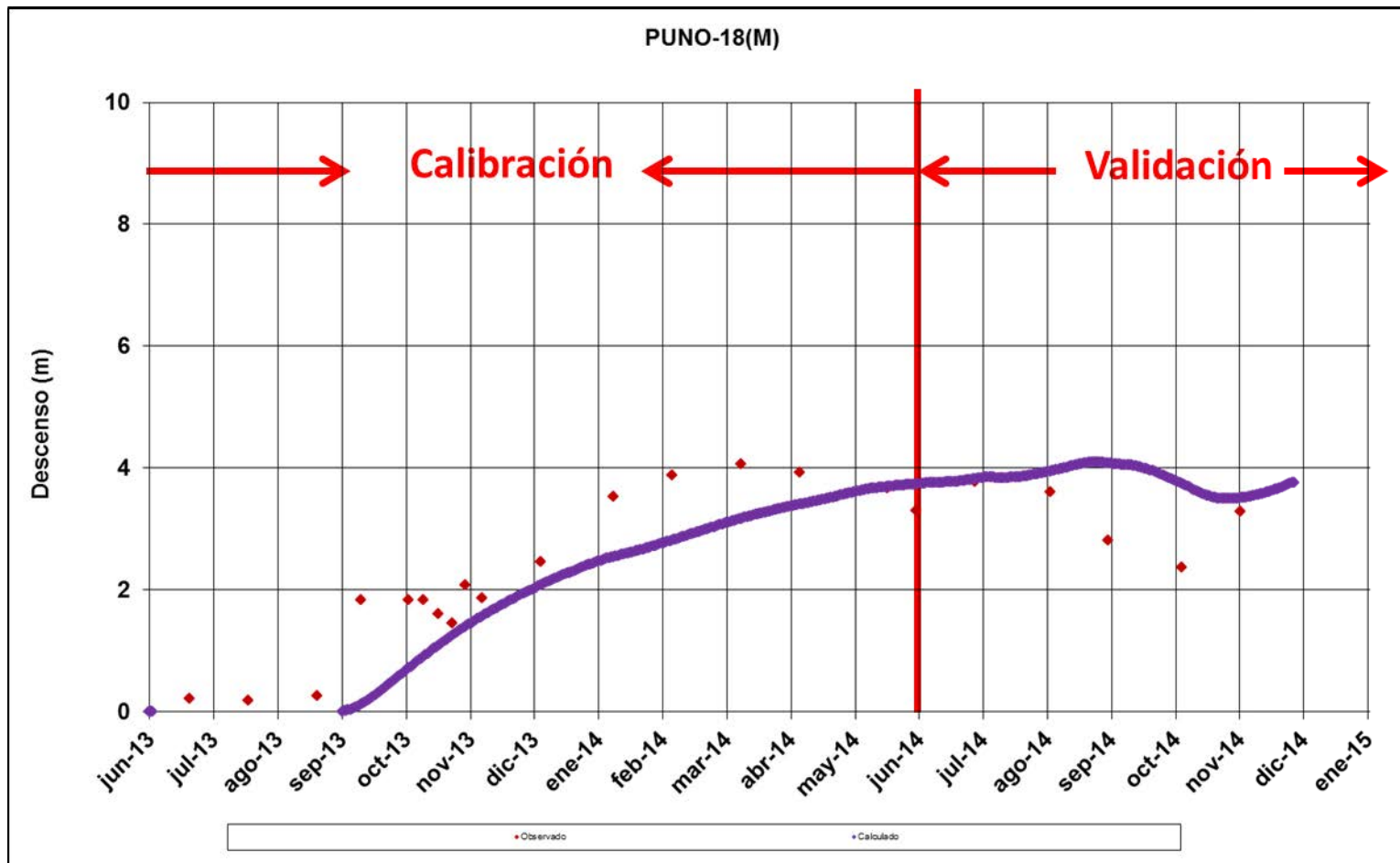
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.24  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-01E – Sector Sur



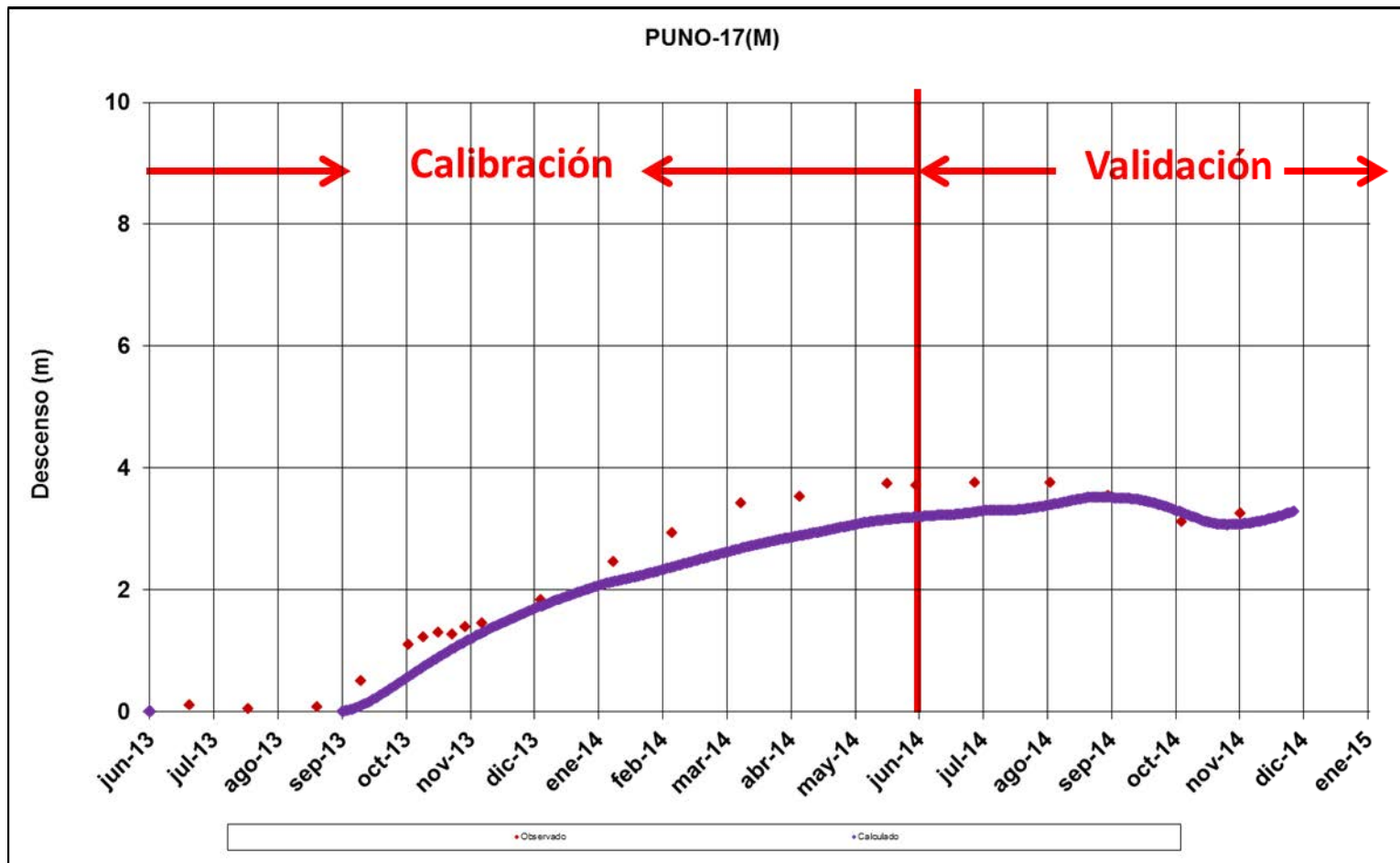
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.25  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-18 – Sector Sur



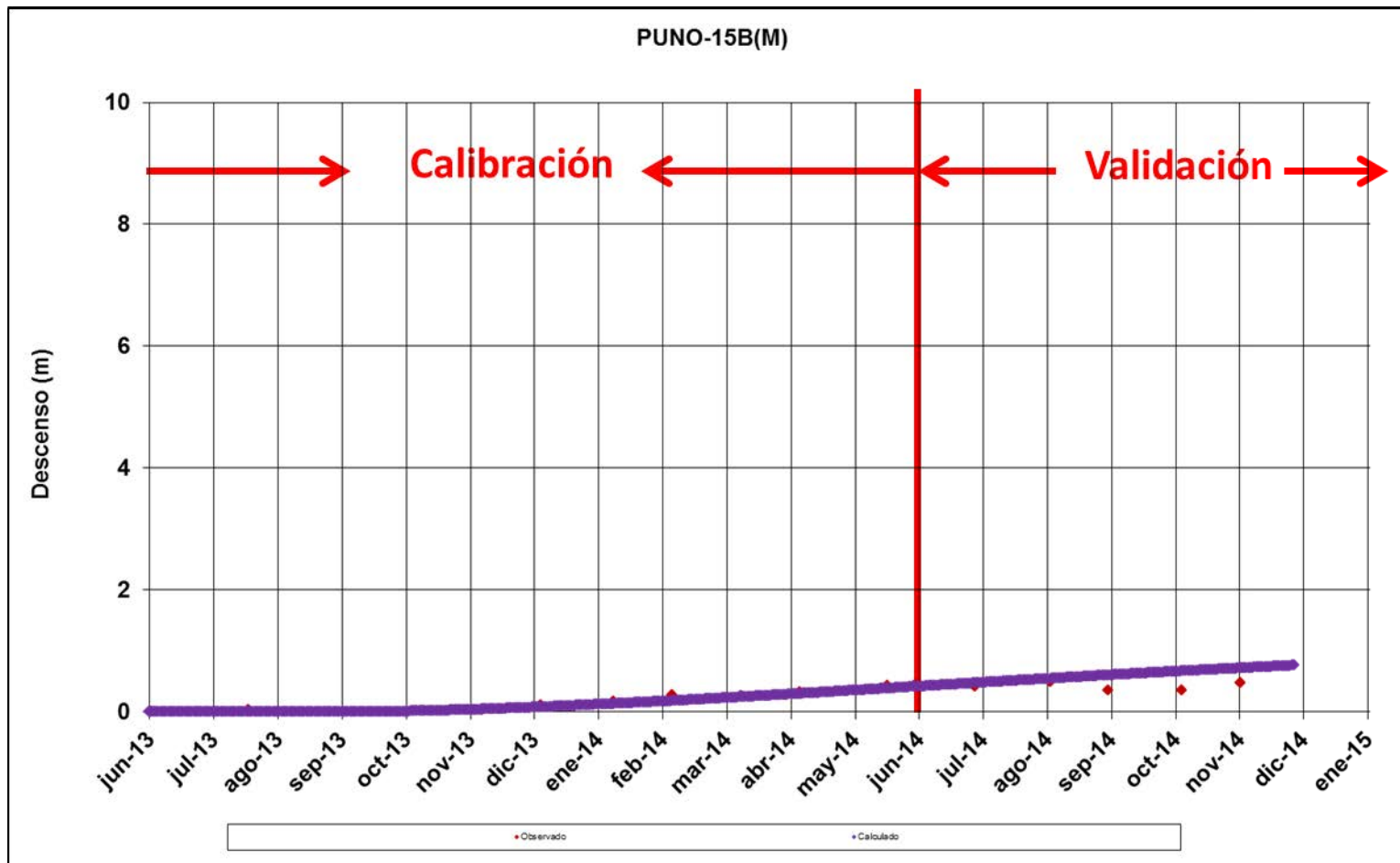
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.26  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-17 – Sector Sur



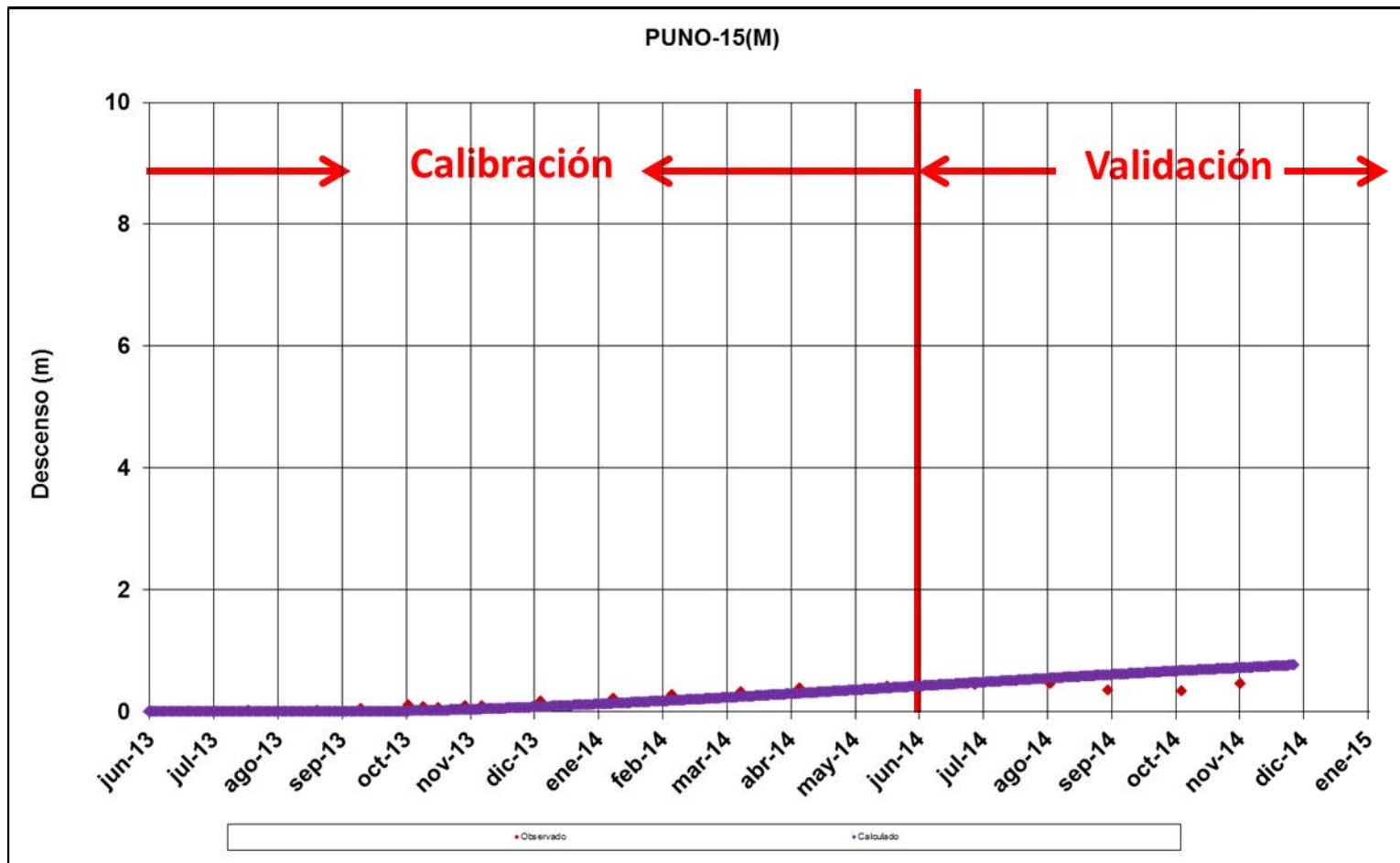
Fuente: Elaboración Propia

Figura H.27  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-15B – Sector Sur



Fuente: Elaboración Propia

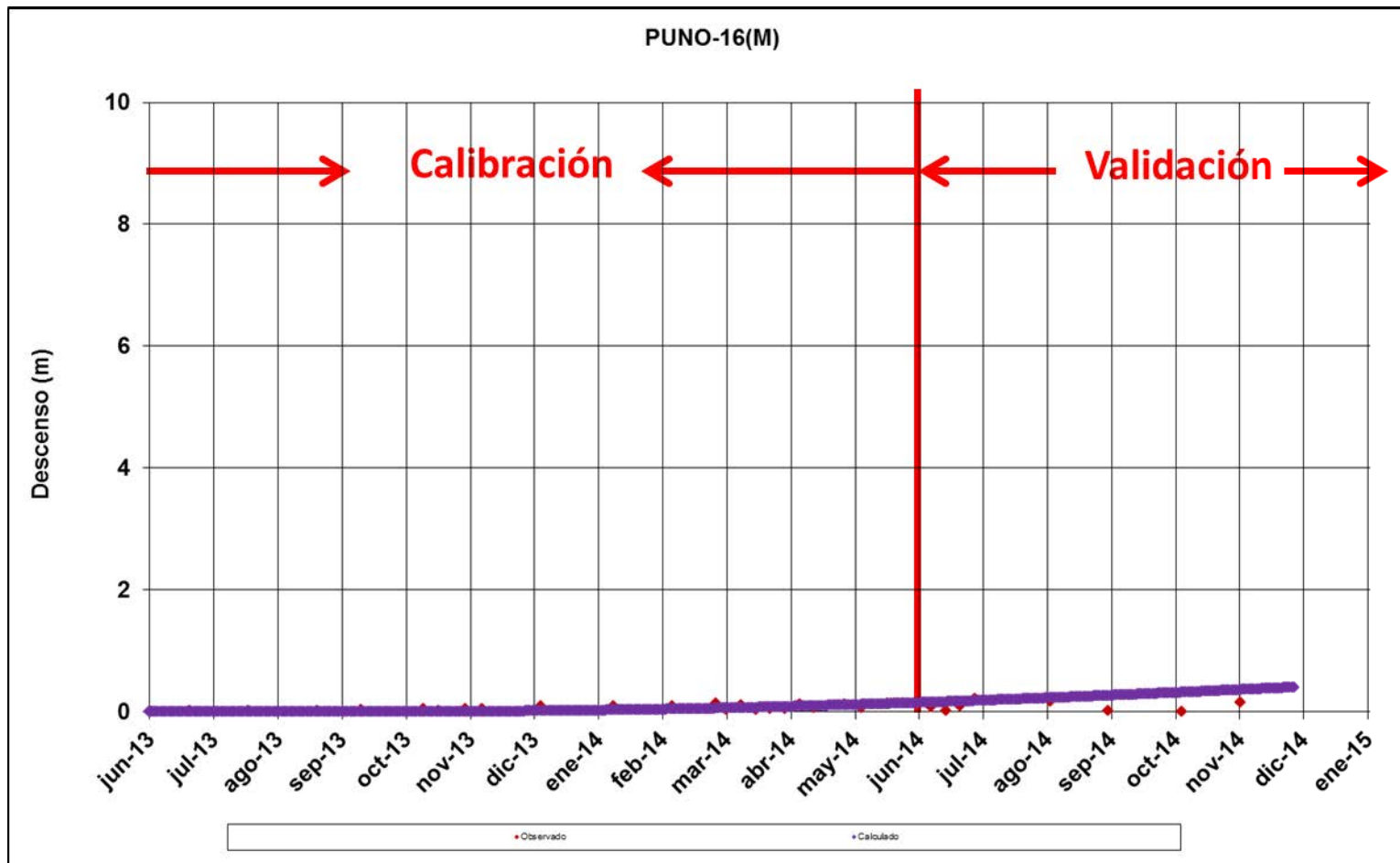
Figura H.28  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-15 – Sector Sur



Fuente: Elaboración Propia



Figura H.29  
Descensos de Niveles Simulados y Observados PUNO-16 – Sector Sur



Fuente: Elaboración Propia

# **ANEXO I**

## **RESULTADOS CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DESCENSOS PAMPA PUNO**

**REV B**

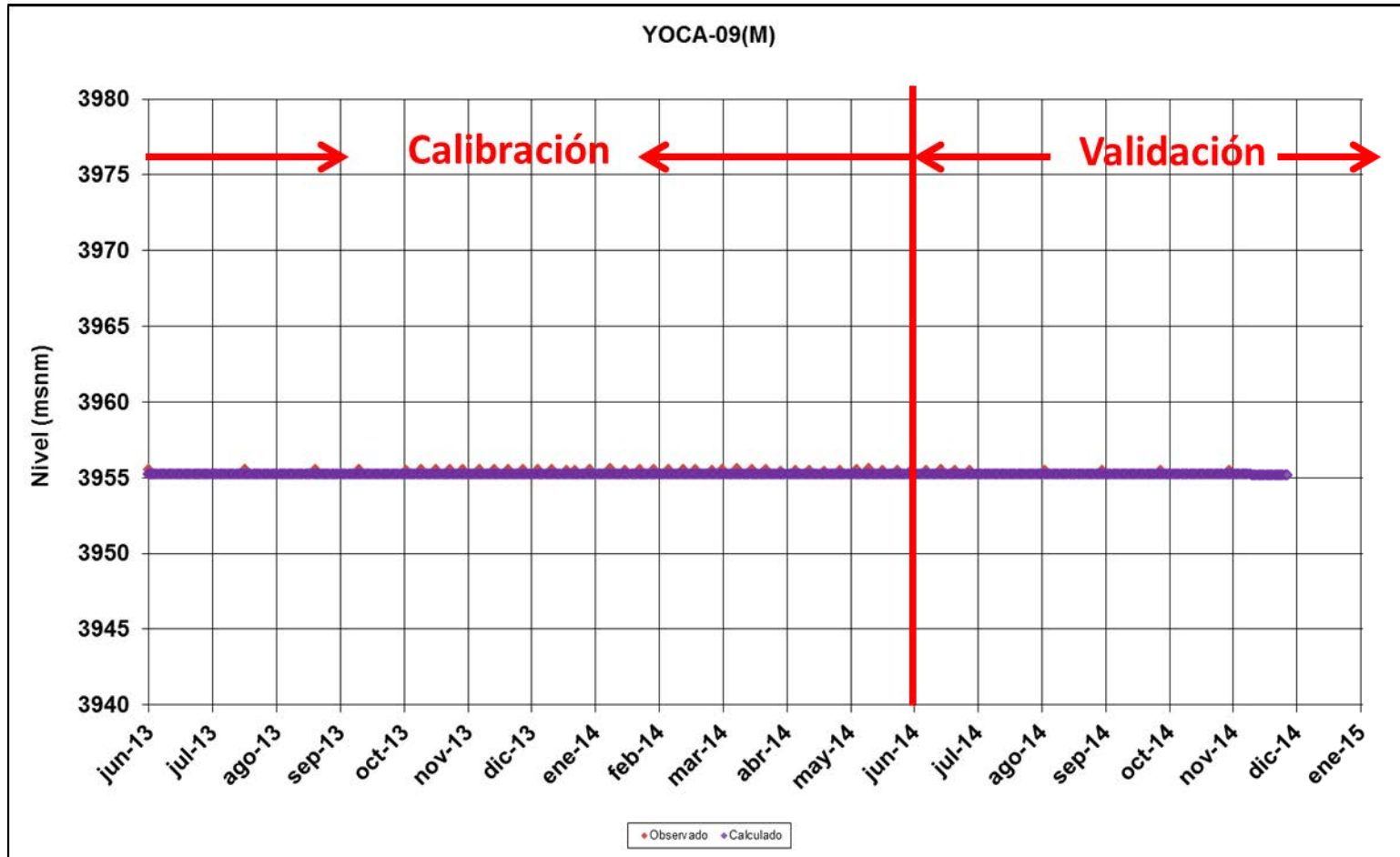
**MARZO 2015**

**PREPARADA POR**



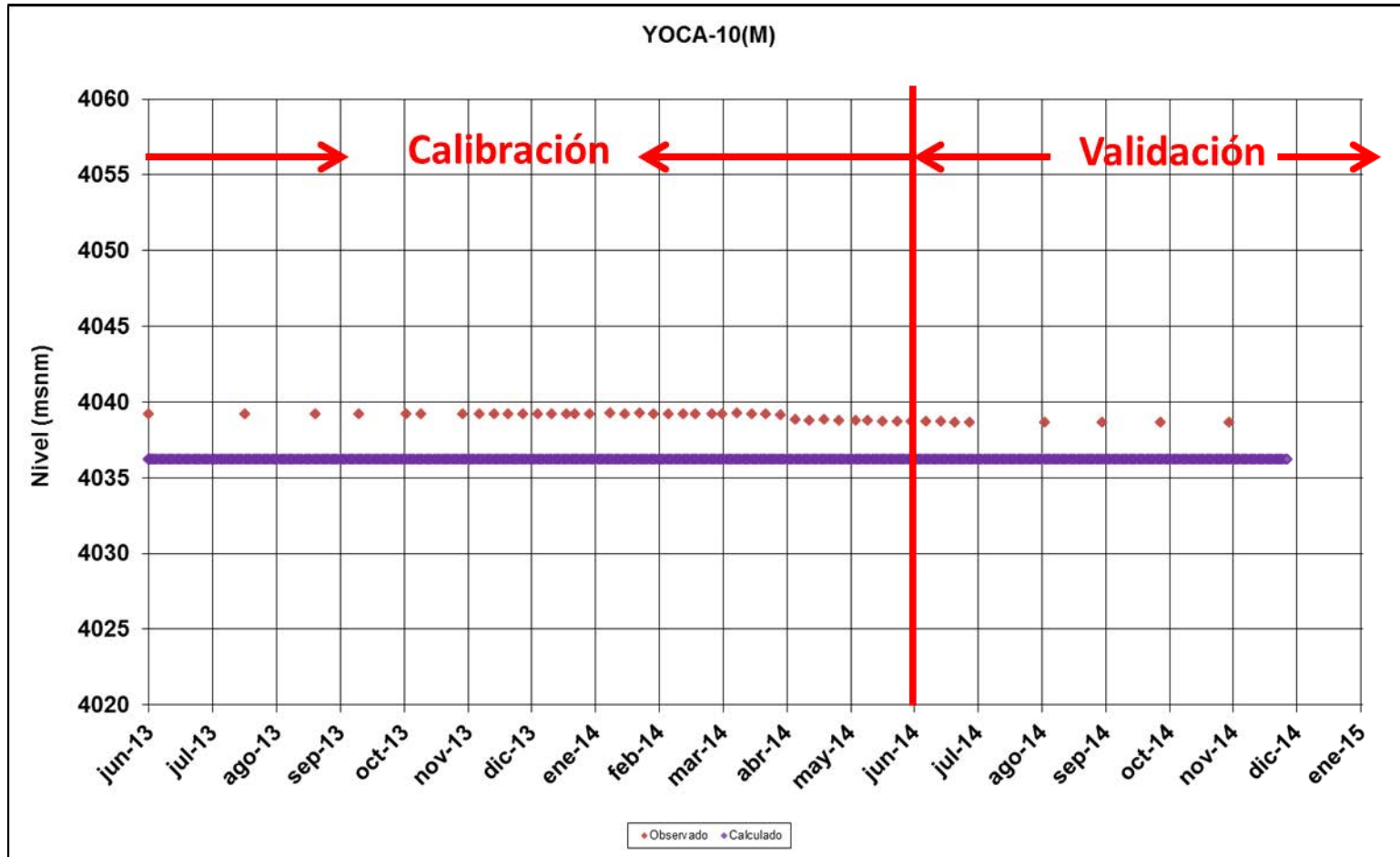
**HIDROGEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE**

Figura I.1  
Niveles Simulados y Observados YOCA-09 – Sector Norte



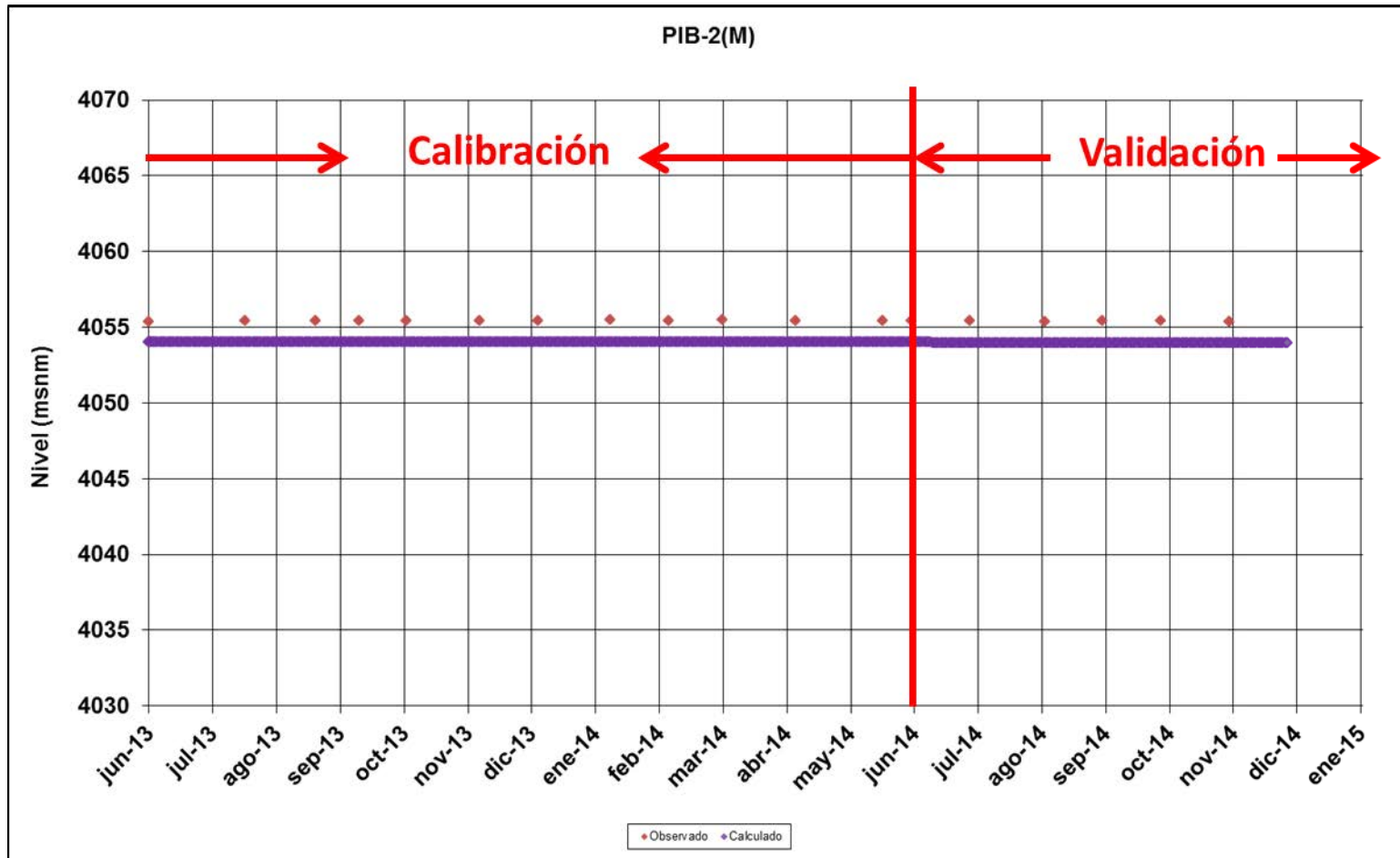
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.2  
Niveles Simulados y Observados YOCA-10 – Sector Norte



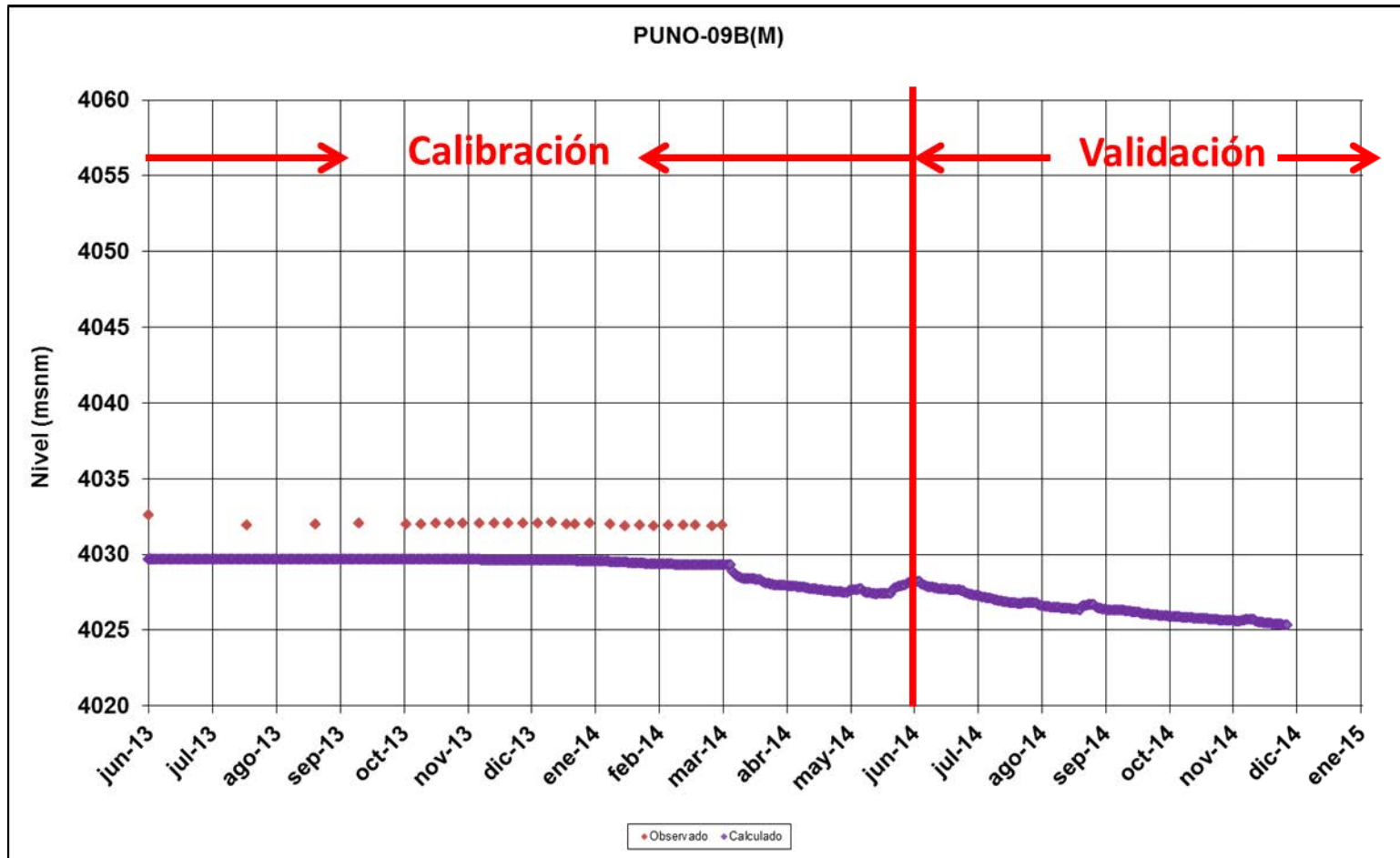
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.3  
Niveles Simulados y Observados PIB-2 – Sector Norte



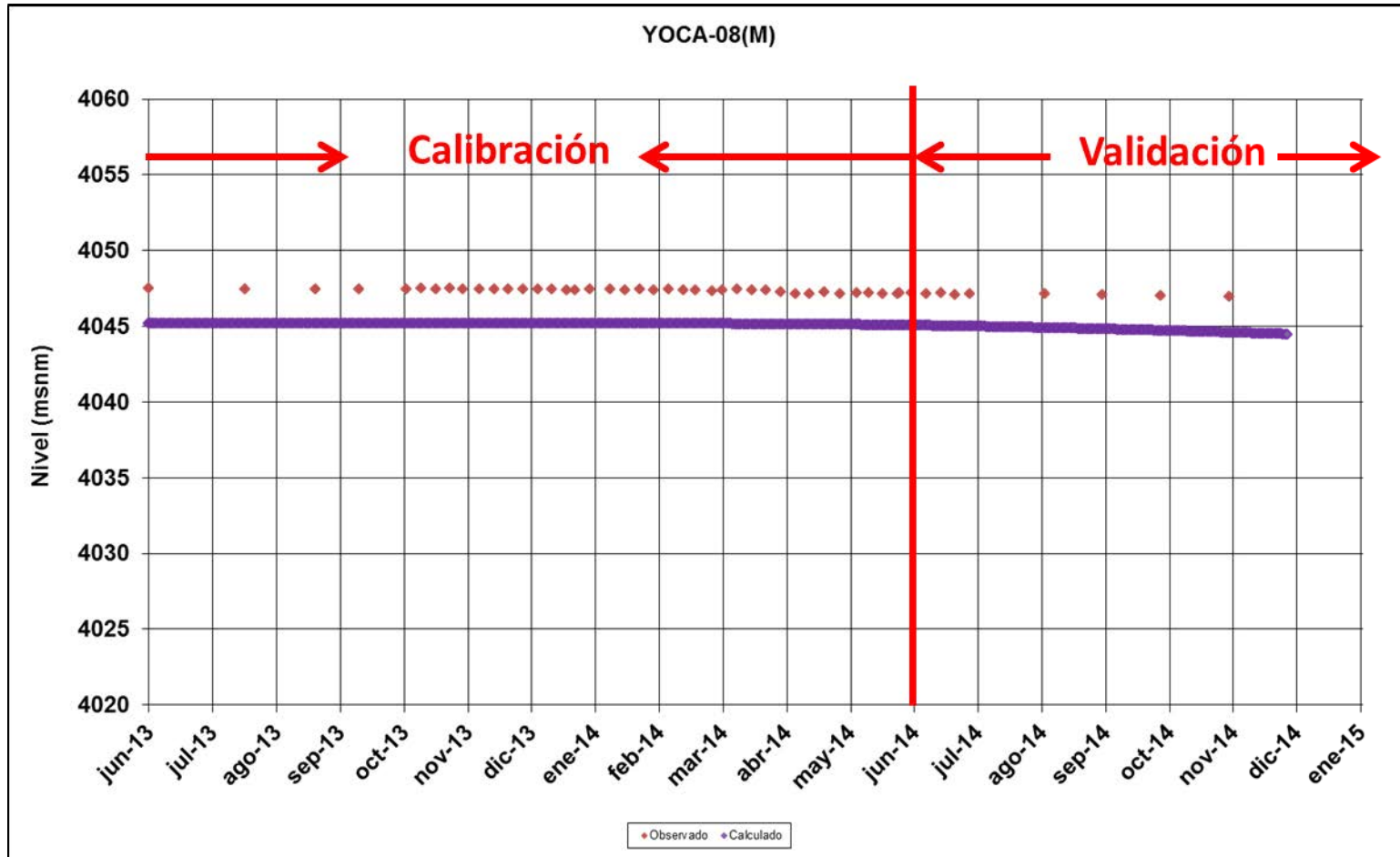
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.4  
Niveles Simulados y Observados PUNO-09B – Sector Norte



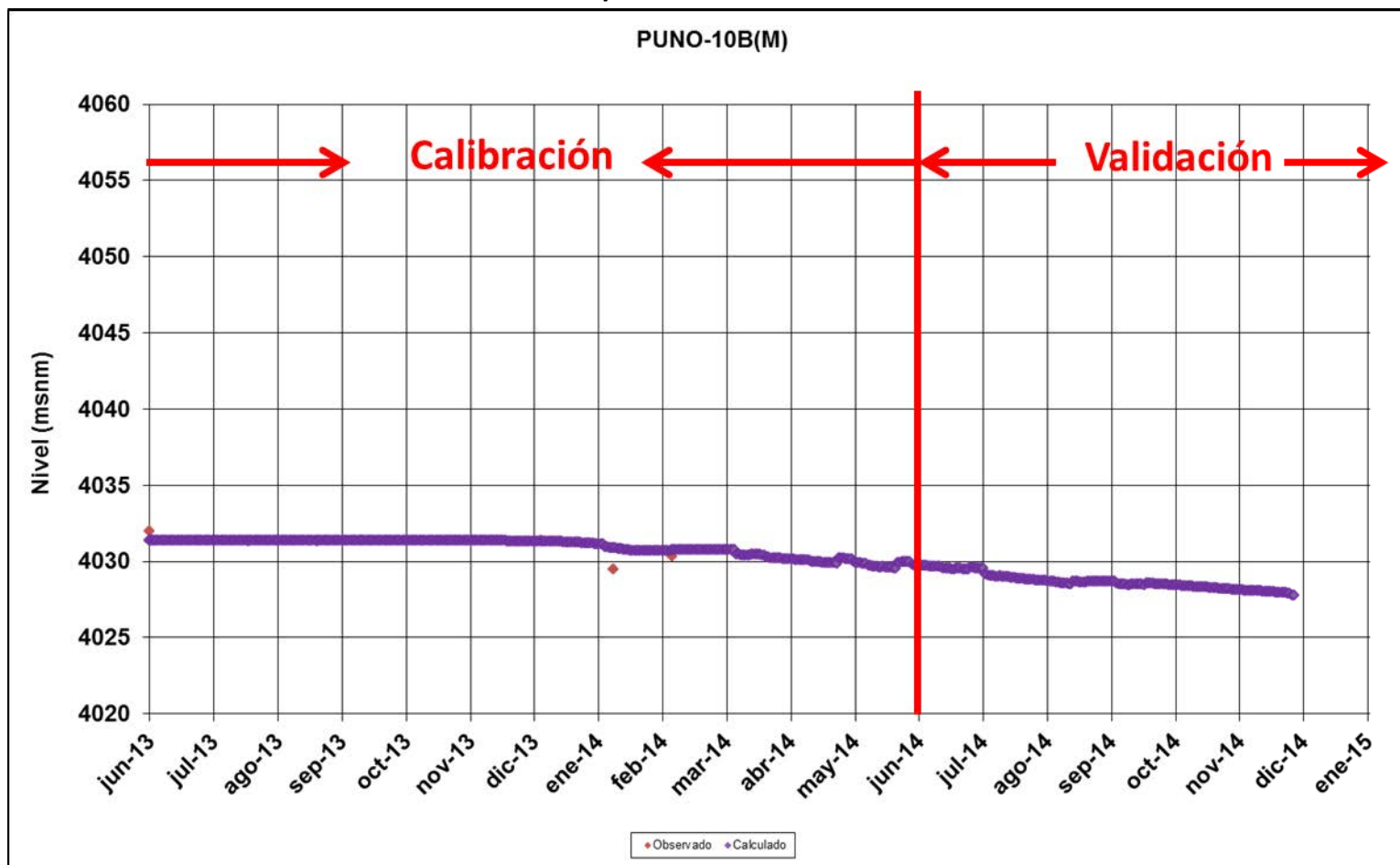
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.5  
Niveles Simulados y Observados YOCA-08 – Sector Norte



Fuente: Elaboración Propia

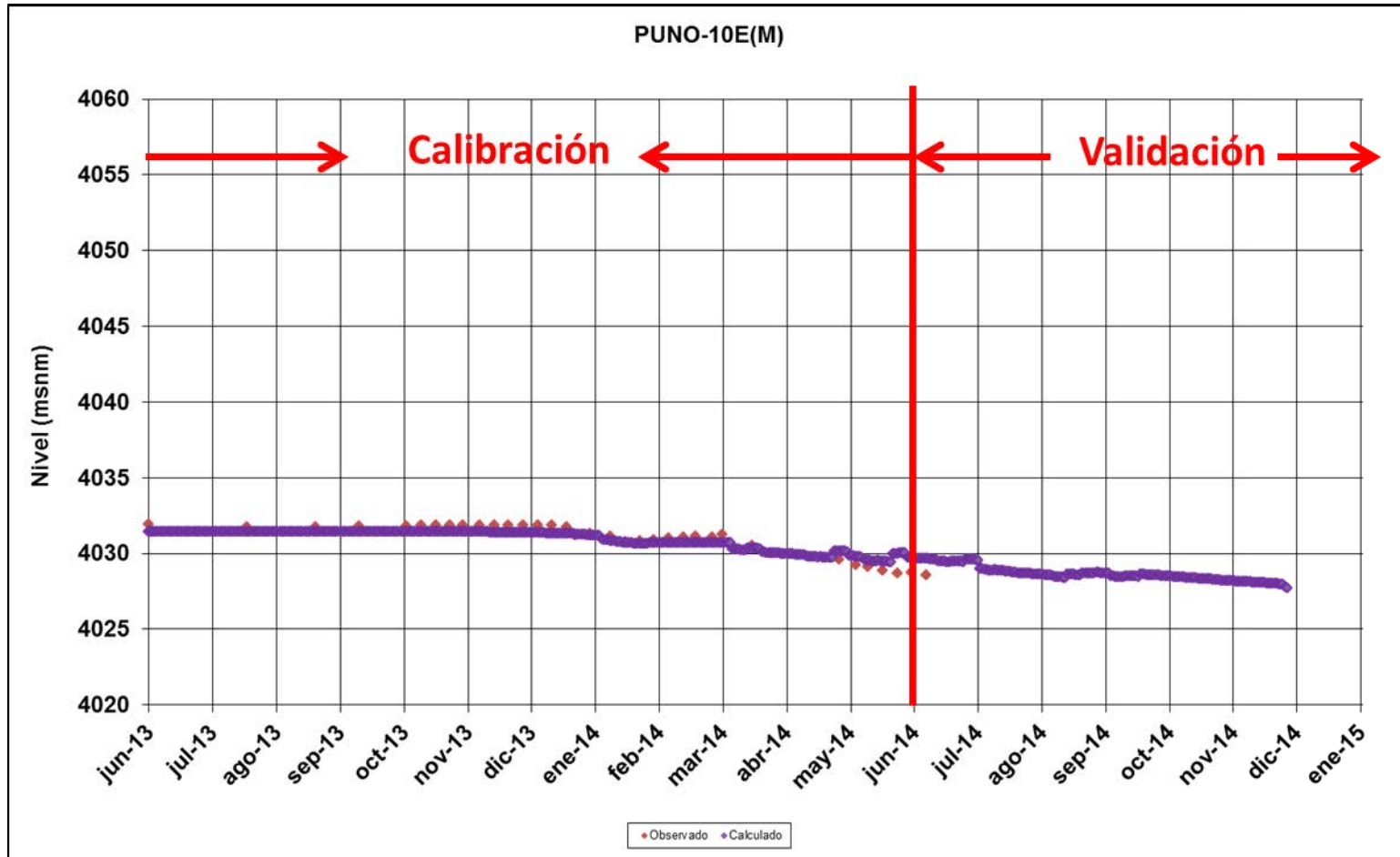
Figura I.6  
Niveles Simulados y Observados PUNO-10B – Sector Norte



Fuente: Elaboración Propia

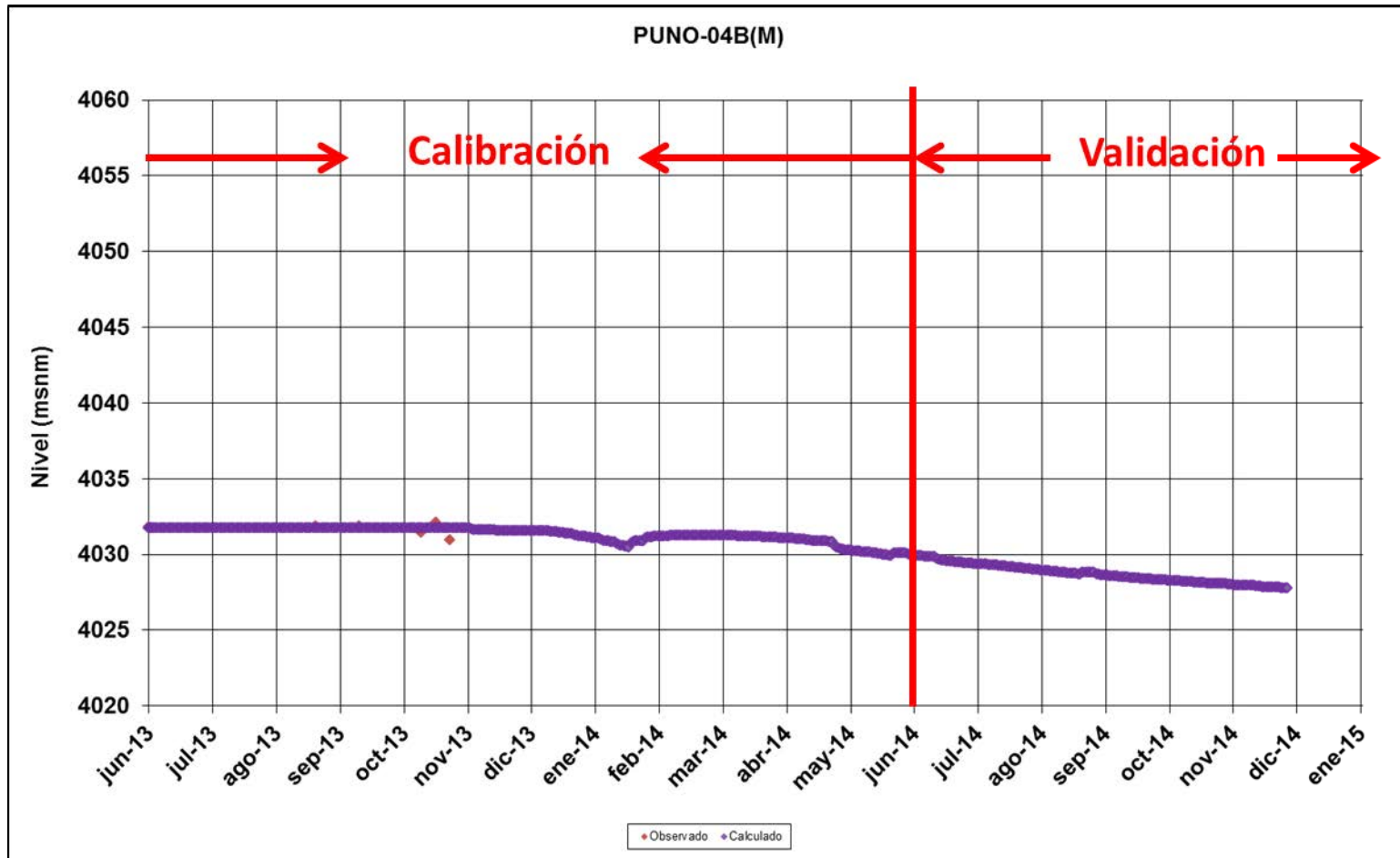


Figura I.7  
Niveles Simulados y Observados PUNO-10E – Sector Norte



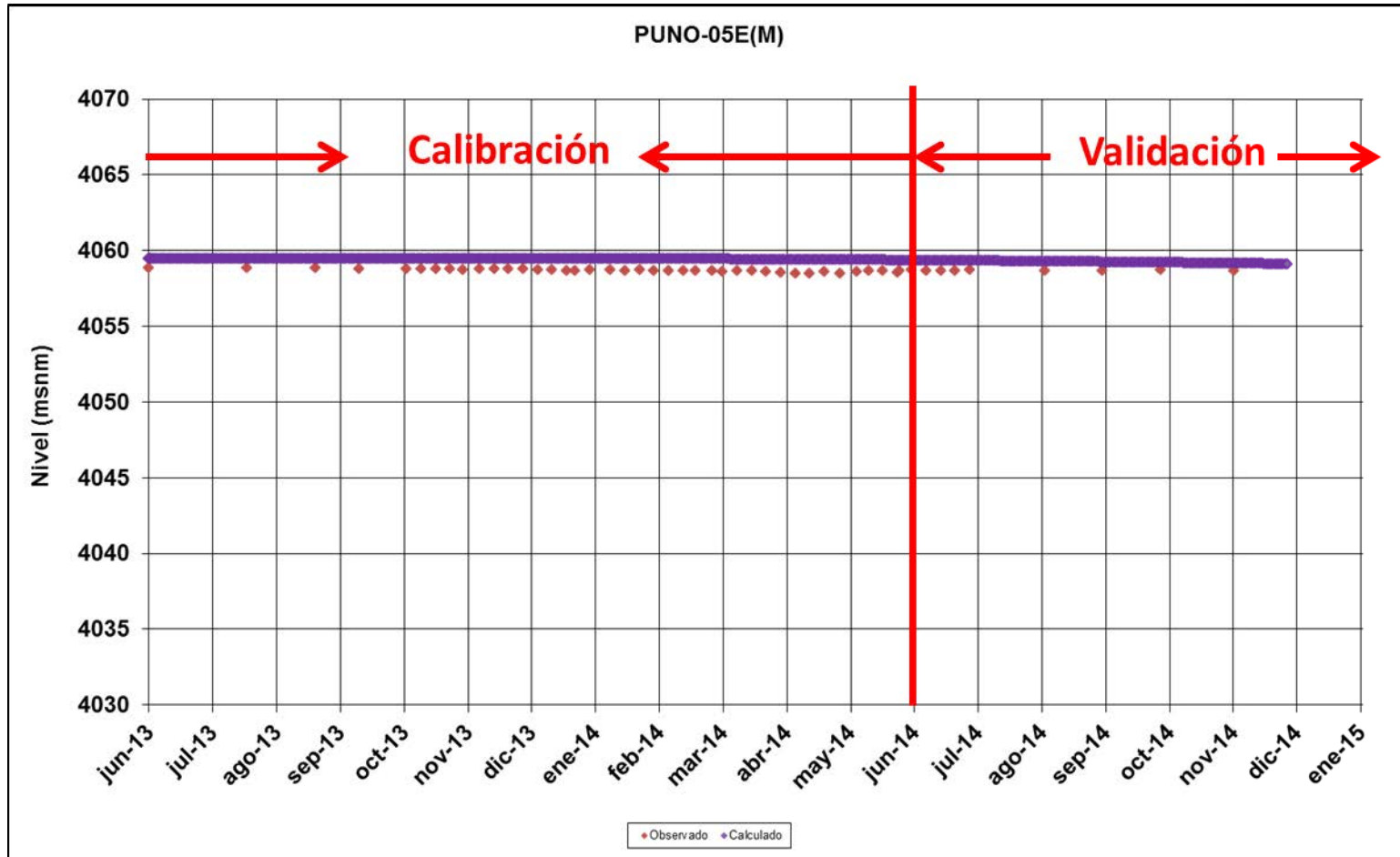
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.8  
Niveles Simulados y Observados PUNO-04B – Sector Norte



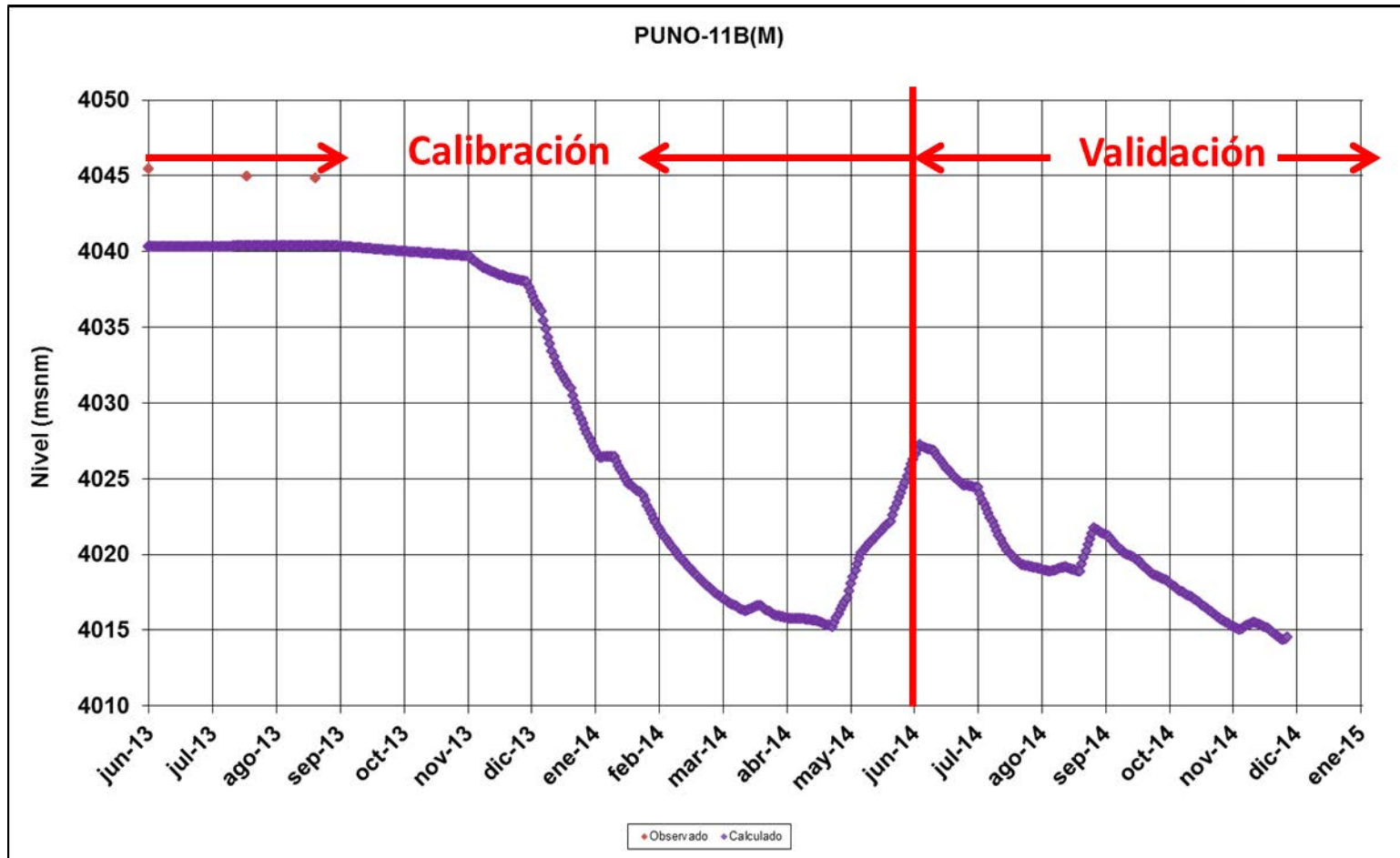
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.9  
Niveles Simulados y Observados PUNO-05E – Sector Norte



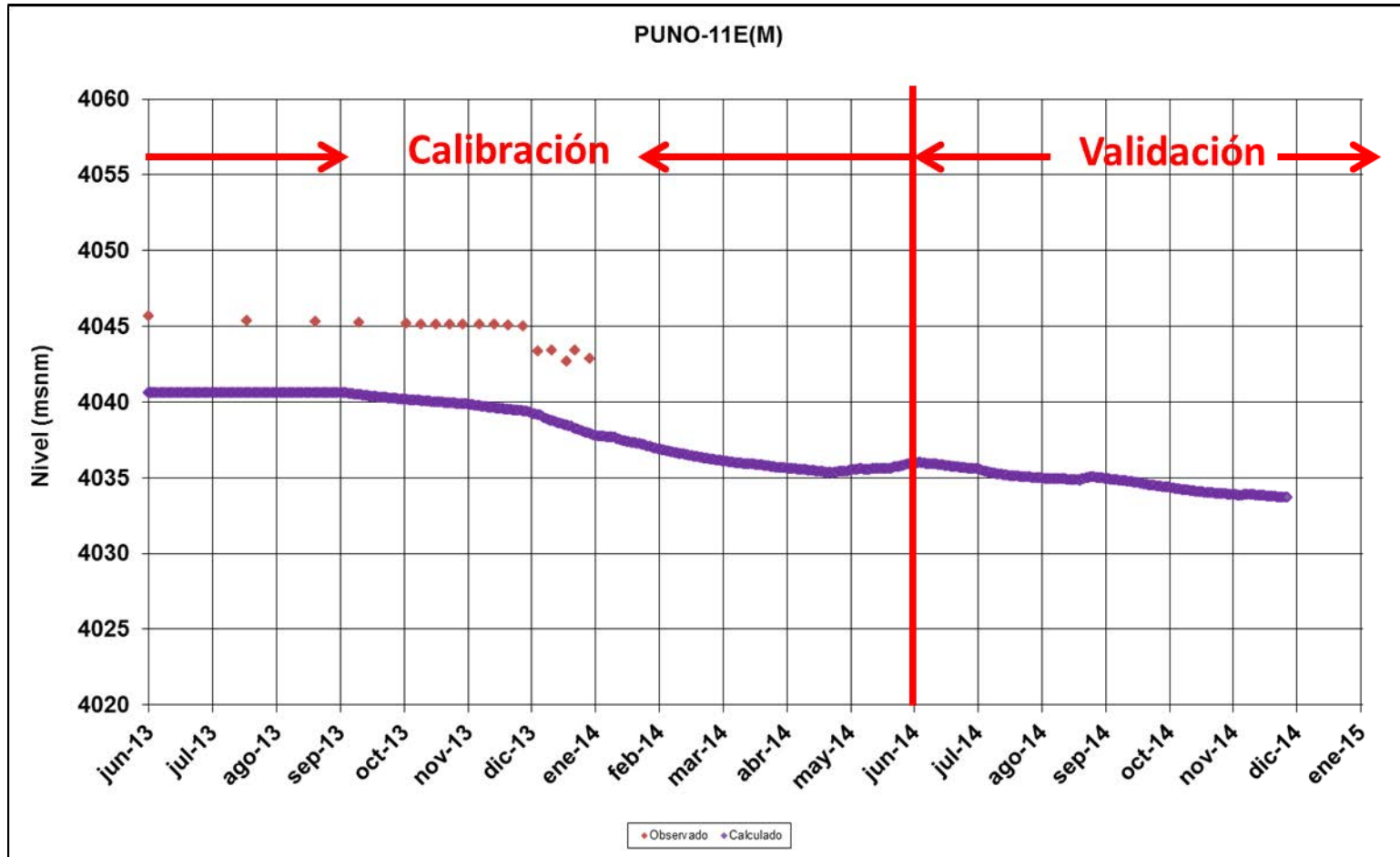
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.10  
Niveles Simulados y Observados PUNO-11B – Sector Norte



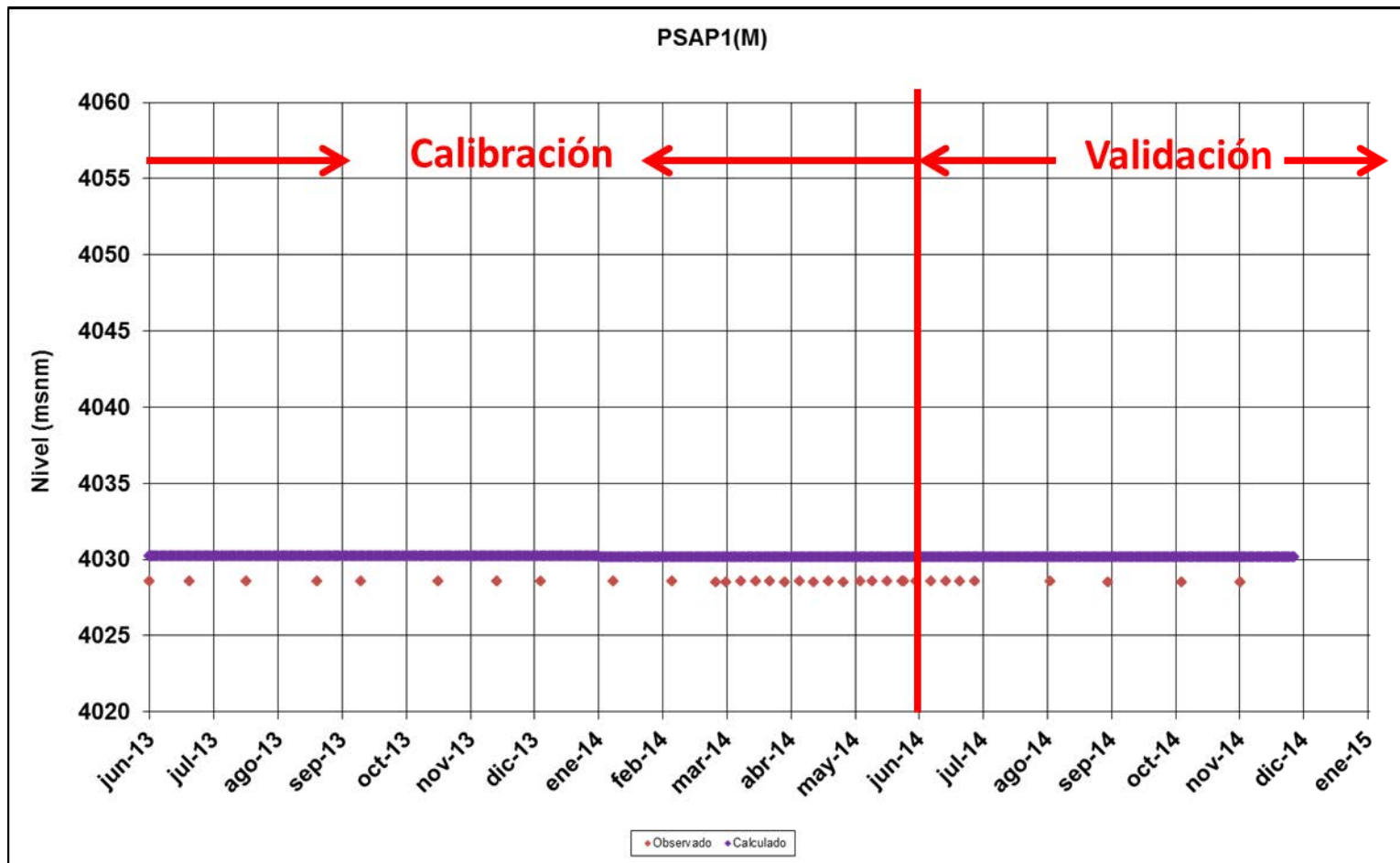
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.11  
Niveles Simulados y Observados PUNO-11E – Sector Norte



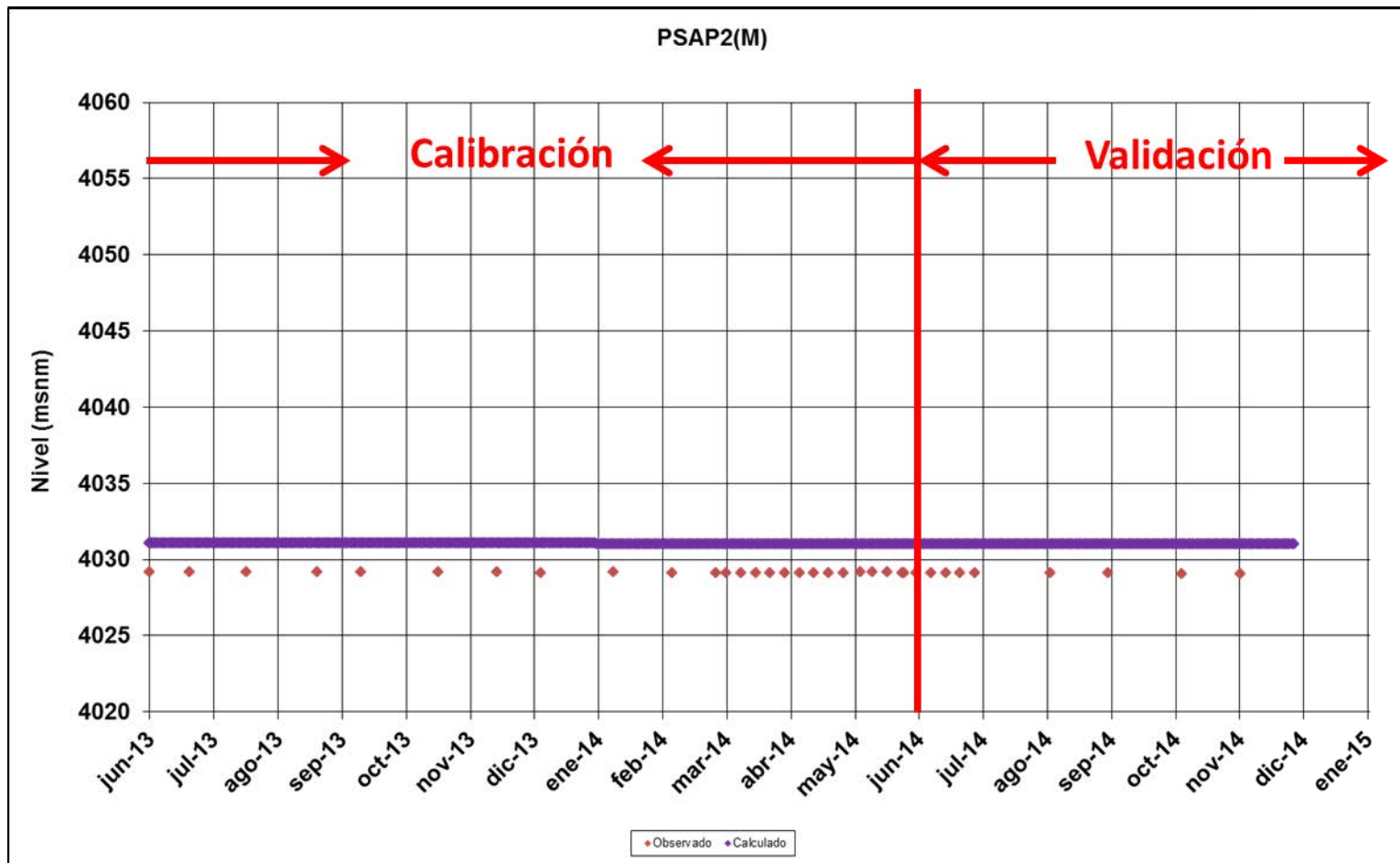
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.12  
Niveles Simulados y Observados PSAP-1 – Sector Norte



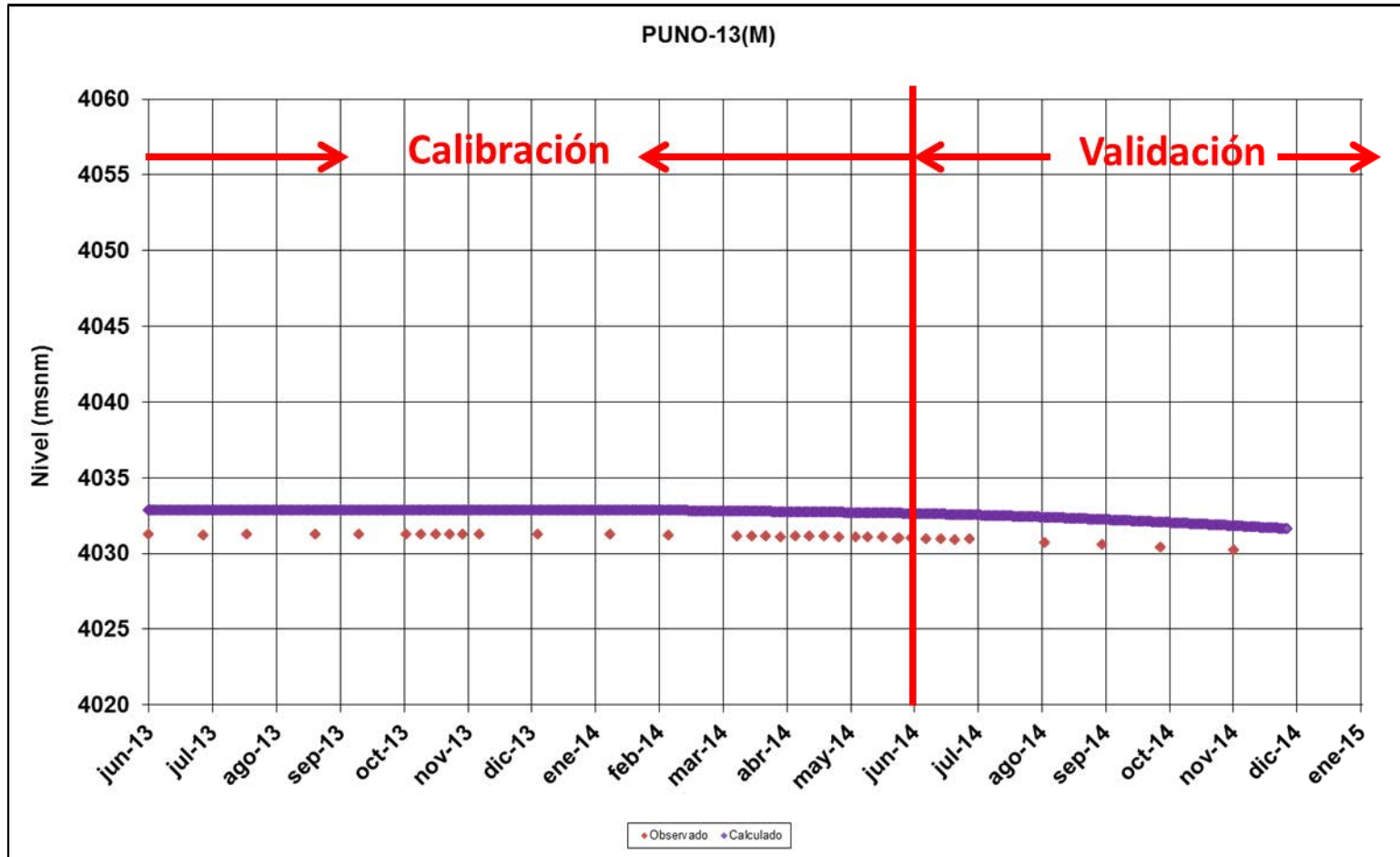
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.13  
Niveles Simulados y Observados PSAP-2 – Sector Norte



Fuente: Elaboración Propia

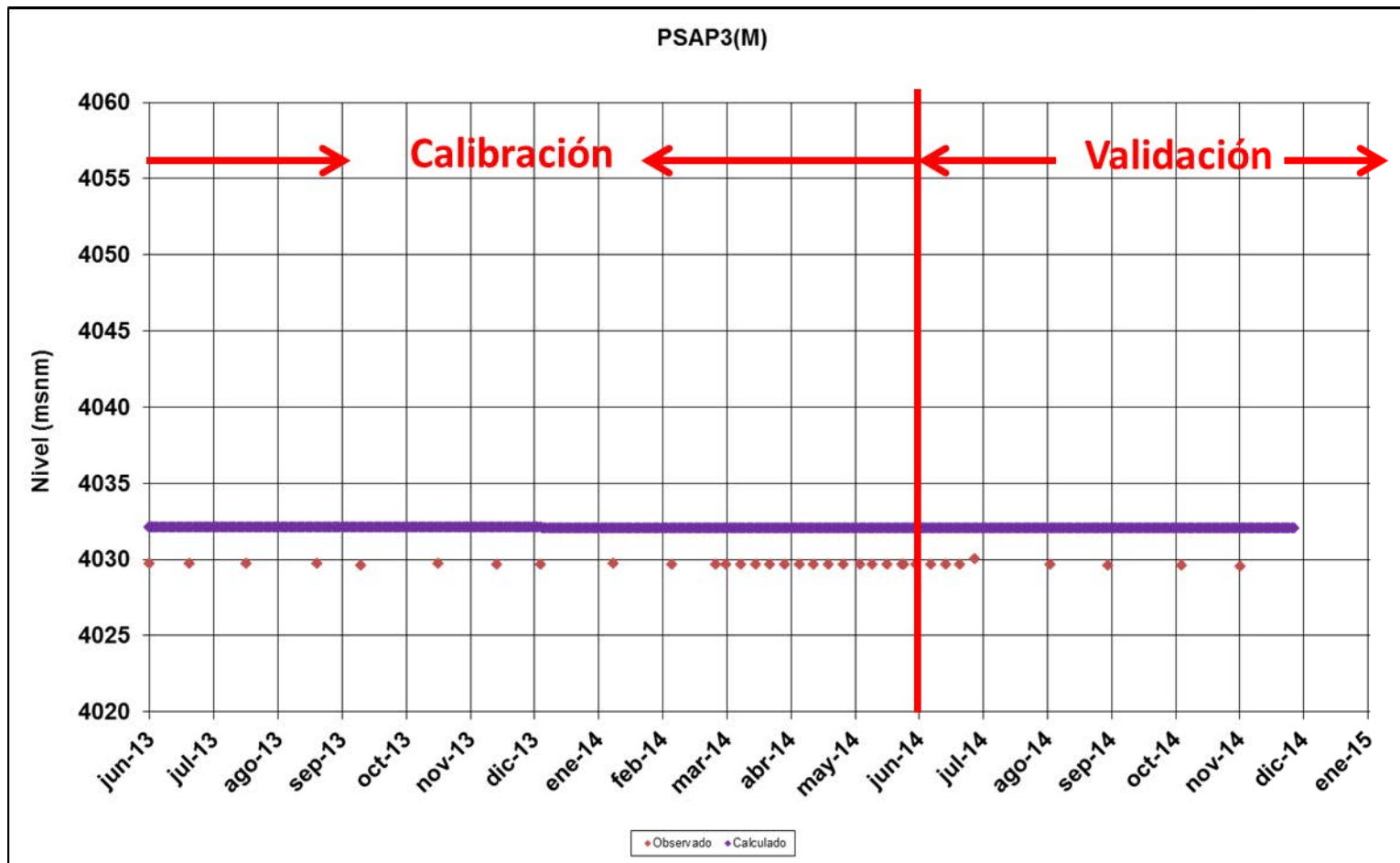
Figura I.14  
Niveles Simulados y Observados PUNO-13 – Sector Norte



Fuente: Elaboración Propia

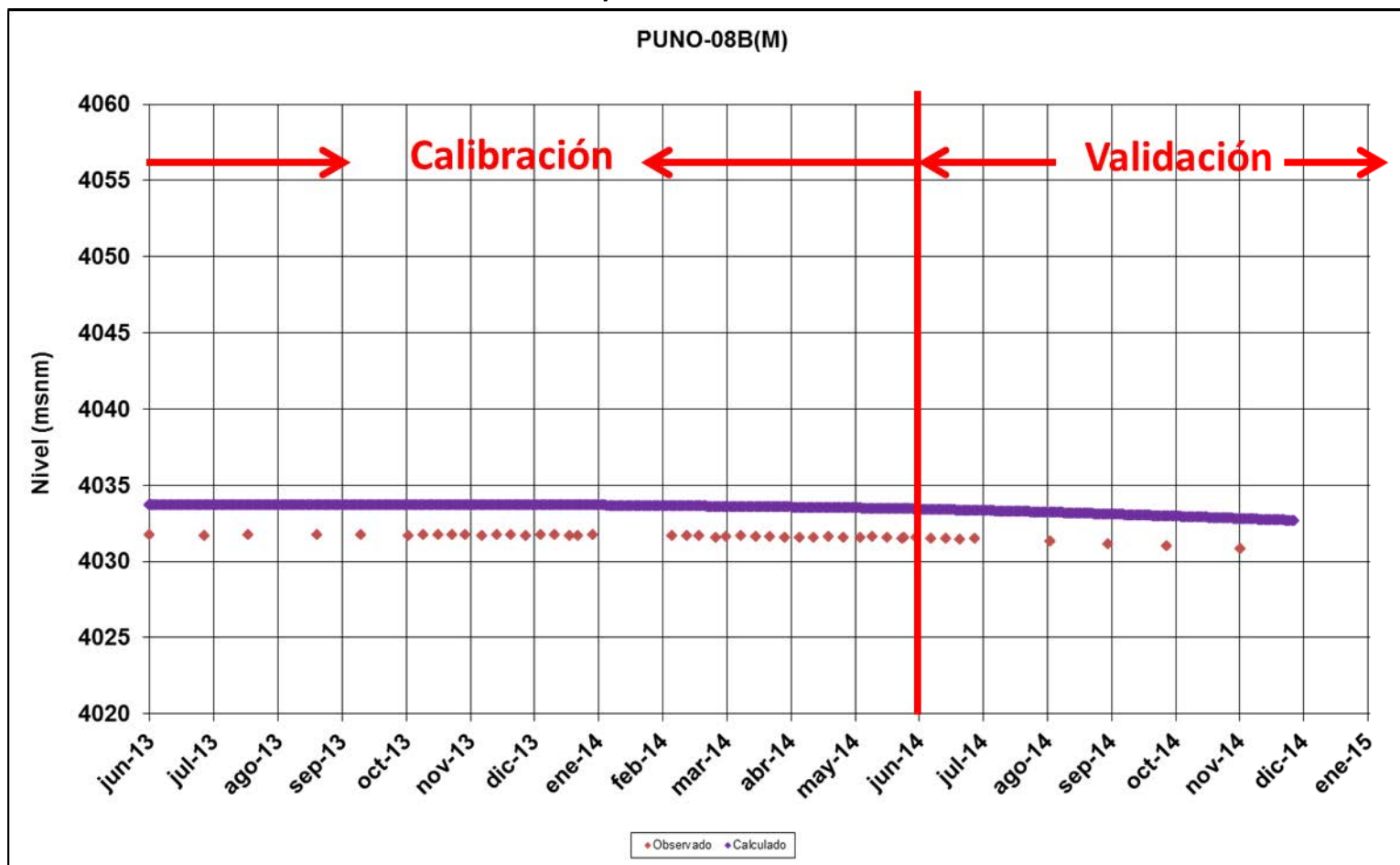


Figura I.15  
Niveles Simulados y Observados PSAP-3 – Sector Norte



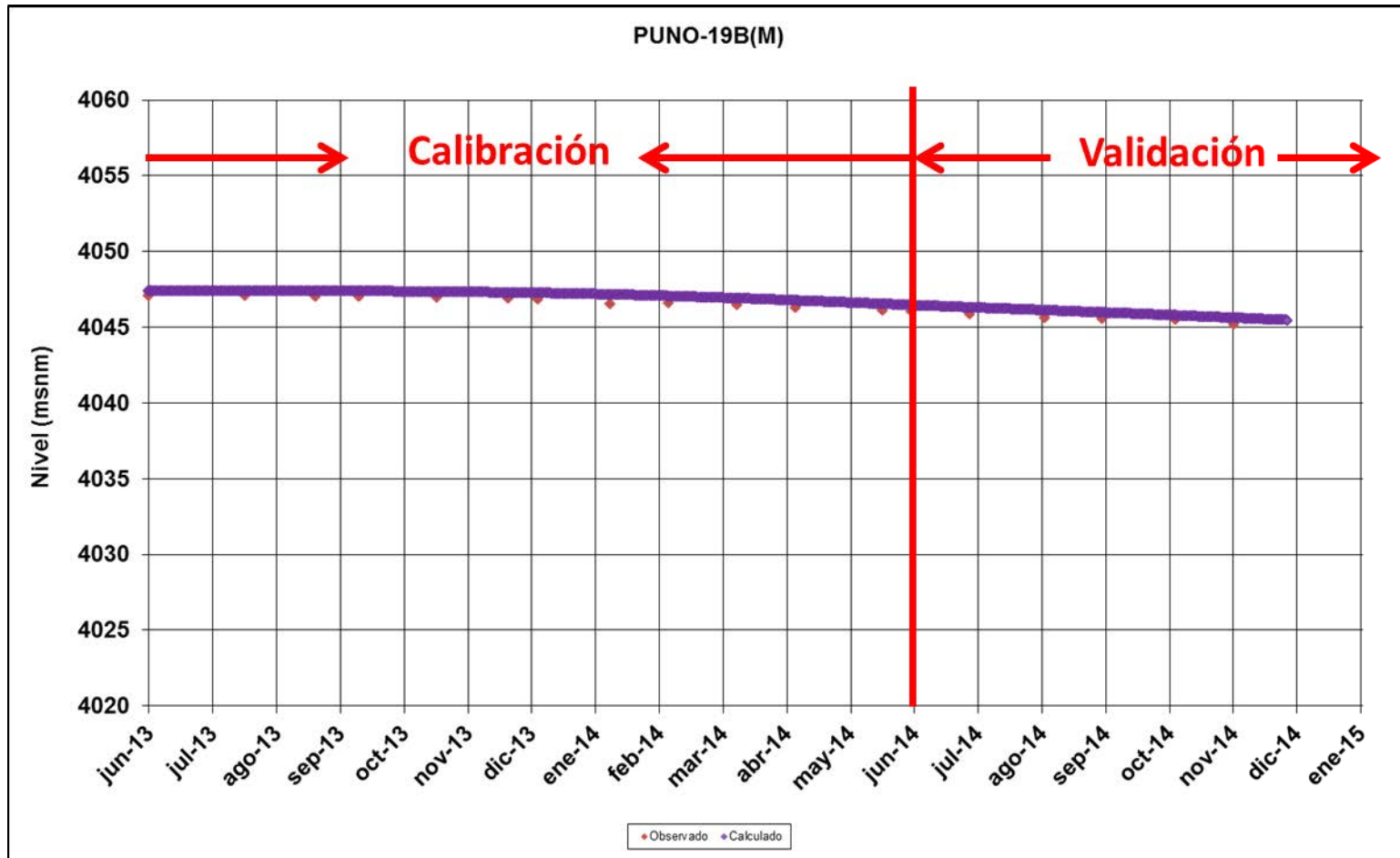
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.16  
Niveles Simulados y Observados PUNO-08B – Sector Norte



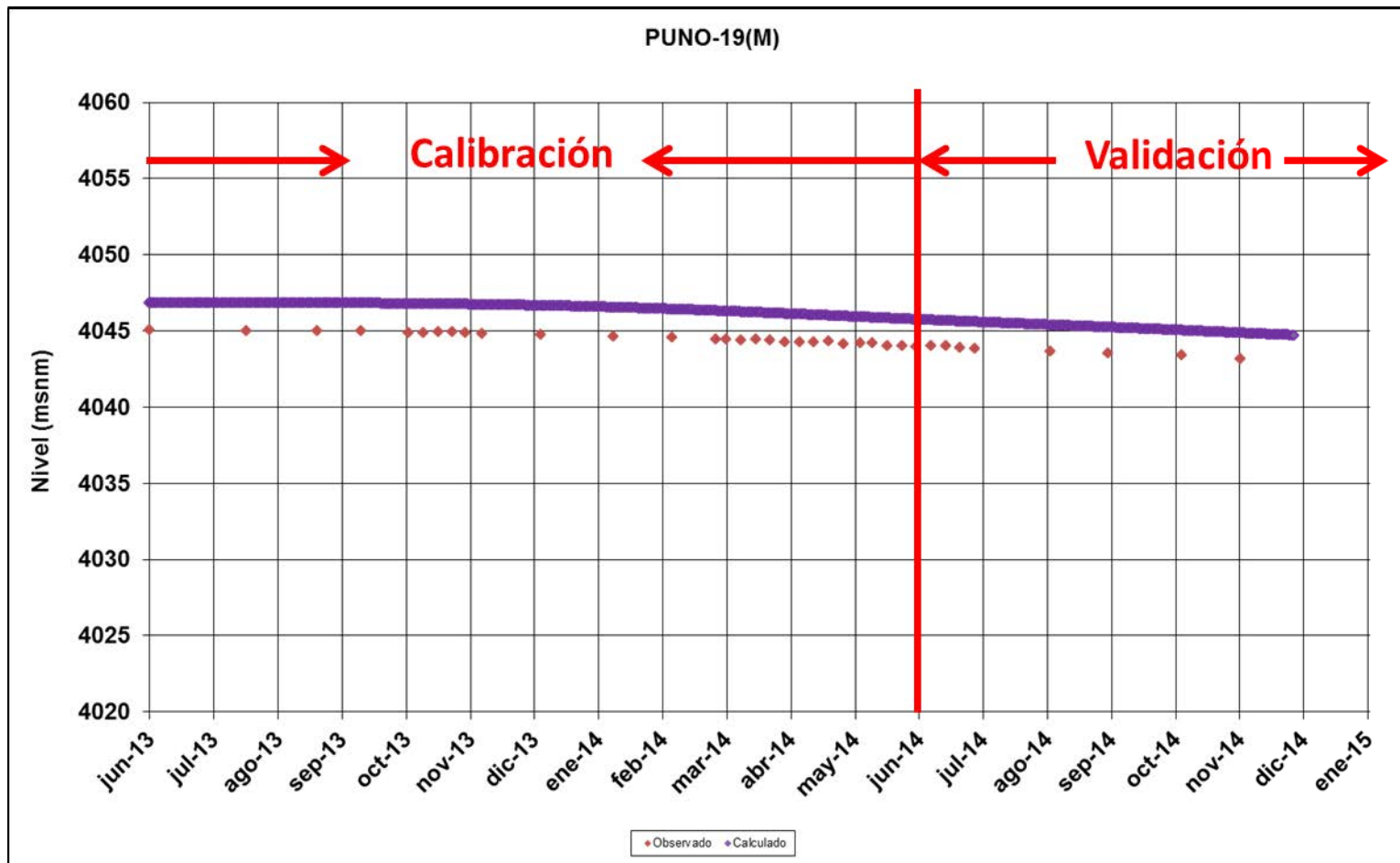
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.17  
Niveles Simulados y Observados PUNO-19B – Sector Centro



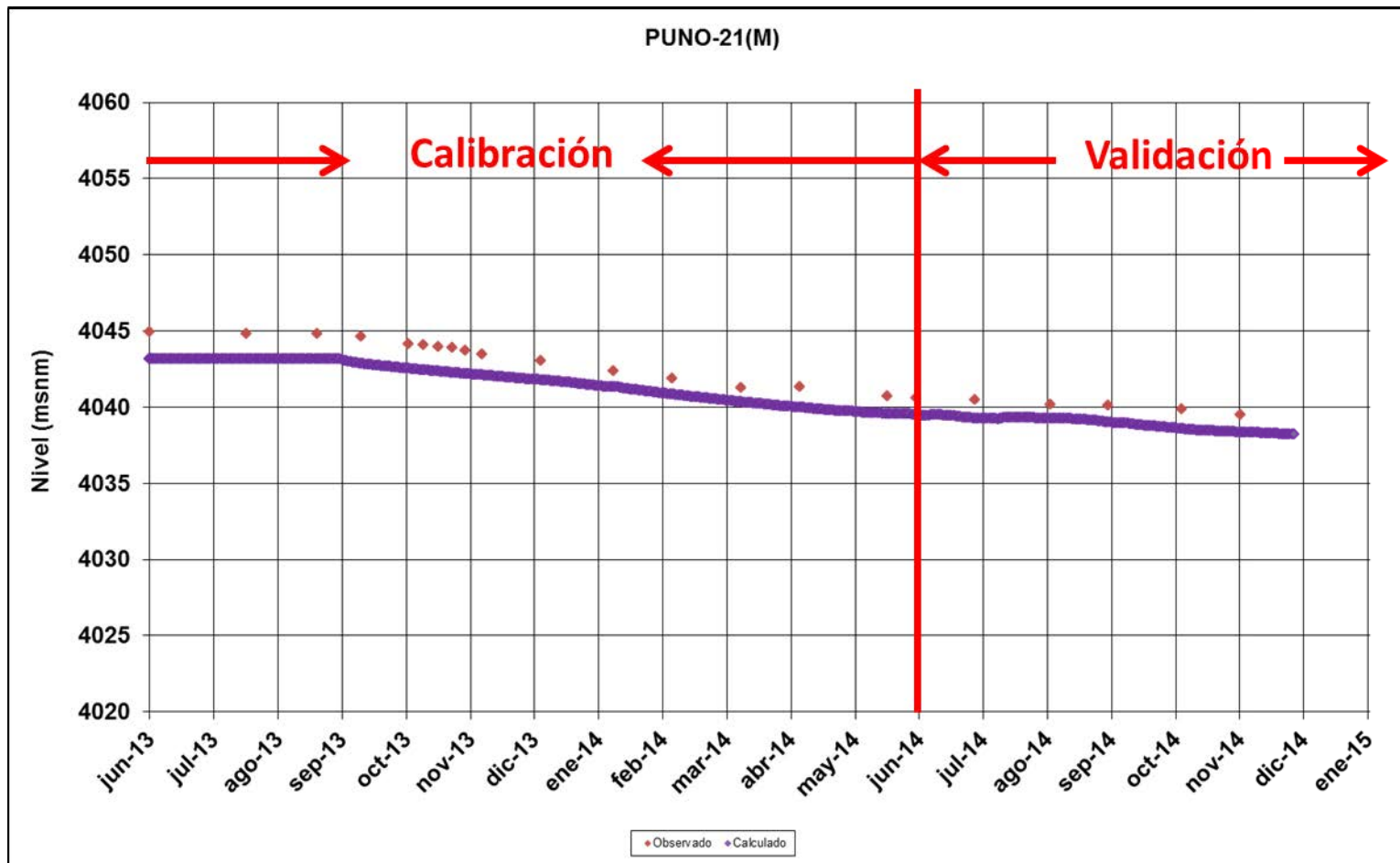
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.18  
Niveles Simulados y Observados PUNO-19 – Sector Centro



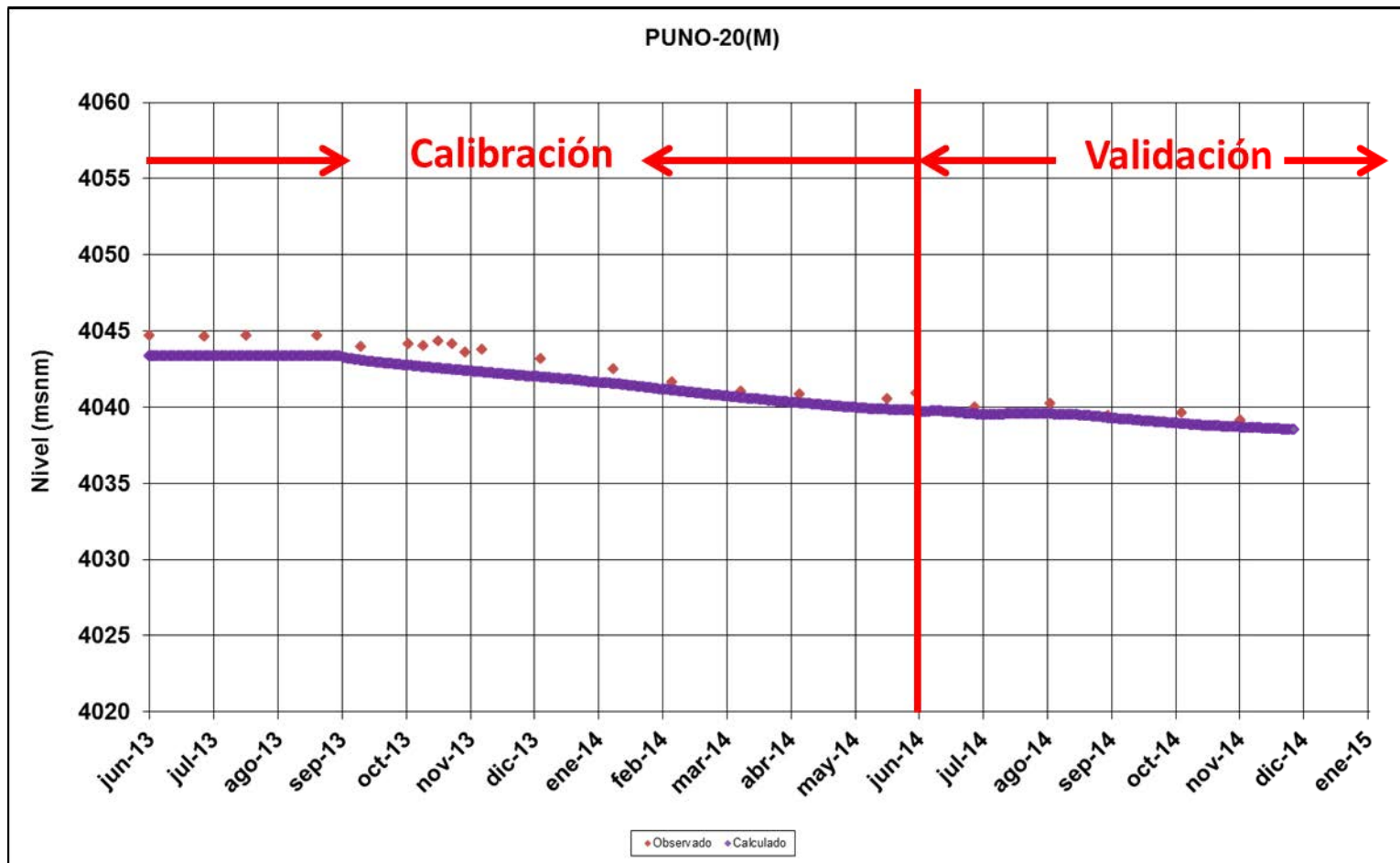
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.19  
Niveles Simulados y Observados PUNO-21 – Sector Centro



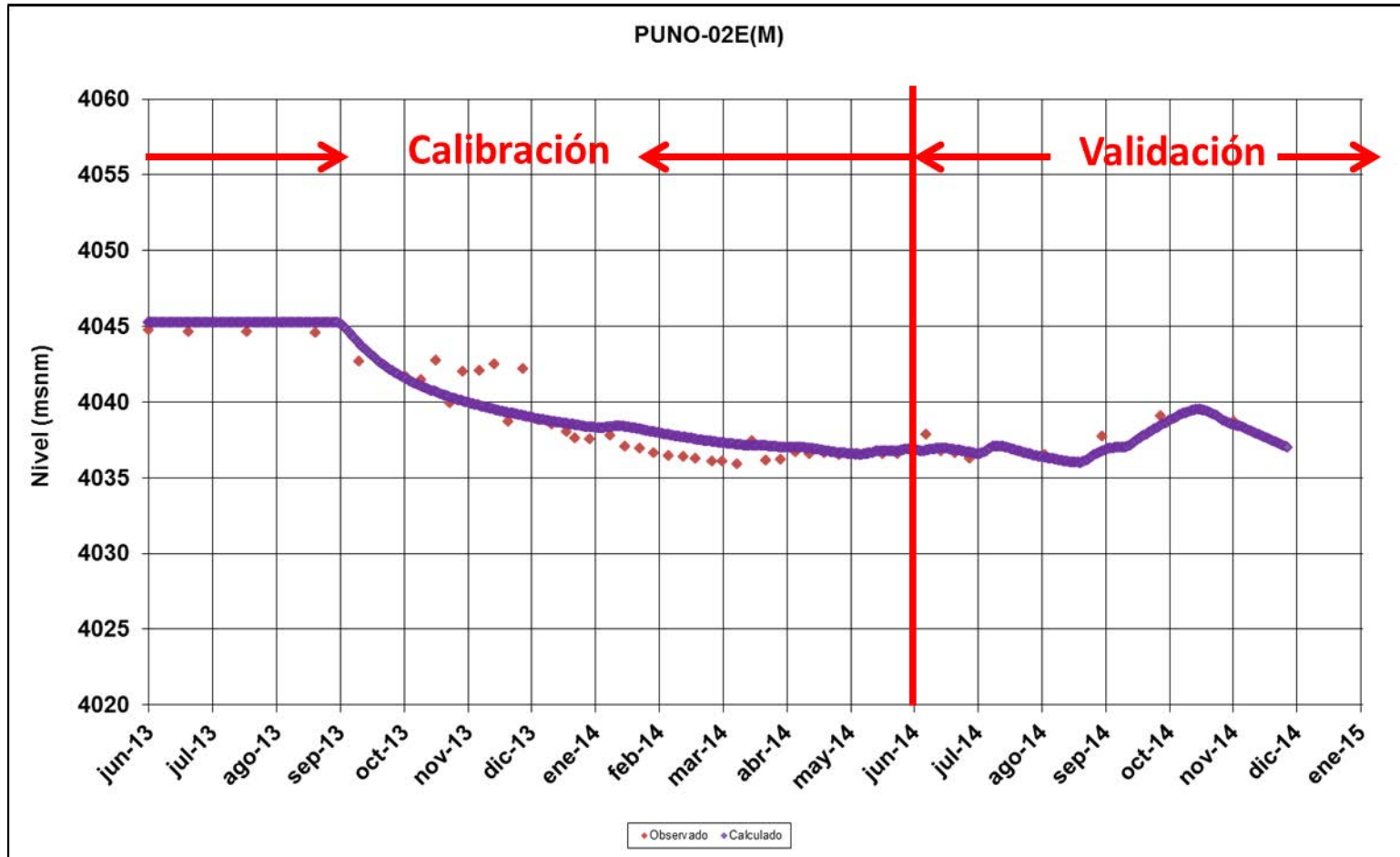
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.20  
Niveles Simulados y Observados PUNO-20 – Sector Centro



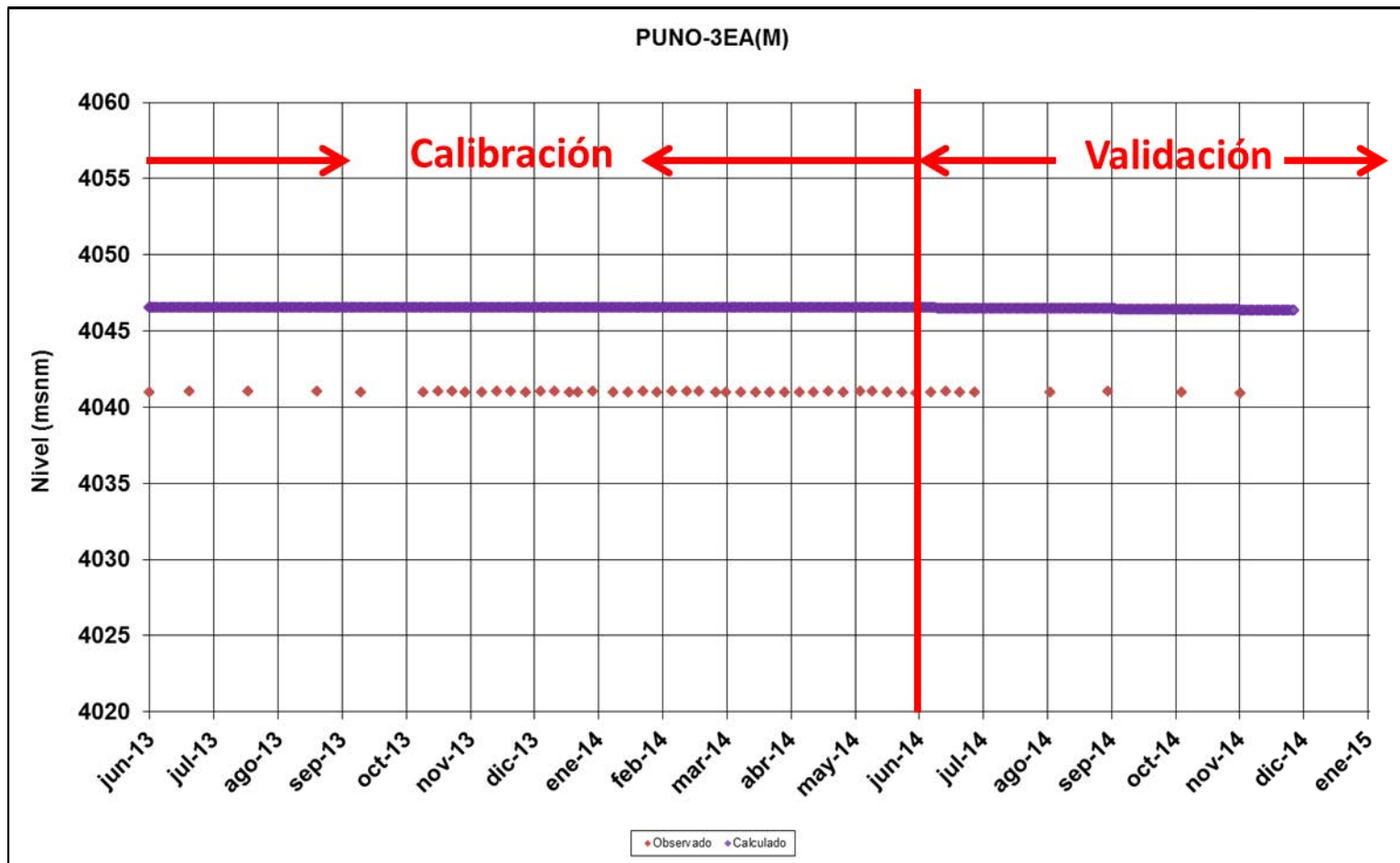
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.21  
Niveles Simulados y Observados PUNO-02E – Sector Sur



Fuente: Elaboración Propia

Figura I.22  
Niveles Simulados y Observados PUNO-3EA – Sector Sur



Fuente: Elaboración Propia



Figura I.23  
Niveles Simulados y Observados PUNO-314B – Sector Sur

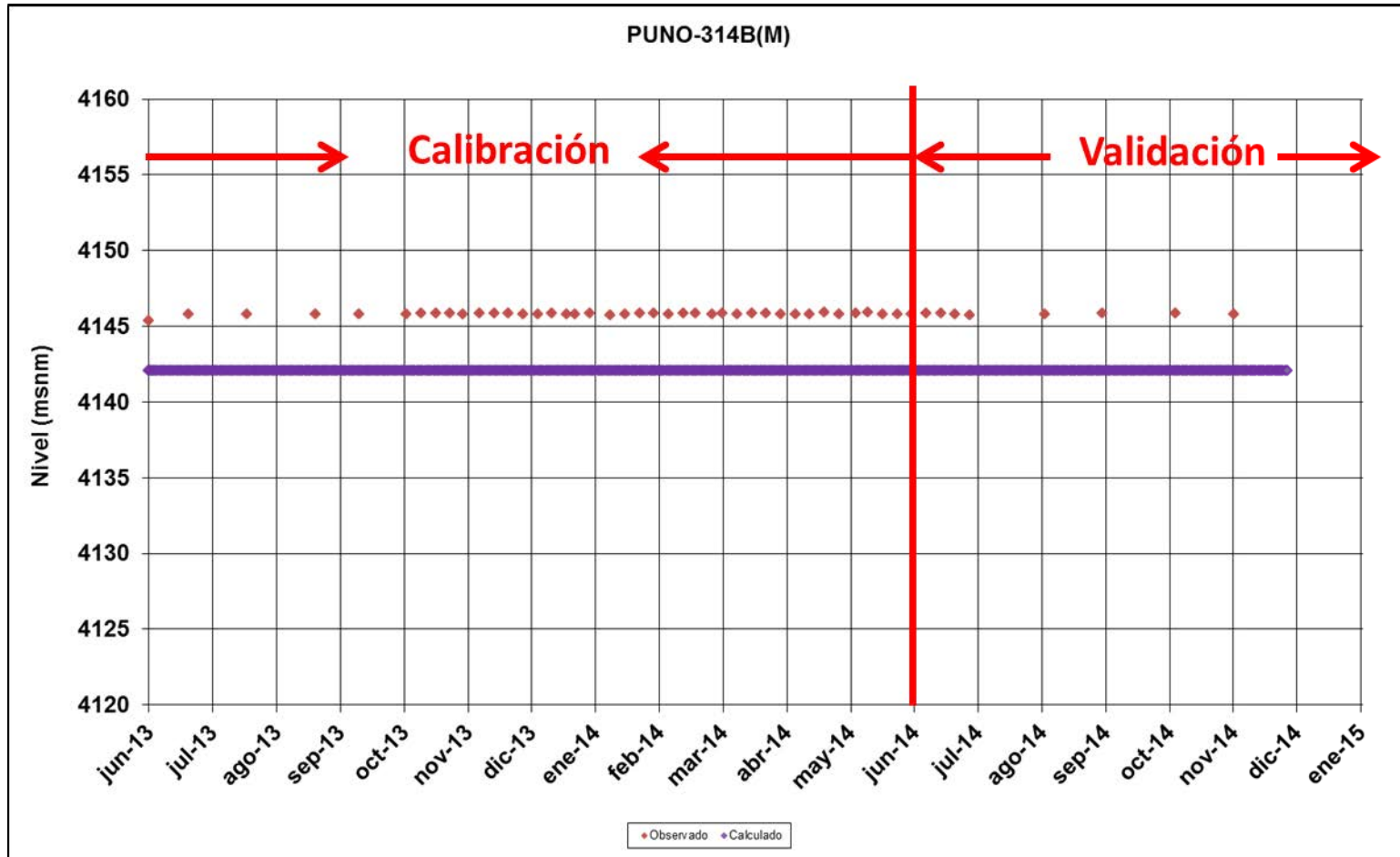
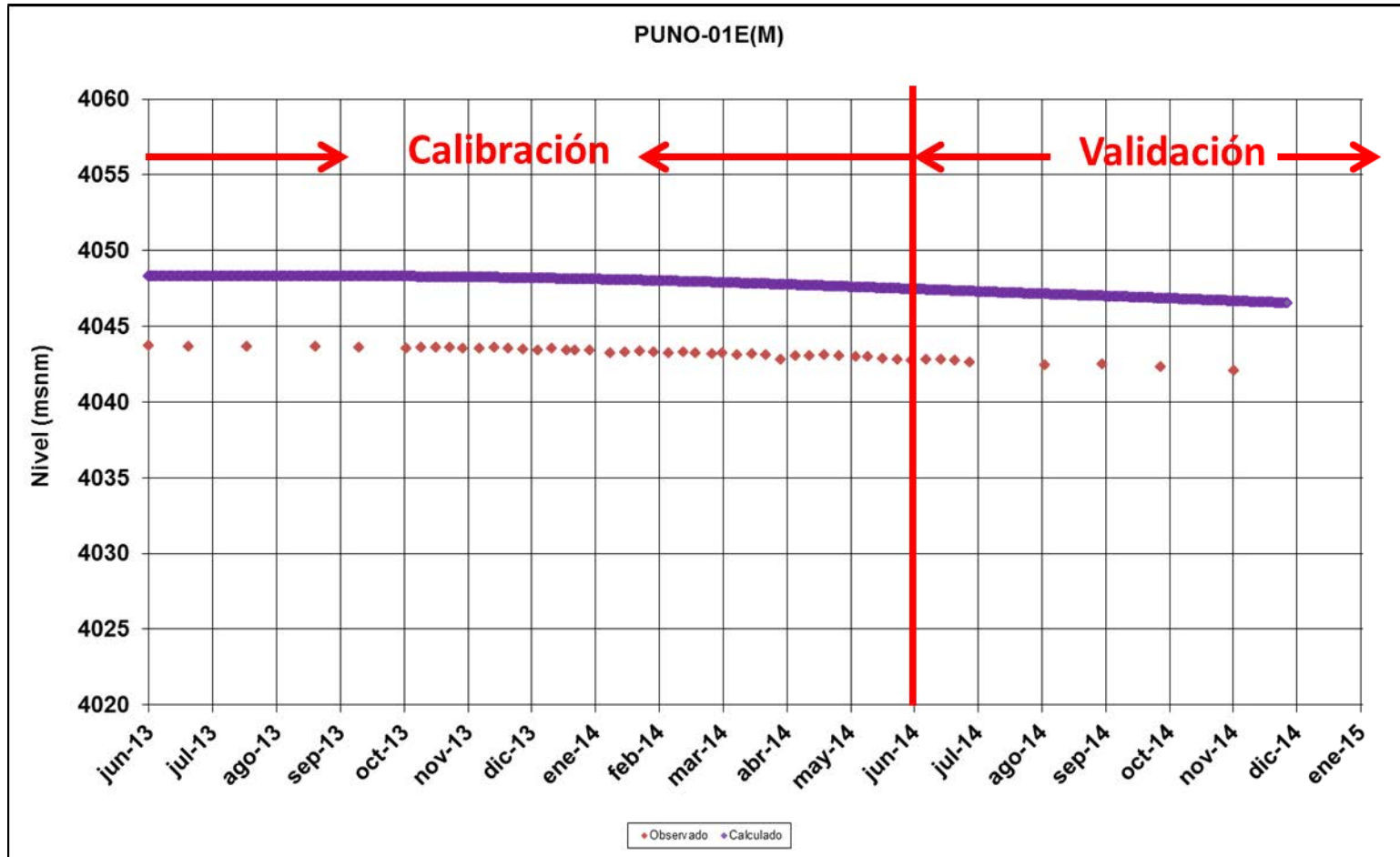
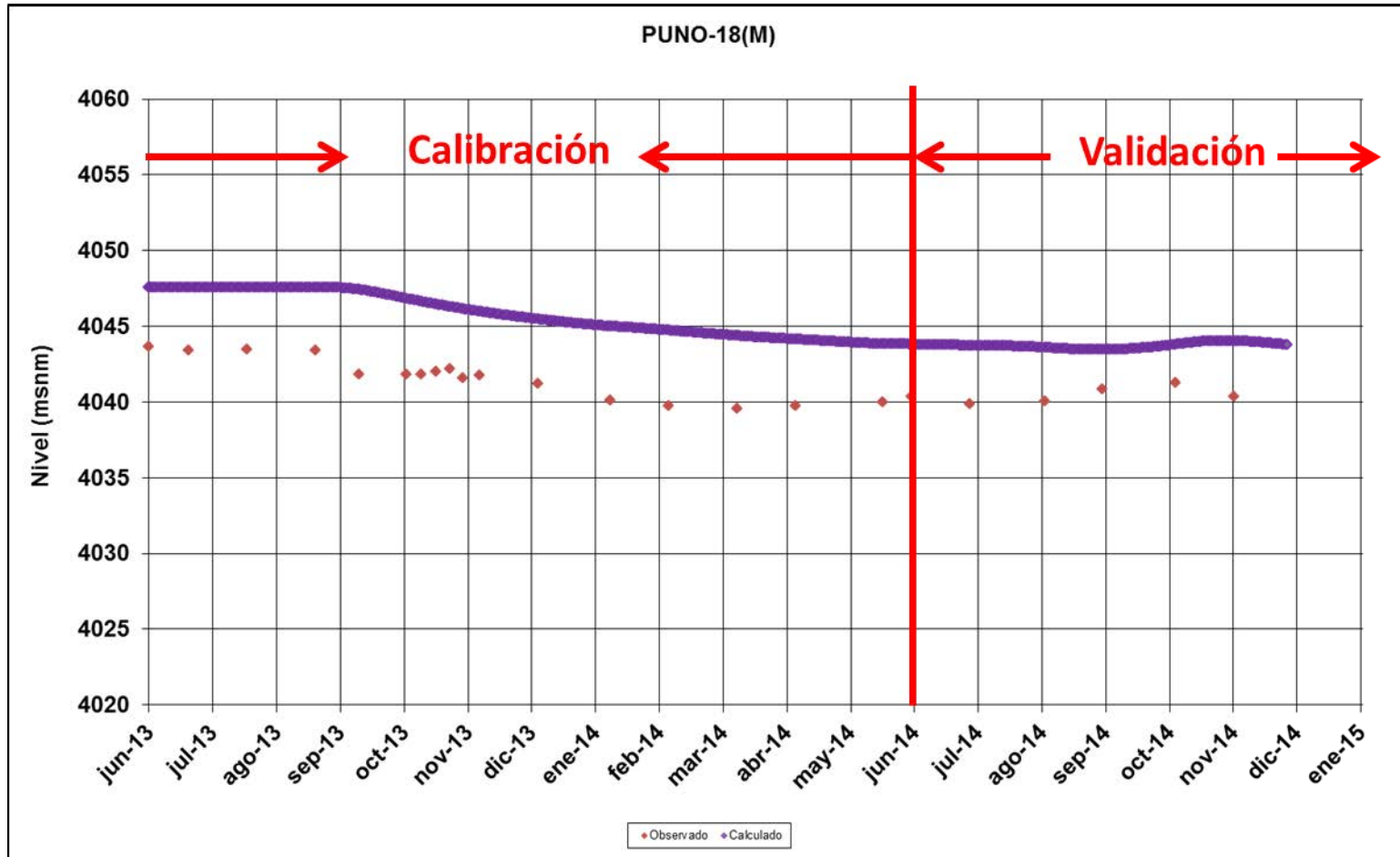


Figura I.24  
Niveles Simulados y Observados PUNO-01E – Sector Sur



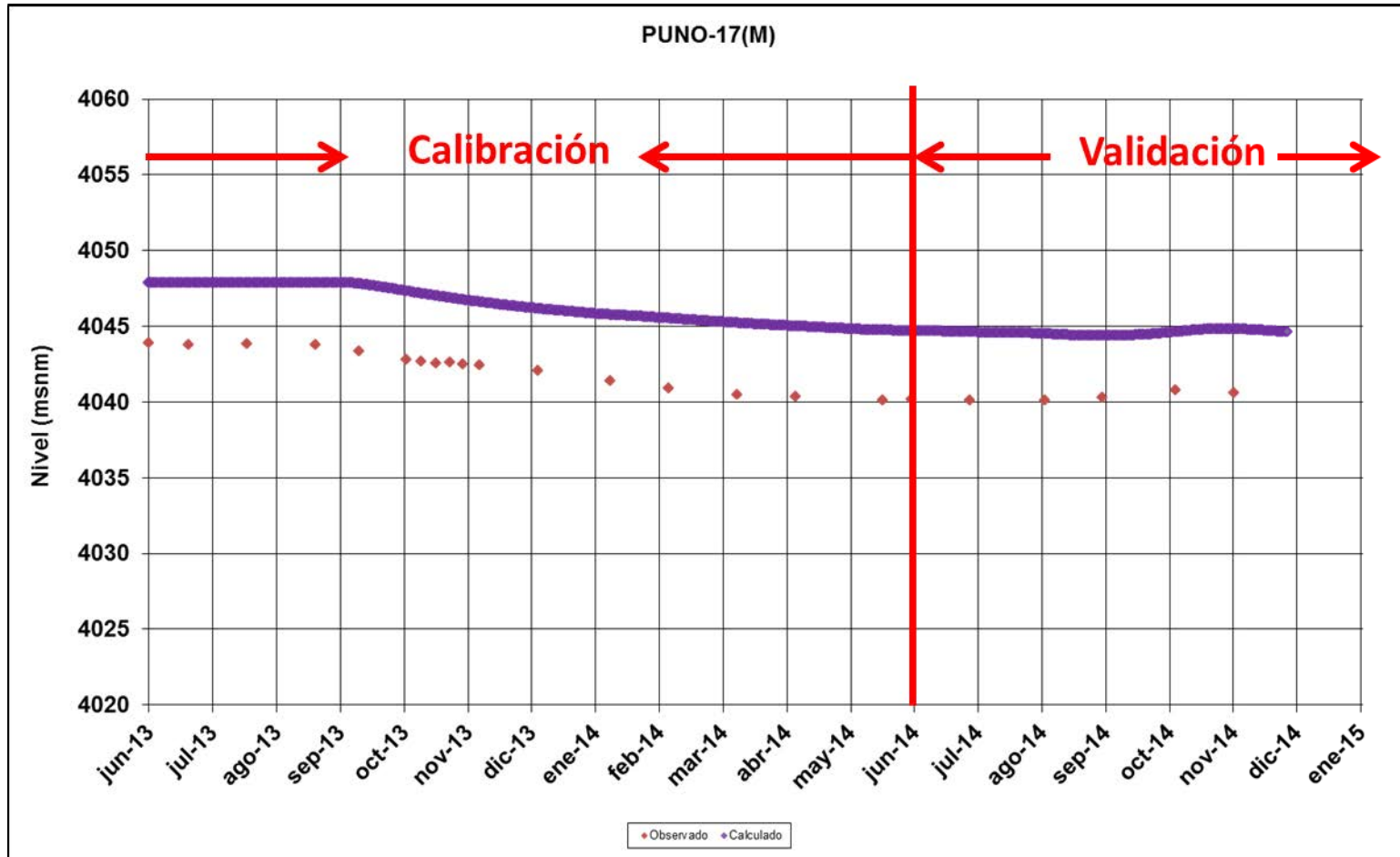
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.25  
Niveles Simulados y Observados PUNO-18 – Sector Sur



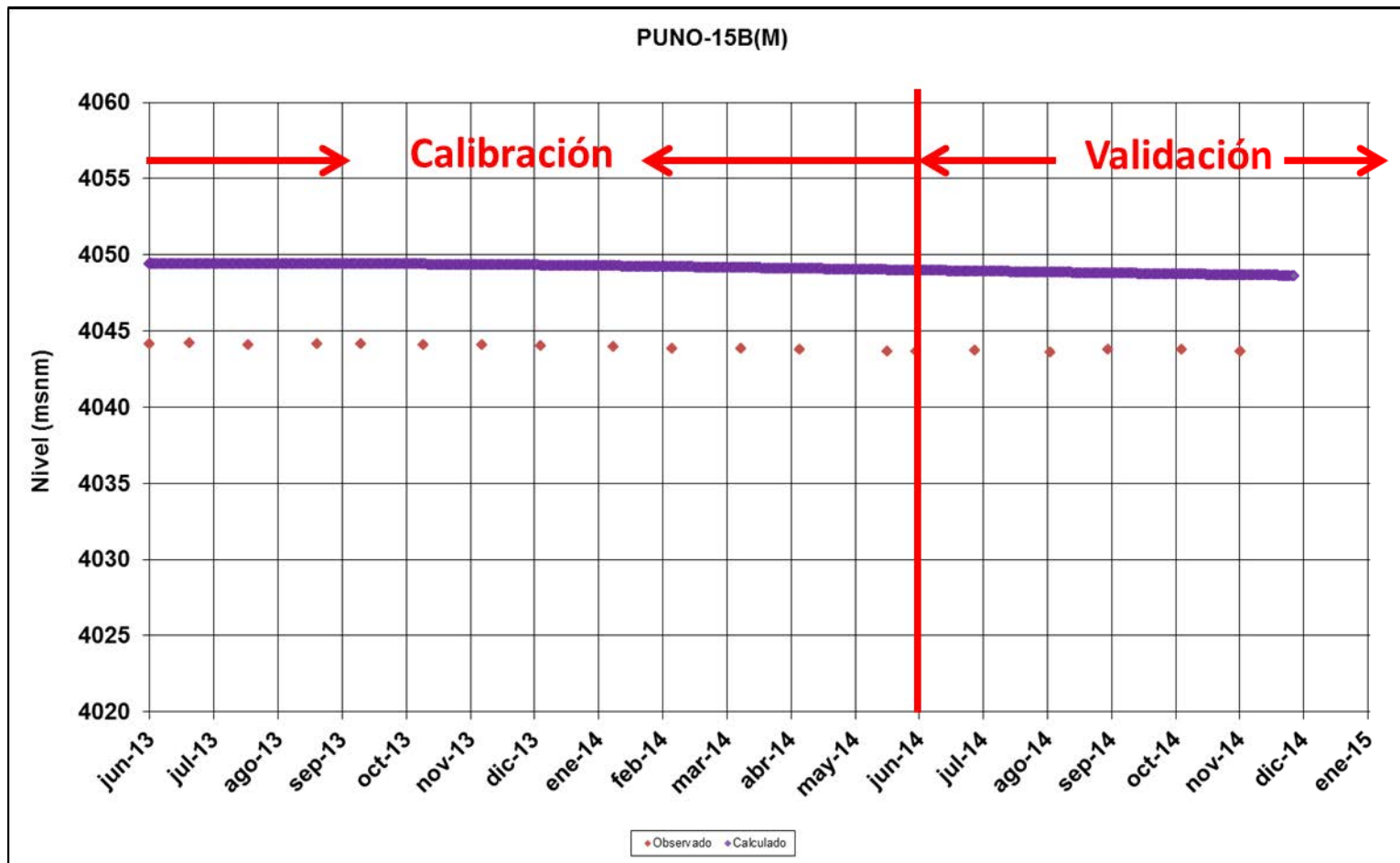
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.26  
Niveles Simulados y Observados PUNO-17 – Sector Sur



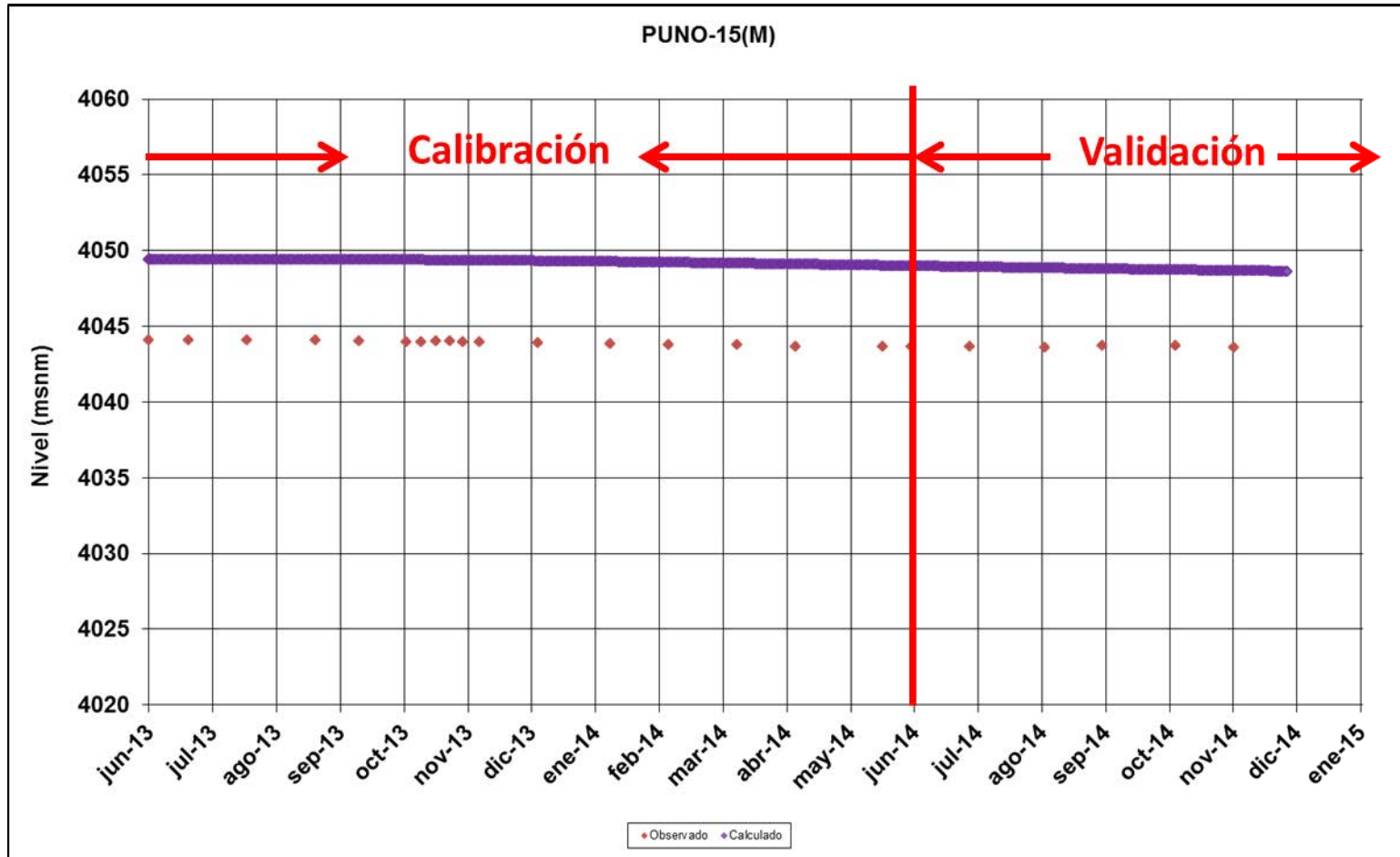
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.27  
Niveles Simulados y Observados PUNO-15B – Sector Sur



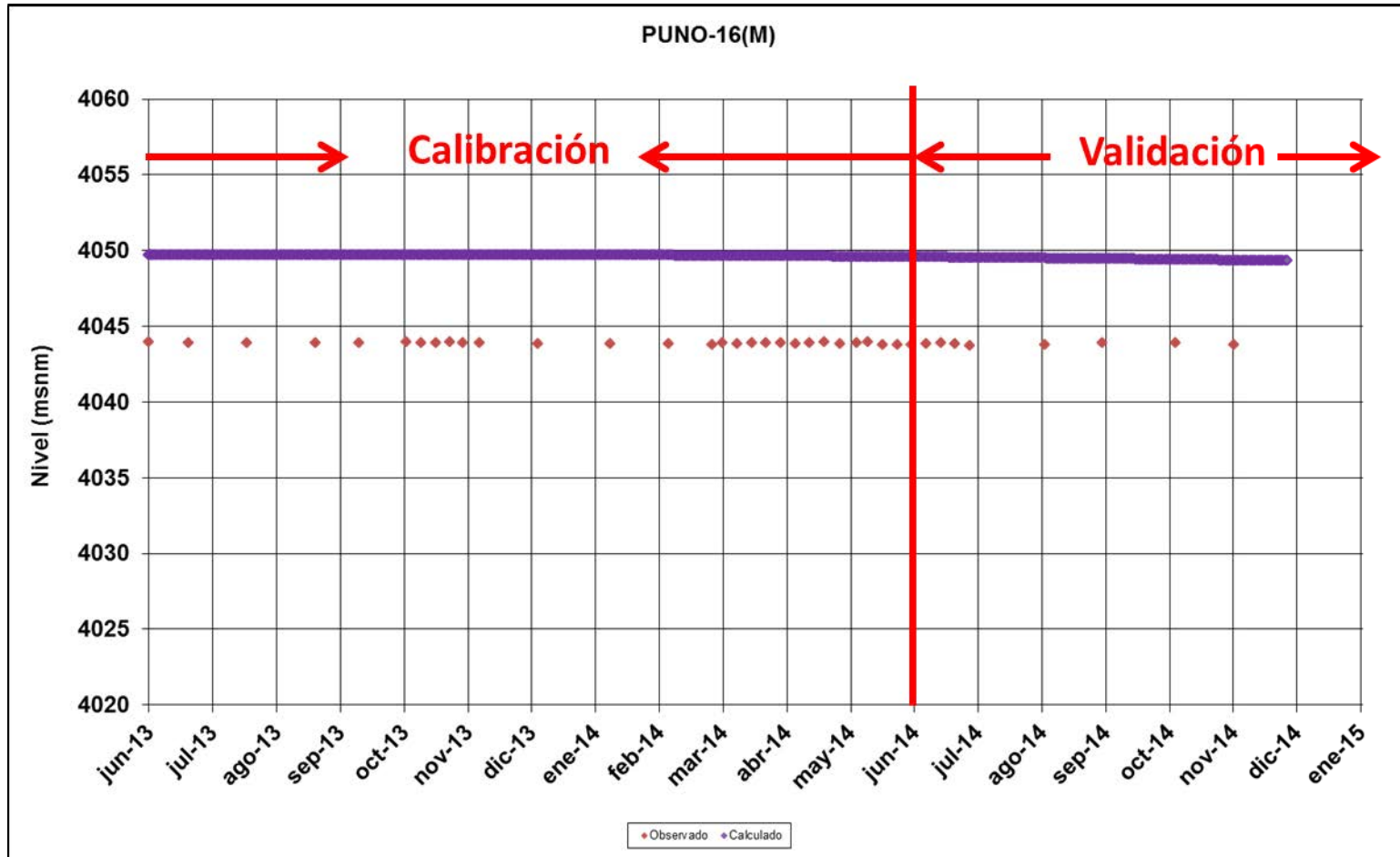
Fuente: Elaboración Propia

Figura I.28  
Niveles Simulados y Observados PUNO-15 – Sector Sur



Fuente: Elaboración Propia

Figura I.29  
Niveles Simulados y Observados PUNO-16 – Sector Sur



Fuente: Elaboración Propia