

# **PMAIM – SUBPROYECTO No. 7**

## **ESTUDIO HIDROGEOLOGICO DE LA MINA SAN JOSE Y LOS ACUIFEROS QUE SUMINISTRAN AGUA A LA CIUDAD DE ORURO**

### **Informe Final 3 Resultados de las Investigaciones de Campo: Interpretación Hidrogeoquímica**

**Preparado por:**

**Dames & Moore Norge**

**Para:**

**Corporación Minera de Bolivia  
(COMIBOL)**

**30 de Mayo de 2000**

**TABLA DE CONTENIDO**

**RESUMEN..... V**

**1.0 INTRODUCCION..... 1**

**2.0 LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO DE LAS UBICACIONES Y ELEVACIONES DE LOS POZOS..... 3**

**3.0 INVESTIGACIONES GEOFISICAS..... 5**

**3.1 METODOS GEOFISICOS.....5**

3.1.1 Sondeos Verticales Mediante Resistividad Eléctrica (VES).....6

3.1.2 Refracción Sísmica.....6

3.1.3 Perfilamiento Eléctrico.....6

3.1.4 Limitaciones y Suposiciones.....6

**3.2 ESTUDIOS PREVIOS.....7**

**3.3 ESTIMACION DE PARAMETROS GEOFISICOS.....8**

**3.4 CONSIDERACIONES PARA LA INTERPRETACION DE RESULTADOS GEOFISICOS EN EL AREA DE ORURO.....9**

**3.5 ESTUDIOS ACTUALES.....9**

3.5.1 Objetivos y Diseño de los Levantamientos.....9

**3.6 SONDEO VERTICAL MEDIANTE RESISTIVIDAD ELECTRICA (VES) - RESULTADOS E INTERPRETACION.....10**

**3.7 REFRACCION SIMICA – RESULTADOS E INTERPRETACION.....11**

3.7.1 Perfil G1.....12

3.7.2 Perfil G2.....12

3.7.3 Perfil G3.....13

3.7.4 Perfil G4.....13

3.7.5 Perfil G5.....14

3.7.6 Perfil G6.....14

3.7.7 Perfil G7.....14

**3.8 CONCLUSIONES.....14**

**4.0 PROGRAMA DE PERFORACION..... 16**

**4.1 OBJETIVOS Y UBICACIONES.....16**

**4.2 EQUIPAMIENTO.....17**

**4.3 PRUEBAS LUGEON.....18**

**4.4 CONCLUSIONES.....21**

<b>5.0</b>	<b>MUESTREO DE AGUAS SUBTERRANEAS .....</b>	<b>22</b>
5.1	OBJETIVOS.....	22
5.2	UBICACIONES DE MUESTRAS Y RESULTADOS DE CAMPO.....	24
5.3	PROTOCOLO DE MUESTREO .....	24
	5.3.1 Pozos de Observación .....	24
	5.3.2 Pozo de Producción.....	26
	5.3.3 Aguas Superficiales .....	26
	5.3.4 Muestras Blanco y Duplicadas.....	26
	5.3.5 Registro de Datos.....	27
5.4	PROCEDIMIENTOS ANALITICOS.....	27
5.5	RESULTADOS .....	28
	5.5.1 Resultados de las Determinaciones de Campo .....	28
	5.5.2 Análisis de Laboratorio.....	31
	5.5.3 Muestras de Control de Calidad.....	31
	5.5.4 Interferencia Analítica con ICP-MS .....	33
5.6	INTERPRETACION DE DATOS .....	33
	5.6.1 Distribución Geográfica.....	36
	5.6.2 Comparación del Análisis con los Criterios Permisibles .....	47
5.7	CONCLUSIONES .....	53
<b>6.0</b>	<b>PRUEBA DE BOMBEO DE LOS POZOS .....</b>	<b>58</b>
6.1	POZO DE PRODUCCION PP-117 DEL AEROPUERTO (TAMBIEN CONOCIDO COMO PPO-BP-107).....	58
6.2	POZOS DE OBSERVACION.....	61
6.3	CONCLUSIONES .....	62
<b>7.0</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Resumen de Estudios Geofísicos Anteriores en el Area del Proyecto.
Tabla 3.2	Unidades Litológicas dentro del Area de Estudio y sus Probables Características Físicas
Tabla 3.3	Predicción de profundidades a la roca madre sobre la base de: 1) sondeos VES, y 2) el mapa de curvas de nivel preparado por Dames & Moore Norge
Tabla 4.1	Valores de Conductividad Hidráulica (K) derivados del Análisis (Apéndice 5) de las Pruebas Lugeon realizadas en el Pozo DM2.
Tabla 4.2	Valores de Conductividad Hidráulica (K) derivados del Análisis (Apéndice 5) de las Pruebas Lugeon realizadas en el Pozo DM-5.
Tabla 5.1	Ubicaciones y Resultados de las Determinaciones de Campo para las Aguas Muestreadas
Tabla 5.2	Ubicaciones de los Puntos de Muestreo de Aguas Superficiales.

Tabla 5.3	Resultados (meq/l) de Análisis para Cationes y Aniones mayores, con Balances Iónicos Calculados
Tabla 5.4	Resultados Analíticos de las Muestras de Control de Calidad: Agua de PPSJ-10 y Muestra Duplicada (DUP) de este Pozo
Tabla 5.5	Concentraciones de los Parámetros en los Pozos PPSJ-1, PPSJ-7, DM-5, DM-6 y PPSJ-10
Tabla 5.6	Parámetros Detectados en Concentraciones que Exceden los Estándares Bolivianos en la Muestra del Pozo de Producción SeLA-3
Tabla 5.7	Parámetros Detectados en Concentraciones que Exceden los Estándares Bolivianos en la Muestra del Pozo de Producción SeLA-2
Tabla 5.8	Parámetros Detectados en Concentraciones que Exceden los Estándares Bolivianos en la Muestra del Pozo de Producción SeLA-4
Tabla 5.9	Parámetros Detectados en Concentraciones que Exceden los Estándares Bolivianos en la Muestra del Pozo de Producción PP-11
Tabla 5.10	Resumen de los Resultados Analíticos que Exceden los Estándares Bolivianos de las Muestras del Río Tagarete
Tabla 5.11	Resumen de los Resultados Analíticos que Exceden los Estándares Bolivianos de la Muestra 1 del Canal de Agua de Mina.
Tabla 5.12	Resumen de los Resultados Analíticos que Exceden los Estándares Bolivianos de la Muestra 2 del Canal de Agua de Mina.
Tabla 5.13	Iones que exceden los Estándares Permisibles en los Pozos Excavados por Dames & Moore Norge
Tabla 5.14	Iones que Exceden los Estándares Permisibles en los Pozos de Observación Existentes Seleccionados
Tabla 6.1	Datos no depurados de la Prueba de Bombeo del Pozo de Observación 118CD-1PO, 14/10/99
Tabla 6.2	Datos no depurados de la Prueba de Bombeo del Pozo de Observación 118CD-1P, 14/10/99
Tabla 6.3	Datos no depurados de la Prueba de Bombeo del Pozo de Observación PP-117, 14/10/99
Tabla 6.4	Datos no depurados para el Análisis Thiem
Tabla 6.6	Valores Derivados de Transmisividad y Conductividad Hidráulica a partir de las Pruebas de Bombeo de los Pozos de Aguas Subterráneas Muestreados
Tabla 6.5	Análisis Jacob de los Datos de Bombeo

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Mapa Topográfico de Líneas Sísmicas, Líneas VES y Pozos Dames & Moore
Figura 2.2	Mapa de Superficie de Roca Basado en Pozos; Líneas VES y; Pozos Dames & Moore
Figura 2.3	Perfil Sísmico G1
Figura 2.4	Perfil Sísmico G2
Figura 2.5	Perfil Sísmico G3
Figura 2.6	Perfil Sísmico G4

Figura 2.7	Perfil Sísmico G5
Figura 2.8	Perfil Sísmico G6
Figura 2.9	Perfil Sísmico G7
Figura 3.1	Descripción Litológica. Perforación DM-1
Figura 3.2	Descripción Litológica. Perforación DM-2
Figura 3.3	Descripción Litológica. Perforación DM-3
Figura 3.4	Descripción Litológica. Perforación DM-4
Figura 3.5	Descripción Litológica Perforación DM-5
Figura 3.6	Descripción Litológica Perforación DM-6
Figura 4.1	Cambios en el pH y la Alcalinidad entre los Pozos de Monitoreo PPSJ-1, PPSJ-7 y DM5
Figura 4.2	Cambios en la Concentraciones de Elementos Seleccionados en las Aguas Subterráneas entre los Pozos PPSJ-1, PPSJ7 y DM-5
Figura 4.3	Cambios en la Concentraciones de Elementos Seleccionados en las Aguas Subterráneas entre los Pozos PPSJ-1, PPSJ7 y DM-5
Figura 5.1	Análisis Gráfico de Tacon de los Datos de H8Cd-1PO
Figura 5.2	Análisis y Gráficos de Tacon de los Datos de H8Cd-1P
Figura 5.3	Análisis Gráfico de Tachem del Abatimiento de 30 Minutos en los Tres Pozos del Acuífero

## LISTA DE APENDICES

Apéndice 1	Hoja de Campo para Muestreo Hidroquímico
Apéndice 2	Análisis del Bombeo Datos Recuperados del Muestreo de los Hoyos de Perforación del Agua Subterránea
Apéndice 3A	Resultados Analíticos de los Análisis de Agua Subterránea de los Laboratorios
Apéndice 3B	Resultados Analíticos de los Análisis de Agua Subterránea comparados con los Estándares de Calidad de Agua de Bolivia y de la USEPA
Apéndice 4A	Mapas Hidrogeoquímicos de Distribución de los Elementos Seleccionados en Aguas Subterráneas del Sistema del Acuífero Cuaternario
Apéndice 4B	Mapas Hidrogeoquímicos de Distribución de los Elementos Seleccionados en Aguas Subterráneas del Sistema del Acuífero Cuaternario y de Aguas Superficiales del Canal de Agua de la Mina y del Río Tagarete en los alrededores del Canal de la Mina/Río Tagarete
Apéndice 5	Análisis de Pruebas Lugeon de Hoyos de Perforación DM-2 y DM-5
Apéndice 6	Metodología del Levantamiento Topográfico y Elevaciones de los Pozos y sus Coordenadas Encontradas
Apéndice 7	Procedimientos de Perforación

## **INFORME 3 RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES DE CAMPO / INTERPRETACION HIDROGEOQUIMICA**

### **RESUMEN**

#### **OBJETIVO**

Este informe documenta los resultados de las siguientes actividades de campo realizadas por Dames & Moore Norge:

- Levantamiento Topográfico de las ubicaciones y elevaciones de los pozos de monitoreo
- Investigaciones geofísicas
- Programa de perforación
- Muestreo e interpretación hidroquímica de agua
- Prueba de bombeo del pozo de producción PP-117 (aeropuerto) y de varios pozos de observación.

#### **PRINCIPALES HALLAZGOS**

##### **Levantamiento Topográfico, Geofísica, Perforación, Pruebas de Bombeo**

A continuación se presentan los principales hallazgos provenientes de las investigaciones de campo y documentadas en el informe

- La calidad de los datos del levantamiento topográfico es variable. Los datos sobre las elevaciones de pozos son de alta calidad; los datos de GPS para las ubicaciones de pozos requirieron de correcciones ocasionales por la referencia con las coordenadas en los mapas topográficos.
- Los Sondeos Verticales Mediante Resistividad Eléctrica (SEV) no dieron buenos resultados en la ubicación de la superficie de la roca madre, debido a que las capas superiores de sedimento eran conductivas y altamente salinas. Las interpretaciones basadas en investigaciones VES previas deben ser tratadas con un alto grado de escepticismo.
- El empleo de la refracción sísmica para la generación de la forma de la superficie de la roca madre debajo de la cubierta cuaternaria fue exitoso. Sin embargo, no se pueden deducir profundidades absolutas debido a la ausencia de información complementaria de la perforación. La refracción sísmica no pudo distinguir entre los sedimentos compactados y la roca madre debido a la ausencia de datos de la perforación. Por lo tanto, se debe cuestionar la confiabilidad de los datos de investigaciones sísmicas anteriores.

- Se realizaron exitosamente pruebas Lugeon en la parte superior de la roca madre (hasta aproximadamente 20 m debajo de la superficie de la roca madre). Esta zona es somera, meteorizada, fracturada y, por lo general, tiene una conductividad hidráulica de aproximadamente  $1 \times 10^{-5}$  m/s.
- La sección más profunda del pozo DM-5 fue mucho más competente y devolvió un valor de conductividad hidráulica de  $6 \times 10^{-8}$  m/s. Este valor es de la misma orden de magnitud que del valor de la conductividad hidráulica en masa deducida en el Informe I para la roca madre profunda que circunda la mina, es decir  $3 \times 10^{-8}$  m/s.
- Se efectuó un bombeo de prueba del pozo de producción PP-117 del aeropuerto, obteniendo resultados de alta calidad. Un análisis Jacob de los resultados dio un valor de transmisividad de 670 m<sup>2</sup>/d y un coeficiente de almacenamiento de  $1.6 \times 10^{-4}$ . Un análisis Thiem de la prueba de bombeo dio una transmisividad de 750 m<sup>2</sup>/d.
- Las pruebas de bombeo que se realizaron a pequeña escala en los pozos de monitoreo durante el muestreo de aguas subterráneas, típicamente dieron valores entre 1 - 20 m/d para la conductividad hidráulica en sedimentos del acuífero del Cuaternario.

## INVESTIGACIONES HIDROQUÍMICAS

A continuación se resumen los principales hallazgos del programa de muestreo y análisis de aguas subterráneas realizado por Dames & Moore Norge:

- Los pozos ubicados al este de San José parecen estar contaminados por parámetros químicos relacionados con actividades mineras. Los pozos afectados son PPSJ-1, PPSJ-7, PPSJ-10, PPO-13, PPO-14, PPO-15, DM-6 y, hasta cierto grado, DM-5.
- Aparentemente existen tres fuentes de contaminación discreta:
  - (i) Lixiviado de los residuos mineros alrededor de San José, que resulta en contaminación por varios elementos. Este tipo de contaminación es típico en los pozos PPSJ-1, PPSJ-7 y DM-5, en concentraciones que disminuyen progresivamente con la distancia al sitio de la mina.
  - (ii) Infiltración de agua de mina salina de la mina San José a través de la base del canal de agua de mina o del río Tagarete. Esto conduce a la contaminación por varios elementos. Los pozos afectados de esta forma son PPSJ-10 (cerca del canal de agua de mina), PPO-14, PO-15 y DM-6 (cerca del río Tagarete). El pozo PPO-13 también parece estar impactado, lo que resulta sorprendente, considerando que yace al norte de la confluencia del canal de agua de mina y del río Tagarete. Sin embargo, la confluencia del río y del canal yace cerca a la divisorio de aguas subterráneas que se encuentra entre los flujos de dirección norte y sur de dichas aguas, y se puede pensar que la infiltración de agua de mina en este punto pueda fluir hacia el norte. Alternativamente, se puede atribuir la contaminación a las inversiones del flujo en el río Tagarete, lo cual se observó durante el trabajo de campo realizado en diciembre de 1999.

- (iii) Infiltración del lixiviado de desechos / aguas negras procedentes del río Tagarete y/o fugas del alcantarillado. Aparentemente esta contaminación se caracteriza por elevados niveles de nitrato,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{I}^-$ .
- La hidroquímica natural del área al este de Oruro parece ser salina, lo que hace difícil determinar si la aparente contaminación producida por algunos parámetros es natural o no (por ejemplo, cloruro en PPSJ-10 o PPO-14). Es interesante que, aparentemente, existe una divisoria de salinidad que corresponde a la posición de la proyectada divisoria de aguas subterráneas (en las cercanías del pozo PPO-13, al norte de San José), y altos niveles de salinidad en la parte sur del área de estudio.
  - La contaminación de las diversas fuentes no es discreta. Aunque el pozo PPSJ-1, por ejemplo, está contaminado predominantemente por residuos mineros (a través de los cuales está perforado), la presencia de una salinidad moderadamente alta indica que también puede estar afectado por infiltración del canal de agua de mina.
  - La mayoría de los otros pozos ubicados en el área de estudio tienen uno o más parámetros que exceden los estándares de agua potable. Se piensa que estos son parámetros de salinidad derivados naturalmente, como por ejemplo, sodio, litio y boro. Un alto número de pozos también excede el estándar boliviano para amonio (como  $\text{NH}_4^+$ ) en agua potable que es 5 mg/l, el cual es más bien bajo. En este caso, el amonio puede ser un derivado natural o estar relacionado con la contaminación del alcantarillado, ganado o letrinas.

## CONCLUSIONES

En base a los datos recolectados durante las actividades de levantamiento topográfico, geofísica, perforación, y prueba de bombeo, Dames & Moore Norge ha llegado a las siguientes conclusiones:

- No se ha encontrado evidencia clara que indique la existencia de una dorsal de roca madre importante entre el cerro Huajara y el cerro Khala Khala, la cual podría actuar como barrera hidráulica entre Oruro y los campos de pozos de Challapampa.
- En base al análisis de la distribución geográfica de los químicos, parece haber tres fuentes de contaminación discreta: 1) lixiviado de residuos mineros, 2) infiltración de agua de mina salina procedente de la mina San José, a través de la base del canal de agua de mina o del río Tagarete, e 3) infiltración del lixiviado de desechos, de las aguas del río Tagarete y/o fugas del sistema de alcantarillado.
- Los pozos ubicados hacia el este de la mina San José parecen estar contaminados por parámetros químicos relacionados a actividades mineras. El lixiviado de los residuos mineros parece haber impactado en forma significativa a los pozos ubicados relativamente cerca de la mina San José. La infiltración de agua de mina salina del canal



de descarga o del río Tagarete ha impactado las aguas subterráneas, en el área ubicada inmediatamente al noreste de la ciudad de Oruro.

- Parece que la contaminación directa de aguas subterráneas por acción del lixiviado de los residuos mineros no se extiende por más de 1 km de la fuente. Aparentemente los contaminantes de esta fuente relacionados a las actividades mineras tienden a ser disminuidos o retardados por el medio ambiente geológico.
- Es probable que al bombear agua de mina al río Tagarete se haya producido una modificación en el sistema hidrogeológico, permitiendo que el agua contaminada infiltre al acuífero a mayores distancias de la fuente. Esta condición podría explicar la contaminación aparente de aguas subterráneas a distancias mayores de 3 km de la mina.
- Para proteger las aguas subterráneas y las aguas superficiales, debería ser prioritario retirar el agua de mina, mediante el cese del bombeo de agua de mina o realizar el tratamiento de ésta antes de su descarga.
- Las pruebas de conductividad hidráulica confirmaron la información existente, permitiendo a Dames & Moore Norge deducir un escenario posible de roca madre de relativamente baja permeabilidad ( $10^{-8}$  -  $10^{-7}$  m/s), con una zona superior meteorizada de conductividad elevada.

## 1.0 INTRODUCCION

El Proyecto de Medio Ambiente, Industria y Minería (PMAIM) es un programa de protección del medio ambiente fundado por el Banco Mundial, el Fondo Nórdico de Desarrollo y el Gobierno de Bolivia, a través de la empresa minera nacional, la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL). Los objetivos de PMAIM son los siguientes:

- Mejorar el marco de protección ambiental de los sectores industriales y mineros bolivianos y para apoyar la implementación de medidas de protección.
- Ayudar a proporcionar fondos para la prevención de riesgos y para la remediación de pasivos ambientales generados por las actividades mineras.
- Apoyar a las municipalidades en la adquisición de financiamiento de otras fuentes que no sean de PMAIM, para mejorar las condiciones ambientales y aliviar la pobreza de las comunidades mineras que se encuentran bajo la jurisdicción de PMAIM.

El PMAIM tiene cinco componentes:

- a) Marco ambiental
- b) Mejora de laboratorios
- c) Inversiones en medidas de remediación
- d) Manejo ambiental en el sector minero
- e) Apoyo técnico a las municipalidades

El Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación (MDSP) es el responsable de la implementación de las Partes "a" y "b". El Ministerio de Desarrollo Económico (MDE), a través del Viceministerio de Minería y Metalurgia (VMMM) y COMIBOL, es el responsable de las Partes "c", "d" y "e".

Dames & Moore Norge fue contratada por VMMM y COMIBOL el 11 de agosto de 1999, para realizar los subproyectos No. 6 y 7 de la parte "c" del PMAIM. A continuación se detallan los títulos de los proyectos:

- Subproyecto No. 6 Estudios de Ingeniería, Viabilidad y Diseño para la Remediación de las Fuentes de Contaminación de la Mina San José, Oruro.
- Subproyecto No. 7 Estudio Hidrogeológico del Acuífero de la Mina San José y los Acuíferos que son la Fuentes de Agua a la Ciudad de Oruro.

Dames & Moore Norge inició formalmente las actividades del proyecto para el Subproyecto No. 7, el 14 de septiembre de 1999.

Este informe documenta los resultados de las siguientes actividades de campo:

- Levantamiento topográfico de las ubicaciones y elevaciones de los pozos de monitoreo
- Investigaciones geofísicas
- Programa de perforación
- Muestreo e interpretación hidroquímica de muestras de agua
- Prueba de bombeo del pozo de producción PP-117 (aeropuerto) y de otros pozos de observación.

Este es el tercer informe de una serie de cuatro informes pertinentes al Subproyecto No. 7. El Subproyecto No. 6 se presenta en un informe separado.

- El Informe 1 caracteriza las fuentes potenciales de contaminación: el complejo minero San José y las aguas subterráneas que circundan a la ciudad de Oruro. Han sido contaminadas por escorrentías de desmontes.
- El Informe 2 es una compilación de los datos existentes sobre las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la ciudad de Oruro y sus alrededores.
- El Informe 4 comprende los estudios de modelado de aguas subterráneas y la evaluación de riesgos.

## 2.0 LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO DE LAS UBICACIONES Y ELEVACIONES DE LOS POZOS

En las etapas iniciales del proyecto, Dames & Moore Norge examinó las fuentes existentes de información para compilar una base de datos de pozos y perforaciones que pueda proporcionar información hidrogeológica o que pueda ser adecuada para monitoreo o muestreo. Dames & Moore Norge identificó más de 200 pozos de agua en la región de Oruro. De ello, aproximadamente treinta fueron identificados como pozos potencialmente útiles en los que se podría recolectar muestras de agua subterránea para análisis químico y los cuales podrían servir como pozos de monitoreo del nivel piezométrico de las aguas subterráneas.

No existía información disponible, como registros geológicos, especificaciones de ingeniería, e información de construcción, para muchos de estos pozos. La falta de información imposibilitó la interpretación cabal de los datos del nivel de agua y la evaluación de la calidad del agua.

Por otra parte, las elevaciones de la napa freática de muchos de estos pozos fueron registradas durante uno o más de los estudios hidrológicos previos de la región. Sin embargo, dichas elevaciones no pudieron ser utilizadas debido a que, en los estudios previos, se usaron diferentes datos de línea base, hubo diferencias en las técnicas de levantamiento topográfico utilizadas y, en algunos casos la calidad es cuestionable. En algunos casos, se observaron discrepancias de algunas décimas de metro entre pozos cercanos sobre el casi completamente plano Altiplano. Dado que las diferencias del nivel piezométrico del agua subterránea entre los pozos están en el orden de centímetros, dichos errores no son aceptables.

Por lo tanto, Dames & Moore Norge realizó un nuevo levantamiento topográfico de todos los pozos existentes identificados que podrían ser monitoreados para proveer información del nivel del agua. Además, se efectuó el levantamiento topográfico de los pozos nuevos perforados (DM-1 a DM-6). Para realizar esta tarea, Dames & Moore Norge contrató los servicios de la Empresa de Servicios Técnicos (EST), de Oruro.

Los pozos levantados en esta investigación estaban ubicados en las áreas de Challapampa (Khala Kaja), Vinto-Sepulturas, Iroco, el aeropuerto, y dentro de la ciudad de Oruro. En el Apéndice 6 se presenta una lista de los pozos identificados, la metodología de levantamiento utilizada, y las elevaciones y coordenadas de los pozos donde se realizó el levantamiento topográfico (ver también Figura 4.1).

El levantamiento topográfico fue realizado con altos estándares debido a la metodología aplicada. Se enfatizó la construcción de nuevas líneas de base, basándose en los puntos de referencia existentes, y el levantamiento topográfico en circuitos cerrados.

Se observaron unas cuantas diferencias entre las posiciones de los pozos ubicados en los mapas y las posiciones registradas usando GPS. Por ejemplo, para el pozo DM-6 las coordenadas

### 3.0 INVESTIGACIONES GEOFISICAS

Dames & Moore Norge realizó estudios geofísicos en el área de estudio con los siguientes objetivos:

1. Determinar la profundidad de la roca madre a lo largo de perfiles claves relacionados a posibles vías de transporte de contaminantes entre la mina y los campos de pozos de Challapampa. El espesor del sistema del acuífero del Cuaternario está relacionado con su transmisividad y, por lo tanto, al volumen de contaminantes transportados.
2. Verificar la existencia o ausencia de una dorsal de roca madre enterrada entre el cerro Huajara / Chapi Kholu y el cerro Khala Khala (ver Sección 3.3.1 del Informe 2), que pueda influir en el potencial transporte de contaminantes entre Oruro y los campos de pozos de Challapampa.
3. Averiguar si se pueden definir algunas estructuras dentro del complejo del acuífero del Cuaternario.
4. Determinar si el sondeo vertical mediante resistividad eléctrica (VES) y la refracción sísmica son métodos viables en el complejo del acuífero del Altiplano.

Durante el curso de este estudio, se llevaron a cabo siete perfiles sísmicos de suelo (G1-G7) y siete sondeos VES. La longitud total de las líneas sísmicas fue de 13,380 m (Figura 2.1); éstas estaban diseñadas para pasar a través de perforaciones donde existía información geológica confiable, para calibrar los perfiles. También se examinaron datos geofísicos de estudios previos.

Como se mencionó anteriormente, uno de los objetivos de los programas de geofísica y perforación fue determinar las características del subsuelo, en particular la profundidad a la roca en el área del Altiplano, entre la ciudad de Oruro y los campos de pozos. Dames & Moore Norge logró este objetivo por medio de una combinación de datos geofísicos e información de perforación. Tanto la información de geofísica como la de perforación están sujetas a la interpretación de datos. Sin embargo, combinando ambos métodos y usando como complemento el uno del otro, Dames & Moore Norge ha desarrollado un mapa de profundidad a la roca madre que parece ser más exacto que otros estudios previos revisados durante la presente investigación. La profundidad a la roca madre desarrollada por Dames & Moore Norge es totalmente adecuada para lograr los objetivos del proyecto.

### 3.1 METODOS GEOFISICOS

Las investigaciones anteriores y las efectuadas por Dames & Moore Norge fueron llevadas a cabo con los siguientes objetivos:

- (i) estimar la profundidad a la roca madre
- (ii) caracterizar físicamente los sedimentos que yacen sobre el cuaternario

Para lograr lo mencionado anteriormente, se aplicaron tres diferentes metodologías geofísicas. A continuación se describen los métodos empleados, los cuales son frecuentemente usados en este tipo de estudios:

### 3.1.1 Sondeos Verticales Mediante Resistividad Eléctrica (VES)

El VES es uno de los métodos de geofísica más usados. Consiste en introducir una corriente eléctrica continua al terreno, mediante dos *electrodos de corriente* que se clavan en el suelo. Estos electrodos crean un campo eléctrico artificial, del cual se mide la diferencia de potencia a través de otros dos electrodos (*electrodos de potencia*). A partir de esta diferencia de potencia, se calcula un parámetro conocido como *resistividad aparente*. Se entiende que para una mayor separación entre los electrodos, será también mayor la profundidad de investigación.

La metodología VES es afectada por la salinidad de las aguas subterráneas y del suelo, y para que sea confiable, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Las capas sedimentarias tienen que ser horizontales o tener sólo un buzamiento muy leve.
- La extensión lateral de las capas tiene que ser grande en comparación con la separación de los electrodos.
- Las capas tienen que ser eléctricamente diferentes (es decir, con una resistividad distintiva) y tener una composición homogénea vertical y horizontalmente.

### 3.1.2 Refracción Sísmica

Este método implica la generación de ondas elásticas en el terreno mediante el uso de explosivos o impactos pesados en la superficie y la medición del tiempo de viaje del impulso de energía creado desde esta fuente hasta su punto de detección, en una serie de líneas geofonas. A partir de las ubicaciones de las geofonas y sus respectivos tiempos de llegada, se plotear curvas de tiempo de viaje. Estas curvas son la base principal para la interpretación de datos.

Para proporcionar profundidades apropiadas y calibración litológica, se debe tener disponibles los datos de perforación junto con los perfiles sísmicos.

### 3.1.3 Perfilamiento Eléctrico

Este tipo de levantamiento es similar al VES, pero usualmente incluye un perfil más largo de líneas, así como también áreas mayores.

### 3.1.4 Limitaciones y Suposiciones

Tanto los estudios geofísicos anteriores, como los actuales, están sujetos a ciertas limitaciones y suposiciones. Las suposiciones básicas realizadas cuando se usa software estándar disponible comercialmente, para el VES y la refracción sísmica, son las siguientes:

- El subsuelo está compuesto por capas homogéneas isotópicas y de roca madre sólida.
- Las capas son aproximadamente horizontales, con velocidad sísmica creciente y conductividad eléctrica que disminuye con la profundidad, especialmente en formaciones más profundas.

En condiciones geológicas como las que se presentan en el área de estudio, existen las siguientes limitaciones:

- La *resistividad aparente* y *velocidad sísmica aparente* de la roca madre y los sedimentos compactos que muchas veces yacen sobre el mismo, difieren muy poco entre ellas. Por lo tanto, es muy difícil obtener cualquier información de profundidad confiable.
- Debido a la presencia de una capa arcillosa muy conductiva (salina) cerca a la superficie de la mayor parte del Altiplano, la información obtenida confiable usando el VES puede limitarse a profundidades de 0 a 30 metros. Sin embargo, esta limitación depende de la potencia de salida usada y de la separación entre los electrodos de corriente.
- La topografía de la superficie de la roca madre no es plana, lo que crea problemas en la interpretación de cualquier método de sondeo (sísmico o eléctrico).
- Los sedimentos saturados están compuestos por capas alternas de arcilla, limo, arena y grava con diferentes permeabilidades. Como resultado de esto, la corriente (VES) y la energía sísmica tiende a "canalizarse", llevando a valores falsos de resistividad aparente y velocidad sísmica. En el caso de las capas inclinadas, la información de profundidad correcta es muy difícil de obtener aún teóricamente.

### 3.2 ESTUDIOS PREVIOS

En el área del proyecto se han realizado cuatro estudios previos. El primero fue realizado en 1967, el segundo entre 1969 y 1973, el tercero en 1979 y el cuarto, en 1993. A continuación se presenta la lista de estos estudios (Tabla 3.1).

*Tabla 3.1 Resumen de estudios geofísicos anteriores en el área del proyecto.*

Año	Promotor	Referencia	Área de Estudio	No. de perfiles
1967	Dames & Moore – SeLA	Dames & Moore (1967)	Challapampa	9
1969-73	GeoBol – United Nations	UNDP-GeoBol (1973)	Paria – Vinto	6
1979	GeoBol – SCIDE	SCIDE-CORDEOR (1979?)	Norte de Khala Kaja	7
1993	GeoBol CABAS	CABAS (1993)	Aeropuerto Vinto	5

En áreas sin información de perforación, la interpretación de los datos geofísicos es aproximada y sólo los parámetros de las dos capas superiores pueden ser considerados confiables. La profundidad estimada a la superficie de la roca madre puede ser considerada sólo como un estimado aproximado. Esto se aplica especialmente al área del campo de pozos de Khala Kaja, donde la profundidad a la roca madre puede exceder los 150 m.

1. El primer estudio fue realizado por Dames & Moore (1967) en el área de Challapampita. Estas líneas cortas de refracción sísmica se describen en la Sección 5.2 del Informe 2 (ver Apéndice 2 del Informe 2). El criterio de Dames & Moore Norge es que la interpretación de estas líneas todavía puede ser considerada relativamente confiable, aún comparada con prácticas actuales.
2. El segundo estudio fue realizado en el área entre Paria, Challapampa y Vinto. En total, se ejecutaron seis perfiles VES (UNDP-GeoBol 1973). Debido a la falta de datos de perforaciones en el área, no hay forma de calibrar o evaluar la confiabilidad de la interpretación. Por lo tanto, la superficie de la roca madre real puede ser considerablemente diferente de la superficie interpretada en ésta área. Los parámetros aplicados para los sedimentos cuaternarios pueden ser considerados relativamente confiables.
3. El tercer estudio (1979) consistió en el estudio de refracción sísmica, VES y perfilamiento eléctrico. El área de estudio se encuentra al norte de Khala - Kaja y está parcialmente ubicada fuera del área de interés de este proyecto. Los resultados de los estudios geofísicos parecieron complementar la mayor parte de la información disponible de los pozos. Sin embargo, la aplicabilidad de los resultados del perfilamiento eléctrico es limitada, ya que no es posible obtener información superficial confiable sobre la roca madre mediante este método.
4. El cuarto estudio (1993) consistió solamente en VES. El área de estudio está ubicada en la zona entre Vinto y el aeropuerto. La mayoría de las curvas VES son poco pronunciadas y las interpretaciones son confiables. No obstante, existen algunas estaciones VES donde una interpretación alternativa daría como resultado una interpretación de profundidad algo diferente (por ejemplo, soluciones no únicas), posiblemente debido a la roca madre fracturada o a una superficie de roca madre inclinada.

### 3.3 ESTIMACION DE PARAMETROS GEOFISICOS

En base a los datos de perforación y geofísicos existentes, y al conocimiento de otras áreas con condiciones geológicas similares, es posible realizar una clasificación tentativa de las unidades geológicas y estimar sus probables parámetros físicos (Tabla 3.2).

*Tabla 3.2 Unidades litológicas dentro del área de estudio y sus probables características físicas*

Suelo/Roca	Resistividad Aparente (Ohm-m)	Velocidad Sísmica (m/s)
Arcilla no saturada	5 - 10	400 - 600
Arcilla saturada	1 - 5	1.500 - 2.000
Arcilla arenosa (saturada)	5 - 10	1.500 - 2.000
Arena (saturada, compactada)	20 - 50	2.000 - 2.500
Roca fracturada (lutita, arenisca)	50 - 80	2.000 - 2.500
Roca madre	> 100	> 3.000



Es posible que no exista ninguna ubicación dentro del área de estudio donde estén presentes todas estas capas. Sin embargo, en cualquier ubicación existe una combinación de varias de estas capas y se pueden aplicar los parámetros físicos relevantes para la interpretación de los datos geofísicos. Estos parámetros también pueden ser aplicados para la planificación de trabajos geofísicos futuros.

### 3.4 CONSIDERACIONES PARA LA INTERPRETACION DE RESULTADOS GEOFISICOS EN EL AREA DE ORURO

Para la aplicación de técnicas geofísicas e interpretación de datos, se debe considerar lo siguiente:

- El VES se aplica para determinar la profundidad al nivel freático, y las profundidades y parámetros eléctricos del estrato arenoso o arcillo-arenoso, a profundidades típicas en un rango de 30 – 50 m. Sin embargo, esta limitación depende de la potencia de señal usada y de la separación entre los electrodos de corriente.
- El sondeo de refracción sísmica es aplicable para determinar profundidades a capas como las mencionadas anteriormente, dentro de un rango de profundidad de 100 – 150 m. Cada 100 m se usa un mínimo de 5 a 7 puntos de inicio de percusión por tramo geófono.
- Debido a las zonas negras (por ejemplo, zonas de velocidad sísmica más bajas debajo de zonas de velocidades más alta), y superficies inclinadas de roca madre, sólo se puede lograr una precisión de profundidad de aproximadamente 20 % con métodos de refracción sísmica.
- Es posible que las diferencias de velocidad sísmica entre sedimentos compactos (si existen) y roca madre paleozoica sedimentaria, sean tan pequeñas que no se distinguen mediante estudios geofísicos.
- Las velocidades mayores a 3.500-4.000 m/s son "velocidades falsas" debido a la inclinación de la superficie de roca madre, y llevarían a sobrestimar los valores de profundidad.

### 3.5 ESTUDIOS ACTUALES

#### 3.5.1 Objetivos y Diseño de los Levantamientos

El objetivo principal de los levantamientos geofísicos realizados como parte de este estudio fue adquirir información adicional concerniente a la profundidad a la roca madre, y la estructura y características de los sedimentos que yacen sobre la misma. Los sedimentos cuaternarios consisten de limo y arcilla de baja permeabilidad y capas de arena/grava más permeables. Estos últimos son acuíferos importantes para el suministro de agua potable.

Un objetivo más específico fue obtener información sobre la existencia de una posible dorsal enterrada entre el cerro Huajara y el cerro Khala Khala. Dicha dorsal podría ser una característica geomorfológica mayor que influya en el flujo de aguas subterráneas, o podría

pensarse que dicha dorsal impida que las aguas contaminadas del área minera de Oruro alcancen los campos de pozos de abastecimiento de agua potable de Challapampa.

Dames & Moore Norge utilizó dos métodos geofísicos: refracción sísmica y sondeo vertical mediante resistividad eléctrica (VES). Se completó un total de 13.380 m de perfiles, a través de siete líneas de refracción sísmica y siete estaciones VES. Las ubicaciones de las líneas sísmicas y de las estaciones VES se presentan en la Figura 2.1.

La oficina de SERGEOMIN de Cochabamba fue subcontratada para realizar los sondeos VES, y Geoexploraciones S.A. de Santiago de Chile, fue subcontratada para efectuar el perfilamiento de refracción sísmica. Cada subcontratista presentó un informe con sus interpretaciones básicas. Los datos de campo documentados en estos informes fueron utilizados como base para las interpretaciones desarrolladas por Dames & Moore Norge.

Dames & Moore Norge controló la validez de las interpretaciones realizadas por ambos subcontratistas, así como también las interpretaciones finales de los perfiles. Las interpretaciones geofísicas fueron revisadas de forma cruzada y calibradas contra las condiciones geológicas conocidas, usando datos de pozos y perforaciones existentes y recién perforados, aplicando los parámetros pertinentes de resistividad aparente y de velocidad que se discutieron anteriormente (Tabla 3.2).

### 3.6 SONDEO VERTICAL MEDIANTE RESISTIVIDAD ELECTRICA (VES) - RESULTADOS E INTERPRETACION

Se usó el equipo ABEM TERRAMETER, el cual permite la introducción de corriente continua al subsuelo de 0.2 a 500 mA. Los datos fueron registrados con una computadora Calomí y grabados en un disquete. Posteriormente, Interpex analizó los datos automáticamente, utilizando el software RESINIP. Se utilizó un esquema Schlumberger de distancias entre electrodos que varían entre 600 a 800 metros. Las interpretaciones de los datos y las predicciones de las profundidades a la roca madre figuraban en el informe de Sergeomin realizado por Soruco (octubre 1999). Sin embargo, posteriormente las interpretaciones de Sergeomin fueron revisadas (Soruco, mayo 2000). Las resistividades aparentes utilizadas en la interpretación difieren levemente de aquellas discutidas anteriormente (Tabla 3.2). Los valores de resistividad aparente sólo tienen una influencia menor sobre la información de profundidad. La predicción de las profundidades a la roca madre utilizando dos diferentes métodos basados en: 1) sondeos VES (Sergeomin - Soruco, mayo 2000), y 2) el mapa de curvas de nivel preparado por Dames & Moore Norge basado en evidencia de perforación, se presenta en la Tabla 3.3 y en la Figura 2.2.

**Tabla 3.3 Predicción de profundidades a la roca madre sobre la base de: 1) sondeos VES, y 2) el mapa de curvas de nivel preparado por Dames & Moore Norge**

Punto de Sondeo	Predicción de profundidad a la roca madre usando VES (m)	Predicción de profundidad a la roca madre usando el mapa de curvas de nivel en base a evidencia de perforación (m)	Profundidad a la roca madre actual en perforaciones (m)
DM-A01	>78	24	
DM-A02	46	46	46 (DM-2)
DM-A03	>59	60	
DM-B01	>27	94	
DM-B02	>125	124	> 125 (DM-1)
DM-B03	>45	110	
DM-C01	>22	69	

Comparando los resultados obtenidos mediante los dos métodos utilizados para la predicción de la profundidad a la roca madre se observa lo siguiente: 1) En la estación DM-A01, las predicciones presentan resultados que no concuerdan. 2) En las otras seis ubicaciones las predicciones presentan resultados consistentes, incluyendo los pozos perforados en las estaciones DM-A02 y DM-B02, es decir DM-2 y DM-1 respectivamente.

La respuesta de VES de todas las estaciones también puede ser usada para interpretar:

- El espesor de la primera capa no saturada
- Las resistividades aparentes de las dos capas más elevadas.

Usualmente, la profundidad de penetración es de 10 a 15% de la distancia  $AB/2$ , lo que significa aproximadamente 100 m usando una distancia máxima  $AB/2$  igual a 800 m, como fue el caso en nuestro estudio. Debido a la presencia de capas arcillosas superiores de alta conductividad, sólo una porción menor de la corriente viaja a través de horizontes tan profundos; por lo tanto, sólo se obtuvieron respuestas de profundidades máximas de 30 a 50 m y el VES no pudo detectar la roca madre en la mayoría de las ubicaciones. De hecho, la única estación donde se puede haber detectado la roca madre es A02.

### 3.7 REFRACCIÓN SISMICA – RESULTADOS E INTERPRETACION

El trabajo de campo fue realizado usando sismógrafos digitales de 24 canales, y registrando los datos en disquetes. Los sismógrafos fueron un ABEM Terraloc Mark 3 y un SCINTRUX, modelo S2-ECHO, equipado con una computadora portátil, Compaq SLT 3865/20.

El intervalo geófono fue de 12,5 m, lo que implica 287,5 m para un tramo geófono. Como fuente de energía se utilizó dinamita (Amon gel) activada por detonadores eléctricos, con tres puntos de

disparo por tramo en todas las líneas, excepto en la línea G-4, la cual se realizó con cinco puntos de disparo.

Con la refracción sísmica se efectuó una buena detección del espesor y la pendiente de los sedimentos sueltos saturados. Esta información es crítica para evaluar movimientos de agua en los sedimentos, ya que dentro de estos sedimentos se presentan muchos horizontes de arena y grava permeable.

En las Figuras 2.3 a 2.9, se presentan las interpretaciones finales de los datos sísmicos después de la calibración, contra los datos de perforación.

### 3.7.1 Perfil G1

El Perfil G1 se estrecha desde las periferias del norte de Oruro, a través de los pozos DM-2 y DM-4, hasta el cerro Chapi Kkol'u.

La inspección de campo reveló que existen afloramientos de arenisca limolita paleozoica de grano fino en el cerro Chapi Kkol'u. Esta observación se usa para identificar la característica de la superficie de roca madre delineada en la Figura 2.3. Dames & Moore Norge tiene conocimiento de que también se encontró roca madre aproximadamente a 31 metros en DM-4, y a 46 m en DM-2. La superficie de la roca madre (Figura 2.4) parece inclinarse continuamente hacia abajo en dirección sudeste, para lograr una profundidad de más de 50 m al final oeste de la línea. Se podría esperar una elevación abrupta en la topografía de la roca madre a medida que se acerca al cerro San Pedro, en el extremo norte de Oruro. De hecho, esta interpretación geográfica en el extremo oeste del perfil no se vincula bien con un arrumbamiento de roca madre a sólo unos 29 m de profundidad en PPO-13m, a una corta distancia al SO de DM-2.

### 3.7.2 Perfil G2

El Perfil G2 corre en dirección NNO desde DM-2 hacia DM-1. Como se describe anteriormente, Dames & Moore Norge tiene conocimiento de que la roca madre estaba arrumbada a 46 m en DM-2. Sin embargo, los datos geofísicos parecen sugerir que hay roca madre aproximadamente a 80 m de profundidad en DM-1, mientras que perforaciones subsecuentes no encontraron roca madre ni siquiera a 125 m de profundidad. No obstante, el registro de perforaciones (Figura 3.1), muestra que se encontró arcilla compacta a unos 87 m de profundidad en DM-1, y es posible que esta arcilla compacta tenga una velocidad sísmica alta, lo que hace que sea confundida por roca madre. En resumen, la profundidad a la roca madre a lo largo del perfil varía de aproximadamente 50 a 125 m por debajo de la superficie del suelo.

En el perfil (Figura 2.4), la "superficie" sísmica más baja está entonces marcada como roca madre o sedimentos compactados.

### 3.7.3 Perfil G3

El Perfil G3 corre desde el oeste de la Calle La Paz, en dirección ENE a través de DM-1, hacia DM-3 y al campo de pozos de Challapampita.

Dames & Moore Norge sospecha que la superficie sísmica identificada aproximadamente a 80 m en DM-1 no es roca madre, sino arcilla compactada. La roca madre auténtica en DM-1 yace a una profundidad mayor a los 125 m. Esto se expresa en el perfil en la Figura 2.5. La roca madre estaba arribada a 89-90 m en DM-3, mientras que se estimó la presencia de una superficie sísmica, inicialmente como roca madre, a una profundidad aproximada de 65 m. El registro de perforación para DM-3 (Figura 3.3) muestra una disminución abrupta en la tasa de penetración a una profundidad de 64 m, indicando la cima de una zona altamente compacta de arena/grava. De igual forma que en DM-1, es probable que este sedimento compacto tenga una velocidad sísmica alta y haya sido confundida por roca madre.

Con el conocimiento de la estratigrafía encontrada en las perforaciones, se estimó el perfil que aparece en la Figura 2.5. DM-3 fue perforado de modo que quedara ubicado en la línea de la posible dorsal de roca madre enterrada entre el cerro Huajara y el cerro Khala Khala. El perfil geofísico en este lugar no muestra señas de esta dorsal. Al oeste de DM-3, se pueden ver algunas elevaciones leves en la superficie, que representan la cima de los sedimentos compactados, lo que puede reflejar la topografía de la roca madre. En resumen, la geofísica no proporciona evidencia concluyente de que exista una dorsal significativa en la topografía de la roca madre, sobre una línea entre el cerro Huajara y el cerro Khala Khala.

### 3.7.4 Perfil G4

El Perfil G4 (Figura 2.6) corre en dirección ENE-OSO a través del campo de pozos de Khala Kaja. La evidencia de perforación de los pozos de SeLA indica que la profundidad a la roca madre excede 150 m a lo largo de esta línea. Se identificó una superficie sísmica en el perfil, a una profundidad entre 90 y 150 m, y se lo marcó en la Figura 2.6 como "sedimentos compactados y/o roca madre fracturada". Una comparación con el Perfil G3 sugeriría que esta superficie representa sedimentos compactados y no roca madre. Resulta interesante señalar que, en esta superficie, se identificó una dorsal que alcanza una profundidad mínima de 90 m, aproximadamente en la línea del cerro Huajara al cerro Khala Khala. Esto podría reflejar la existencia de una dorsal en la topografía de la roca madre. No obstante, una dorsal como esta, si existe, yace a una profundidad tan grande que no es posible que tenga ningún impacto significativo sobre el flujo de aguas subterráneas en los sedimentos del Cuaternario. Además, no existe evidencia de dicha dorsal en los registros de perforación del campo de pozos de Khala Kaja (ver Figura 3.3 del Informe 2). En resumen, la profundidad a la roca madre a lo largo del perfil varía de aproximadamente 100 a 150 m por debajo de la superficie del suelo.

### 3.7.5 Perfil G5

El Perfil G5 es un perfil corto complementario, que mayormente se registró en los suelos de la Planta Industrial de Oro (PIO), en San José. Esta línea muestra que, como se esperaba, la roca madre se inclina en dirección este, lejos de las montañas ciudad. La profundidad a la roca madre varía y decrece desde aproximadamente 55 m en el oeste a más de 80 m en el este. Estas profundidades no se vinculan con el plano topográfico de Dames & Moore Norge (Informe 2, Figura 3.3), el cual está basado mayormente en la información de perforación. El perfil tampoco está vinculado con el arribamiento de la roca madre a 25 m, en el pozo PPSJ-1, al extremo este del perfil. Por lo tanto, no se puede confiar en las profundidades absolutas sugeridas por este perfil.

### 3.7.6 Perfil G6

Similar al anterior, el Perfil G6 es un perfil corto complementario ubicado al noreste de la ciudad, pero muy lejos del PPSJ-10. La profundidad a los sedimentos compactos fluctúa entre 15 y 41 m a lo largo del perfil. En PPSJ-10, se encontró roca madre a 21.6 m. Es posible que la profundidad a la roca madre sea mayor a 50 m por debajo de la superficie del suelo en varios puntos.

### 3.7.7 Perfil G7

El Perfil corre a través del valle, en ltos. entre el macizo de San José y el cerro Jatun Compañía. Este indica una profundidad al sedimento compactado de 7 a 19 m, cifra comparable a las profundidades de roca madre de 16-18 m registradas en las perforaciones PPSJ-2 y PPSJ-5. La profundidad a la roca madre puede ser mayor a 25 m a lo largo de gran parte del perfil. Tal como lo describen los perfiles geofísicos, los sedimentos compactos continúan a una profundidad mayor a 40 m, por lo que la profundidad de la roca madre es mayor a 25 m.

## 3.8 CONCLUSIONES

1. Los sondeos verticales mediante resistividad eléctrica (VES) fracasaron en el intento de ubicar la superficie de la roca madre, debido a la existencia de capas sedimentarias superiores con alto contenido salino y conductivas. No se puede recomendar el VES como una técnica para ubicar superficie de roca madre en este sector del Altiplano. Por lo tanto, las interpretaciones basadas en investigaciones VES previas deben ser tratadas con un alto grado de escepticismo.
2. La refracción sísmica resultó exitosa para la generación de la forma de la superficie de la roca madre debajo de la cubierta del Cuaternario. Sin embargo, no se puede deducir profundidades absolutas debido a la falta de información confiable sobre las perforaciones. No se debe intentar realizar refracción sísmica en el Altiplano, a no ser que existan datos de perforación para calibrar los datos sísmicos.
3. No se pudo obtener una distinción entre los sedimentos compactados y la roca madre mediante refracción sísmica, debido a la falta de datos de perforación. Por lo tanto, las

### 3.7.5 Perfil G5

El Perfil G5 es un perfil corto complementario, que mayormente se registro en los suelos de la Planta Industrial de Oruro (PIO), en San José. Esta línea muestra que, como se esperaba, la roca madre se inclina en dirección este, lejos de las montañas ciudad. La profundidad a la roca madre varía y declina desde aproximadamente 35 m en el oeste a más de 80 m en el este. Estas profundidades no se vinculan con el plano topográfico de Dames & Moore Norge (Informe 2, Figura 3.2) y el cual esta basado mayormente en la información de perforación. El perfil tampoco esta vinculado con el arrumbamiento de la roca madre a 25 m, en el pozo PPSJ-1, al extremo este del perfil. Por lo tanto, no se puede confiar en las profundidades absolutas sugeridas por este perfil.

### 3.7.6 Perfil G6

Similar al anterior, el Perfil G6 es un perfil corto complementario ubicado al noreste de la ciudad y muy lejos del PPSJ-10. La profundidad a los sedimentos compactos fluctua entre 15 y 21 m, a lo largo del perfil. En PPSJ-10, se encontró roca madre a 21.6 m. Es posible que la profundidad a la roca madre sea mayor a 50 m por debajo de la superficie del suelo en varios puntos.

### 3.7.7 Perfil G7

El Perfil corre a través del valle, en lvs, entre el macizo de San José y el cerro Jatun Compañía. Este indica una profundidad al sedimento compactado de 7 a 19 m, cifra comparable a las profundidades de roca madre de 16-18 m registradas en las perforaciones PPSJ-2 y PPSJ-5. La profundidad a la roca madre puede ser mayor a 25 m a lo largo de gran parte del perfil. Tal como lo describen los perfiles geofísicos, los sedimentos compactos continúan a una profundidad mayor a 40 m, por lo que la profundidad de la roca madre es mayor a 25 m.

## 3.8 CONCLUSIONES

1. Los sondeos verticales mediante resistividad eléctrica (VES) fracasaron en el intento de ubicar la superficie de la roca madre, debido a la existencia de capas sedimentarias superiores con alto contenido salino y conductivas. No se puede recomendar el VES como una técnica para ubicar superficie de roca madre en este sector del Altiplano. Por lo tanto, las interpretaciones basadas en investigaciones VES previas deben ser tratadas con un alto grado de escepticismo.
2. La refracción sísmica resultó exitosa para la generación de la forma de la superficie de la roca madre debajo de la cubierta del Cuaternario. Sin embargo, no se puede deducir profundidades absolutas debido a la falta de información confiable sobre las perforaciones. No se debe intentar realizar refracción sísmica en el Altiplano, a no ser que existan datos de perforación para calibrar los datos sísmicos.
3. No se pudo obtener una distinción entre los sedimentos compactados y la roca madre mediante refracción sísmica, debido a la falta de datos de perforación. Por lo tanto, las

investigaciones sísmicas previas, especialmente las correspondientes al área de Challapampa, deben entonces ser tratadas con mucha cautela.

4. Los resultados geofísicos proporcionan poca evidencia sobre la existencia de alguna dorsal de roca madre significativa entre el cerro Huajara y el cerro Khala Khala, la cual podría actuar como barrera hidráulica.



## 4.0 PROGRAMA DE PERFORACION

### 4.1 OBJETIVOS Y UBICACIONES

Dames & Moore Norge propuso y realizó un programa de perforación que consistió en seis perforaciones. Este programa tenía los siguientes fines:

- calibrar los perfiles geofísicos
- determinar la profundidad a la roca madre, particularmente en el área entre Challapampa y Oruro
- investigar la presencia de alguna posible dorsal de roca madre enterrada debajo de los sedimentos del Cuaternario entre el cerro Khala Khala y el cerro Huajara
- investigar la estructura del complejo del acuífero del Cuaternario
- complementar la red de monitoreo de pozos existentes, en lo que se refiere a datos del nivel de agua y la química de las aguas subterráneas

En las ubicaciones que se listan en la Figura 2.1 se perforaron seis pozos, con los siguientes propósitos:

- DM-1. Este sitio de perforación estaba ubicado 500 m al este de la Urbanización Aurora, dentro del área conocida como Challapampita-Norte. Los objetivos de esta perforación fueron:
  - determinar la profundidad a la roca madre en el área entre Oruro y Challapampa
  - calibrar los perfiles geofísicos G2 y G3
  - proporcionar datos de monitoreo adicionales en el área oeste de Challapampa
  - investigar la estructura del acuífero en el área oeste de Challapampa
- DM-2. El pozo está ubicado 300 m al sur de la intersección entre el gasoducto de YPFB y la Avenida Circunvalación, hacia el este de Oruro. El pozo está ubicado justo al este de la Circunvalación. Los objetivos de este pozo fueron:
  - determinar la profundidad a la roca madre en el área este de Oruro
  - calibrar los perfiles geofísicos G2 y G1
  - proporcionar datos de monitoreo adicionales en la zona este de Oruro
  - obtener "cores" y llevar a cabo pruebas de permeabilidad en la roca madre
  - investigar la estructura del acuífero en la zona este de Oruro.
- DM-3. Este pozo fue perforado aproximadamente a 450 m al NO del pozo SeLA-4 (y al norte de la línea de ferrocarril), dentro del área conocida como Challapampita. Los objetivos de esta perforación fueron:
  - determinar la profundidad a la roca madre en el área de Challapampita

- calibrar el perfil geofísico G3
- investigar la estructura del acuífero en Challapampita

No se instaló un pozo de monitoreo en esta ubicación debido a la proximidad al pozo de monitoreo existente SCL-A-4

- DM-4. La ubicación de esta perforación coincidió con la estaca 2+000 de la línea geofísica G1, ligeramente al SO del cerro Chapi Kkolliu (un afloramiento de caliza de grano fino y limolita paleozoica). Los objetivos de esta perforación fueron:
  - determinar la profundidad a la roca madre en el área al oeste del Chapi Kkolliu
  - calibrar el perfil geofísico G1
  - proporcionar datos de monitoreo adicionales en el área al este de Oruro
  - investigar la estructura del acuífero al este de Oruro
- DM-5. El pozo estaba ubicado al frente de la entrada principal (sur) del estadio de Oruro. Los objetivos de este pozo fueron:
  - determinar la profundidad a la roca madre en el área del estadio de Oruro
  - proporcionar un punto de muestreo adicional en el perfil hidroquímico PPSJ-1, PPSJ-7, PPSJ-10
  - proporcionar datos de monitoreo adicionales en la ciudad de Oruro
  - obtener "cores" y llevar a cabo pruebas de permeabilidad en la roca madre
  - investigar la estructura del acuífero en el área de la ciudad de Oruro
- DM-6. Este pozo fue perforado en la Calle Jordán, en Papel Pampa Este, a 300 m al OSO de la Avenida Circunvalación. Los objetivos de este pozo fueron:
  - determinar la profundidad a la roca madre en el área al este del centro de Oruro
  - proporcionar un punto de muestreo en la posible vía de flujo, en dirección este de la mina San José
  - proporcionar datos de monitoreo adicionales en la zona este de Oruro
  - investigar la estructura del acuífero en la zona este de Oruro

## 4.2 EQUIPAMIENTO

Para construir los pozos propuestos para el estudio, Dames & Moore Norge contrató las siguientes empresas de perforación:

- PERSONDA S.R.L., de La Paz. Esta compañía utilizó un equipo de perforación giratorio con circulación directa, un camión cisterna Ford 350 de 2 toneladas y un compresor Komatsu. Este equipo de perforación fue usado en los pozos DM-1, DM-3, DM-4 y DM-6.

- **SERVICIOS DE INGENIERIA Y GEOLOGIA S.R.L.**, de La Paz. Esta compañía utilizó una Perforadora Saca Testigo Acker Mountameer equipada con una diamantina, una bomba de agua de 3 cilindros Beam Royal con un motor Deutz con una capacidad de 132 l/min (litros por minuto), y vástagos para broca postiza y portatestigos de denominaciones HQ y NQ. Este equipo de perforación fue usado en los pozos DM-2 y DM-5.

En el Apéndice 7 se presenta una descripción de las operaciones de perforación y construcción de los pozos para cada perforación. El personal técnico de Dames & Moore Norge realizó la supervisión de campo durante todas las fases de perforación y actividades de construcción de los pozos.

Para el presente estudio se perforó un total de seis pozos, cinco (DM-1, DM-2, DM-4, DM-5, DM-6), de los cuales se convirtieron en pozos de monitoreo. En la Figura 2.1 se presentan las ubicaciones de los pozos.

### 4.3 PRUEBAS LUGEON

Dames & Moore Norge realizó pruebas Lugeon en los pozos DM-2 y DM-5 para determinar la permeabilidad de la roca madre en una sección con empaque fuera del pozo. La prueba Lugeon es una forma simple de prueba empaque por inyección empleada en pozos coreados. El procedimiento es descrito por Meyer (1957), Banks (1972), Banks (1992) y Banks et al. (1992).

Las pruebas Lugeon típicamente se realizan en longitudes de prueba de aproximadamente 2 m en pozos con un diámetro de 46 – 74 mm. En nuestro caso, los pozos DM-2 y DM-5 tienen un diámetro de aproximadamente 76 mm y una longitud de prueba de 3 m. Se inyecta agua bajo presión a la sección del empaque. Se calibra la presión con un manómetro en el tope del pozo y, después de 10 minutos, se registra la tasa de flujo determinada por un flujómetro instalado en línea. Idealmente, las pruebas se realizan en cinco pasos de presión, empezando con una presión relativamente baja. El segundo paso con presión más alta y, el tercer paso con una presión aún más alta. El cuarto y el quinto paso son esencialmente la repetición de los pasos dos y uno (es decir, presión decreciente).

Las pruebas Lugeon realizadas en DM-2 y DM-5 por Servicios de Ingeniería y Geología SRL, esencialmente siguieron la descripción mencionada anteriormente excepto que (i) en algunos casos se realizaron tres pasos de elevación de presión, en vez de los cinco pasos completos, y (ii) se midió el flujo durante todo el período de 10 minutos usando un flujómetro integrador.

El volumen de flujo total  $V$  durante cada paso es convertido a una tasa de flujo  $Q$  mediante

$$Q = V/t$$

y luego a una tasa de flujo específica  $Q_{\text{spec}}$  por:

$$Q_{\text{spec}} = Q / L \quad \text{en litros por m por minuto o l/m/min}$$

donde

$t$  = tiempo de prueba del paso (minutos) = 10 minutos en nuestro caso

$L$  = longitud de la sección a prueba (m) = 3 m en nuestro caso

La presión efectiva  $P_{ef}$  en la sección del pozo (por ejemplo, la diferencia entre la presión aplicada y el nivel piezométrico en el acuífero) es calculada por:

$$P_{ef} = P_m + 10 \cdot \Delta h - \Delta p$$

donde:

$P_m$  es la lectura del manómetro en  $\text{kg/cm}^2$  (atm.)

$\Delta h$  es la diferencia en altura entre el manómetro y el nivel estático del agua en el pozo (por ejemplo, nivel piezométrico hidráulico excedente). El efecto de 10 convierte la altura en m a  $\text{kg/cm}^2$

$\Delta p$  es la pérdida por fricción en la tubería de inyección (en relación a la longitud, radio y velocidad de flujo de la tubería) en  $\text{kg/cm}^2$ .

#### Método de Cálculo No. 1 (Método Moye 1967)

Una permeabilidad de 1 Lugeon es definida como una tasa de flujo  $Q_{spec} = 1 \text{ l/m min}$  para una presión aplicada de  $10 \text{ kg/cm}^2$ .

Entonces, 
$$K_L = \frac{Q_{spec} * 10 \text{ kg/cm}^2}{P_{ef}}$$

donde:

$K_L$  = permeabilidad en Lugeons.

Moye (1967) ha demostrado que 1 Lugeon = 11.4 ft/año =  $1.10 \times 10^{-7} \text{ m/s}$

Entonces  $K = K_L \times 1.10 \times 10^{-7} \text{ m/s}$

donde:

$K$  – permeabilidad en m/s

#### Método de Cálculo No. 2 (Método Banks 1992)

Banks (1992) ha recalculado y verificado el trabajo previo de Moye (1967), y ha presentado la ecuación genérica (la cual toma en cuenta el radio del pozo):

$$K = Q / (\alpha \cdot P_{ef} \cdot L)$$

donde:

$$\alpha = 2\pi / [1 + \ln(L / 2r)]$$

$P_{ef}$  = presión efectiva en metros de nivel piezométrico de agua

r = radio del pozo (m)

Ambos métodos han sido aplicados a las pruebas Lugeon en los pozos DM-2 y DM-5 y han dado resultados bastante similares (Apéndice 5). Los valores promedios de K para todos los pasos de cada sección a prueba se presentan a continuación, en las Tablas 4.1 y 4.2.

*Tabla 4.1 Valores de conductividad hidráulica (K) derivados del análisis (Apéndice 5) de las pruebas Lugeon realizadas en el pozo DM2.*

Sección a prueba (m profundidad)	Rango de $P_{ef}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	K (m/s)
51.5 a 54.5	0.69 - 2.07	$9 \times 10^{-6}$
54.5 a 57.5	0.62 - 1.40	$1 \times 10^{-5}$
61.5 a 64.5	0.32 - 0.89	$2 \times 10^{-5}$

*Tabla 4.2 Valores de conductividad hidráulica (K) derivados del análisis (Apéndice 5) de las pruebas Lugeon realizadas en el pozo DM-5.*

Sección a prueba (m profundidad)	Rango de $P_{ef}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	K (m/s)
14 a 17	0.80 - 3.36	$2 \times 10^{-5}$ durante el paso 1, hasta $< 1 \times 10^{-8}$ durante el paso 2
17 a 20	1.01 - 2.59	$8 \times 10^{-6}$
20 a 23	1.24 - 2.83	$4 \times 10^{-6}$
23 a 26	0.89 - 2.60	$9 \times 10^{-7}$
26 a 29	1.06 - 2.49	$1 \times 10^{-5}$
30 a 33	1.49 - 3.29	$6 \times 10^{-8}$

Se debe notar que las conductividades hidráulicas típicas de esta zona de roca madre (por ejemplo, la zona superior meteorizada de la roca madre, inmediatamente subyacente a la cubierta del Cuaternario) generalmente están en el orden de  $1 \times 10^{-5}$  m/s. Se podría esperar que la conductividad hidráulica disminuyera con la profundidad a medida que se penetra roca más competente, menos fracturada y meteorizada. En el Informe 1, se derivó un valor de  $3 \times 10^{-8}$  m/s de conductividad hidráulica para la mayor parte de la roca madre que circunda la mina a profundidad. Efectivamente, en la sección más profunda del pozo DM-5, se encontró roca de baja permeabilidad con una conductividad hidráulica de  $6 \times 10^{-8}$  m/s, dato que es consistente con la cifra del Informe 1 (Sección 4.1.2.6).

También se debe notar que en la sección más alta de DM-5, el flujo (y en consecuencia la conductividad hidráulica calculada) disminuye al aumentar los pasos de presión. Existen dos explicaciones para esto:

- (i) La tubería de inyección o las fracturas se bloquearon durante la prueba.
- (ii) El sistema de fractura medido tenía una conductividad alta cerca al pozo, pero una conductividad baja a mayor distancia (por ejemplo, una fractura "ciega" de conectividad deficiente).

#### 4.4 CONCLUSIONES

El programa de perforación no encontró evidencia clara sobre la existencia de una dorsal de roca madre enterrada a una profundidad somera entre el cerro Huajara y el cerro Khala Khala, que pueda actuar como barrera hidráulica entre Oruro y los campos de pozos de Challapampa.

Los resultados de las pruebas Lugeon de la zona superior de la roca madre (hasta aproximadamente 20 m debajo de la superficie de roca madre) indicaron que esta zona es somera, meteorizada y fracturada y por lo general tiene una conductividad hidráulica más baja, alta, de aproximadamente  $1 \times 10^{-5}$  m/s. La sección más profunda del pozo DM-5 fue mucho más competente y dio un valor de  $6 \times 10^{-8}$  m/s. Este valor es consistente con el valor de conductividad hidráulica deducido en el Informe 1 para la roca madre profunda que circunda la mina, específicamente  $3 \times 10^{-8}$  m/s.

Se debe notar que, estrictamente hablando, nueve pruebas de conductividad hidráulica son inadecuadas para caracterizar la conductividad de un medio tan heterogéneo como es la roca madre fracturada. Tampoco se deberían sacar muchas conclusiones de la única sección Lugeon que dio un valor bajo de conductividad hidráulica. Sin embargo, juntando estos resultados con los de modelación de flujos de entrada a la mina (Informe 1) y el hecho de que los valores derivados de conductividad hidráulica coinciden en gran parte con los valores reportados en la literatura (Banks et al 1996) para un rango amplio de tipos de roca madre cristalinos, Dames & Moore Norge ha desarrollado una hipótesis estructural de trabajo la cual incluye una roca madre de baja permeabilidad ( $10^{-8}$  -  $10^{-7}$  m/s), con una zona superior, meteorizada de conductividad elevada.

## 5.0 MUESTREO DE AGUAS SUBTERRANEAS

### 5.1 OBJETIVOS

Dames & Moore Norge realizó el muestreo de aguas subterráneas con los siguientes objetivos:

- Realizar una investigación para completar la información no incluida por el informe SGAB 1996. El grupo de datos de SGAB (1996a) contaba con las siguientes fallencias: contenía datos viciados para los parámetros clave (cloruro y sulfato); los límites de detección eran inapropiadamente altos para un gran número de elementos traza y; carecía de determinaciones de alcalinidad.
- Perforar nuevos pozos con el fin de llenar los vacíos existentes en la red de pozos de monitoreo. Dames & Moore Norge perforó nuevos pozos (DM-1 a DM-6) que llenaron los espacios en la red existente y que requerían de muestreo.
- Adquirir un grupo de datos que proporcione evidencia empírica del alcance de la contaminación en el área de la mina San José. Dames & Moore Norge deseaba adueñarse un grupo de datos para proporcionar evidencia empírica de la extensión de la migración de algún contaminante del área de la mina San José.

Para lograr estos objetivos, Dames & Moore Norge realizó muestreo de aguas subterráneas en varias áreas. A continuación se listan estas áreas y la razón fundamental que justificó efectuar el muestreo en cada una de ellas:

- el área de Khala Kaja - Challapampita, para determinar si estos pozos habían o no sido impactados por la contaminación de la mina San José.
- el área este de Oruro y el área entre San José y Challapampa, para delinear la extensión de cualquier pluma de contaminación.
- dos muestras de agua superficial del canal de agua de mina y una del río Tagarete, para determinar si existe alguna relación entre estas aguas superficiales y las aguas subterráneas.
- un número de pozos hacia el SE de la ciudad (PP-117 y BP-112) que se pensó que no podrían haber sido afectados por la contaminación de la mina y los cuales podían actuar como controles de calidad de agua de referencia.

Tabla 5.1: Ubicaciones y resultados de determinaciones de campo para las aguas muestreadas

Pozo	Fecha	Tipo	T	pH	CE	AM1	AM2	AM3	AM	AP1	AP2	AP3	AP
			°C		µS/cm	meq/l				meq/l			
PP-7	09-Nov	Y	14	7.83	796	4.90	4.85	5.20	4.98				
PP-17	09-Nov	Y	13	7.93	782	5.20	5.20	5.00	5.13				
PP-15	09-Nov	Y	15	8.10	817	5.70	5.60	5.80	5.70				
PP-14	09-Nov	Y	16	8.06	895	5.60	5.70	5.80	5.70				
PP-12	09-Nov	Y	14	8.08	764	5.40	5.40	5.50	5.43				
PP-13	09-Nov	Y	15	8.03	842	6.10	6.00	6.10	6.07				
SeLA-2	09-Nov	Y	14.5	7.86	1.231	6.60	6.60	6.80	6.67				
SeLA-3	09-Nov	Y	14.5	7.75	1.563	6.30	6.20	6.00	6.17				
PP-117 (aeropuerto)	09-Nov	Y	13	8.03	1.301	4.30	4.30	4.20	4.27				
Canal de agua de mina 1	10-Nov	S	16.2	2.10	43.800	0.00	0.00	0.00	0.00				
Canal de agua de mina 2	10-Nov	S	14.4	2.30	38.100	0.00	0.00	0.00	0.00				
Río Tagarete	10-Nov	S	17.6	8.41	6.380	5.30	5.25	5.40	5.32	0.65	0.75	0.60	0.67
PPSJ-1	10-Nov	N	16.3	3.23	16.900	0.00	0.00	0.00	0.00				
PPSJ-10	11-Nov	N	14.4	6.37	19.600	18.50	18.60	18.50	18.53				
PPO-14	11-Nov	N	14.8	7.05	45.800	6.50	6.60	6.70	6.60				
SeLA-4	11-Nov	N	14.4	7.76	1.211	6.00	6.20	6.30	6.17				
PPO-22	11-Nov	N	15.6	7.82	1.399	4.60	4.40	4.60	4.53				
PP-10	12-Nov	N	21.8	7.17	1.790	8.60	8.70	8.60	8.63				
PP-9	12-Nov	N	15.6	7.90	1.000	6.30	6.20	6.30	6.27				
PPA-1	12-Nov	N	16.2	7.67	5.770	13.50	13.30	13.10	13.30				
PP-11	12-Nov	Y	15.1	7.80	863	6.30	6.20	6.20	6.23				
PPO PI-10	12-Nov	N	13.5	7.76	876	6.40	6.20	6.30	6.30				
PPO-21	13-Nov	N	15.1	7.37	3.240	11.40	11.30	11.40	11.37				
PPSJ-7	13-Nov	N	20.4	6.25	5.570	4.20	4.10	4.10	4.13				
PPO-BP-112	13-Nov	N	14.5	7.32	850	N/A	N/A	N/A	3.85				
PPO-BP-106	15-Nov	N	14.0	7.51	1.006	6.20	6.20	6.40	6.27				
PPO-BP-111	15-Nov	N	16.7	7.64	50.000	7.20	7.25	7.30	7.25				
REX	29-Nov	Sp	13.8	7.54	1.706	5.60	5.60	5.70	5.63				
PPO-13	30-Nov	N	14.5	7.78	51.500	5.30	5.40	5.40	5.37				
PPO-15	30-Nov	N	14.1	7.75	22.000	8.10	7.90	8.00	8.00				
PPO-16	30-Nov	N	15.1	7.61	3.100	7.35	7.40	7.35	7.37				
DM-1	30-Nov	N	15.1	7.76	1.894	4.20	4.20	4.40	4.30				
DM-2	7-Dec	N	15.5	8.55	2.030	5.90	5.90	5.80	5.87	1.00	1.00	1.10	1.03
DM-4	7-Dec	N	15.8	7.00	8.200	5.80	5.80	5.80	5.80				
DM-5	7-Dec	N	16.3	6.34	6.640	7.30	7.20	6.60	7.07				
DM-6	7-Dec	N	14.1	7.21	40.700	8.90	8.80	9.40	9.03				

Nota: AM = alcalinidad promedio con indicador mixto (punto final 4.3). AP = alcalinidad promedio con indicador fenolftaleína (punto final 8.3). AM1, AM2 y AP1, AP2 son determinaciones alcalinas individuales. Tipo: Y = pozo en producción, N = pozo de observación (sin producción), S = aguas superficiales, Sp = manantial. REA = manantial debajo del Cine Rex, entre las Calles Adolfo Mier, 6 de Octubre y Soria Galvarro.



El muestreo se llevó a cabo durante los meses, generalmente secos, de noviembre y diciembre 1999. El pH, alcalinidad, temperatura y conductividad eléctrica se determinaron en el campo. También se llevaron las muestras para su análisis a SpectroLab, Oruro. El análisis ICP-MS fue subcontratado por SpectroLab a ActLabs, Canada.

La Figura 4.4, muestra la ubicación de los pozos.

## 5.2 UBICACIONES DE MUESTRAS Y RESULTADOS DE CAMPO

Entre el 9 de noviembre y el 7 de diciembre, se llevó a cabo una campaña de muestreo en los pozos y aguas superficiales detallados en la Tabla 5.1.

Las aguas superficiales fueron muestreadas en las ubicaciones especificadas en la Tabla 5.2, ya que datos previos (SGAB 1996a, ver Sección 6.4 del Informe 2) sugieren la posible presencia de aguas servidas y contaminación por metales en las cercanías del río Tagarete - canal de agua de mina, posiblemente debido a infiltración de aguas superficiales.

*Tabla 5.2 Ubicaciones de los puntos de muestreo de aguas superficiales.*

Nombre de Muestra	Ubicación
Canal de agua de mina 1	Canal de agua de mina en zanja situada justo al norte del estadio
Canal de agua de mina 2	Canal de agua de mina, 100 m aguas arriba de la confluencia con el río Tagarete.
Río Tagarete	Río Tagarete, justo aguas arriba de la confluencia con el canal de agua de mina, a 80 m del puente.

## 5.3 PROTOCOLO DE MUESTREO

Esta sección describe las metodologías de campo para el muestreo de los pozos de observación, pozos de producción y aguas superficiales, y proporciona un resumen de muestreo de la verificación y control de calidad (QA/QC).

### 5.3.1 Pozos de Observación

El siguiente procedimiento fue adoptado para el muestreo de los pozos de observación (por ejemplo, pozos fuera de producción):

- i) El nivel estático del agua del pozo fue medido con referencia a un dato de elevación en el entubado del pozo (usualmente el tope del pozo), usando una cinta eléctrica de nivel de agua ("dipper").
- ii) Se colocó una bomba pequeña plástica sumergible (especificación: Bomba Reforzadora Eijkelkamp Agrisearch) en el pozo. Estas bombas operaban con una batería de auto de 12V. Dames & Moore Norge utilizó una variedad de bombas dependiendo de la profundidad del enrejado del pozo y la calidad de agua esperada, (a) una bomba con 20 m

de manguera, dedicada a los pozos significativamente contaminados (PPSJ-1, PPSJ-7); (b) una bomba limpia con 20 m de manguera; (c) una bomba limpia con 50 m de manguera. En los casos en que se tenía conocimiento de la profundidad del pozo, la bomba fue colocada en la sección del filtro, de lo contrario, se colocó la bomba lo más cerca posible del fondo del pozo. En algunas perforaciones (por ejemplo, PP-9, PP-10) no se pudo colocar la bomba en el filtro del pozo, debido a que había una obstrucción que impedía su descenso (probablemente reducciones en el entubado del pozo).

- iii) Se midió nuevamente la profundidad del nivel estático del agua.
- iv) Se apuntó la hora de inicio del bombeo y se midió el nivel del agua durante el mismo (donde era posible), para formar una prueba de abatimiento de crudo del pozo ("crudo", la tasa de bombeo a menudo variaba con el nivel piezométrico de bombeo y la carga de la batería).
- v) La tasa de bombeo fue determinada midiendo el tiempo requerido para llenar ya sea un matraz de 1.000 ml o un balde de 10 l.
- vi) La manguera de la bomba descargaba a un matraz sin boquilla de 1.000 ml, el cual actuaba como una celda de paso de flujo de crudo. El pH, la conductividad eléctrica (CE) y los electrodos de temperatura (T), fueron monitoreados en la celda a intervalos de cinco minutos durante el bombeo.
- vii) El muestreo sólo se realizó después de un mínimo de 40 minutos de bombeo de limpieza. En la mayoría de los casos, se obtuvieron mediciones estables de pH, CE y T.
- viii) Después del bombeo de limpieza, se tomaron mediciones finales de pH y temperatura (Mini medidor Accumet, modelo científico Fisher 955) y de conductividad eléctrica (medidor de conductividad de alcance múltiple Hanna HI 9033). El medidor de pH fue calibrado por lo menos tres veces al día con soluciones estándar de 4.7 y 9.2 (con algoritmos de corrección de temperatura), apropiadas para las aguas que estaban siendo muestreadas.
- ix) Se efectuó la titulación de la alcalinidad en campo, usando un equipo de prueba de alcalinidad AquaMerck 1.11109. Se realizaron tres titulaciones usando un indicador mixto de punto final 4.3 (total-alcalinidad o m-alcalinidad) y se calculó el promedio de estas tres titulaciones. Cuando el pH excedió 8.2, se hicieron tres titulaciones usando un indicador de fenolftaleína de punto final 8.2 (p-alcalinidad) y se sacó el promedio. Se cree que las titulaciones de alcalinidad tienen una precisión de  $\pm 0.2$  meq/l.
- x) Dos matraces de polietileno de 1.000 ml se enjuagaron tres veces con el agua bombeada y luego fueron llenados con agua bombeada sin filtrar.
- xi) Se enjuagó un matraz nuevo de polietileno de 125 ml con agua bombeada filtrada a 0.45  $\mu\text{m}$ . Luego se lo llenó con agua filtrada de la misma manera. El filtrado se realizaba típicamente usando unidades de filtración al vacío desechables Nalgene de 0.45  $\mu\text{m}$  o en algunos casos, usando jeringas desechables montadas sobre cápsulas de filtrado Millex-Millipore de 0.45  $\mu\text{m}$ .
- xii) Un último matraz de polietileno de 125 ml, predosificado por Spectrolab con preservante concentrado puro  $\text{HNO}_3$ , fue llenado con agua de muestreo filtrada.
- xiii) Una vez finalizado el muestreo, se apagó y retiró la bomba. Cuando no se logró una prueba de abatimiento de manera satisfactoria, se monitoreó continuamente la

recuperación de los niveles de agua para formar la base para el análisis de la prueba de recuperación.

El pozo PPO-21 produjo un resultado muy bajo, y probablemente esto se deba a que el filtro del pozo esté lleno de sedimento. Se observó que la mayor parte del agua bombeada durante el primer intento de muestreo provenía de la columna de agua del pozo y no de una verdadera formación hídrica. Durante este intento de muestreo (12/11/99), el nivel de agua del pozo bajó de 2.65 m debajo del tope del pozo (bwt) a 8.23 m bwt. Se visitó nuevamente el pozo al día siguiente y se encontró que el nivel del agua se había recuperado a 3.83 bwt, lo que implicaba que unos 4.40 m de agua fresca habrían ingresado a la base del pozo. De este modo, la bomba fue colocada en la base del pozo y, después de 10 min. de bombeo, se tomó una muestra del agua fresca. La temperatura más baja (15.1 °C el 13/11/99, en contraste con 19.3 °C el 12/11/99) era un buen indicador de que se estaban muestreando aguas subterráneas representativas. Esta agua subterránea representativa fue usada para la recolección y análisis de muestras.

El pozo (BP-106) era artesiano y rebalsaba naturalmente aproximadamente 20 cm arriba del nivel del suelo. Las mediciones y el muestreo se realizaron directamente de la corriente del agua de rebalse como se detalla en los pasos (viii)-(xii).

### 5.3.2 Pozo de Producción

Se muestrearon los siguientes pozos de producción:

- PP-117 (BP-107), en el Acropuerto
- SeLA-2 y SeLA-3, en Challapampa
- PP-7, PP-11, PP-12, PP-13, PP-14, PP-15, PP-17, en Khala Kaja (Challapampa)

Se tomaron muestras directamente de la tubería de bombeo, siguiendo los pasos (viii)-(xii) mencionados en secciones anteriores. Las mediciones de pH y CE se realizaron en un balde limpio, lleno con agua fresca bombeada directamente de la tubería de bombeo. Los pozos estaban en continua producción y no fue necesario efectuar el bombeo de limpieza.

### 5.3.3 Aguas Superficiales

El muestreo de aguas superficiales fue realizado de acuerdo a los pasos (viii)-(xii) señalados en secciones anteriores, directamente en el mismo canal de aguas superficiales.

### 5.3.4 Muestras Blanco y Duplicadas

También se enviaron a SpectroLab, un duplicado (DUP) y dos juegos de muestras blanco (BLA y BLA2) para control analítico. La muestra duplicada fue recolectada en PPSJ-10 simultáneamente con la muestra primaria y fue sometida a los mismos procedimientos de filtrado/preservación como la primera muestra. La primera muestra blanco (BLA) fue preparada en el campo, usando agua desionizada proporcionada por SpectroLab y con los mismos procedimientos de filtrado/preservación aplicadas a las muestras primarias. La segunda muestra

blanco (BLA2) se obtuvo simplemente de una serie de matraces llenados directamente por el laboratorio SpectroLab con agua desionizada. Por lo tanto, cualquier diferencia entre BLA y BLA2 puede ser atribuida al muestreo de campo o a los procedimientos de filtrado.

### 5.3.5 Registro de Datos

Los datos de campo para cada muestra fueron registrados en hojas de campo. En el Apéndice 1 se muestra una de estas hojas como ejemplo.

## 5.4 PROCEDIMIENTOS ANALITICOS

Las muestras fueron enviadas el mismo día del muestreo a SpectroLab (Oruro), para que se realizara el análisis de especies de nitrógeno sin ningún retraso. Los matraces se analizaron de la siguiente forma:

1. 1 x 125 ml. muestra filtrada (0.45 µm) y acidificada:
  - análisis completo por ICP-MS (espectrometría de masa por plasma inductivo acoplado), subcontratado a ActLabs, Canadá.
  - Hg mediante absorción atómica de vapor (CVAA) en SpectroLab, Oruro.
  - Na por absorción atómica (AA), en SpectroLab, Oruro, ya que este parámetro no puede ser determinado adecuadamente por ICP-MS en muestras de alta conductividad.
2. 1 x 125 ml. muestra filtrada (0.45 µm) sin acidificar:
  - serie de aniones (cloruro, sulfato, fluoruro, fosfato) mediante cromatografía de iones (CI), subcontratada a ActLabs, Canadá.
  - nitrato (mismo día) mediante colorimetría en SpectroLab, Oruro.
3. 1 x 1000 ml. muestra sin acidificar ni filtrar:
  - amonio (mismo día) mediante colorimetría en SpectroLab, Oruro.
  - alcalinidad de carbonato y bicarbonato en SpectroLab, Oruro.
  - pH y CE en un número limitado de muestras, donde se experimentó problemas con las determinaciones de campo de pH.
4. 1 x 1000 ml. sin acidificar ni filtrar, retenido como reserva.

## 5.5 RESULTADOS

### 5.5.1 Resultados de las Determinaciones de Campo

En la Tabla 5.1 se presentan los resultados de las determinaciones de campo.

*Tabla 5.3: Resultados (meq/l) de análisis para cationes y aniones mayores, con balances iónicos calculados*

Pozo	H	Ca	Mg	Na	K	Fe	Alcali- nidad	Cl	SO4	Suma cationes	Suma aniones	% error
	meq/l	meq/l	Meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	
PP-7	1.5E-05	2.00	1.13	7.16	0.13	7.71E-03	4.98	1.94	3.04	10.72	9.96	3.7
PP-17	1.2E-05	2.50	1.05	6.49	0.15	5.14E-03	5.13	1.78	3.98	10.81	10.89	-0.4
PP-15	7.9E-06	1.99	1.28	7.76	0.14	4.39E-03	5.70	2.05	2.79	11.17	10.84	2.9
PP-14	8.7E-06	1.92	1.27	8.55	0.18	5.31E-03	5.70	3.78	2.21	11.91	11.69	1.0
PP-12	5.3E-06	1.80	1.23	7.31	0.13	5.71E-03	5.43	1.93	2.33	10.48	9.69	5.9
PP-13	9.3E-06	1.76	1.33	8.08	0.13	3.82E-03	6.07	2.49	2.31	11.50	10.87	3.0
SeLA-2	1.47E-05	2.43	1.95	10.06	0.20	5.06E-03	6.67	6.06	2.14	14.63	14.88	-0.8
SeLA-3	1.8E-05	3.80	2.90	12.99	0.26	7.89E-03	6.17	11.40	1.49	20.04	19.06	2.5
PPO-BP-107	9.3E-06	4.36	2.38	8.25	0.41	7.94E-03	4.27	6.35	4.75	15.11	15.30	-0.2
Agua de mina canal 1	7.9E-00	37.92	29.30	376.03	3.50	3.53E-01	0.00	485.86	44.66	490.02	530.52	-4.0
Agua de mina canal 2	3.0E-00	48.97	34.07	495.65	4.60	3.94E+00	0.00	499.26	112.84	592.18	612.16	-1.7
Río Taguete	3.9E-05	3.60	2.72	80.47	0.93	2.26E-02	5.32	74.18	13.95	91.83	93.45	-0.9
PPSI-1	3.9E-01	11.88	12.67	123.35	0.19	8.31E+00	0.00	184.75	84.22	228.99	268.97	-8.7
PPSI-10	1.3E-04	33.78	33.05	164.91	1.32	9.96E-02	18.53	198.57	28.75	236.16	245.84	-3.0
DUP	4.3E-04	41.37	44.77	162.29	1.58	1.05E-01	18.53	198.57	28.11	250.11	245.21	1.0
PPO-14	8.9E-05	0.33	0.71	459.55	0.08	<	6.60	437.20	32.06	460.70	475.86	-1.6
SeLA-4	7E-05	2.7	1.46	10.94	0.23	2.57E-02	6.17	6.54	1.58	13.36	14.19	3.6
PPSI-22	5E-05	3.88	2.37	11.03	0.30	2.19E-02	4.53	10.97	0.66	17.45	16.17	3.8
PP-16	4.8E-05	1.23	1.83	18.38	0.24	4.71E-03	8.63	9.22	1.88	21.09	19.74	3.3
PP-9	3E-05	1.44	1.12	10.07	0.14	3.80E-03	6.27	3.81	1.78	12.78	11.86	3.7
PPA-1	2.1E-05	3.72	2.87	56.85	0.61	7.63E-01	13.30	49.36	0.12	64.75	62.78	1.5
PP-11	1.6E-05	2.77	1.19	8.52	0.15	4.50E-03	6.23	2.50	2.15	11.93	10.88	4.6
PPO-PI-10	7.7E-05	1.57	1.85	8.69	0.15	3.29E-03	6.30	2.08	1.79	11.20	10.18	4.8
PPO-21	4.3E-05	3.46	1.46	35.05	0.50	1.35E-01	11.37	28.15	1.55	40.60	41.07	-0.6
PPSI-7	5.6E-04	20.66	9.88	31.77	0.56	8.27E-01	4.13	38.08	17.80	63.70	60.01	3.0
PPO-BP-112	4.8E-05	5.14	1.97	4.85	0.30	1.07E-02	3.85	1.44	6.00	12.26	11.19	4.1
PPO-BP-106	3.1E-05	1.23	1.86	10.13	0.14	3.24E-03	6.27	4.71	1.61	12.37	12.59	-0.9
PPO-BP-111	2.3E-05	0.82	1.09	538.49	0.10	<	7.25	493.62	48.51	540.51	519.37	-0.8
REX	2.9E-05	8.18	1.75	11.20	1.63	1.50E-02	5.63	10.04	7.42	22.78	23.09	-0.7
PPO-13	6.6E-05	27.64	39.92	579.30	5.37	7.52E-02	5.37	579.50	49.97	652.30	634.84	1.4
PPO-15	7.1E-05	28.09	30.45	242.71	1.52	6.05E-02	8.00	246.22	33.10	302.84	287.32	2.6
PPO-16	2.5E-05	3.35	2.07	30.88	0.35	6.94E-03	7.37	26.40	3.34	36.66	37.11	-0.6
DM-1	1.7E-05	3.29	2.71	11.40	0.29	6.33E-03	4.30	12.04	0.35	17.69	16.69	2.9

## 5.5 RESULTADOS

### 5.5.1 Resultados de las Determinaciones de Campo

En la Tabla 5.1 se presentan los resultados de las determinaciones de campo.

*Tabla 5.3: Resultados (meq/l) de análisis para cationes y aniones mayores, con balances iónicos calculados*

Pozo	H	Ca	Mg	Na	K	Fe	Alcali- nidad	Cl	SO4	Suma cationes meq/l	Suma aniones meq/l	% error
	meq/l	meq/l	Meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l			
PP-7	1.5E-05	2.00	1.73	7.46	0.13	3.71E-03	4.98	1.94	3.04	10.72	9.96	3.7
PP-17	1.2E-05	2.50	1.68	6.49	0.15	3.14E-03	5.13	1.78	3.98	10.81	10.89	0.4
PP-15	7.9E-06	1.99	1.28	7.76	0.14	4.39E-03	5.70	2.05	2.79	11.17	10.51	2.9
PP-14	8.7E-06	1.92	1.27	8.55	0.18	3.31E-03	5.70	3.78	2.21	11.91	11.69	1.0
PP-12	8.3E-06	1.80	1.23	7.31	0.13	3.71E-03	5.43	1.93	2.33	10.48	9.69	3.9
PP-13	9.3E-06	1.76	1.33	8.08	0.13	3.82E-03	6.07	2.49	2.31	11.30	10.87	2.0
SeLA-2	1.4E-05	2.43	1.95	10.06	0.20	3.06E-03	6.67	6.06	2.14	14.63	14.88	-0.8
SeLA-3	1.8E-05	3.80	2.90	12.99	0.26	7.89E-03	6.17	11.40	1.49	20.04	19.00	2.5
PPO-BP-107	9.3E-06	4.36	2.38	8.25	0.41	7.94E-03	4.27	6.35	4.75	15.41	15.36	0.2
Agua de mina canal 1	7.9E-06	37.92	29.30	376.03	3.50	3.53E-01	0.00	485.86	44.66	490.02	330.52	-1.0
Agua de mina canal 2	5.0E-06	48.87	34.07	495.65	4.60	3.94E-01	0.00	499.26	112.84	592.18	611.10	-1.7
Río Tagarete	7.9E-06	3.60	2.72	80.47	0.93	2.26E-02	5.32	74.18	13.95	91.83	93.43	-0.9
PPS-7	5.9E-04	26.88	12.67	123.35	0.19	8.31E-03	0.00	184.75	84.22	228.99	268.97	-8.7
PPS-10	4.3E-04	33.78	33.05	164.91	1.32	9.96E-02	18.53	198.57	28.73	236.16	243.81	-2.0
DUP	4.3E-04	41.37	44.77	162.29	1.58	1.05E-01	18.53	198.57	28.11	250.11	245.21	1.0
PPO-14	8.9E-05	0.30	1.77	459.55	0.08	<	6.60	437.20	32.06	460.70	478.86	-1.6
SeLA-4	7E-05	2.00	1.46	10.94	0.23	2.57E-02	6.17	6.54	1.58	15.36	11.29	3.6
PPO-20	9E-05	1.88	1.2	11.03	0.30	2.19E-02	4.53	10.97	0.66	17.45	16.17	3.8
PP-10	1.8E-05	1.33	1.83	18.38	0.24	4.71E-03	8.63	9.22	1.88	21.09	19.74	3.3
PP-9	1.2E-05	1.24	1.12	10.07	0.14	3.80E-03	6.27	3.81	1.78	12.78	11.86	3.7
PPA-1	2.1E-05	1.72	2.87	56.85	0.61	7.63E-01	13.30	49.36	0.12	64.75	62.78	1.3
PP-11	1.8E-05	2.07	1.39	8.52	0.15	4.50E-03	6.23	2.50	2.15	11.93	10.88	1.6
PPO-PI-10	1.7E-05	1.51	0.85	8.69	0.15	3.29E-03	6.30	2.08	1.79	11.20	10.18	4.8
PPO-21	4.3E-05	3.46	1.46	35.05	0.50	1.35E-01	11.37	28.13	1.55	40.60	41.07	-0.6
PPS-7	5.6E-04	20.60	9.88	31.77	0.56	8.27E-01	4.13	38.08	17.80	63.70	60.01	3.0
PPO-BP-112	4.8E-05	5.14	1.97	4.85	0.30	1.07E-02	3.85	1.44	6.00	12.26	11.79	4.1
PPO-BP-106	3.1E-05	1.23	1.86	10.13	0.14	3.24E-03	6.27	4.71	1.61	12.37	12.59	-0.9
PPO-BP-111	2.3E-05	0.82	1.09	538.49	0.10	<	7.25	493.62	48.51	540.51	519.37	-0.8
REX	2.9E-05	8.18	1.75	11.20	1.63	1.50E-02	5.63	10.04	7.42	22.78	23.09	-0.7
PPO-13	6.6E-05	27.64	34.92	579.30	5.37	7.52E-02	5.37	579.50	49.97	652.30	634.84	1.8
PPO-15	7.1E-05	28.09	30.45	242.71	1.52	6.05E-02	8.00	246.22	33.10	302.84	287.32	2.6
PPO-16	2.5E-05	3.35	2.07	30.88	0.35	6.94E-03	7.37	26.40	3.34	36.66	37.11	-0.6
DM-1	1.7E-05	3.29	2.71	11.40	0.29	6.33E-03	4.30	12.04	0.35	17.69	16.69	2.9

Pozo	H	Ca	Mg	Na	K	Fe	Alcali- nidad	Cl	SO4	Suma caciones	Suma aniones	% error
	meq/l	meq/l	Meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	
DM-2	2.8E-06	4.50	2.27	16.79	0.48	5.61E-03	5.87	16.98	1.42	24.04	24.26	-0.5
DM-4	1.0E-04	7.04	4.80	84.24	0.34	3.24E-03	5.80	82.08	6.83	96.92	94.71	1.2
DM-5	4.6E-04	24.15	8.81	50.62	0.79	3.48E-02	7.07	47.67	28.73	84.40	83.47	0.6
DM-6	6.2E-05	17.27	23.29	491.01	3.86	3.24E-02	9.03	460.05	69.75	535.47	538.85	-0.3
Máximo	7.9E-00	60.88	44.77	579.30	5.37	5.53E-01	18.53	579.50	112.84	652.30	634.84	4.8
Mínimo	2.8E-06	0.56	0.71	4.85	0.08	<	0.00	1.44	0.12	10.48	9.69	-8.7
Mediana	2.3E-05	3.72	2.07	16.79	0.30	7.94E-03	6.07	12.04	3.34	22.78	23.09	1.0
Media	3.7E-01	11.44	9.17	113.57	0.88	1.35E-00	6.54	114.80	17.73	136.77	139.07	0.9

Nota: < = debajo del límite de detección.

Tabla 5.4 Resultados analíticos de las muestras de control de calidad: agua de PPSJ-10 y muestra duplicada (DUP) de este pozo

Parámetro/Pozo	Unidad	PPSJ-10	DUP	BLA	BLA2
Cl	mg/l	7.040	7.040	0.2	0.2
SO <sub>4</sub>	mg/l	1.380	1.350	< 0.5	< 0.5
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/l	< 25	< 25	< 10	10
F	mg/l	< 1	< 1	< 1	< 1
PH (Lab.)		na	na	na	5.72
EC (Lab.)	µS/cm	na	na	na	1.18
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	1.128	1.128	10.40	14.06
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	< 3	< 3	< 3	3
Alcalinidad (Lab.)	meq/l	17.50	17.55	0.17	0.25
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg/l	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	mg/l	na	na	Na	Na
Hg	mg/l	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Na	mg/l	3.791.2	3.731.0	< 0.2	0.027
NH <sub>4</sub>	mg/l	0.18	0.18	< 0.05	< 0.05
Pb	µg/l	10.100	12.700	1	1
Bc	µg/l	< 2	< 2	< 0.1	< 0.1
Mg	µg/l	438.000	544.000	50	5
Al	µg/l	53	< 40	40	< 2
S	µg/l	18.500	22.500	< 50	< 50
K	µg/l	51.500	61.700	10	19
Cd	µg/l	677.000	829.000	< 50	< 50
Se	µg/l	< 20	< 20	< 1	< 1
I	µg/l	15	17	0.9	< 0.1
V	µg/l	< 1	< 1	< 0.05	< 0.05
Cr	µg/l	< 10	< 10	< 0.5	< 0.5
Mn	µg/l	171	156	0.5	0.8
Fe	µg/l	2.780	2.940	77	< 5
Co	µg/l	0.9	1.1	0.011	0.011
Ni	µg/l	16	17	< 0.3	< 0.3
Cu	µg/l	43	53	0.5	0.4
Zn	µg/l	138	102	41.8	2.3
Ga	µg/l	< 0.2	< 0.2	< 0.01	< 0.01
Ge	µg/l	< 0.2	< 0.2	< 0.01	< 0.01
As	µg/l	1.4	1.7	1.27	0.08

Parámetro/Pozo	Unidad	PPS-J-10	DUP	BLA	BLA2
Sc	ug/l	<4	5	<0,2	<0,2
Br	ug/l	1.990	2.430	<3	3
Rb	ug/l	60,2	72,5	0,086	0,023
Sr	ug/l	15,700	19,100	0,46	0,7
Y	ug/l	0,13	0,16	0,005	<0,005
Zr	ug/l	<0,6	<0,6	<0,003	<0,003
Nb	ug/l	<0,2	<0,2	<0,01	<0,01
Mo	ug/l	2	<2	<0,1	<0,1
Ru	ug/l	<0,4	<0,4	<0,02	<0,02
Pd	ug/l	<0,4	<0,4	<0,02	<0,02
Ag	ug/l	<4	<4	1,7	0,7
Cd	ug/l	1,6	0,9	0,07	0,01
In	ug/l	<0,02	<0,02	0,009	<0,001
Sn	ug/l	2	<2	0,2	<0,1
Sb	ug/l	1,1	1,6	0,28	0,26
Te	ug/l	<4	<4	<0,2	<0,2
I	ug/l	250	282	1	<1
Cs	ug/l	27,5	34,7	0,542	<0,002
Ba	ug/l	91	110	0,1	0,7
La	ug/l	<0,1	<0,1	<0,005	0,005
Ce	ug/l	<0,2	<0,2	<0,01	<0,01
Pr	ug/l	<0,04	<0,04	<0,002	0,002
Nd	ug/l	<0,08	<0,08	0,005	<0,001
Sm	ug/l	<0,1	<0,1	<0,005	0,005
Eu	ug/l	<0,02	<0,02	<0,001	0,001
Gd	ug/l	<0,04	<0,04	<0,002	<0,002
Tb	ug/l	<0,02	<0,02	0,001	0,001
Dy	ug/l	<0,04	<0,04	<0,002	<0,002
Ho	ug/l	<0,02	<0,02	<0,001	<0,001
Er	ug/l	<0,02	<0,02	<0,001	<0,001
Tm	ug/l	<0,02	<0,02	<0,001	<0,001
Yb	ug/l	<0,02	<0,02	<0,001	<0,001
Lu	ug/l	<0,02	<0,02	<0,001	0,001
Hf	ug/l	<0,04	<0,04	<0,002	0,002
Ta	ug/l	<0,2	<0,2	<0,01	<0,01
W	ug/l	<0,4	<0,4	<0,02	<0,02
Re	ug/l	<0,02	<0,02	<0,001	<0,001
Os	ug/l	<0,04	<0,04	<0,002	<0,002
Pt	ug/l	<0,4	<0,4	<0,02	<0,02
Au	ug/l	<0,04	<0,04	<0,002	<0,002
Ir	ug/l	0,5	0,6	<0,005	<0,005
Pb	ug/l	4	7	1,5	1,3
Bi	ug/l	1,0	1,0	0,77	<0,01
Th	ug/l	<0,06	<0,06	<0,003	<0,003
U	ug/l	25,2	30,6	<0,001	0,011
B	ug/l	7.080	8.850	<1	na

Nota: BLA = muestra blanco de campo (agua desionizada filtrada y preservada);  
 BLA2 = muestra blanco, no de campo con agua desionizada sin filtrar; na = no analizada



### 5.5.2 Análisis de Laboratorio

En el Apéndice 3A se presentan los resultados completos del análisis de laboratorio. La Tabla 5.3 muestra los resultados para los cationes y aniones mayores (Ca, Mg, Na, K, Fe, Cl, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) calculados en meq/l. La tabla también muestra los resultados de campo para alcalinidad y actividades iónicas de hidronio en meq/l (esta última calculada a partir del pH por):

$$[H^+] = 1000 * 10^{-pH}$$

donde [H<sup>+</sup>] es la actividad iónica de hidronio en meq/l).

La suma de cationes y aniones fue calculada usando:

$$\Sigma cat = (Ca) + (Na) + (Fe^{II}) + (Mg) + (K) + [H^+]$$

$$\Sigma an = (SO_4^{2-}) + (Cl) + (\text{alcalinidad})$$

Los paréntesis ( ) y los corchetes [ ] denotan la concentración / actividad en meq/l, y donde se asume que todo el hierro está presente en estado de oxidación +II. El error de balance iónico se calcula como:

$$\text{Error de balance iónico (\%)} = 100\% * (\Sigma cat - \Sigma an) / (\Sigma cat + \Sigma an)$$

Los errores de balance iónico calculados están casi entre -5% y +5%, lo que indica la excelente calidad analítica para aguas tan salinas y/o contaminadas. La única muestra fuera de estos límites (PPSJ-1 en -8.6 %) también es la muestra más contaminada y es posible que la consideración de otros metales y caracterización de elementos mejore considerablemente los errores de balance iónico.

### 5.5.3 Muestras de Control de Calidad

Durante el análisis de laboratorio, las muestras para el análisis ICP-MS fueron realizadas en grupos. Cada grupo incluía los siguientes controles analíticos:

- una muestra blanco de laboratorio, la cual debería dar concentraciones menores al límite de detección para cada elemento.
- reanálisis de las muestras reales recolectadas, para chequear la reproductividad analítica.
- análisis de muestras de control estándar aceptadas. Estas son esencialmente soluciones/mezclas de una amplia variedad de elementos en diferentes, pero conocidas concentraciones. Los controles estándares usados por ActLabs fueron SLRS-4 (una solución relativamente diluida) y NIST 1643 D (una solución más concentrada).

Los resultados de todos estos controles de laboratorio fueron proporcionados a Dames & Moore Norge. Ni SpectroLab ni Dames & Moore Norge encontraron serias discrepancias en los resultados de los estándares de laboratorio, muestras blanco o duplicados.

Como se describió anteriormente, Dames & Moore Norge también introdujo de manera independiente sus propias muestras de control de calidad en el programa analítico específicamente:

DUP: una muestra duplicada de PPSJ-10

BLA: una muestra blanco de campo de agua deionizada de laboratorio, filtrada y preservada en el campo

BLA2: una muestra blanco de control de agua deionizada de laboratorio, sin filtrar.

Los resultados de estas muestras de control independientes se presentan en la Tabla 5.4. Entre la muestra primaria de PPSJ-10 y la duplicada, no se observaron serias discrepancias en los resultados. Posiblemente, las anomalías más prominentes estén en los cationes mayores analizados por ICP-MS (por ejemplo 677 mg/l Ca *versus* 829 mg/l en el duplicado). Sin embargo, en general, uno puede concluir que la reproductividad analítica en sí, es buena.

Una comparación de BLA con BLA2 nos permite determinar si hubo alguna contaminación de la muestra mediante los procedimientos de campo, por ejemplo:

- polvo llevado por el viento que haya entrado a los matraces de muestras
- contaminación por manipuleo
- contaminación por filtración. Reimann et al. (1999a,b) ha demostrado que, para algunos cuantos elementos específicos, el material de filtración y del matraz pueden introducir un nivel limitado de contaminación a las muestras de agua.

Generalmente, las concentraciones determinadas en BLA y BLA2 son muy bajas y están por debajo del límite de detección, esto indica la falta de contaminación significativa. Para los siguientes elementos, las concentraciones registradas en BLA exceden significativamente las de BLA2, indicando algún tipo de contaminación de campo, aunque estas concentraciones son consideradas tan pequeñas que no tienen un impacto práctico en la validez del análisis:

Mg, Rb, Sr

Para los siguientes elementos las concentraciones registradas en BLA exceden significativamente las concentraciones en BLA2 y se acercan al orden de magnitud de concentraciones encontradas en muestras reales de aguas subterráneas:

Al, Ti, Fe, Zr, As, Y, Ag, In, Cd, Sn, Cs, Bi

Por lo tanto, se debe tener mucho cuidado al interpretar los datos de las muestras reales de aguas subterráneas para estos elementos, ya que una parte de la concentración registrada puede deberse a contaminación de campo.

Para Sb y Pb, las concentraciones en BLA y BLA2 son similares y representan una proporción significativa de las concentraciones analizadas en muestras reales de aguas subterráneas. Esto

sugiere que el agua destilada de laboratorio está contaminada con estos elementos y no impacta la validez del análisis en muestras reales para estos elementos. Sin embargo, si el contaminante es el preservante ácido nítrico, en vez del agua destilada, se debe ser cauteloso con estos elementos.

#### 5.5.4 Interferencia Analítica con ICP-MS

Las técnicas de ICP-MS están sujetas a un gran número de interferencias de masa entre especies cargadas de una masa similar. Un operador calificado y con experiencia podría corregir estas interferencias con la ayuda de un software adecuado de algoritmos de corrección. Dames & Moore Norge ha revisado el grupo de datos para varias de las interferencias de masa más comunes. No se encontró ninguna señal de interferencia entre Cl y V, Cl y Cr, ni entre Cl y As. Sin embargo, se encontró una correlación linear buena entre Si y Se, lo que indica interferencia entre estos elementos. De esta manera, no se eliminaron todas las interferencias potenciales del grupo de datos y, por lo tanto, no se pueden considerar útiles los datos para Se.

### 5.6 INTERPRETACION DE DATOS

Para interpretar estos datos, Dames & Moore Norge asumió dos enfoques.

#### *Examen de la Distribución Geográfica*

Dames & Moore Norge examinó la distribución geográfica de los datos, poniendo particular atención al perfil hidroquímico PPSJ-1 (pozo altamente contaminado debido al lixiviado de los desmontes mineros), progresivamente cuesta abajo a través de PPSJ-7 y posiblemente hasta DM-6, DM-5 y PPSJ-10. Existe una fuerte posibilidad que PPSJ-7 no esté lejos de la vía de flujo que pasa a través de PPSJ-1. Lamentablemente, no existen datos adecuados del nivel piezométrico de las aguas subterráneas para proyectar la vía de flujo de las aguas subterráneas más allá de PPSJ-7. Por lo tanto, no se sabe si es correcto considerar que los últimos tres pozos (DM-5, PPSJ-10 y DM-6) se encuentran en la misma vía de flujo que PPSJ-1 y PPSJ-7.

Sin embargo, Dames & Moore Norge puede considerar a PPSJ-1, PPSJ-7 y DM-5 como pozos ubicados a distancias mayores progresivas de los desmontes (San José, Frankeita y Jallpha) en el área, lo cual puede producir lixiviado contaminante.

#### *Examen de los Datos de Calidad de Agua*

Dames & Moore Norge examinó los datos de calidad de agua con relación al cumplimiento con los estándares de calidad de agua potable, riego y descarga de Bolivia y del USEPA. A continuación, se usa la palabra "contaminación" para indicar concentraciones elevadas de parámetros químicos, que se encuentren por encima de las concentraciones de base típicas, y puedan atribuirse a la actividad humana. El hecho de que las aguas subterráneas o el agua de un pozo estén *contaminadas* **no** implica que no sean aptas para consumo u otros usos. Cuando un pozo está contaminado a tal grado que ya no es apto para su uso (agua potable, riego o descarga), y excede los estándares de agua relevantes, se dice que está *polucionado*.

**Tabla 5.5: Concentraciones de los parámetros en los pozos PPSJ-1, PPSJ-7, DM-5, DM-6 y PPSJ-10**

Pozo	Unidad	Agua Potable MAC	PPSJ-1	PPSJ-7	DM-5	DM-6	PPSJ-10
Temp.	°C		16,3	20,4	16,3	14,1	14,4
pH		6,0-8,5	3,23	6,25	6,34	7,21	6,37
EC	µS cm		16.900	5.570	6.640	40.700	19.600
Alcalinidad	meq l		0,00	4,13	7,07	9,03	18,53
Cl <sup>-</sup>	mg l	250	6.550	1.350	1.690	16.310	7.040
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg l	300	4.045	855	1.380	3.350	1.580
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg l		< 50	10	< 10	< 10	25
F <sup>-</sup>	mg l	1,7	< 5	< 1	< 1	< 1	1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg N l	4,5 (nitrato)	< 0,5	< 0,5	9,80	3,42	0,5
Hg- CVAA	mg l	0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001
Na - AA	mg l	200	2.836	731	1.164	11.288	3.791
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg l	0,05	< 0,5	< 0,05	2,29	1,70	0,18
Li	µg l	2.500	7.930	1.050	1.180	38.200	10.100
Be	µg l		42,9	0,5	< 0,1	< 4	2
Mg	µg l	100.000	397.000	120.000	107.000	283.000	438.000
Al	µg l	200	375.000	36	< 2	< 80	53
Si	µg l		67.200	17.800	24.400	20.500	18.500
K	µg l		7.480	21.900	30.700	151.000	51.600
Ca	µg l	200.000	1.220.000	414.000	484.000	346.000	677.000
Sc	µg l		51	10	8	40	20
Ti	µg l		27,7	8,5	8,2	31	15
V	µg l	100	85,8	< 0,2	0,51	21	< 2
Cr	µg l	50	339	< 2	< 0,5	31	10
Mn	µg l	500	112.000	6.310	24.600	6.110	171
Fe	µg l	300	232.000	23.100	971	904	2.780
Co	µg l	100	582	4,79	10,8	8,2	0,9
Ni	µg l	50	973	96,7	201	733	16
Cu	µg l	50	9.540	15,2	11,8	152	43
Zn	µg l	200	31.700	1.950	1,5	329	138
Ga	µg l		3,04	0,12	0,22	0,4	< 0,2
Ge	µg l		0,40	< 0,04	< 0,01	< 0,4	< 0,2
As	µg l	50	38,6	1,43	3,75	23,1	1,4
Se	µg l	0	23	4,6	10,1	11	12
Br	µg l		2.640	892	922	7.900	1.990
Rb	µg l		171	30,3	57,2	74,3	60,2
Sr	µg l		3.730	3.310	3.440	14.400	15.700
Y	µg l		281	0.480	0.080	8.49	0.13
Zr	µg l		< 0,2	< 0,12	0,06	< 1,2	< 0,6
Nb	µg l		< 0,05	< 0,04	0,05	< 0,4	< 0,2
Mo	µg l		0,9	12,5	1,4	6	< 2
Ru	µg l		0,2	< 0,08	< 0,02	< 0,8	< 0,4

Pozo	Unidad	Agua Potable MAC	PPSJ-1	PPSJ-*	DM-5	DM-6	PPSJ-10
Pd	µg/l		<0,1	<0,08	<0,02	<0,8	<0,4
Ag	µg/l	50	455	<0,8	<0,2	<8	4
Cd	µg/l	5	1.890	130	63,1	45,9	1,6
Ch	µg/l		111	<0,004	0,007	<0,04	<0,02
Sn	µg/l	2.000	0,9	<0,4	<0,1	<4	2
Se	µg/l	10	3,95	0,80	0,41	4,9	1,1
Te	µg/l		<1	<0,8	<0,2	<8	4
Tl	µg/l		110	117	49	197	259
Cs	µg/l		393	1,54	2,54	7,01	27,5
Ba	µg/l	1.000	23,0	31,9	65,4	51	91
Br	µg/l		59,2	0,07	0,059	6,6	<0,1
Zn	µg/l		234	0,06	0,06	9,3	<0,2
Pb	µg/l		43,1	<0,008	0,005	0,71	<0,04
Ni	µg/l		220	0,046	0,017	2,73	<0,08
Sm	µg		65,0	<0,02	<0,005	0,6	0,1
Fa	µg/l		16,6	0,004	0,003	0,21	0,02
Gd	µg		64,4	0,013	0,005	0,76	<0,04
Tb	µg/l		10,0	<0,004	0,002	0,09	<0,02
Dy	µg/l		49,9	0,013	0,003	0,52	0,04
Ho	µg/l		8,34	<0,004	0,002	0,13	<0,02
Er	µg/l		21,1	0,008	0,003	0,30	<0,02
Tm	µg/l		2,52	<0,004	<0,001	0,05	<0,02
Yb	µg/l		14,92	0,005	0,002	0,22	<0,02
Lu	µg/l		2,04	<0,004	<0,001	0,05	<0,02
Hf	µg/l		0,43	<0,008	0,002	<0,08	<0,04
Ta	µg		0,05	0,04	<0,01	<0,4	<0,2
W	µg/l		<0,1	0,08	0,20	<0,8	<0,4
Re	µg/l		0,019	0,022	0,015	0,07	<0,02
Os	µg/l		<0,01	<0,008	<0,002	<0,08	<0,04
Pt	µg/l		<0,1	<0,08	<0,02	<0,8	<0,4
Au	µg/l		0,03	0,009	0,008	0,47	<0,04
Tl	µg/l	2 *	4,58	<0,02	0,066	1,2	0,5
Pb	µg/l	50	83	3,9	<0,1	34	4
Bi	µg/l		0,85	0,06	<0,01	<0,4	1,0
Th	µg/l		0,60	0,024	<0,003	<0,12	<0,06
U	µg/l	20	13,6	0,322	1,07	111	25,2
B	µg/l	1.000	na	2.790	na	na	7.080

Nota: Las concentraciones máximas aceptables (MAC) para agua potable son las normas bolivianas, excepto (\*) para talio, donde se usaron las normas del USEPA. Las celdas sombreadas indican valores que exceden de las normas. na = no analizada.

### 5.6.1 Distribución Geográfica

Para examinar la distribución geográfica, Dames & Moore Norge produjo mapas hidrogeoquímicos de las concentraciones de elementos selectos en aguas subterráneas del sistema acuífero del Cuaternario (Apéndice 4). Estos mapas fueron producidos usando el programa "Data Analysis Software" (DAS), desarrollado por la Universidad Técnica de Viena, especialmente para el fin de análisis estadístico de grupos de datos geoquímicos. El programa no usa técnicas de perfilado (lo que puede imponer patrones artificiales en los grupos de datos), ni ninguna forma de estadísticas basadas en supuestos asociados con la estructura de los datos fundamentales (normalidad, normalidad de registros, etc.). Las clases ploteadas en los mapas están basadas en un concepto estadístico sin parámetros conocido como casillero (que se ilustra en la esquina superior izquierda de cada mapa). El casillero contiene el 50% central de los datos (el rango intercuartiles, representado en los mapas por un punto negro), con una línea horizontal en el valor de la mediana. Las curvas paralelas ( $\approx$ ), representan los datos externos al cuartiles, (el 25% más alto y más bajo), ser representados por una cruz y un círculo vacío, respectivamente. Se incluyen datos aislados, los cuales se ilustran como cuadrados de dimensión creciente.

Para producir estos mapas hidrogeoquímicos, es necesario definir un medio para manejar los resultados inferiores de los límites de detección analítica. Es una práctica estándar establecer éstos a un valor de la mitad del límite de detección. Sin embargo, en este grupo de datos, el límite de detección varía fuertemente dependiendo de, por ejemplo, la salinidad del agua. Por lo tanto, dicha práctica resultaría en un tratamiento estadístico sesgado y mapas erróneos. Por esta razón, Dames & Moore Norge decidió establecer todos los resultados por debajo del límite de detección a cero, con el fin de realizar el ploteo de mapas en los Apéndices 4A y 4B. En consecuencia, se debe notar que un punto plotado con concentración cero no contiene, necesariamente, una concentración insignificante de ese parámetro, sino que simplemente se le dio un valor por debajo del límite de detección.

#### 5.6.1.1 La "Vía" PPSJ-1-PPSJ-7-DM-5

La sección hidrogeológica de PPSJ-1, gradiente abajo hasta PPSJ-7, DM-5 y PPSJ-10, es de interés especial para entender la atenuación de contaminantes de mina. La sección empieza en PPSJ-1, la cual consiste de agua altamente contaminada por lixiviado de residuos de mina. Esta línea de pozos está ubicada en la dirección de los residuos de la mina San José hacia el campo de pozos. Existen datos insuficientes del nivel piezométrico de aguas subterráneas en el área para producir un mapa topográfico confiable de aguas subterráneas, por lo tanto, es incierto si esta sección representa una vía de flujo verdadera.

Se considera probable que PPSJ-7 se encuentre cerca a una vía de flujo que pasa a través de PPSJ-1. Es mucho menos probable que DM-5 se encuentre en la misma vía. Dichos mapas topográficos de aguas subterráneas que fueron producidos por Dames & Moore Norge (Figura 7.1, Informe 2) sugieren que es probable que las aguas subterráneas fluyan más directamente en

dirección este, hacia DM-6. Sin embargo, también es posible que PPSJ-1, PPSJ-7 y DM-5 puedan ser considerados como pozos ubicados a distancias progresivamente mayores de diversas fuentes de residuos mineros (San José, Jallpha, y Frankeita), las que pueden generar lixiviado contaminante.

Al plotear las concentraciones de varios contaminantes de PPSJ-1, PPSJ-7 a DM-5, Dames & Moore Norge puede obtener una buena impresión de la atenuación de esos parámetros en el entorno geológico (Tabla 5.5). En PPSJ-10 y DM-6, los niveles de contaminantes muchas veces parecen incrementarse nuevamente. Muy probablemente, esto se debería a la infiltración de agua contaminada del canal de agua de mina o del río Tagarete, respectivamente, ya que estos pozos están ubicados muy cerca de dichos cursos de agua (ver Figura 3.5 del Informe 1).

Se debe notar que varios parámetros parecen atenuarse extremadamente a lo largo de la sección PPSJ-1, PPSJ-7 a DM-5. Estos incluyen un gran número de elementos potencialmente ecotóxicos, como ser, Be, Al, Cu, Fe, Zn, Pb, Th, Cd y Sb (ver Figuras 4.1, 4.2 y 4.3, notar las escalas logarítmicas).

Para poder elucidar aún más los procesos de atenuación de lixiviado, infiltración de agua de mina y de aguas negras que pueda estar ocurriendo en la región este de San José, Dames & Moore Norge ha reploteado mapas para ciertos elementos de las aguas subterráneas y aguas superficiales, concentrándose sólo en esa región. Estos mapas se encuentran en el Apéndice 4B.

#### *5.6.1.2 Distribución Geográfica de Ciertos Parámetros y Químicos de Calidad de Agua*

Los mapas a que se hace referencia en esta sección se encuentran en los Apéndices 4A y 4B de este informe. Esta sección sobre hidrogeoquímica proporciona importantes datos para la modelación del transporte de contaminantes.

#### **pH - Acidez**

Inmediatamente al este de San José las aguas tienen valores de pH menores a la mediana. Probablemente esto se deba parcialmente a la contaminación minera y en parte sea algo natural. Ciertamente PPSJ-1 tiene registrado el pH más bajo, debido a contaminación por lixiviado de residuos mineros.

Se desconoce si los valores de pH levemente bajos encontrados en PPSJ-10, PPO-14 y PPO-15 se deban a la contaminación o sean naturales. Ciertamente parece existir un incremento estable en pH de sur a norte, teniendo los pozos de Challapampita un pH intermedio y los de Khala Kala, valores elevados de pH (típico de aguas bicarbonatadas sódicas naturales).

#### **CE – Conductividad Eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$**

La conductividad eléctrica es una medida del total de sólidos disueltos en el agua. Esto se puede dar debido a componentes naturales (salinidad) o componentes antropogénicos (contaminación).

Los pozos situados al este de Oruro muestran alta conductividad, lo que se puede atribuir parcialmente a la alta salinidad natural del acuífero de esta área. También es posible que se deba a la infiltración de agua de mina salina y aguas negras procedentes del río Tagarete y del canal de agua de mina.

Es interesante observar que el pozo PPSJ-1 sólo muestra salinidad moderada, lo que sugiere que está siendo impactado principalmente por lixiviado de residuos mineros y no por infiltración de agua de mina, con alto contenido de salinidad de cloruro de sodio. Sin embargo, es posible que exista cierto grado de infiltración de agua de mina, aún en este pozo.

Se nota una baja en la conductividad eléctrica hacia el norte. Probablemente esto refleja gradientes laterales hidrogeoquímicos naturales, y posiblemente también gradientes verticales (dado que los pozos y los acuíferos se tornan bastante profundos hacia el norte).

### **Temperatura**

La mayoría de las variaciones en las temperaturas de aguas subterráneas registradas se debe a diferencias en las condiciones de bombeo durante el muestreo (por ejemplo, una tasa de bombeo baja indica que la bomba puede haber calentado el agua muestreada significativamente (exponer al sol una sección extensa de la manguera en la parte superior del pozo provoca temperaturas más altas). Sin embargo, uno de los pozos con una temperatura significativamente alta, puede representar un efecto real: se sabe que PP-10 tiene un componente geotermal y, cuando está en producción, envía agua con una temperatura mayor a 30°C (SGAB 1996a).

### **Ag - Plata**

Sólo existe contaminación significativa en PPSJ-1. Se obtienen concentraciones de base por PPSJ-7. Se observan concentraciones elevadas en PPO-13, Aurora, SeLA-2 y SeLA-4. Se estima que estas concentraciones son naturales o no están relacionadas a contaminación minera.

### **Al - Aluminio**

Sólo existe contaminación significativa en PPSJ-1. En PPSJ-7 existen concentraciones levemente elevadas. Se observan concentraciones de base en DM-5 y concentraciones elevadas en PPSJ-10 y PP-13. La concentración en PPSJ-10, se puede atribuir a la infiltración de agua de mina del canal de descarga o del río Tagarete.

### **Alcalinidad (campo)**

Se observa alcalinidad elevada en las perforaciones Aurora y PPO-21, lo cual es consistente con las condiciones de reducción de sulfato. También se observa alcalinidad elevada en PPSJ-10 – esto no es consistente con la infiltración de agua de mina del canal o del río Tagarete y es más probable que se deba a contaminación de aguas negras o desechos.



La alcalinidad más baja se observó en PPSJ-1, volviéndose un poco más alta en PPSJ-7 y retornando a valores normales (por ejemplo, por encima de la mediana) en DM-5.

#### **As - Arsénico**

Se observaron concentraciones elevadas significativas sólo en PPSJ-1, la vertiente del Cinema Rex y PPO-16. Por eso, existe evidencia de contaminación de mina en estos pozos, aunque los valores absolutos no exceden el estándar de agua potable de 50 µg/l.

Se debe notar las bajas concentraciones de arsénico en PPSJ-7 y el hecho de que una concentración de base natural de arsénico de 2 – 3 µg/l exista en varios de los pozos de Challapampa. Dada esta base natural, es difícil decir mucho acerca de la atenuación de arsénico aparte de que la concentración observada en puntos adyacentes a los residuos mineros (PPSJ-1) parece atenuarse a niveles aceptables en PPSJ-7.

#### **Au - Oro**

Se sabe muy poco acerca de la hidroquímica natural del oro y ya que sus concentraciones están cerca al límite de detección, no se puede poner mucho énfasis en estos resultados. Se observan concentraciones elevadas en el área, al este de Oruro, las cuales pueden estar relacionadas a contaminación de mina o tal vez, sólo a la complejización (y solubilidad) del oro en aguas salinas.

#### **B - Boro**

Se analizó solo una muestra de muestras para boro, un parámetro que muchas veces está relacionado a la salinidad. Los pozos en Khala Kaja y Challapampita exceden los estándares de agua potable (1000 µg/l), aunque esto se debe enteramente a factores naturales.

#### **Ba - Bario**

Las concentraciones de bario en aguas subterráneas muchas veces están controladas por solubilidad de baritina, ya que las concentraciones altas generalmente están asociadas a bajas concentraciones de sulfato y viceversa. Se puede ver claramente este efecto en el mapa hidrogeoquímico para Ba. Se observan bajas concentraciones de Ba en los pozos ricos en sulfatos (derivadas de fuentes de contaminación y naturales), al este de Oruro. Se cree que, alrededor de Aurora, se presentan condiciones reductoras de sulfato que permiten una acumulación de altas concentraciones de bario en las aguas subterráneas.

#### **Be - Berilio**

Parece que el berilio se deriva de fuentes de residuos mineros y se presenta en 43 µg/l en PPSJ-1. En PPSJ-7, la concentración se presenta por debajo del estándar de agua (0.5 µg/l) y no es detectable en DM-5.

### **Bi - Bismuto**

Se sabe muy poco acerca de la hidroquímica del bismuto. Parece provenir de los residuos mineros (concentraciones elevadas en PPSJ-1, decrecientes hasta PPSJ-7 y DM-5). También se observan concentraciones elevadas en PPO-13, PPSJ-10 y PPO-15. Esto puede deberse a infiltración de agua de mina del río Tagarete o del canal de drenaje. Hasta la concentración más alta (1.9  $\mu\text{g/l}$ ) resulta ser muy modesta.

### **Br - Bromuro**

El bromuro es considerado un parámetro relacionado a la salinidad. Las concentraciones elevadas en PPSJ-1, DM-6, PPO-15, PPSJ-10 y PPO-13 pueden estar relacionadas con la infiltración de agua de mina salina o puede que, en gran parte, sean naturales.

### **Ca - Calcio**

Es posible que las concentraciones elevadas de calcio en PPSJ-1, PPSJ-7 y DM-5 estén relacionadas a la contaminación minera, por cuanto el drenaje ácido de mina meteorizará y disolverá parcialmente los minerales cálcicos como ser, la calcita o el feldespato de plagioclasa.

También se observan altas concentraciones de Ca en los pozos PPSJ-10 y DM-6 (lo que puede estar relacionado a infiltración de agua de mina del río Tagarete o del canal de drenaje, o por migración directa de aguas subterráneas contaminadas), y la vertiente Rex.

No está claro si las concentraciones elevadas en PPO-13 y PPO-15 están relacionadas con actividades mineras. Se debe notar que existe una reducción general en las concentraciones de calcio hacia el norte. Se observan concentraciones moderadas en Challapampita y bajas en Khala Kaja. En la parte norte de Khala Kaja, las concentraciones se incrementan nuevamente, lo que probablemente refleja gradientes hidroquímicas naturales.

### **Cd - Cadmio**

Existe una aparente pluma de aguas subterráneas contaminadas con cadmio alrededor de la mina San José. Dames & Moore Norge opina que las concentraciones en PPSJ-1, PPSJ-7 y DM-5 están directamente relacionadas a residuos mineros. Las concentraciones elevadas que se encuentran más hacia el este pueden derivarse de las mismas fuentes o, lo que es más probable, de infiltración de agua de mina contaminada proveniente del canal de drenaje, el alcantarillado o el río Tagarete.

Es difícil explicar la fuente de las concentraciones elevadas de cadmio en PPO-13 y PPO-15 sin tener que invocar algún grado de migración de aguas subterráneas contaminadas, posiblemente, por la infiltración de agua de mina del canal de drenaje o del río Tagarete. Sin embargo, se debe

notar, que las concentraciones en estos pozos (aproximadamente 1  $\mu\text{g/l}$ ) son más bien bajas, muy por debajo de los límites de agua potable de 5  $\mu\text{g/l}$ .

### **Ce - Cerio**

Se observaron concentraciones elevadas de cerio en PPSJ-1 y se puede observar una posible pluma que se extiende hacia PPSJ-7, DM-5 y DM-6. En PPSJ-10, PPO-14 y PPO-15 se obtienen concentraciones de base.

### **Cl - Cloruro**

En el área de PPO-13, DM-4, BP-111, PPO-14, DM-6 y PPO-15 se observa una zona con altos niveles de cloruro. Es muy probable que esto se deba en gran parte a causas naturales, aunque también pueden existir contribuciones de infiltración de agua de mina salina (del río Tagarete / canal de drenaje) o fugas de alcantarillado / lixiviado de los desechos.

Se puede observar una tendencia al decremento natural de las concentraciones de cloruro hacia el norte, a través de Challapampita, hasta Khala Kaja..

### **Co - Cobalto**

El cobalto esencialmente exhibe una distribución similar al cadmio y es probable que este relacionado en gran parte con las actividades mineras.

### **Cr - Cromo**

Se observa contaminación de cromo relacionada a actividades mineras en PPSJ-1, pero se atenúa rápidamente dado que las concentraciones de base se logran por PPSJ-7 y DM-5. También se observan concentraciones levemente elevadas en DM-6 y PPO15. Se desconoce si éstas implican contaminación relacionada a la mina (por ejemplo, infiltración del río Tagarete).

### **Cs - Cesio**

En PPSJ-1, se observan concentraciones elevadas, relacionadas a contaminación minera, pero éstas se atenúan rápidamente ya que en PPSJ-7 se obtienen concentraciones base. En PPSJ-10 se pueden atribuir las concentraciones levemente elevadas a la infiltración de agua de mina a través del canal de drenaje. Lo más probable es que las concentraciones de Aurora, BP-106 y PP-9 estén relacionados a las aguas naturalmente reductoras de esa área.

### **Cu - Cobre**

El cobre también muestra una distribución similar a la del cadmio, lo que indica que la contaminación de agua de mina podría haber alcanzado PPO-13 y PPO-15.

Es interesante que las concentraciones de DM-5 y PPSJ-7, aunque son algo elevadas con respecto a las de referencia, siguen siendo más bajas que aquéllas en PPSJ-10, DM-6, PPO-15 y PPO-13. Esto sugiere que la infiltración de agua de mina del río Tagarete y del canal de descarga, podría ser la fuente principal de contaminación en este último grupo de pozos.

### **Eu - Europio**

El europio difiere de los otros elementos de tierra raros por el hecho de que forma iones divalentes bajo condiciones reductoras (movilidad incrementada en condiciones reductoras - Banks et al. 1999). Se observan concentraciones elevadas en el área de aguas reductoras en Aurora, PPO-21, DM-1, PPO-22, SeLA-3, SeLA-4, lo que tiende a confirmar esta hipótesis.

También se observan concentraciones elevadas relacionadas a la mina en PPSJ-1.

### **Fe - Hierro**

A lo largo de las secciones PPSJ-1, PPSJ-7, DM-5/DM-6 se observan concentraciones de hierro elevadas pero de reducción regular. Esto probablemente representa atenuación del hierro derivado de actividades mineras al medio de aguas subterráneas. Las concentraciones elevadas de PPO-15, PPO-13 y PPSJ-10 pueden estar relacionadas a infiltración de agua de mina del canal de drenaje o del río Tagarete.

Las concentraciones elevadas en el área de Aurora están relacionadas con las condiciones reductoras en aguas subterráneas.

### **I - Yodo**

No se tiene una buena comprensión de la distribución de yodo. Las elevadas concentraciones de PPSJ-1 y PPSJ-7 pueden ser derivadas de la mina. Las concentraciones elevadas en PPO-13, PPSJ-10, DM-6 y PPO-15, a simple vista, pueden ser interpretadas como concentraciones naturales, relacionadas a la salinidad natural. Sin embargo, se observan bajas concentraciones de yodo sólo en PPO-14 y BP-111, con una salinidad de cloruro alta.

Las concentraciones de yodo en las aguas subterráneas más ricas en yodo también son más altas que en la muestra del canal de drenaje de agua de mina (aunque sólo por un pequeño margen). Por eso, la posible explicación para las concentraciones elevadas es la infiltración de agua de mina del canal de drenaje, aunque no es completamente convincente.

El yodo puede estar relacionado a la degradación de materiales orgánicos y por eso puede ser un indicador de infiltración de aguas negras del río Tagarete o de la red de alcantarillado de la ciudad.

## **K - Potasio**

El potasio muestra una distribución similar a la del cobre y del yodo, con una excepción. No se observaron concentraciones elevadas en PPSJ-1, lo que sugiere que K no es un contaminante primario proveniente de los residuos mineros. En PPSJ-7 y DM-5, se presentan concentraciones levemente elevadas, que posiblemente estén relacionadas a la descarga de K mediante meteorización de feldespato por el agua de mina ácida, a lo largo de una vía de flujo de aguas subterráneas.

Las concentraciones más elevadas se observan en PPO-13, PPSJ-10, DM-6 y PPO-15. Al igual que el yodo, estas concentraciones probablemente se derivan de la infiltración de agua de mina del canal (ver mapa en el Apéndice 4B). Además, el K es un buen indicador de contaminación por desechos orgánicos como aguas negras, y las elevadas concentraciones de estos cuatro pozos (y en la vertiente Rex) pueden indicar la existencia de fugas en el sistema de alcantarillado o infiltración de aguas negras contaminadas del río Tagarete.

## **La - Lantano**

Aparentemente el lantano se deriva únicamente del lixiviado de residuos mineros, como indican las altas concentraciones encontradas en PPSJ-1 y las concentraciones atenuadas gradiente abajo en PPSJ-7, DM-5 y DM-6. Los pozos como PPO-15, PPO-13, PPSJ-10 y PPO-14 no muestran concentraciones especialmente elevadas de La. Se cree que el La es más bien representativo de otros elementos térreos raros (REE - no trazados).

## **Li - Litio**

El litio exhibe una distribución compleja, similar a la del cobre o yodo. Las concentraciones más elevadas se presentan en PPO-13, PPSJ-10, DM-6, DM-4 y PPO-15. Es probable que la distribución sea el resultado de la interacción de varios factores: (i) distribución de salinidad natural (gradiente decreciente hacia el norte), (ii) infiltración de agua de mina; (iii) infiltración de aguas negras.

## **Mg - Magnesio**

El magnesio también muestra una distribución similar a la del cobre, yodo y litio. Inicialmente las concentraciones elevadas en PPSJ-1 son atenuadas gradiente abajo, hacia PPSJ-7 y DM-5. En PPO-13, PPSJ-10, DM-6, DM-4 y PPO-15 vuelven a encontrarse concentraciones más elevadas que pueden estar relacionadas a infiltración de agua de mina del río Tagarete o del canal de drenaje, o tal vez, a distribuciones salinas naturales.

## **Mn - Manganeso**

La distribución de Mn es similar a la de Fe y de Cu.

Esta contaminación es atenuada progresivamente hacia PPSJ-7 (donde la concentración ya está muy por debajo del límite de agua potable de 50  $\mu\text{g/l}$ ) hasta DM-5.

Sin embargo, se encontraron concentraciones algo elevadas en PPO-13, DM-2, PPSJ-10 y DM-6 las que pueden ser indicativas de infiltración de agua superficial contaminada o agua de mina del río Tagarete o del canal de drenaje.

Finalmente se encontraron concentraciones elevadas cerca de Aurora, las cuales no están relacionadas a actividades mineras. Probablemente no se deban a contaminación del asentamiento de Aurora (ya que el pozo BP-106 está gradiente arriba del asentamiento), sino que se deriven naturalmente y estén relacionadas a la hidroquímica anormal (reductora) de las aguas subterráneas.

### **Rb - Rubidio**

En el pozo PPSJ-1 existen concentraciones elevadas de rubidio, aunque éstas son atenuadas eficazmente gradiente abajo.

### **Sb - Antimonio**

En las aguas subterráneas sujetas a estudio se presentan concentraciones modestas de antimonio. Se observa una concentración elevada en PPSJ-1, pero ésta es atenuada rápidamente gradiente abajo, hacia PPSJ-7 y DM-5.

También se observaron concentraciones elevadas en la vertiente Rex, en DM-6 y PPO-13. La concentración más elevada se encuentra en BP-112, la cual no está relacionada a la mina San José, pero se desconoce su fuente.

### **Se - Selenio**

La distribución de selenio es similar a las de Cu, Fe y Cd, aunque se observaron bajas concentraciones en PPSJ-10. El Se se deriva por lo menos parcialmente de la contaminación minera y, posiblemente en parte, de la infiltración de agua superficial contaminada.

### **Si - Silicio**

El silicio disuelto no es considerado una toxina, pero es un indicador de meteorización de silicato bajo condiciones agresivas (por ejemplo, ácidas). Por esto, las concentraciones reflejan condiciones de pH y, como se esperaba, se observa que las concentraciones de Si tienden a declinar hacia el norte.

Las concentraciones elevadas de los pozos PPSJ-1, DM-5 y PPSJ-7 probablemente están relacionadas a contaminación de mina. Es posible que las concentraciones de PPSJ-10, DM-6 y PPO-15 también tengan un componente relacionado con actividades mineras. Dames & Moore

muestra poca evidencia de contaminación minera) a la salinidad de aguas subterráneas (complejización?). También se observan concentraciones elevadas en el área de Aurora.

### **Tl - Talio**

Este elemento altamente tóxico está presente en PPSJ-1, en una concentración que supera el límite (2 µg/l) de USEPA para agua potable. Se presume que se deriva del lixiviado de residuos mineros. Esta concentración es atenuada rápidamente gradiente abajo, hacia PPSJ-7 y DM-5. También se encuentran concentraciones elevadas en PPSJ-10, PPO-13, DM-2, DM-6 y PPO-15, donde puede que se esté produciendo infiltración de agua de mina o de agua superficial contaminada.

### **U - Uranio**

En PPSJ-1, PPSJ-10, PPO-15 y DM-6, existen concentraciones elevadas de uranio que pueden estar parcialmente relacionadas a infiltración de lixiviado de residuos mineros o agua de mina/agua superficial contaminada.

### **V - Vanadio**

El vanadio se encuentra en concentraciones elevadas en unos cuantos pozos al este de Oruro, específicamente PPSJ-1, DM-6 y la vertiente del Cine Rex. Estas concentraciones elevadas pueden estar relacionadas a contaminación minera.

### **Y - Itrio**

El itrio está parcialmente relacionado a la contaminación por lixiviado de residuos mineros (el valor más alto se encuentra en PPSJ-1). Se encuentran concentraciones elevadas en la mayoría de los otros pozos ubicados al este de San José, y en éstos el elemento puede derivarse de fuentes naturales (relacionados a la salinidad) o de infiltración de agua superficial contaminada.

### **Zn - Zinc**

La concentración más alta de zinc (32 mg/l) se registra en PPSJ-1, y es indicativa de contaminación por lixiviado de residuos mineros. Gradiente abajo (hasta PPSJ-7 y DM-5), esta concentración se atenúa rápidamente. Las concentraciones elevadas en DM-6 y PPSJ-10 pueden estar relacionadas a infiltración de agua superficial contaminada.

## **5.6.2 Comparación del Análisis con los Criterios Permisibles**

En esta sección, los resultados para cada parámetro son comparados con los máximos criterios permisibles establecidos en la legislación boliviana (Clase A para agua potable, Clase B para aguas de riego y los criterios del Anexo 2A para descargas superficiales a cuerpos de agua). En los casos donde la legislación boliviana no establece concentraciones máximas permisibles, se

Norge no tiene una explicación para las concentraciones anormalmente bajas presentes en PPO-14 y BP-111.

### **Sn - Estaño**

PPSJ-1 y la vertiente Rex muestran concentraciones elevadas que probablemente están relacionadas con la minería. Los otros pozos situados al este de Oruro (con dos excepciones) muestran concentraciones de base, lo que indica una atenuación eficaz.

Las dos excepciones son PPO-13 y PPO-15. Dado que PPSJ-10 y DM-6 no muestran concentraciones elevadas de Sn, es poco probable que las concentraciones presentes en PPO-13 y PPO-15 se deban a infiltración de agua de mina proveniente del canal de drenaje río Tagarete (ver Apéndice 4B).

### **SO<sub>4</sub> - Sulfato**

El sulfato también tendría que ser un buen indicador de contaminación de agua de mina (éste se genera por oxidación de sulfuro). Sin embargo, se debe tener en cuenta que puede existir sulfato en altas concentraciones en aguas naturalmente salinas.

En PPSJ-1, PPSJ-7, DM-5 y DM-6 se encuentran concentraciones elevadas de sulfato que casi con seguridad están relacionadas a lixiviado de residuos mineros o a infiltración de agua de mina. También existen concentraciones elevadas en PPO-13, PPSJ-10, PPO-14 y PPO-15, que pueden ser naturales (área de aguas subterráneas salinas) o derivarse de infiltración de agua superficial rico en sulfato (río Tagarete o canal de agua de mina).

Las concentraciones de sulfato disminuyen al norte, hacia Challapampita. En el área de Aurora se encuentran concentraciones muy bajas debido a la reducción de sulfato. Las concentraciones se elevan nuevamente hacia Khala Kaja, posiblemente debido al decrecimiento en las concentraciones de calcio y a una elevación del "techo" de saturación de yeso.

### **Sr - Estroncio**

En la sección PPSJ-1, PPSJ-7 y DM-5, se encuentran concentraciones algo elevadas de estroncio. Sin embargo, las concentraciones más altas se encuentran en DM-4, PPO-13, PPSJ-10, DM-6 y PPO-15, lo que indica que el Sr está relacionado a la salinidad natural de las aguas subterráneas o que su fuente es la infiltración de agua superficial contaminada.

### **Th - Torio**

El torio es típicamente insoluble en todo tipo de agua, excepto en las más ácidas. Está presente en las aguas de mina y lixiviado de residuos mineros en concentraciones elevadas (Informe 1). En PPSJ-1 se presenta una concentración elevada que es atenuada progresivamente hacia PPSJ-7 y DM-5. Las concentraciones más altas se encuentran en PPO-13, BP-111, PPO-14 y DM-6 y pueden estar relacionadas a infiltración de agua superficial contaminada o (dado que BP-111



aplicaron los criterios para agua potable de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). En la Sección 8.4 del Informe 2 de este mismo subproyecto, se detallan estas normas.

Se debe destacar que en Bolivia, las normas para aguas de riego son generalmente iguales o menos estrictas que las normas para agua potable. Por esta razón, los pozos que exceden las normas para riego también exceden las normas para agua potable.

Se debe señalar que, para todas las aguas analizadas, las concentraciones de mercurio y fluoruro estaban por debajo del límite de detección (típicamente 1 µg/l y 1 mg/l, respectivamente).

Asimismo, es necesario indicar que, aunque los resultados para nitrito-N se citan en los Apéndices 3A y B (todos están por debajo del límite de detección), no pueden ser muy confiables, ya que no se aplicaron técnicas de preservación apropiadas para nitrato en el campo. Como las concentraciones de nitrito analizadas fueron tan bajas, se puede considerar el parámetro  $N = NO_3^- - N + NO_2^- - N$  simplemente como una medida de nitrógeno de nitrato.

### 5.6.2.1 Pozos de Producción

Los pozos de producción que suministran agua a la ciudad de Oruro y su alrededores son operados por el Servicio Local de Acueductos (SeLA). En las Tablas 5.6 – 5.9, se presentan los resultados analíticos que sobrepasan los estándares bolivianos para los pozos de los cuales se tomaron muestras. A continuación se presentan los pozos de producción de los cuales se tomaron muestras de aguas subterráneas:

PP-7 PP-11 PP-12 PP-13 PP-14 PP-15 PP-17 SeLA-2 SeLA-3 PP-117 (también conocido como PP-107)

*Tabla 5.6: Parámetros detectados en concentraciones que exceden los estándares bolivianos en la muestra del Pozo de Producción SeLA-3*

Parámetro	Concentración	Estándar Boliviano / Agua Potable	Estándar Boliviano / Riego
Cloruro (mg/l)	404	250	300
Sodio (mg/l)	299	200	-

*Tabla 5.7: Parámetros detectados en concentraciones que exceden los estándares bolivianos en la muestra del Pozo de Producción SeLA-2*

Parámetro	Concentración	Estándar Boliviano / Agua Potable	Estándar Boliviano / Riego
Sodio (mg/l)	231	200	-

**Tabla 5.10** Resumen de los resultados analíticos que exceden los estándares bolivianos de las muestras del río Tagarete

Parámetro	Estándar Boliviano / Agua Potable	Estándar Boliviano / Riego	Concentración
Litio ( $\mu\text{g/l}$ )	-	2.500	7.270
Hierro ( $\mu\text{g/l}$ )	-	300	652
Manganeso ( $\mu\text{g/l}$ )	500	-	609
Cobre ( $\mu\text{g/l}$ )	50	-	65
Cadmio ( $\mu\text{g/l}$ )	-	5	11,9
Aluminio ( $\mu\text{g/l}$ )	200	-	326
Níquel ( $\mu\text{g/l}$ )	-	50	59
Zinc ( $\mu\text{g/l}$ )	-	200	203
Antimonio ( $\mu\text{g/l}$ )	-	10	21
Cloruro ( $\text{mg/l}$ )	-	300	2.630
Sulfato ( $\text{mg/l}$ )	-	400	670
Sodio ( $\text{mg/l}$ )	-	200	1.850

Además, las concentraciones de nitrato y amonio exceden los estándares bolivianos para agua potable y, en el caso del amonio, para aguas de riego. Estos parámetros son indicadores de contaminación por efluentes orgánicos (aguas negras, desechos).

*Contenido de Arsenio y Plomo en las aguas arriba*

Esta muestra fue recolectada del canal de agua de mina. El punto de muestreo está ubicado aproximadamente a 700 m aguas arriba del punto de descarga al río Tagarete, al norte del estadio de Oruro.

**Tabla 5.11** Resumen de los resultados analíticos que exceden los estándares bolivianos de la muestra 1 del canal de agua de mina.

Parámetro	Estándar Boliviano / Agua Potable	Estándar Boliviano / Riego	Concentración
Cromo ( $\mu\text{g/l}$ )	100	-	172
Hierro ( $\mu\text{g/l}$ )	1.000	-	986.000
Cadmio ( $\mu\text{g/l}$ )	500	-	1.270
Antimonio ( $\mu\text{g/l}$ )	1.000	-	1.280
Cobre ( $\mu\text{g/l}$ )	1.000	-	9.580
Zinc ( $\mu\text{g/l}$ )	3.000	-	37.800
Arsénico ( $\mu\text{g/l}$ )	1.000	-	14.300
Plomo ( $\mu\text{g/l}$ )	600	-	31.700

Parámetro	Estándar Boliviano / Agua Potable	Estándar Boliviano / Riego	Concentración
Níquel ( $\mu\text{g/l}$ )	-	50	848
Antimonio ( $\mu\text{g/l}$ )	-	10	964
Selenio ( $\mu\text{g/l}$ )	-	10	12
Cloruro ( $\text{mg/l}$ )	-	300	17.700
Sulfato ( $\text{mg/l}$ )	-	400	5.470
Sodio ( $\text{mg/l}$ )	-	200	11.395

El agua del canal también sobrepasa la concentración máxima permisible para talio de la US EPA ( $2 \mu\text{g/l}$ ) para agua potable, con una concentración medida de  $38.5 \mu\text{g/l}$ .

De acuerdo al análisis, las aguas de este canal actualmente constituyen una descarga polucionante de gran magnitud.

### 5.6.2.3 Vertiente del Cine Rex

Esta vertiente está ubicada en el sótano del Cine Rex, en el centro de la ciudad de Oruro. La muestra presenta contenidos de los siguientes elementos que exceden las concentraciones máximas permisibles para agua potable establecidas en la legislación boliviana:

Elemento	Contenido en la Muestra de la Vertiente	Concentración Máxima Permisible en Legislación Boliviana
Hierro	418 $\mu\text{g/l}$	300 $\mu\text{g/l}$
Cloruro	356 $\text{mg/l}$	250 $\text{mg/l}$
Sulfato	356 $\text{mg/l}$	300 $\text{mg/l}$
Sodio	258 $\text{mg/l}$	200 $\text{mg/l}$

Estos excedentes podrían ser solamente el resultado de factores hidroquímicos naturales. La vertiente también contiene  $0.18 \text{ mg/l}$  de  $\text{NH}_4^+$ , lo cual sobrepasa el estándar boliviano para agua potable y puede derivarse de fugas del alcantarillado.

### 5.6.2.4 Pozos de Observación Existentes

Dames & Moore Norge recolectó muestras de los pozos de observación investigación instalados para proyectos anteriores dentro del área de estudio. En total, se analizaron 85 parámetros en cada uno de los 36 pozos (Apéndice 3.A). Dieciséis de estos pozos mostraban evidencia de contaminación. Aquellos que tenían una marcación norte eran: PPSJ-10, PPO-14, PPO-13, BP-111, PPO-22, PPO-21, PPA-1, BP-106, PP-9, y PPO-11-10. Los pozos seleccionados que estaban más cerca a una marcación este, de la mina San José eran: PPSJ-1, PPSJ-7, PPO-16, y PPO-15.

Ion	unit	Bolivian Standard		PPSJ-10	PPO-14	PPO-13	BP-111	PPO-22	PPO-21	PPA-1	BP-106	PP-9	PPO-P1-10	PPSJ-1	PPSJ-7	PPO-16	PPO-15	BP-112	
		drinking	irrigation																
Ag	mg/l		50											455					
Al	mg/l		500											375k					
Be	mg/l		1											43					
Bo	mg/l	1000	1000	7080					3650	5300	1090	1020	1310		2790				3720
Ca	mg/l		300	677		554								1220	414		563		
Cd	mg/l		5											1890	130				
Cl	mg/l		300	7040	15.5k	20.5k	17.5k		389	998	1750			6550	1350	936	8730		
Co	mg/l		200											582					
Cu	mg/l	50	1000			126								9540					
Cr	mg/l	50												339					
Fe	mg/l		300	2780		2100		610	3770	21.3k				232k	23.1k		1690		
Li	mg/l		2500	10.1k		36.8k			2830	4650				7930			12.2k		
Mg	mg/l		100	438		485								397	120		370		
Mn	mg/l		1000			6710			1010					112k	6310		2910		
Na	mg/l		200	3790	10.6k	13.3k	12.4k	254	806	1307	233	232		2836	731	710	5580		
Ni14	mg/l			0.18	0.19	0.4		0.71	0.14	11.3		0.48				0.66	0.41	0.17	
Ni	mg/l		50			115								973	97		77		
Pb	mg/l		50							70				83					
Sb	mg/l																		83
Sc	mg/l		10			29								23			12	10.5	
SO4	mg/l		400	1380	1540	2400	2330							4045	855		1590		
TI	mg/l	2												4.6					
U	mg/l		20												25				
Zn	mg/l		200											31.7k	1950				

Table 5.13: Ions that exceed permissible standards in wells drilled by Dames & Moore Norge

Hydrogeological Study of the San José Mine and Aquifers that Supply Water to the City of Elmore

- Los pozos situados hacia el este de la mina San José, parecen estar contaminados por parámetros químicos relacionados a la minería. Los pozos impactados incluyen PPSJ-1, PPSJ-7, PPSJ-10, PPO13, PPO14, PPO15 y DM-6. En los siguientes pozos existen aguas subterráneas que pueden considerarse polucionadas por parámetros que posiblemente están relacionados con la minería: PPSJ-1, PPSJ-7, PPSJ-10, PPO13, PPO15, DM-5 y DM-6. No está claro si los parámetros presentes que hacen que el agua de PPO14 no sea apta para su uso se deriven naturalmente o se deben a la infiltración de agua de mina. La mayoría de los otros pozos del área de estudio tienen uno o más parámetros que sobrepasan las normas para agua potable. Se estima que por lo general, éstos son parámetros de salinidad derivados naturalmente como sodio, litio y boro. Un gran número de pozos también excede la poco exigente norma boliviana de agua potable para amonio, de 0,05 mg/l (como NH<sub>3</sub>). En este caso, el amonio puede ser un derivado natural o puede estar relacionado a la contaminación por aguas negras, ganado o letrinas.

Aparentemente, el impacto más significativo del lixiviado de los residuos mineros se encuentra en un área de 1 km desde la mina San José (pozos PPSJ-1, PPSJ-7 y DM-5). No se observa contaminación con elementos similares en las muestras recolectadas de pozos distantes de la mina (ver Apéndice 3).

La infiltración de agua de mina salina del canal de descarga o del río Tagarete ha impactado los pozos PPSJ-10, PPO-14, PPO-15 y DM-6.

Aparentemente, el pozo PPO13 también se encuentra impactado, lo cual es sorprendente ya que se encuentra al norte de la confluencia del canal de agua de mina y del río Tagarete. Una posible explicación es que la confluencia del río y el canal se encuentra muy cerca a la divisoria de aguas subterráneas que existe entre las aguas subterráneas que fluyen hacia el norte y las que fluyen hacia el sur, y sería factible pensar que la infiltración de agua de mina en este punto pueda fluir hacia el norte. Sin embargo, debido a que se estima que la napa freática es bastante plana, el tiempo disponible sería inadecuado para permitir la migración de agua contaminada del área de confluencia hacia PPO13. Otra posible explicación es la reversión del flujo hacia el norte, observada por Dames & Moore Norge durante el trabajo de campo realizado en diciembre de 1999.

Una complicación adicional en una interpretación es que la hidroquímica natural del área este de Oruro es salina, lo que hace difícil determinar si la aparente contaminación por algunos parámetros es natural o antropogénica (por ejemplo, cloruro en PPSJ-10 o PPO14). Aparentemente, existe una divisoria de aguas salinas correspondiente a la posición de la divisoria de aguas subterráneas proyectada (en las cercanías de PPO13, norte de San José).

Se entiende que algunos pozos están contaminados por una combinación de fuentes. El PPSJ-1, por ejemplo, está predominantemente contaminado por residuos mineros (a

través de los cuales está perforado): la existencia de una salinidad moderadamente alta indica que también podría estar afectado por infiltración del canal de agua de mina.

- Pareciera que la contaminación de aguas subterráneas directamente por lixiviado de los residuos mineros no se extiende por más de 1 km a partir de la fuente. Aparentemente los contaminantes de mina de esta fuente son más bien atenuados o retardados por el medio geológico.

La acción de bombear agua de mina al río Tagarete puede haber ocasionado una modificación en el sistema hidrogeológico, que permita que el agua contaminada infiltre al acuífero a mayores distancias de la fuente. Esta condición podría explicar la contaminación aparente de las aguas subterráneas a distancias de más de 3 a 4 km de la mina. Los pozos que existen entre San José y el canal del río tienden a indicar un decremento en las concentraciones de contaminantes, lo que sugiere que el medio geológico atenúa la contaminación *directa* proveniente de San José. Cerca al río, nuevamente se observan concentraciones elevadas de contaminantes (es decir, mayores a concentraciones que se encuentran en los pozos cercanos a San José). Esto es indicador de una fuente secundaria a saber, el río Tagarete y el canal de aguas de mina. Lo más probable es que esta *frente secundaria* sea responsable de la contaminación distal (hasta 3 a 4 km desde la mina) ya que produce una modificación en el circuito de los mecanismos de atenuación del medio geológico.

Para proteger las aguas subterráneas y superficiales, la prioridad debería ser retirar el agua bombeada de la mina, mediante el cese del bombeo o su tratamiento antes de la descarga.

---

## 6.0 PRUEBA DE BOMBEO DE LOS POZOS

Existen pocos datos sobre las características hidráulicas del complejo de acuíferos del Cuaternario alrededor Oruro. La mayoría de las determinaciones existentes proviene de las pruebas de bombeo de los campos de pozos de Challapampita (Khala Kaja) (desempeñadas en el Informe 2). Por este motivo, Dames & Moore Norge ha obtenido datos adicionales del acuífero mediante la realización de pruebas de bombeo en los siguientes pozos:

- Pozo de extracción PP-117 (también conocido como BP-107) en el aeropuerto de Oruro.
- Pozos de monitoreo durante el muestreo. En estos pozos se utilizaron técnicas básicas de bombeo y análisis, por lo tanto, se deberá tener menos confianza en estos valores que en los valores derivados de las pruebas de bombeo de los pozos de producción, debido a que éstas fueron realizadas a escala completa.

### 6.1 POZO DE PRODUCCION PP-117 DEL AEROPUERTO (TAMBIEN CONOCIDO COMO PPO-BP-107)

El pozo PP-117 es operado por SeLA para suministro de agua a las comunidades de Huajara y Santa Rosa (ver Sección 5.5 del Informe 2). El bombeo en este pozo es realizado, generalmente, durante aproximadamente 3 horas diarias (por la noche), para reabastecer de agua a las torres de almacenamiento correspondientes.

El 14 de octubre de 1999, se aprovechó la operación de la bomba en el pozo PP-117, desde el encendido, para realizar una prueba de bombeo que derivó valores de transmisividad y almacenamiento. El pozo fue bombeado a un volumen constante de 11 l/s (monitoreado por un flujómetro instalado en línea). Los niveles de agua fueron monitoreados principalmente en los pozos de observación 118Cd-1PO y 118Cd-1P, ubicados a 17 m al sur de PP-117 y 4.6 m al este de PP-117, respectivamente. Los datos de la prueba se presentan en la Tabla 6.1 - 6.4 y, en forma gráfica, en las Figuras 5.1-5.3.

Un análisis Jacob de la prueba de bombeo dio como resultado una transmisividad estimada de aproximadamente 670 m<sup>2</sup>/d, utilizando los datos de 118Cd-1PO, que son los más confiables (Figura 5.1, Tabla 6.5). Se debe notar la interrupción en la pendiente de abatimiento aproximadamente a 1.000 segundos, que posiblemente sea un indicador del efecto de barrera hidráulica encontrada ese momento.

Tabla 6.1 Datos no depurados de la prueba de bombeo del pozo de observación 118CD-1PO, 14/10/99.

Hora	Tiempo	Tope del pozo	Nivel de agua debajo del tope del pozo		Nivel de agua	Abatimiento
	s	m. agl	ft	m	m bgl	m
16:30:00	30	0.82	10.65	3.25	2.45	0.00
17:00:00	0	0.82	10.65	3.25	2.43	0.00
17:00:10	10	0.82	11.40	3.47	2.65	0.23
17:00:20	20	0.82	11.50	3.51	2.69	0.26
17:00:30	30	0.82	11.60	3.54	2.72	0.29
17:00:40	40	0.82	11.65	3.55	2.73	0.30
17:00:50	50	0.82	11.75	3.58	2.76	0.34
17:01:00	60	0.82	11.80	3.60	2.78	0.35
17:01:10	70	0.82	11.85	3.61	2.79	0.37
17:01:20	80	0.82	11.90	3.65	2.81	0.38
17:01:30	90	0.82	11.95	3.64	2.82	0.40
17:01:40	100	0.82	12.00	3.66	2.84	0.41
17:01:50	110	0.82	12.05	3.67	2.85	0.43
17:02:00	120	0.82	12.05	3.67	2.85	0.43
17:02:30	150	0.82	12.15	3.70	2.88	0.46
17:03:00	180	0.82	12.15	3.70	2.88	0.46
17:03:30	210	0.82	12.20	3.72	2.90	0.47
17:04:00	240	0.82	12.25	3.73	2.91	0.49
17:04:30	270	0.82	12.35	3.76	2.94	0.52
17:05:00	300	0.82	12.35	3.76	2.94	0.52
17:06:00	360	0.82	12.45	3.79	2.97	0.55
17:07:00	420	0.82	12.50	3.81	2.99	0.56
17:08:00	480	0.82	12.60	3.84	3.02	0.59
17:09:00	540	0.82	12.62	3.85	3.03	0.60
17:10:00	600	0.82	12.70	3.87	3.05	0.62
17:15:00	900	0.82	12.80	3.90	3.08	0.66
17:20:00	1.200	0.82	13.07	3.98	3.16	0.74
17:25:00	1.500	0.82	13.25	4.04	3.22	0.79
17:30:00	1.800	0.82	13.40	4.08	3.26	0.84
17:40:00	2.400	0.82	13.57	4.14	3.32	0.89
17:50:00	3.000	0.82	13.73	4.18	3.36	0.94
18:00:00	3.600	0.82	13.85	4.22	3.40	0.98

Nota: Pozo de producción PP-117 que bombea a  $Q = 11$  l/s. Distancia desde el pozo de producción,  $r = 17$  m. agl = encima del nivel del suelo, bgl = debajo del nivel del suelo. El tiempo está medido a partir del encendido de la bomba.



**Tabla 6.2 Datos no depurados de la prueba de bombeo del pozo de observación 118Cd-1P, 14/10/99**

Hora	Tiempo	Tope del pozo	Nivel de agua debajo del tope del pozo		Nivel de agua	Abatimiento
	s	m agl	ft	m	m bgl	m
17:00:00	0	0.31	9.25	2.82	2.51	0.00
17:12:00	720	0.31	12.25	3.73	3.42	0.91
17:17:00	1.020	0.31	12.40	3.78	3.47	0.96
17:22:00	1.320	0.31	12.65	3.85	3.54	1.03
17:27:00	1.620	0.31	12.75	3.89	3.58	1.07

*Nota:* Pozo de producción PP-117 que bombea a  $Q = 11$  l/s. Distancia desde el pozo de producción,  $r = 4.6$  m. Después de las 17:27.00 se secó el pozo. El tiempo está medido a partir del encendido de la bomba

**Tabla 6.3 Datos no depurados de la prueba de bombeo del pozo de observación PP-117, 14/10/99, que bombea a  $Q = 11$  l/s**

Hora	Tiempo	Tope del pozo	Nivel de agua debajo del tope del pozo		Nivel de agua	Abatimiento
	s	m agl	ft	m	m bgl	m
17:00:00	0	0.40		3.00	2.60	0.00
17:32:00	1.920	0.40	15.70	4.79	4.39	1.79
17:55:00	3.300	0.40	16.05	4.89	4.49	1.89

*Nota:* Radio del pozo de producción  $r = 0.15$  m. El tiempo está medido a partir del encendido de la bomba

**Tabla 6.4 Datos no depurados para el análisis Thiem (abatido en los tres pozos a 30 minutos y distancia del pozo de producción)**

Pozo	Distancia	30 min de abatimiento
	m	m
PP-117	0.15	1.79
118Cd-1P	4.60	1.03
118Cd-1PO	17.00	0.84

*Nota:* Para PP-117 esta distancia está establecida como el radio del pozo de producción

**Tabla 6.5 Análisis Jacob de los datos de bombeo (pozo bombeado - PP-117, pozos de observación = 118Cd-1PO y 118Cd-1P)**

Parámetro de la prueba de bombeo	118Cd-1P	118Cd-1PO
Q	11 l/s = 950 m <sup>3</sup> /d	11 l/s = 950 m <sup>3</sup> /d
RWL m bgl	2.51 m (2.82 m bwt)	2.43 m bgl (3.25 m bwt)
r = distancia (m)	4.6 m	17 m

Parámetro de la prueba de bombeo	118Cd-1P	118Cd-1PO
Delta s (abatimiento por ciclo de registro)	0.466 m	0.259 m
$T = 2.303 Q / (4 \pi \cdot \text{pi} \cdot \text{delta s})$	370 m <sup>2</sup> /d	670 m <sup>2</sup> /d
$t_0$	8.28 s	2.70 s
$S = 2.25 \cdot T \cdot t_0 \cdot r^2$	$3.8 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-4}$
tal que $u \leq 0.05$	30 s	94 s

*Nota: En todos los casos,  $u \leq 0.05$  y el análisis es válido. bwt = debajo del tope del pozo,  $t_0$  = debajo del nivel del suelo.*

También se construyó un plot Thiem (abatimiento versus distancia de registro geológico) para  $t = 30$  minutos (Figura 5.5), donde el tercer punto es proporcionado por el abatimiento del pozo de producción ( $r = 0.15$  m). Este método dio un ploteo de línea recta de gradiente 0.4642 m, correspondiente a una transmisividad de 750 m<sup>2</sup>/d.

## 6.2 POZOS DE OBSERVACION

Se observaron los niveles de agua durante y/o después del bombeo en conexión con el muestreo de aguas subterráneas.

Se analizaron los resultados mediante dos métodos:

- el método Jacob (Cooper & Jacob 1946). La aplicabilidad de este método no es ideal para las aguas subterráneas de los pozos muestreados, debido a las bajas tasas de bombeo (relativas al volumen del pozo) y a los cortos periodos de bombeo (40 min.);
- el método descrito por Banks (1992), donde se resume la proporción entre la capacidad específica (C) y la transmisividad (T) mencionadas por varios autores (Larson et al.) y se recomienda un coeficiente proporcional de 0.9.

$$T = C/0.9 = \text{Tasa de flujo (Q)} / (\text{Abatimiento (s)} * 0.9) = Q/0.9 \cdot s$$

Este método no está absolutamente refinado, pero es apropiado para las condiciones no sofisticadas bajo las cuales se realizaron las pruebas de bombeo.

Los datos y análisis de la prueba de bombeo se presentan en el Apéndice 2.

Ambos métodos dan un valor de transmisividad aparente. Probablemente estos valores no sean representativos de la verdadera transmisividad total del acuífero en cuestión, ya que (1) solo se bombearon pequeñas cantidades de agua, sin forzar al acuífero en gran medida y (2) muchas veces los pozos estaban penetrando solamente de manera parcial. Por lo tanto, se decidió que es más apropiado considerar la transmisividad aparente derivada, como una aproximación representativa del espesor del acuífero correspondiente a la longitud del filtro del pozo. Por eso, se puede derivar un estimado de la conductividad hidráulica dividiendo la transmisividad entre la longitud total del filtro en el pozo. En la Tabla 6.6 se presentan los resultados de estos cálculos.

### 6.3 CONCLUSIONES

Los datos derivados de la prueba de bombeo del pozo de producción (PP-117) del aeropuerto son de alta calidad. Un análisis Jacob de los resultados dio un valor de transmisividad de  $0.70 \text{ m}^2/\text{d}$  y un coeficiente de almacenamiento de  $1.6 \times 10^{-2}$ . Un análisis Thiem de la prueba de bombeo dio un transmisividad de  $750 \text{ m}^2/\text{d}$ .

Las pruebas de bombeo a pequeña escala realizadas en los pozos de monitoreo durante el muestreo de aguas subterráneas, típicamente dieron valores de conductividad hidráulica en el rango de 1 -  $20 \text{ m/d}$ .

*Tabla 6.7. Valores de transmisividad y conductividad hidráulica a partir de las pruebas de bombeo de los pozos de aguas subterráneas muestreados*

Nombre de Pozo	Transmisividad	Transmisividad	Largo del filtro	Conductividad	Conductividad
	[ $\text{m}^2/\text{d}$ ]	[ $\text{m}^2/\text{d}$ ]		[ $\text{m/d}$ ]	[ $\text{m/d}$ ]
Método	Jacob	Banks (1992)		Jacob	Banks (1992)
DM-1	2	22	5	4.0	9.4
DM-2	6 (abatimiento) 7 (recuperación)	8	5	1.4-2.0	3.0
DM-4	14 (abatimiento) 26 (recuperación)	42	5	2.8-5.2	8.4
DM-5	no analizable	76	4	no analizable	20
DM-6	19 (abatimiento) 20 (recuperación)	87	5	3.8-4.0	6.2
PPSJ-1	2	7.2	14.9	0.12	0.48
PPSJ-7	no analizable	125	9.6	no analizable	13
PPSJ-10	38	58	18.4	2.1	4.2
PP-9	42	115	27	1.6	1.3
PP-10	155	187	27	5.7	6.8
PPO-13	45	62	10	4.5	6.2
PPO-14	34	50	8	4.3	6.3
PPO-15	54	81	8	6.8	10
PPO-16	55	61	16	3.4	2.8
PPO-22	8	21	10	0.80	2.1
Aurora**	15	44	20	0.75	2.2
BP-111***	4	17	13.3	0.30	1.3
PI-10****	107	56	13.3	8.0	12

\* Se suman dos filtros para obtener un total

\*\* El largo del filtro es supuesto

\*\*\* Se asume que el largo del filtro es el promedio de PPO-14 y PPSJ-10

\*\*\*\* Se asume que el largo del filtro es el mismo que para BP-111

*Nota. No se han ubicado detalles de la construcción de los pozos Aurora BP-111 y PPO-PI-10. Por lo tanto, se asumió el largo de los filtros de los pozos, en base a los pozos de producción y de observación, situados en la cercanía.*

REIMANN, C., SIEWERS, U., SKARPHAGEN, H. & BANKS, D. (1999b). Do bottle type and acid washing influence trace element analyses by ICP-MS on water samples ? - A test covering 62 elements and four bottle types (high density polyethene (HDPE), polypropene (PP), fluorinated ethene propene copolymer (FEP) and perfluoralkoxy polymer (PFA)). *The Science of the Total Environment*, **239**, 111-130.

SCIDE - CORDEOR (1979 ?) Abastecimiento de agua para Oruro: Geofísica. SCIDE - CORDEOR report III-0120.

SGAB (1996a). Proyecto Piloto Oruro: Impacto de polucionantes mineros e industriales en aguas subterráneas. Swedish Geological AB Report R-Bo-E-9,45-9702-PPO9616. Diciembre 1996.

SORUCO R., W. (1999). Estudio geoelectrico en al área de Challapampa-Oruro. Sergeomin. Departamento de Hidrogeología. Cochabamba, Octubre 1999. 13 pp. - anexos.

UNDP-GEOBOL (1973). *Los recursos de agua del Altiplano Norte y del área de Oruro*. United Nations Development Program / Geological Survey of Bolivia. 215 pp. plus 46 anexos.

## FIGURAS

8023000 N

8022000 N

8021000 N

8020000 N

8019000 N

8018000 N

8017000 N

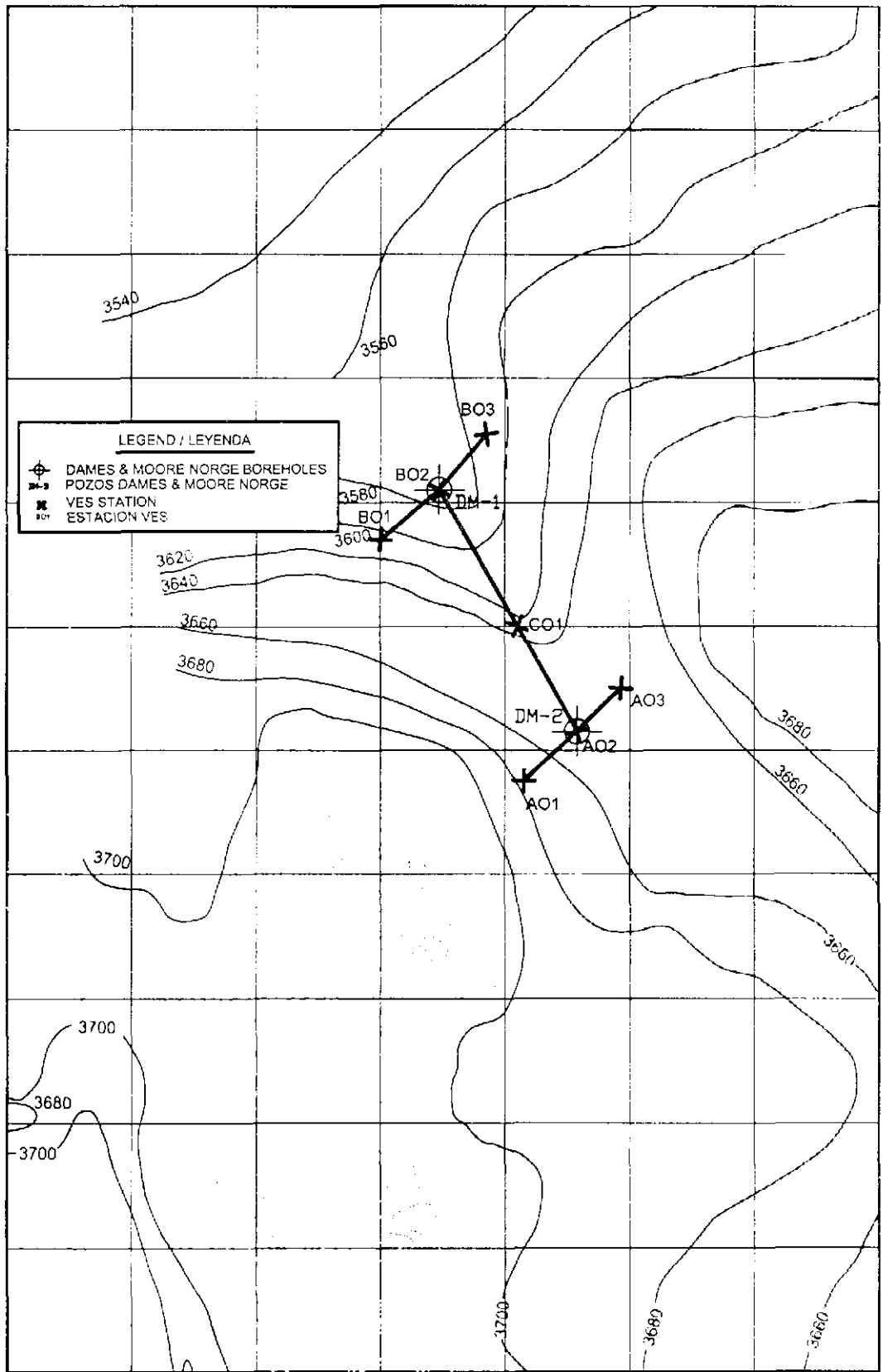
8016000 N

8015000 N

8014000 N

8013000 N

8012000 N



696000 E 697000 E 698000 E 699000 E 700000 E 701000 E 702000 E 703000 E

SUBPROJECT / SUBPROYECTO 7  
 REPORT / INFORME 3  
 HYDROGEOLOGICAL STUDY OF THE SAN JOSE MINE AND  
 ADJACENT AQUIFERS SUPPLYING WATER  
 TO THE CITY OF DURANGO  
 ESTUDIO HIDROGEOLOGICO DE LA MINA SAN JOSE Y  
 ACUIFEROS QUE SUMINISTRAN AGUA A LA CIUDAD DE DURANGO

TOP OF BEDROCK MAP BASED ON BORINGS  
 OF VES LINES AND DAMES & MOORE BOREHOLES  
 MAPA DE SUPERFICIE DE ROCA BASADO EN  
 POZOS, LINEAS VES Y POZOS DAMES & MOORE.

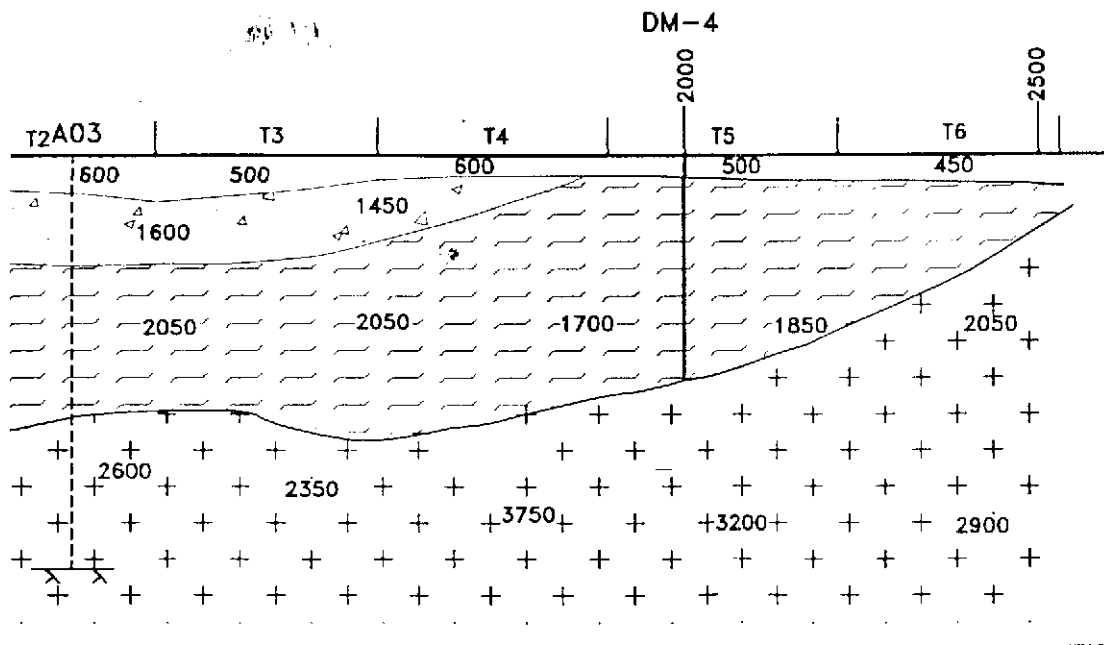


DAMES & MOORE NORGE

FIGURE / FIGURA 2.2

# INTERPRETATION

## LINE G-1

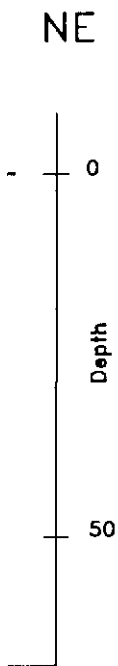


SUBPROYECTO 2 REPORT / INFORME 3  
 SE ANDALZUE EN LOS ACUÍFEROS SUPLENDO WATER TO THE CITY OF ORURO  
 DE ACUÍFEROS EN LOS COTOPACHIS QUE ABASTECEN AGUA A LA CIUDAD DE ORURO

LEGEND / LEYENDA

HORIZONTAL SCALE 1 : 10.000

VERTICAL SCALE 1 : 1.000



- 1000 DISTANCE /  
DISTANCIA
- T-2 GEOPHONE SPREADING (SEISMIC)  
LINEA DE GEOFONOS (SISMICA)
- 3000 COMPRESSIONAL SEISMIC  
VELOCITY m/seg. /  
VELOCIDAD SISMICA DE ONDA  
COMPRESIONAL m/seg.
- [ ] UNSATURATED SEDIMENTS /  
SEDIMENTOS NO SATURADOS
- [ ] SATURATED SEDIMENTS  
(SAND + CLAY LAYERS)  
SEDIMENTOS SATURADOS  
(ARENA + CAPA DE ARCILLA)
- [ ] COMPACT SEDIMENTS  
AND/OR FRACTURED ROCK /  
SEDIMENTOS COMPACTOS  
Y/O ROCA FRACTURADA
- [ + ] BEDROCK /  
BASAMENTO ROCOSO
- DM-2 DRILL HOLE / POZO PERFORADO
- A02 VES-STATION
- [ ] VES-INTERPRETATION

SEISMIC PROFILE G1

PERFIL SISMICO G1



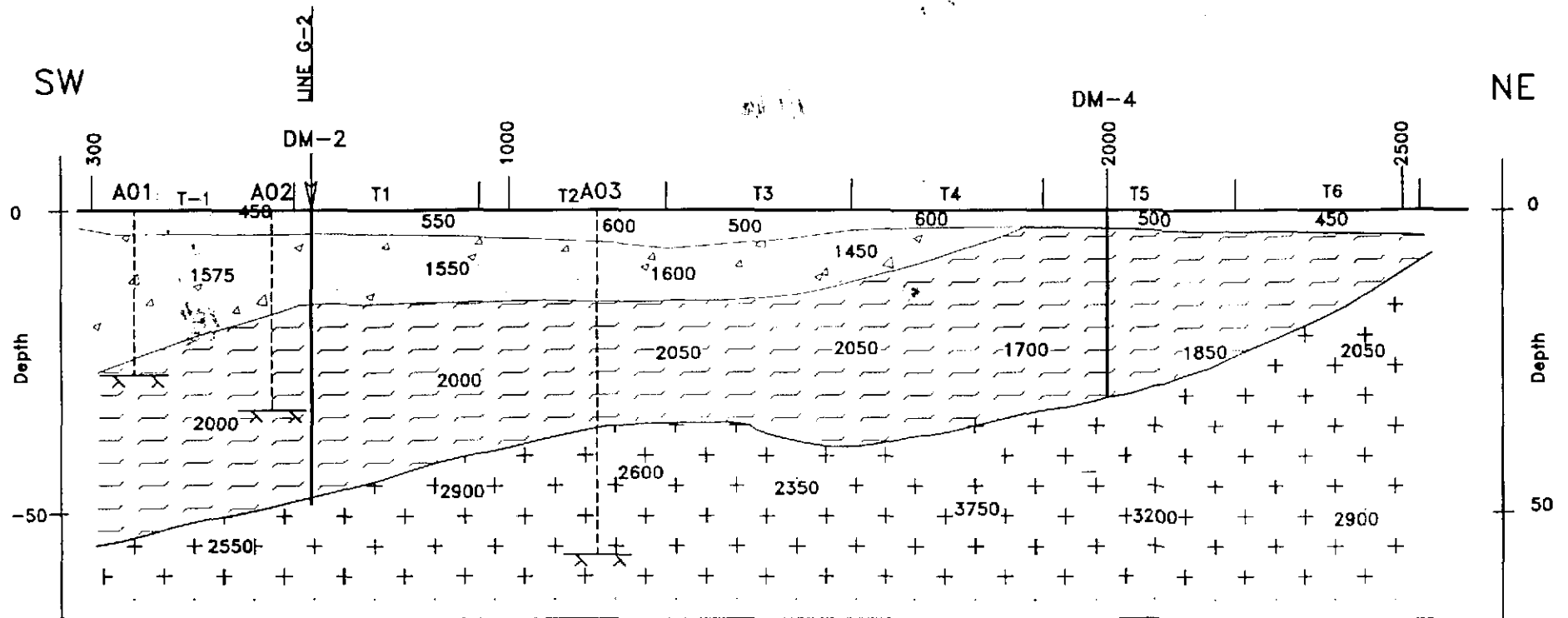
DAMES & MOORE NORGE

FIGURE / FIGURA 2.3

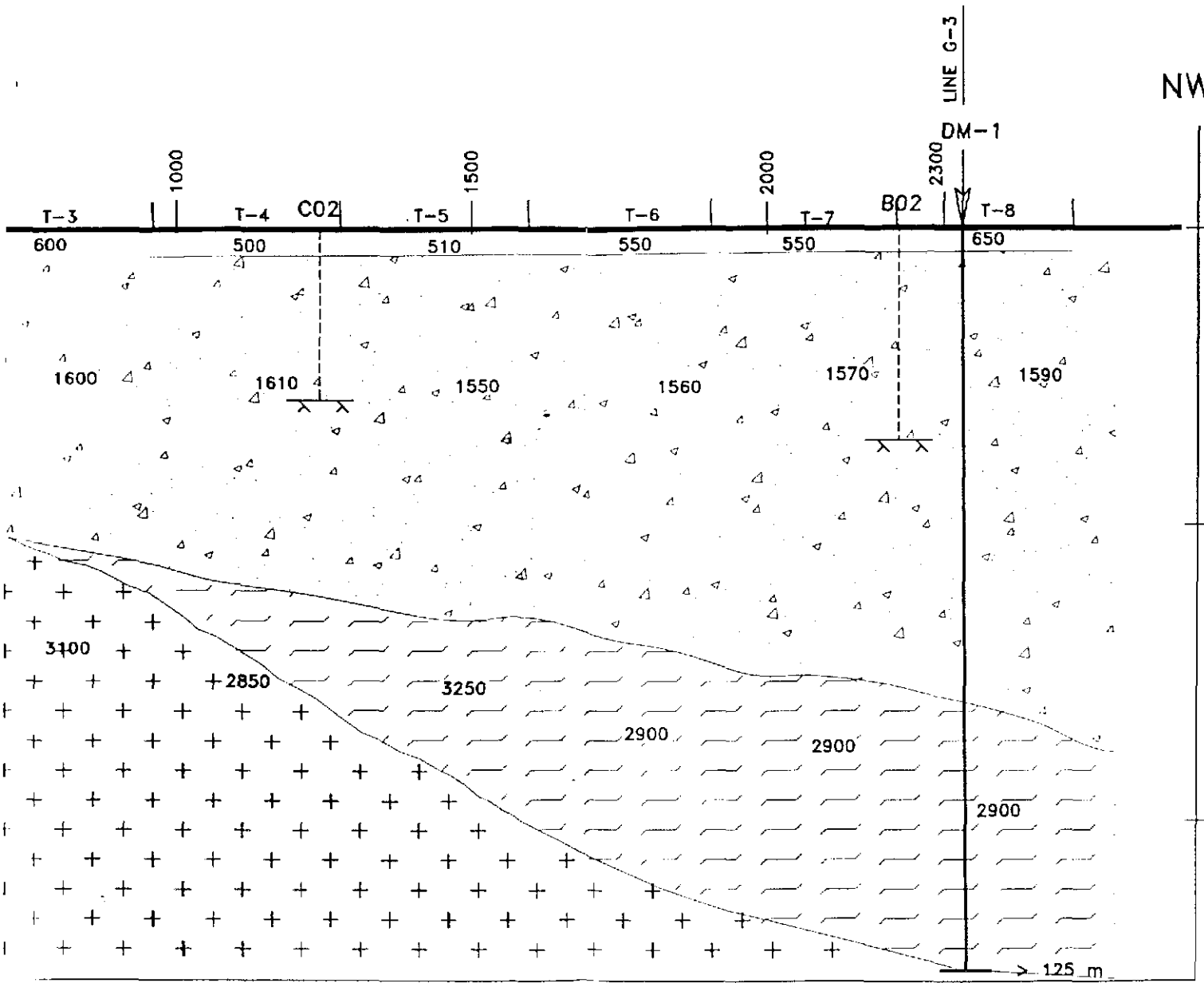


# INTERPRETATION

## LINE G-1



# LINE G-2

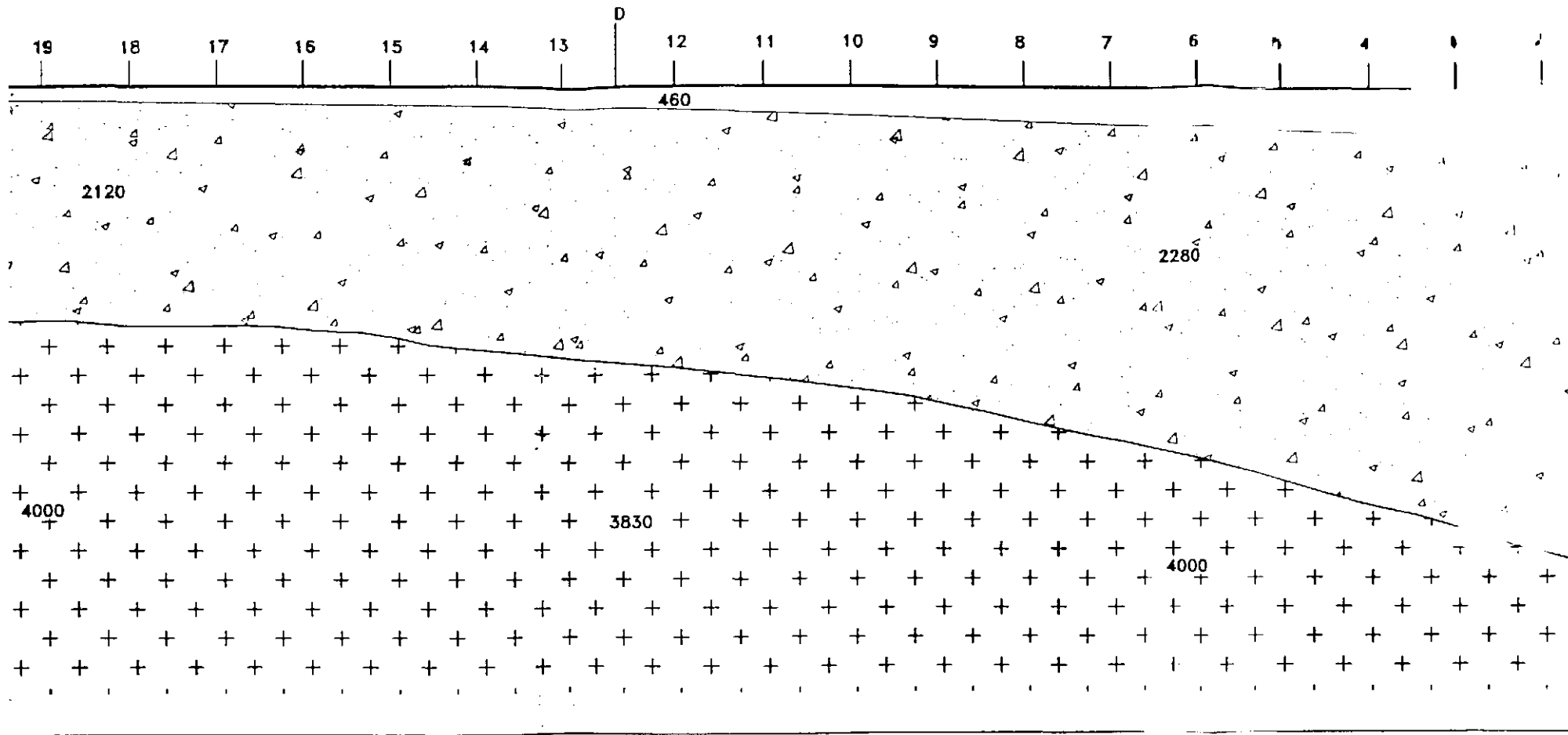


NW

## LEGEND / LEYENDA

HORIZONTAL SCALE 1 : 10.000  
 VERTICAL SCALE 1 : 1.000

- 1000 DISTANCE / DISTANCIA
- T-2 GEOPHONE SPREADING (SEISMIC) / LINEA DE GEOFONOS (SISMICA)
- 3000 COMPRESSONAL SEISMIC VELOCITY m/seg. / VELOCIDAD SISMICA DE ONDA COMPRESIONAL m/seg.
- UNSATURATED SEDIMENTS / SEDIMENTOS NO SATURADOS
- SATURATED SEDIMENTS (SAND + CLAY LAYER) / SEDIMENTOS SATURADOS (ARENA + CAPA DE ARCILLA)
- COMPACT SEDIMENTS AND/OR FRACTURED ROCK / SEDIMENTOS COMPACTOS Y/O ROCA FRACTURADA
- BEDROCK / BASAMENTO ROCOSO
- DM-2 DRILL HOLE / POZO PERFORADO
- A02 VES-STATION
- VES-INTERPRETATION



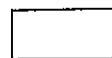
LEYENDA



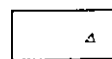
24 LOCATION OF GEOPHONE/  
UBICACION DE GEOFONO

3000

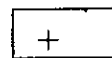
COMPRESIONAL SEISMIC  
VELOCITY m/seg. /  
VELOCIDAD SISMICA DE ONDA  
COMPRESIONAL m/seg.



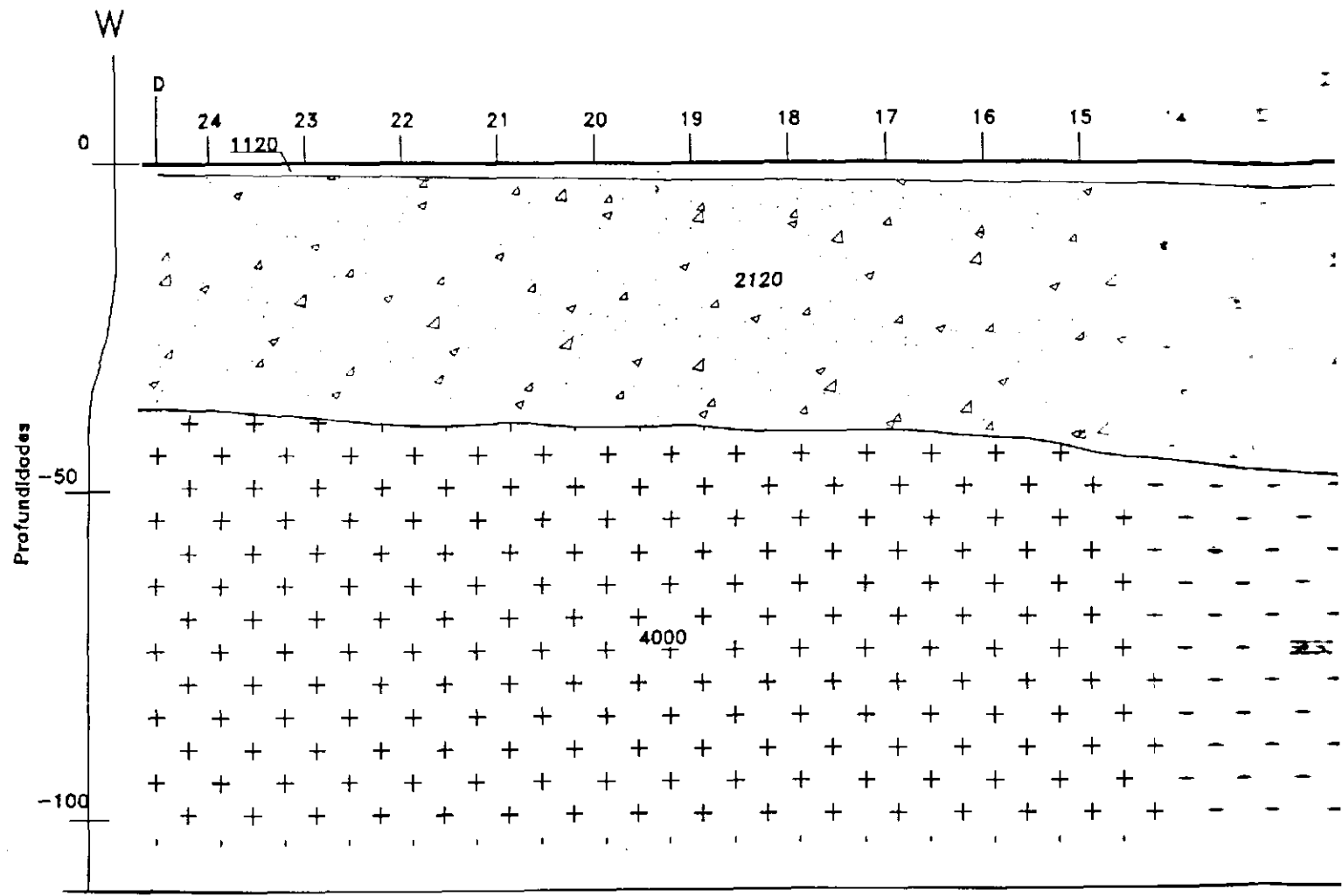
LOOSE SEDIMENTS /  
SEDIMENTOS SUELTOS



SATURATED SEDIMENTS (SAND GRAVEL) /  
SEDIMENTOS SATURADOS (ARENAS GRAVAS)



BEDROCK /  
BASAMENTO ROCOSO

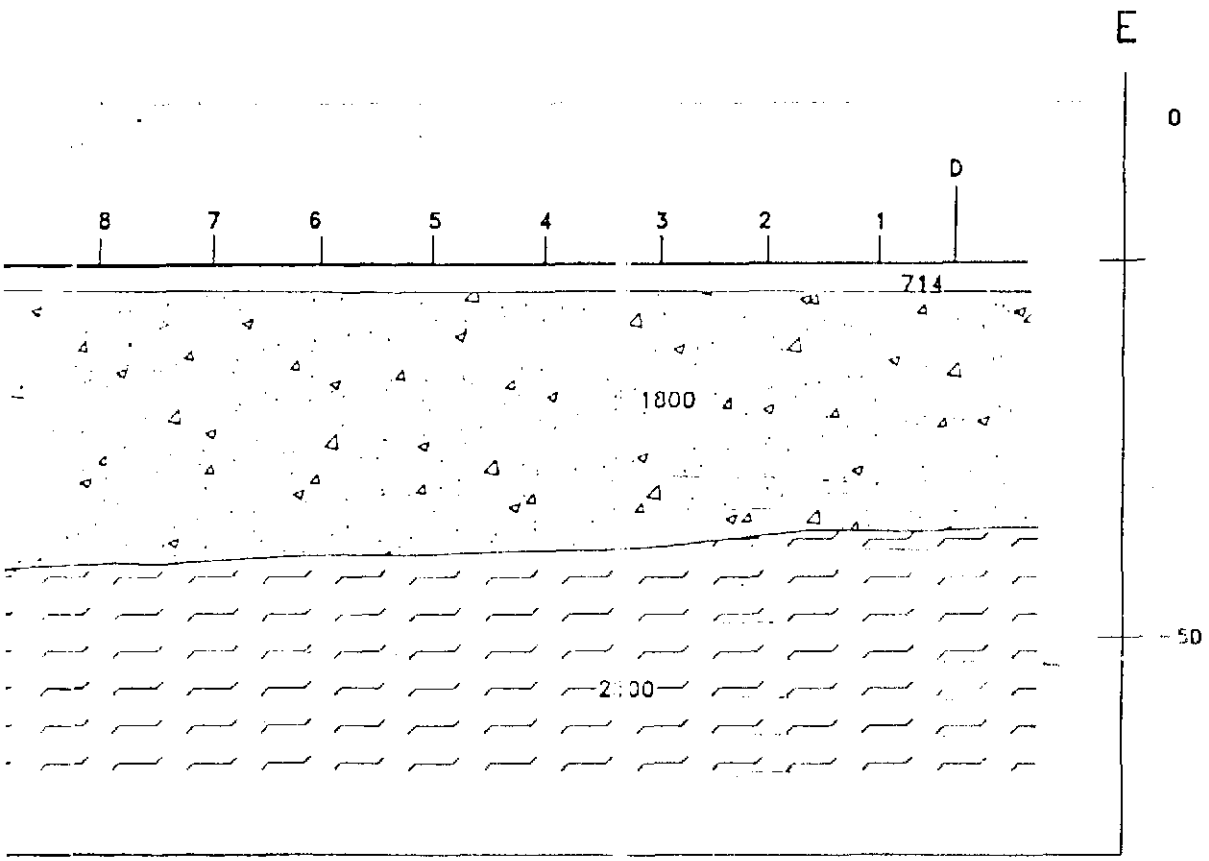


LEYEND

- 24      LOCATION OF GEOPHONE/  
         UBICACION DE GEOFONO
- 3000    COMPRESSONAL SEISMIC  
         VELOCITY m/seg. /  
         VELOCIDAD SISMICA DE ONDA  
         COMPRESIONAL m)seg.

SUBPROJECT / SUBPROYECTO 7 REPORT / INFORME 3

HYDROGEOLOGICAL STUDY OF THE SAN JOSÉ MINE AND ADJACENT AQUIFERS SUPPLYING WATER TO THE CITY OF CR.  
ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA MINA SAN JOSE Y LOS AQUIFEROS ADYACENTES QUE ABASTECEN AGUA A LA CIUDAD DE



SEISMIC PROFILE G6  
 PERFIL SISMICO G6



DAMES & MOORE NORGE

FIGURE / FIGURA 3.3

2190

2500

LOOSE SEDIMENTS /  
SEDIMENTOS SUELTOS

SATURATED SEDIMENTS (SAND+GRAVEL) /  
SEDIMENTOS SATURADOS (ARENAS+GRAVAS)

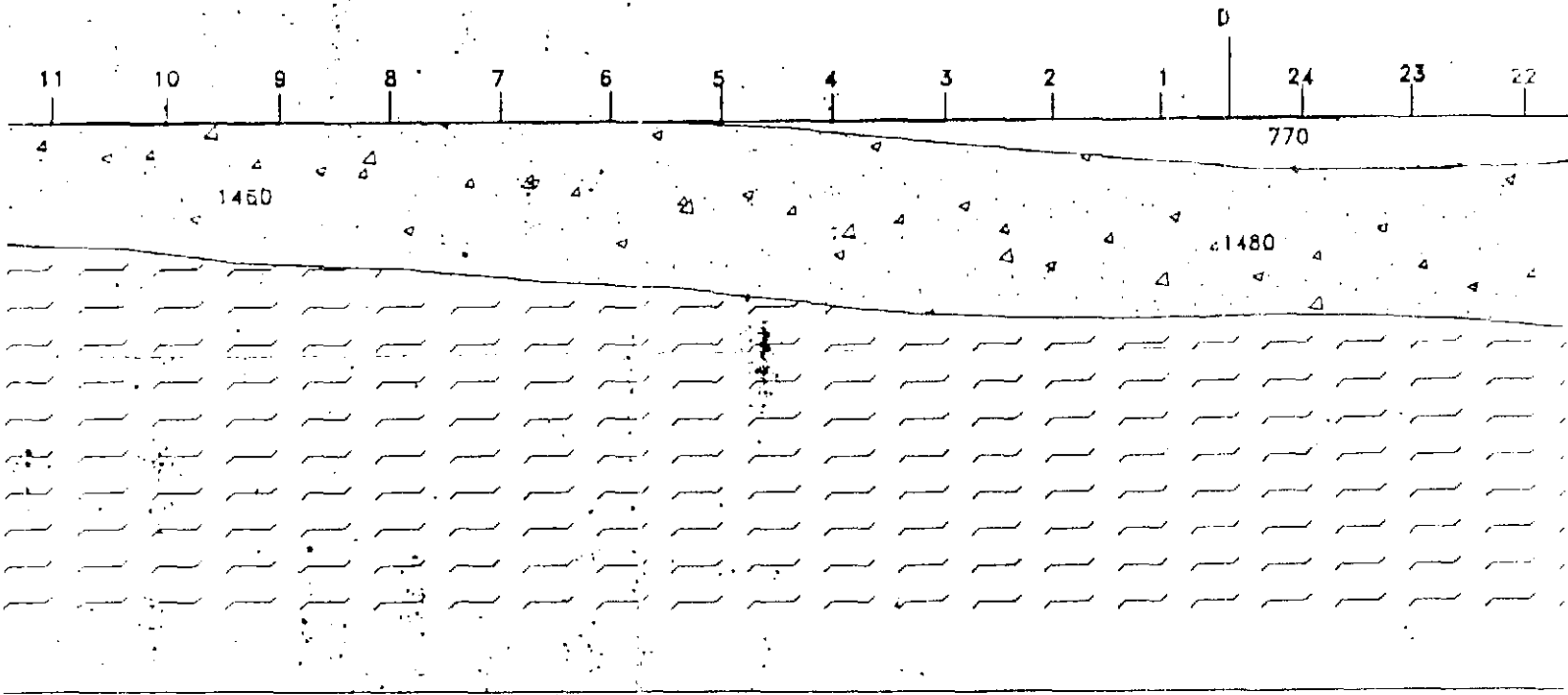
IMPACT AND DRY SEDIMENTS AND/OR FRACTURATED ROCK  
SEDIMENTOS COMPACTOS Y SECOS Y/O ROCA FRACTURADA

SUBPROJECT / SUBPROYECTO 7 REPORT / INFORME 3

GEOLOGICAL STUDY OF THE SAN JOSÉ MINE AND ADJACENT AQUIFERS SUPPLYING WATER TO THE CITY OF ORURO  
ESTUDIO GEOLOGICO DE LA MINA SAN JOSE Y LOS AQUIFEROS ADYACENTES QUE ABASTECEN AGUA A LA CIUDAD DE ORURO

# LINEA G-6

(ESCALA 1 : 1.000)



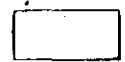
## LEYENDA



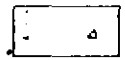
24 LOCATION OF GEOPHONE/  
UBICACION DE GEOFONO

3000

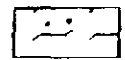
COMPRESSIONAL SEISMIC  
VELOCITY m/seg. /  
VELOCIDAD SISMICA DE ONDA  
COMPRESIONAL m/seg.



LOOSE  
SEDIMEN



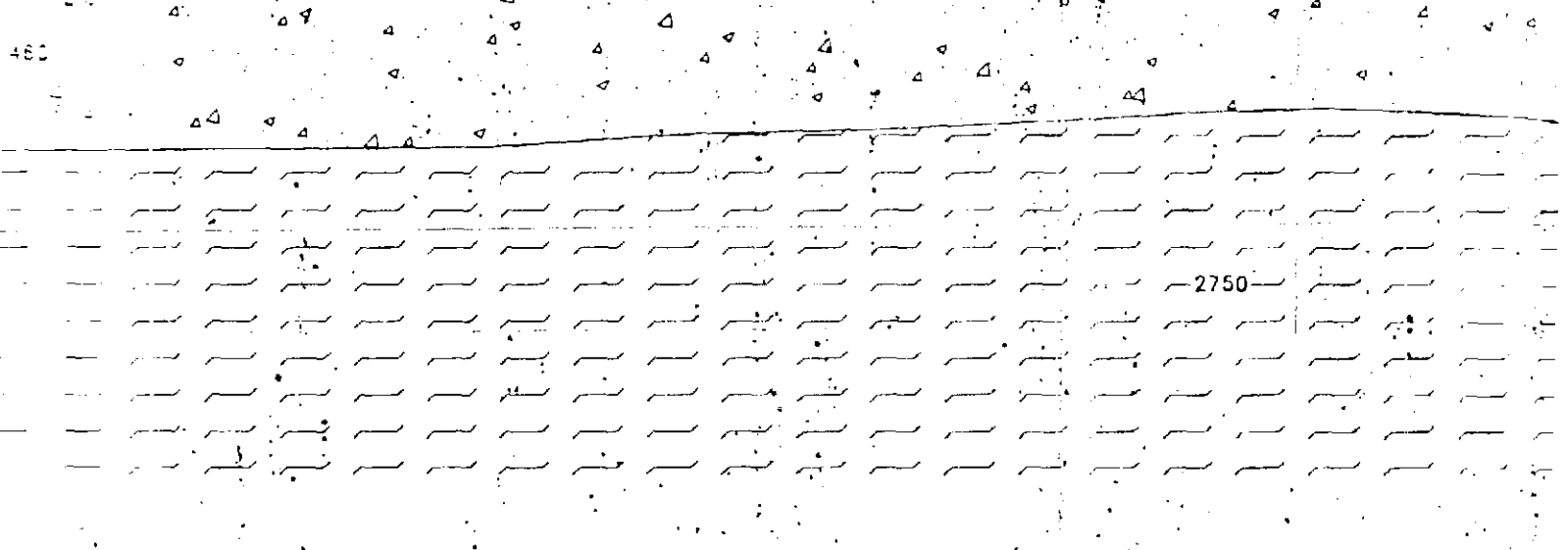
SATURAT  
SEDIMEN



COMPAC  
SEDIMEN

HYDROGEOLO  
ESTUDIO HIDROGI

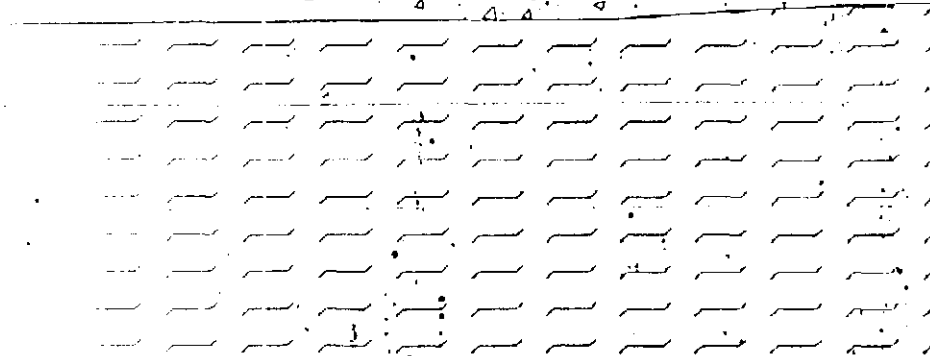
33 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 0 12 11 10



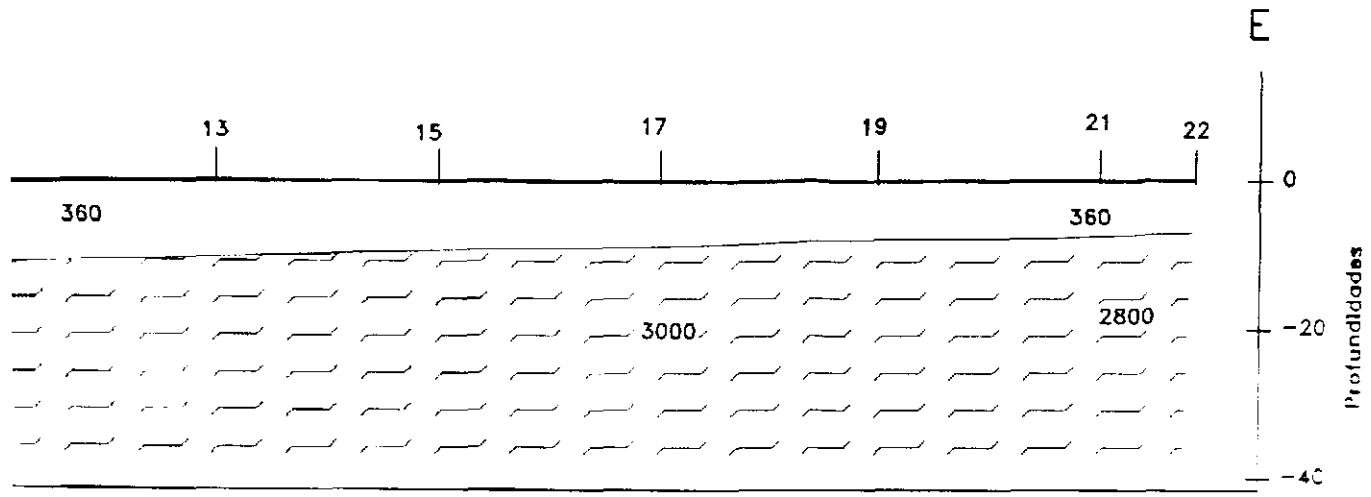


23 22 21 20 19 18 17

1460



-7  
00)



- LOOSE SEDIMENTS /  
SEDIMENTOS SUELTOS
- COMPACT AND DRY SEDIMENTS  
AND/OR FRACTURATED ROCK /  
SEDIMENTOS COMPACTOS Y SECOS  
Y/O ROCA FRACTURADA

SEISMIC PROFILE G7  
PERFIL SISMICO G7

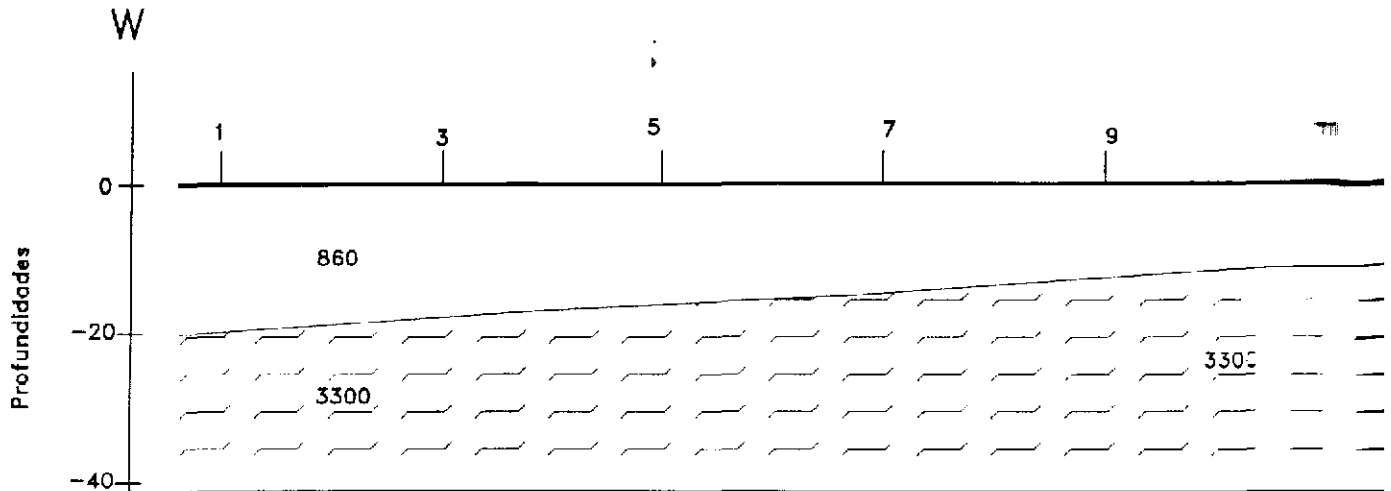


DAMES & MOORE NORGE

FIGURE / FIGURA 2.9

LINEA

(ESCALA =



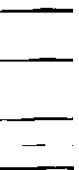
LEYENDA



24 LOCATION OF GEOPHONE/  
UBICACION DE GEOFONO

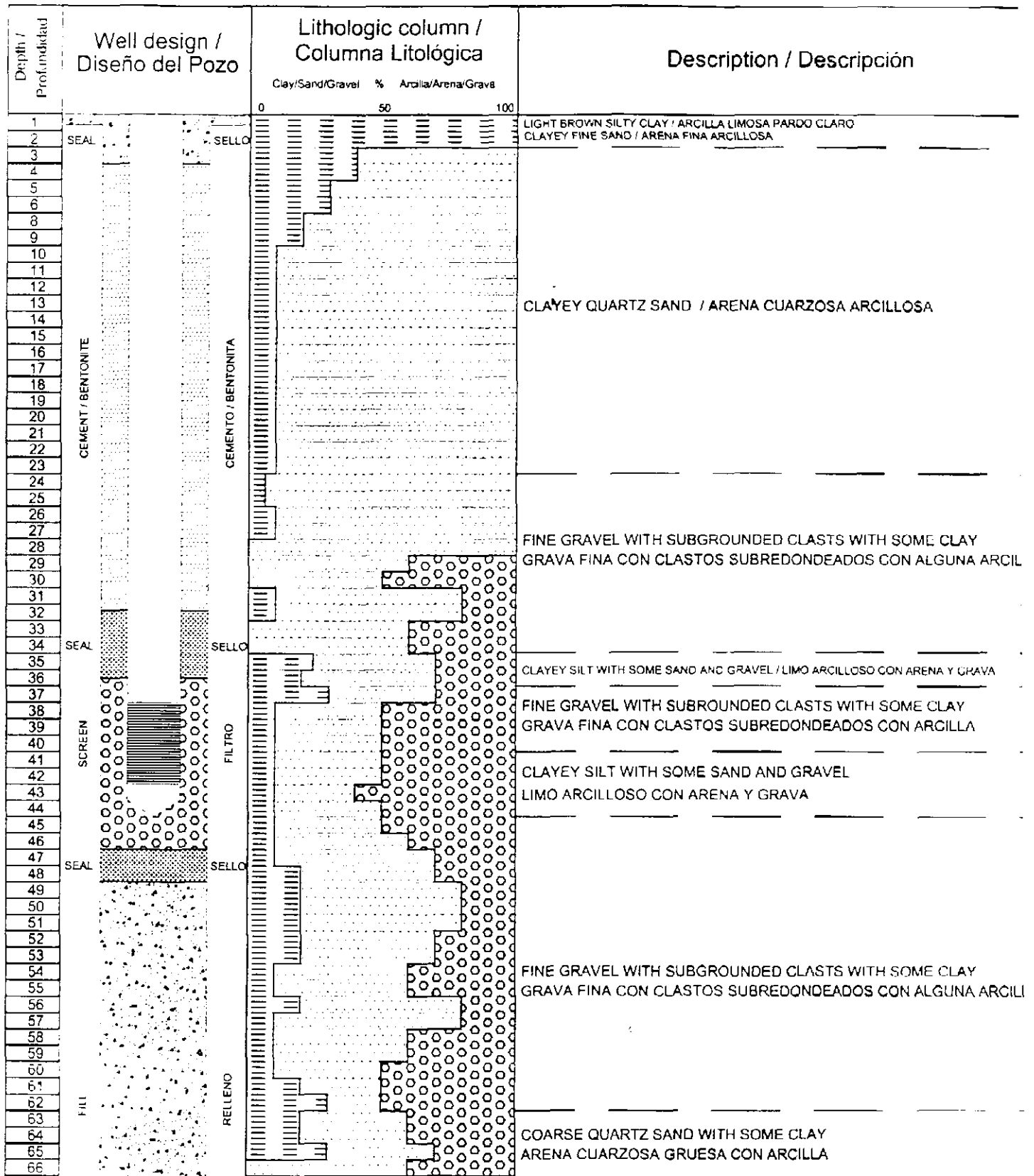
3000

COMPRESSIONAL SEISMIC  
VELOCITY m/seg. /  
VELOCIDAD SISMICA DE ONDA  
COMPRESIONAL m/seg.



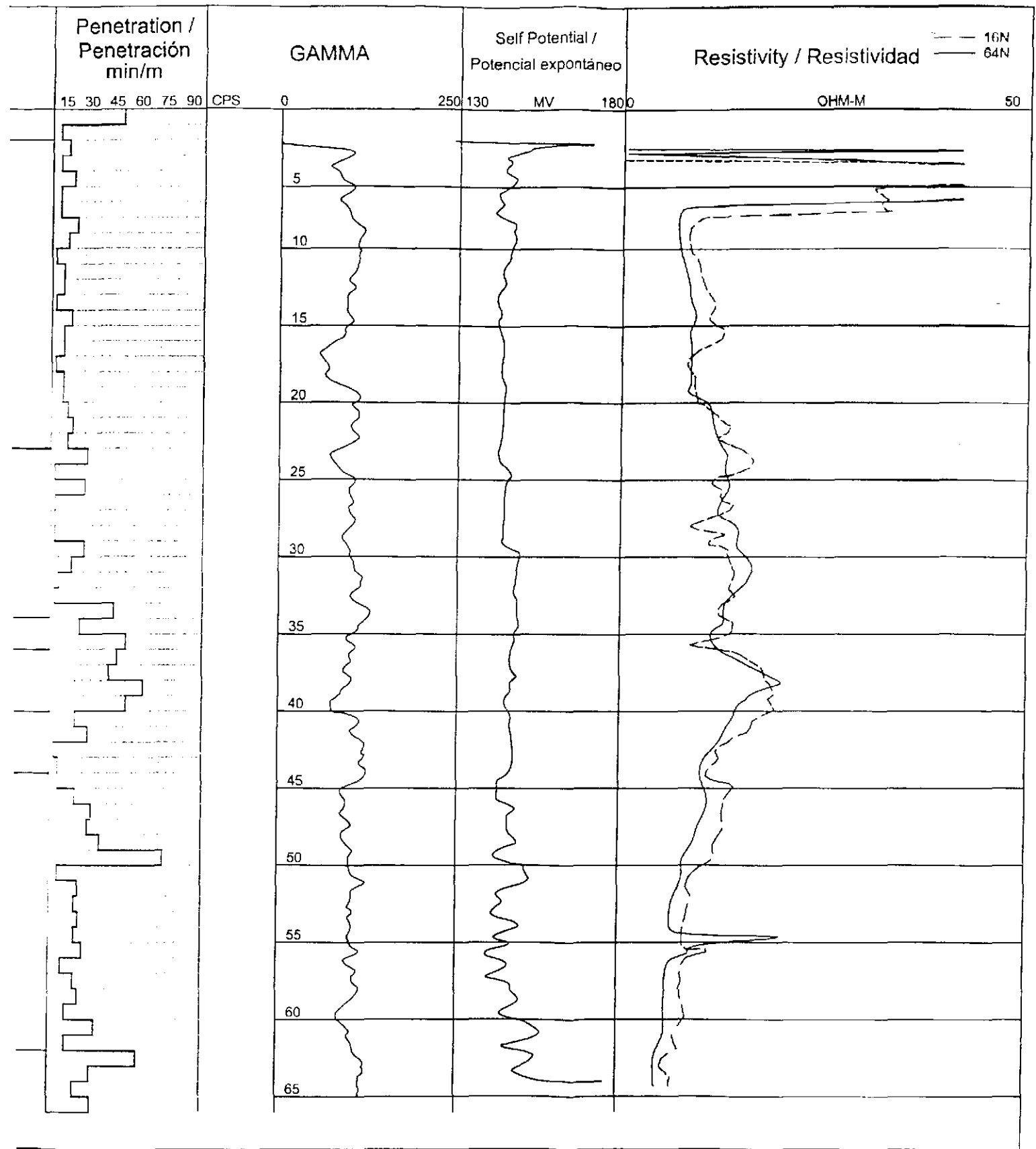
SUBPROJECT / SUBPROYECTO 7 REPORT / INFORME 3

HYDROGEOLOGICAL STUDY OF THE SAN JOSÉ MINE AND ADJACENT AQUIFERS SUPPLYING WATER TO THE CITY OF  
ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA MINA SAN JOSÉ Y LOS AQUIFEROS ADYACENTES QUE ABASTECEN AGUA A LA CIUDAD



SUBPROJECT / SUBPROYECTO 7 REPORT / INFORME 3

HYDROGEOLOGICAL STUDY OF THE SAN JOSÉ MINE AND ADJACENT AQUIFERS SUPPLYING WATER TO THE CITY  
 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA MINA SAN JOSE Y LOS AQUIFEROS ADYACENTES QUE ABASTECEN AGUA A LA CIUDAD



F DRURO  
C DE ORURO

BOREHOLE No. / PERFORACION No. DM-1  
LITHOLOGIC DESCRIPTION / DESCRIPCION LITOLÓGICA


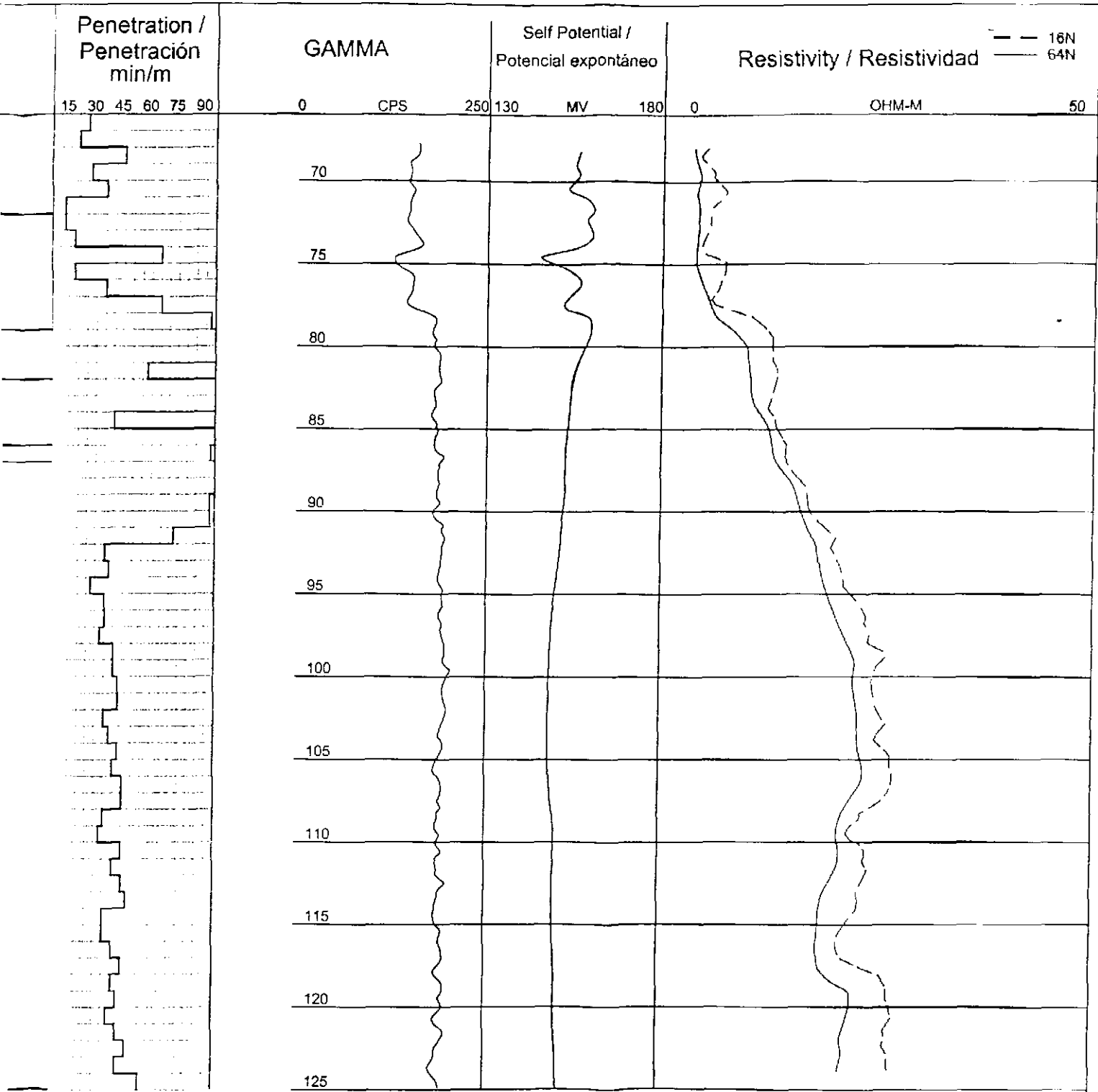
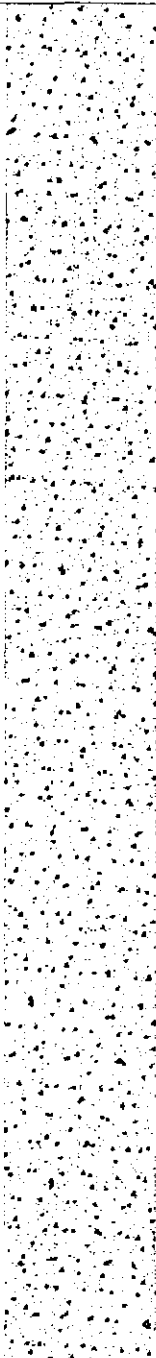
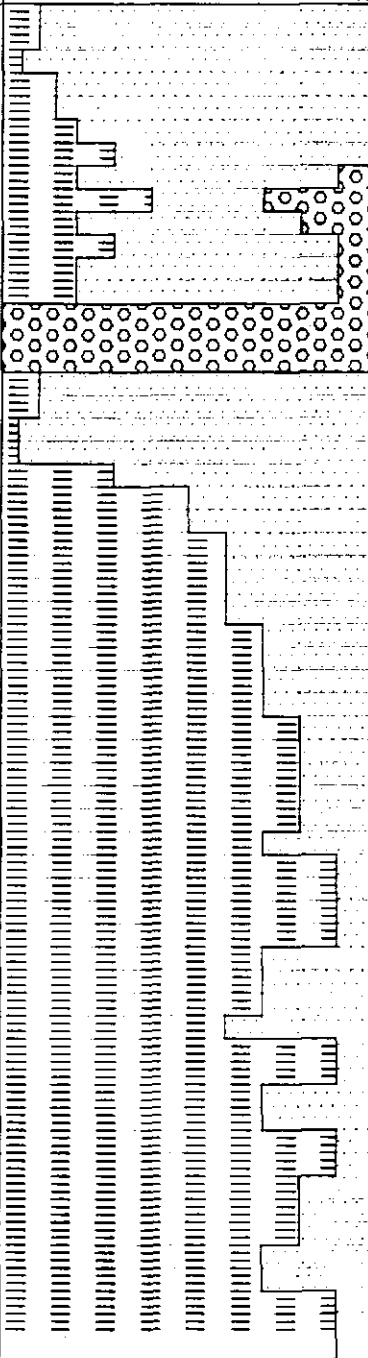
 DAMES & MOORE NORGE

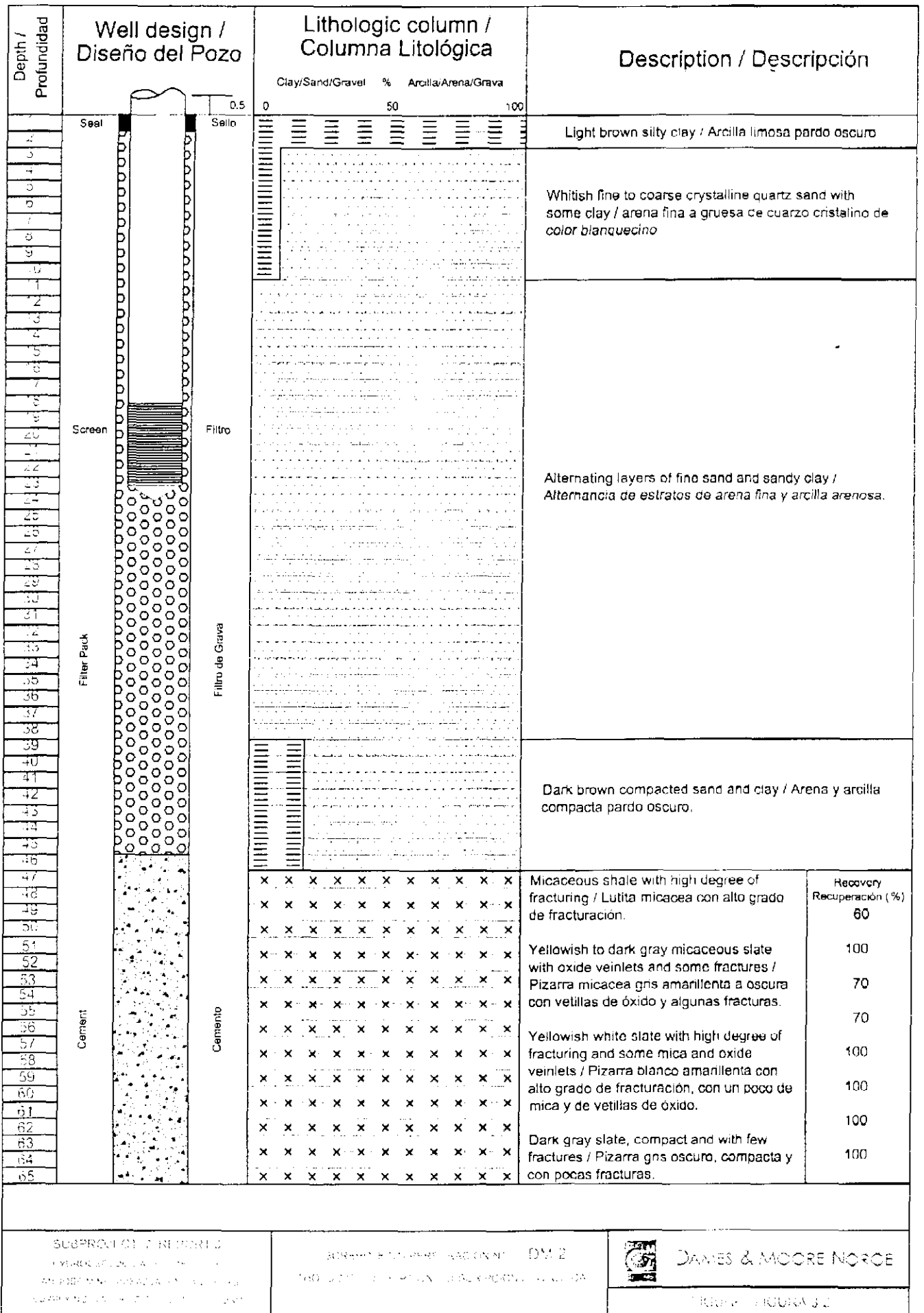
FIGURE / FIGURA 3.1 (1/2)



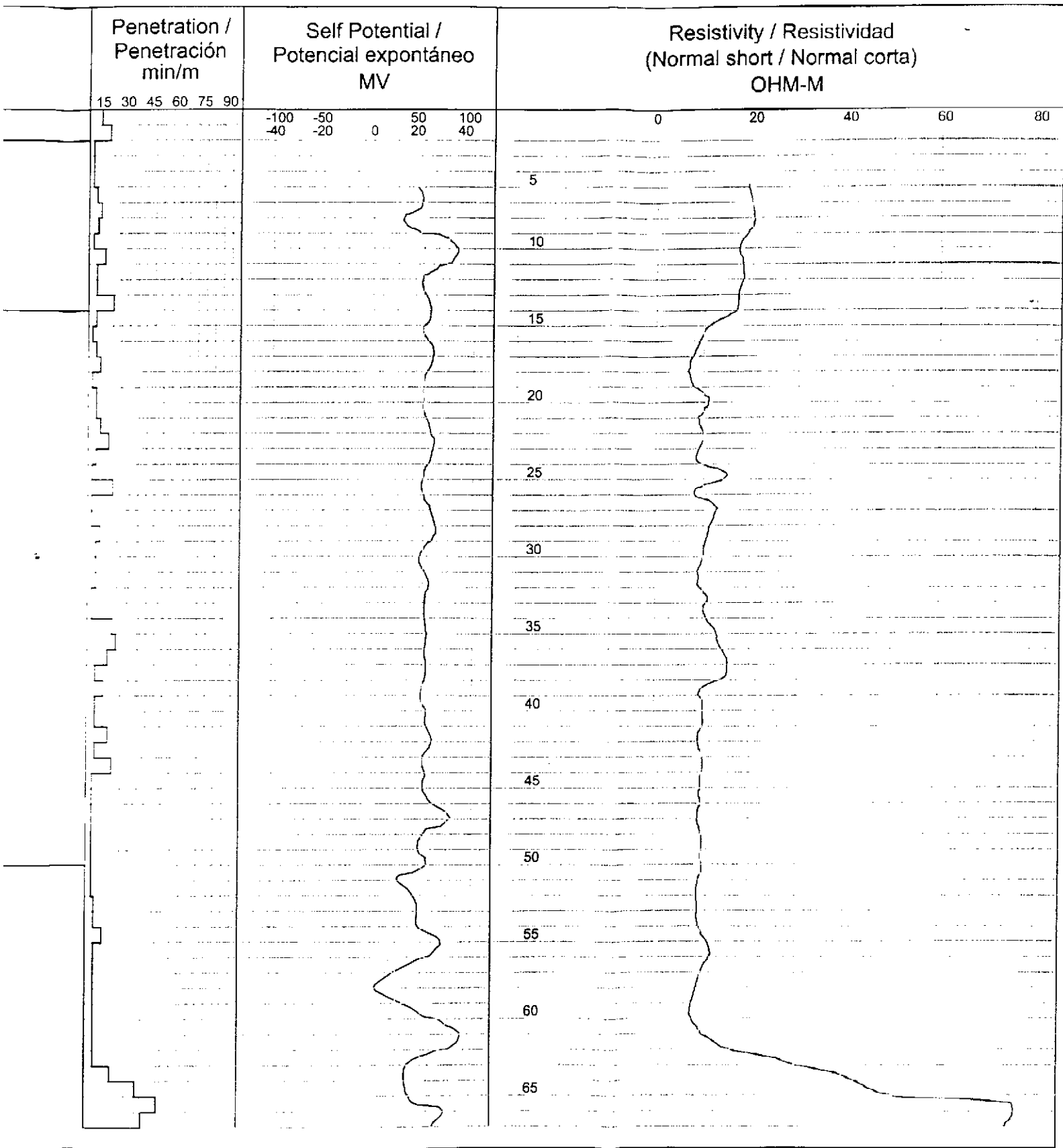
Depth / Profundidad	Well design / Diseño del Pozo	Lithologic column / Columna Litológica	Description / Descripción	
		Clay/Sand/Gravel % Arcilla/Arena/Grava		
		0 50 100		
67			COARSE QUARTZ SAND WITH SOME CLAY ARENA CUARZOSA GRUESA CON ARCILLA	
68				
69				
70				
71				
72				
73				
74				
75				
76				
77				
78				
79				
80				
81				
82				
83				
84				
85				
86				
87				
88				
89				
90				
91				
92				
93				
94				
95				
96				
97				
98				
99				
100				
101				
102				
103				
104				
105				
106				
107				
108				
109				
110				
111				
112				
113				
114				
115				
116				
117				
118				
119				
120				
121				
122				
123				
124				
125				

SUBPROJECT / SUBPROYECTO 7 REPORT / INFORME 3

HYDROGEOLOGICAL STUDY OF THE SAN JOSÉ MINE AND ADJACENT AQUIFERS SUPPLYING WATER TO THE CITY  
 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA MINA SAN JOSE Y LOS AQUIFEROS ADYACENTES QUE ABASTECEN AGUA A LA CIU




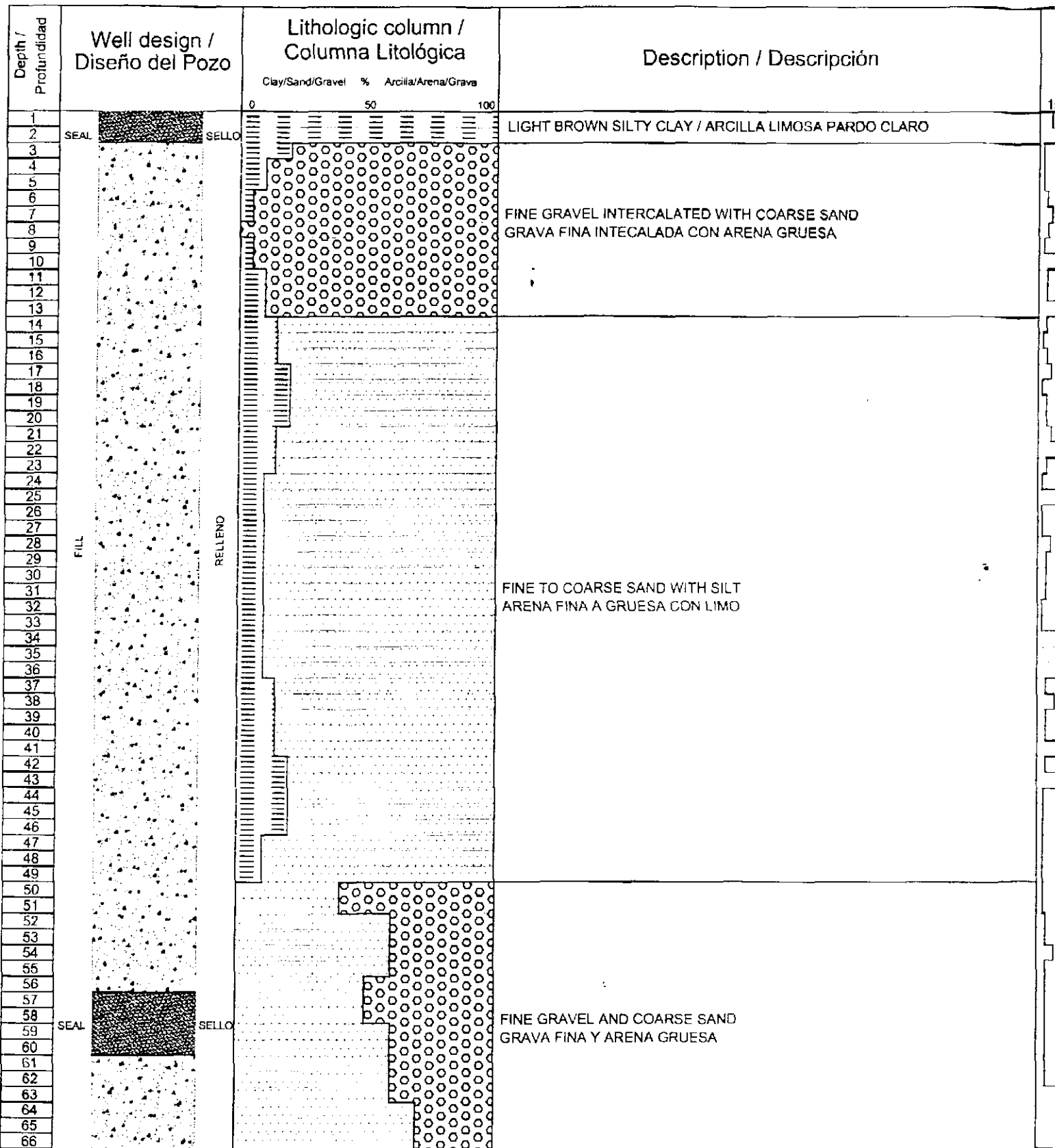




CITY OF ORURO  
CIUDAD DE ORURO

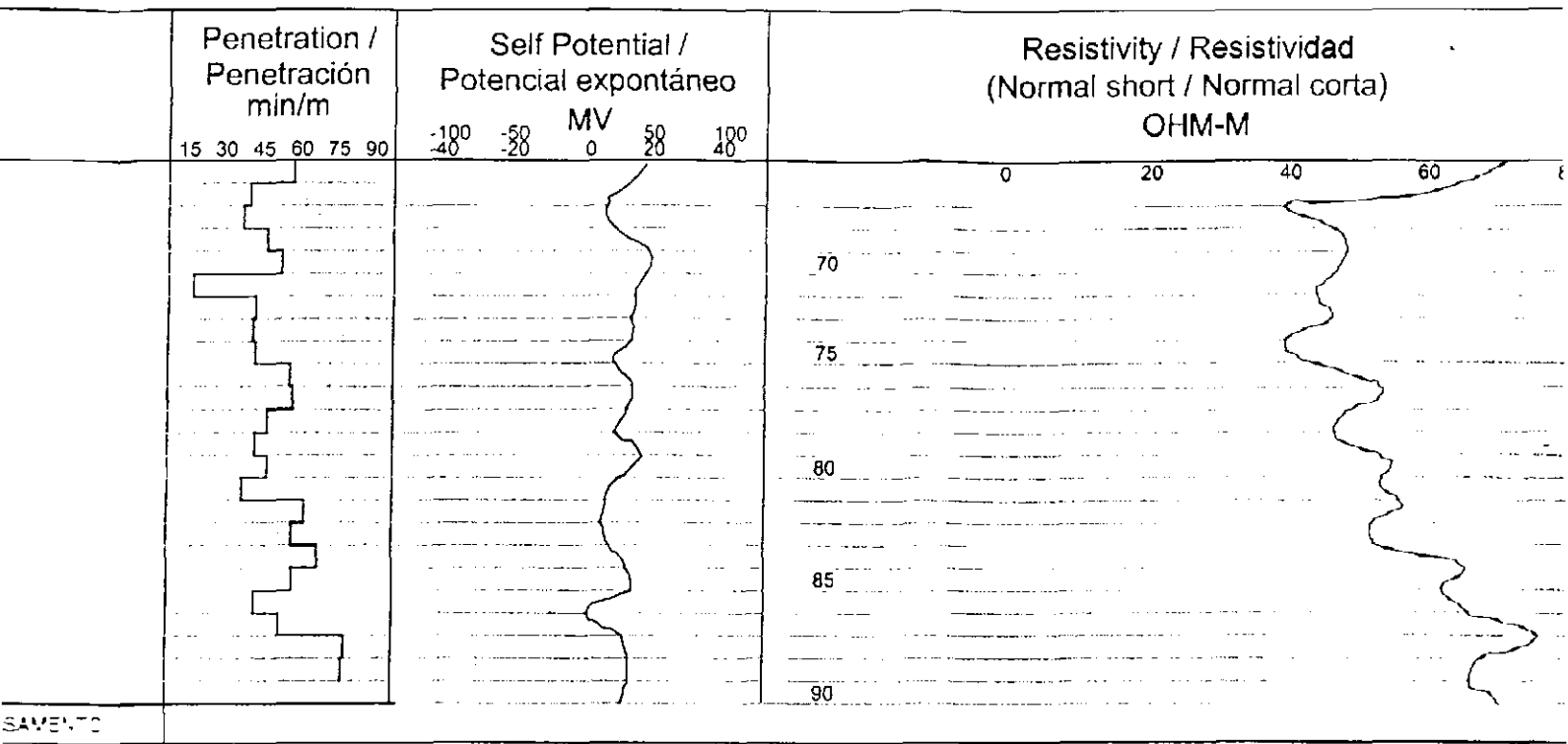
BOREHOLE No. / PERFORACION No. **DM-3**  
LITHOLOGIC DESCRIPTION / DESCRIPCION LITOLOGICA

 **DAMES & MOORE NORGE**  
FIGURE / FIGURA 3.3 (1/2)



SUBPROJECT / SUBPROYECTO 7 REPORT / INFORME 3

HYDROGEOLOGICAL STUDY OF THE SAN JOSÉ MINE AND ADJACENT AQUIFERS SUPPLYING WATER TO THE CITY OF ORUR  
 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA MINA SAN JOSE Y LOS AQUIFEROS ADYACENTES QUE ABASTECEN AGUA A LA CIUDAD DE O



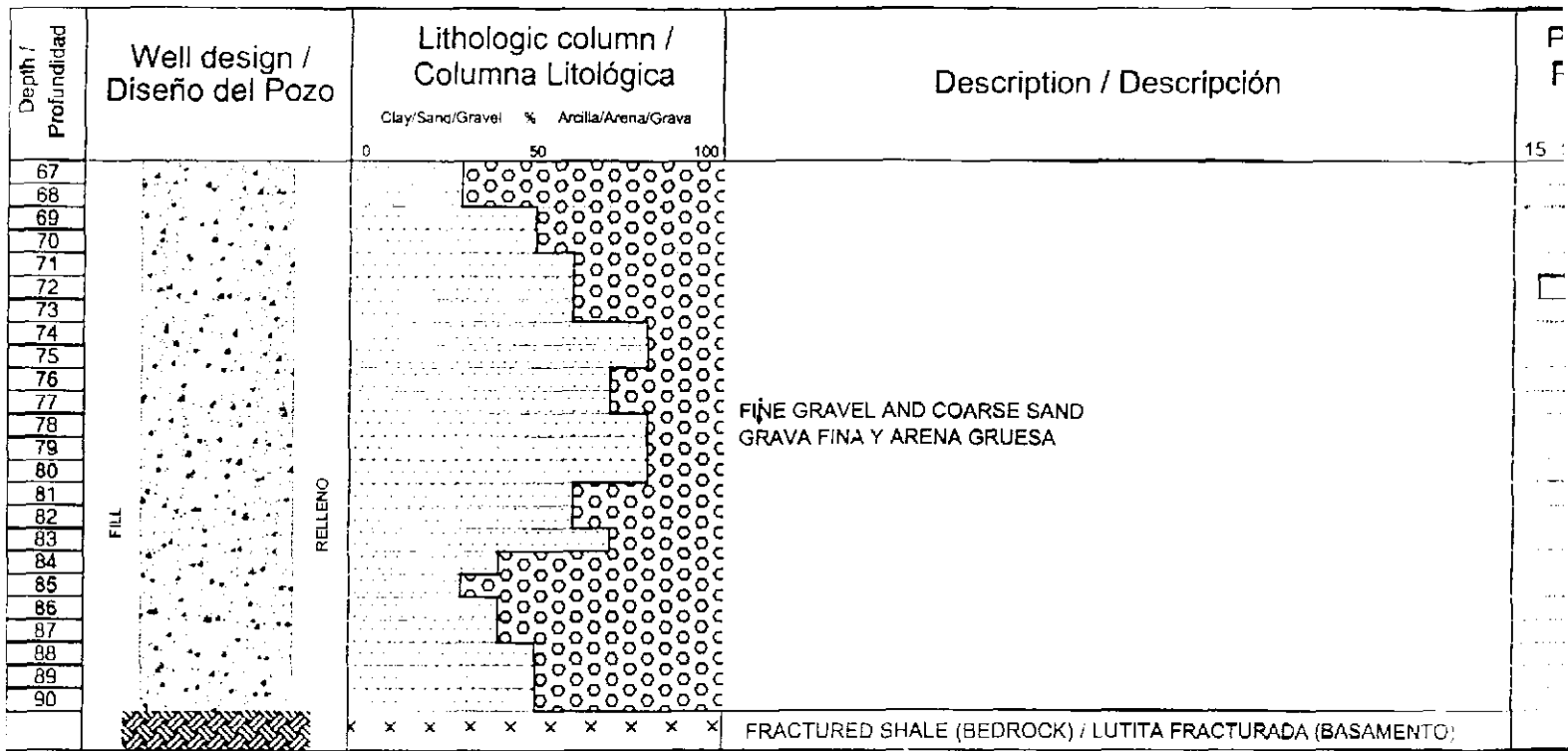
THE CITY OF URURO  
LA CIUDAD DE URURO

BOREHOLE No. / PERFORACION No. DM-3  
LITHOLOGIC DESCRIPTION / DESCRIPCION LITOLÓGICA



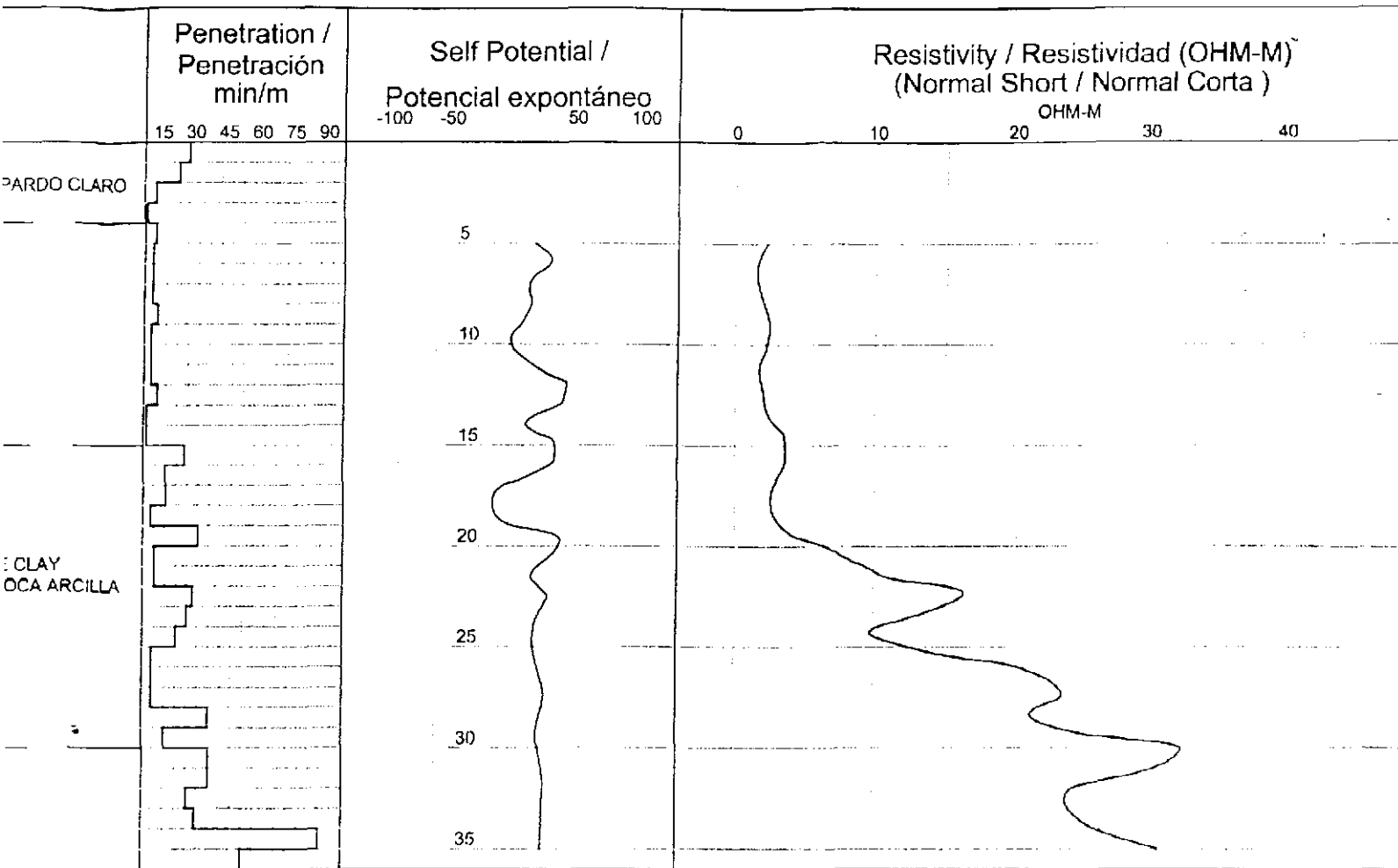
DAMES & MOORE NORGE

FIGURE / FIGURA 3.3 (2/2)



SUBPROJECT / SUBPROYECTO 7 REPORT / INFORME 3

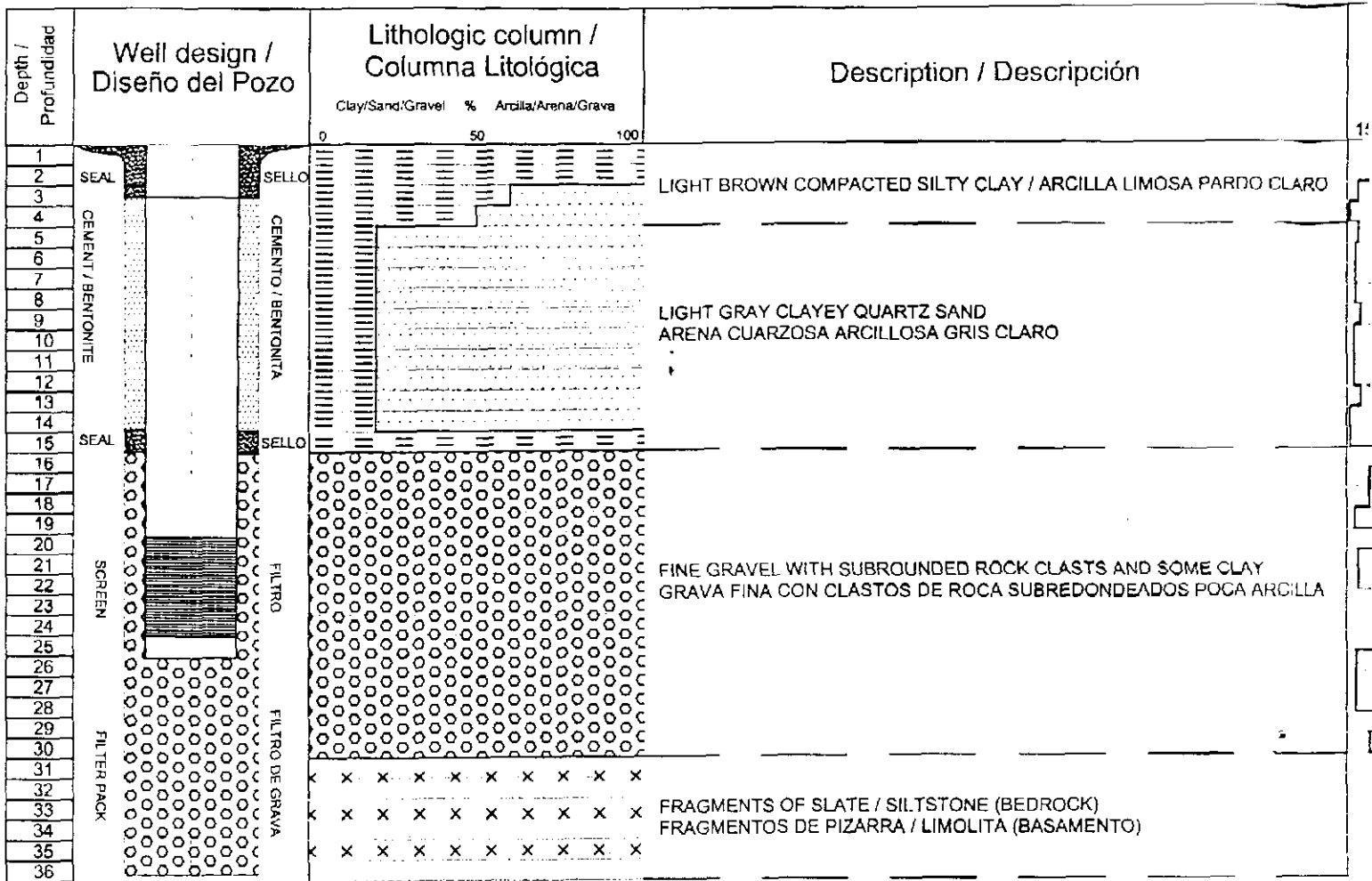
HYDROGEOLOGICAL STUDY OF THE SAN JOSÉ MINE AND ADJACENT AQUIFERS SUPPLYING WATER TO THE CITY OF QRURO  
 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA MINA SAN JOSE Y LOS AQUIFEROS ADYACENTES QUE ABASTECEN AGUA A LA CIUDAD DE ORU



DE LA CIUDAD DE ORURO  
 LA CIUDAD DE ORURO

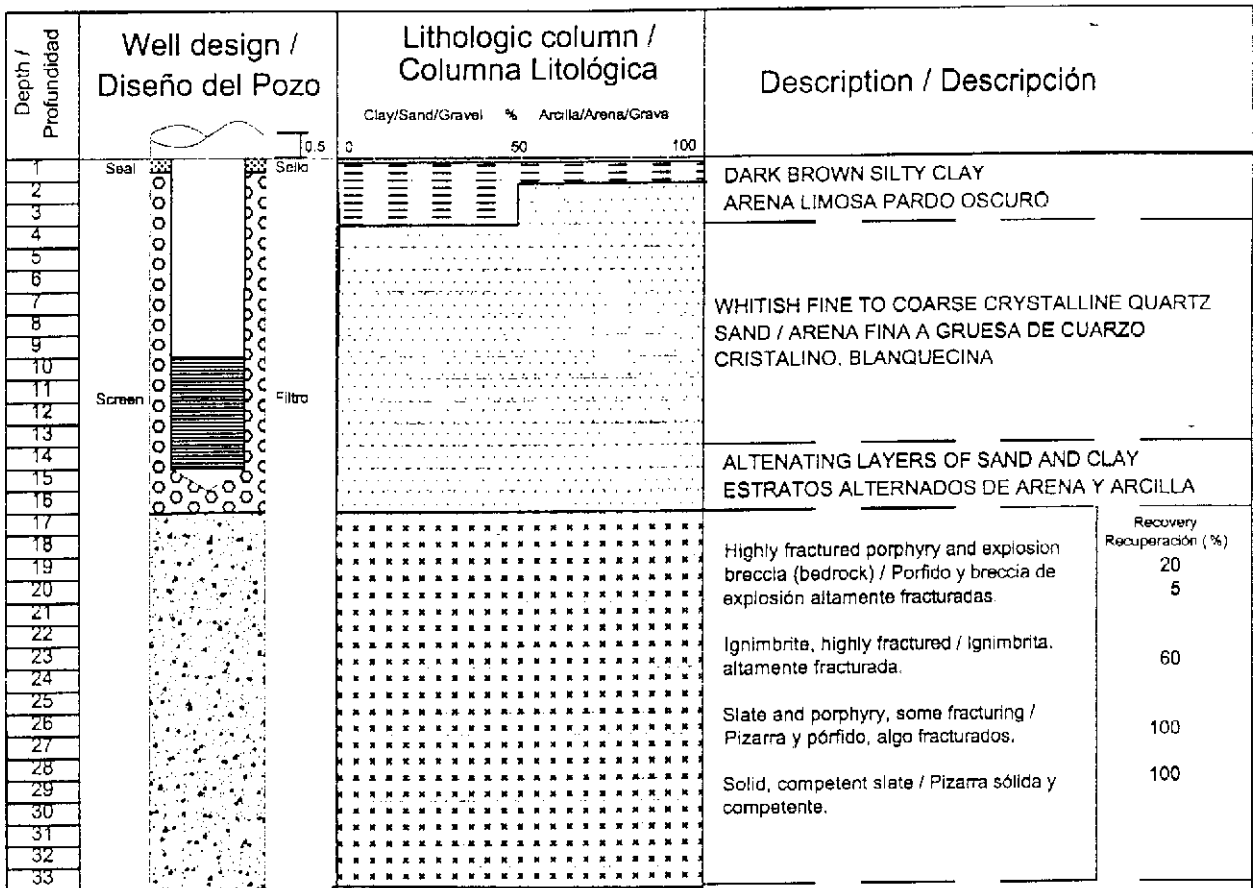
BOREHOLE No. / PERFORACION No. DM - - -  
 LITHOLOGIC DESCRIPTION / DESCRIPCION LITOLÓGICA


SERVICIO GEOLOGICO DEL ESTADO DE ORURO  
 - CIUDAD DE ORURO -

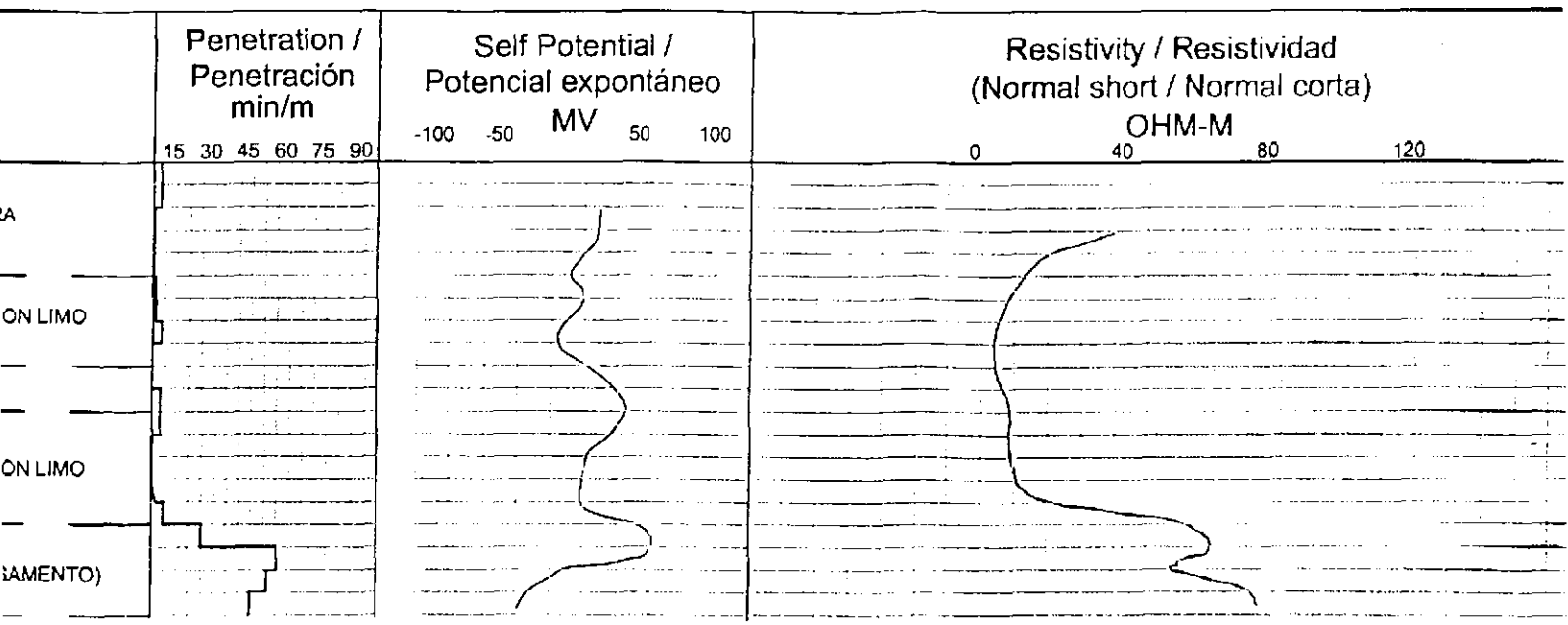


SUBPROJECT / SUBPROYECTO 7 REPORT / INFORME 3

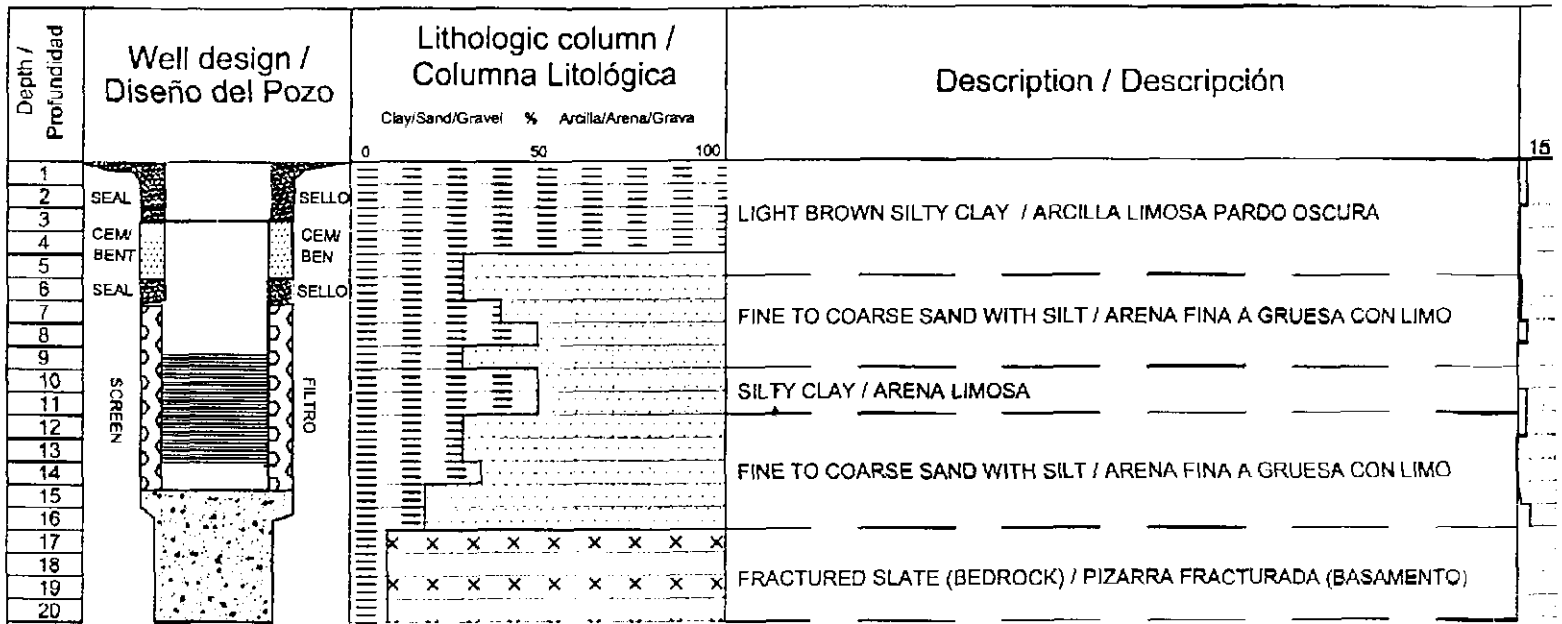
HYDROGEOLOGICAL STUDY OF THE SAN JOSÉ MINE AND ADJACENT AQUIFERS SUPPLYING WATER TO THE CITY OF ORUR  
 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA MINA SAN JOSÉ Y LOS AQUIFEROS ADYACENTES QUE ABASTECEN AGUA A LA CIUDAD DE O



SUBPROJECT REPORT HYDROLOGICAL STUDY SAN JOSE MINE AREA, NANTUXI, CHINA WASHINGTON STATE UNIVERSITY	PROJECT NUMBER: DM-5 PROJECT NAME: SAN JOSE MINE, CHINA	 <b>DAM &amp; MOORE NORGE</b> FIGURE FIGURA 3.5
--	--	---







15

SUBPROJECT / SUBPROYECTO 7 REPORT / INFORME 3

HYDROGEOLOGICAL STUDY OF THE SAN JOSE MINE AND ADJACENT AQUIFERS SUOOLYING WATER TO THE CITY OF ORURO  
 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA MINA SAN JOSE Y LOS AQUIFEROS ADYACENTES QUE ABASTECENA AGUA A LA CIUDAD DE O

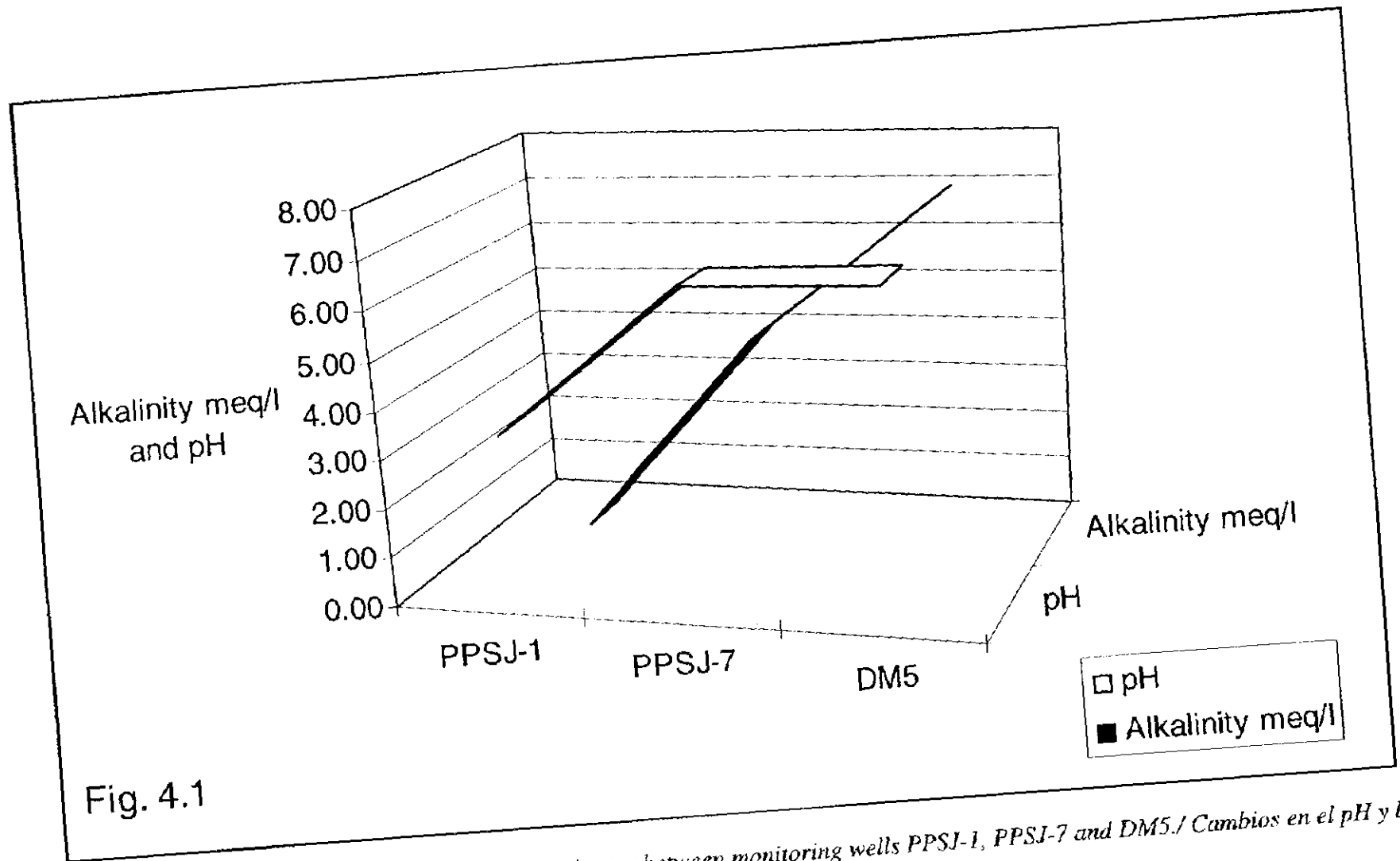


Fig. 4.1 Changes in pH and alkalinity in groundwater between monitoring wells PPSJ-1, PPSJ-7 and DM5. / Cambios en el pH y la alcalinidad entre los pozos de monitoreo PPSJ-1, PPSJ-7 y DM5.

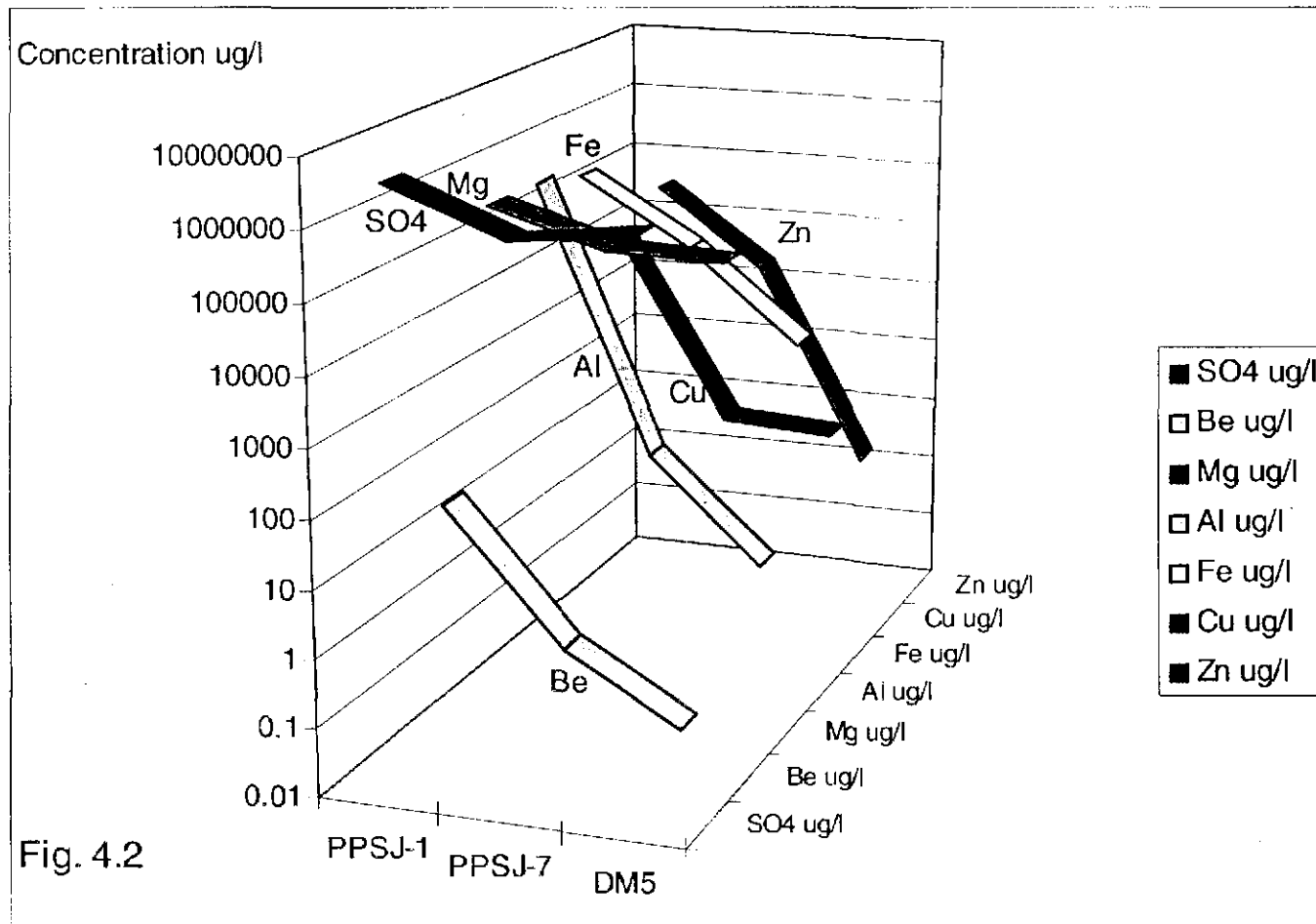


Fig. 4.2

Figure 4.2. Changes in concentrations of selected dissolved elements in groundwater between the wells PPSJ-1, PPSJ-7 and DM5. / Cambios en las concentraciones de elementos seleccionados en las aguas subterráneas entre los pozos PPSJ-1, PPSJ-7 y DM-5.

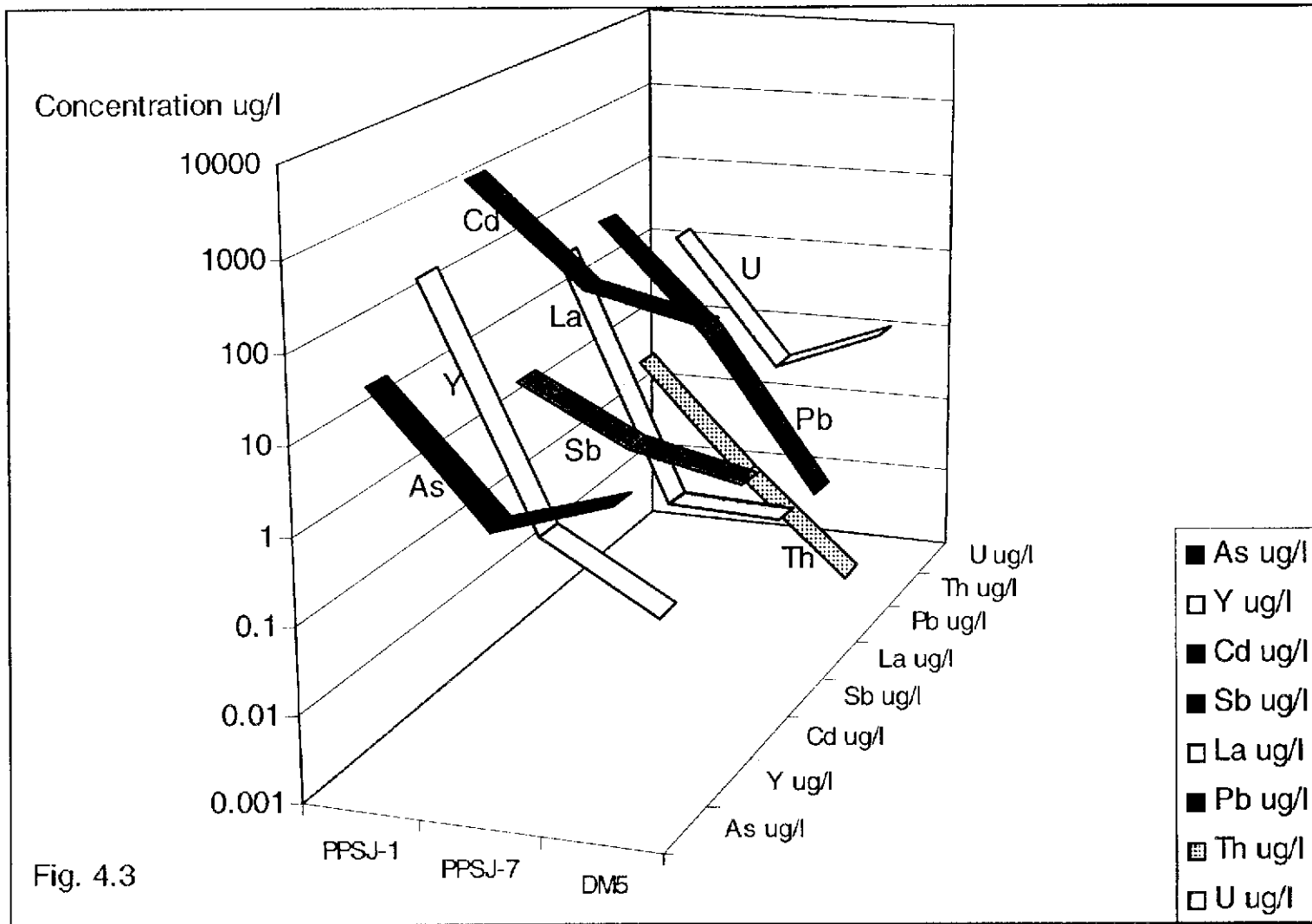


Figure 4.3. Changes in concentrations of selected dissolved elements in groundwater between the wells PPSJ1, PPSJ7 and DM5. /  
Cambios en las concentraciones de elementos seleccionados en el agua subterránea entre los pozos PPSJ-1, PPSJ-7 y DM-5.

della s = 0.259 m  
to = 2.70 s

**Drawdown curve for 118Cd-1PO**  
**Curva de Abatimiento para 118-Cd-1P**

T = 670 m<sup>2</sup>/d  
S = 1.6 x 10<sup>-4</sup>

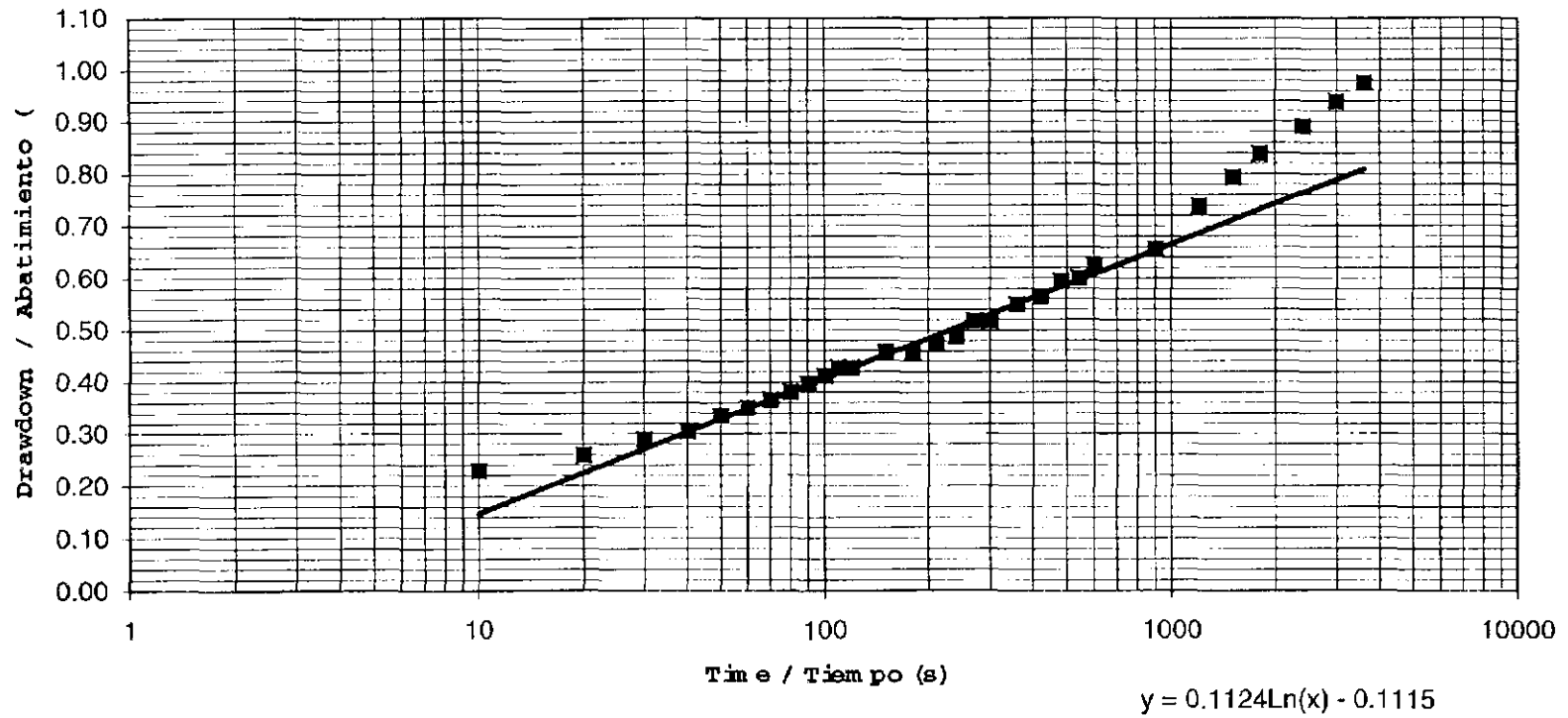


Figure 5.1. Graphical Jacob analysis of data for 118Cd-1PO / Análisis Gráfico de Jacob de los datos de 118Cd-1PO.

delta s = 0.466 m  
to = 8.28 s

### Drawdown Curve for 118Cd-1P / Curva de Abatimiento para 118Cd-1P

T = 370 m<sup>2</sup>/d  
S = 3.8 x 10<sup>-3</sup>

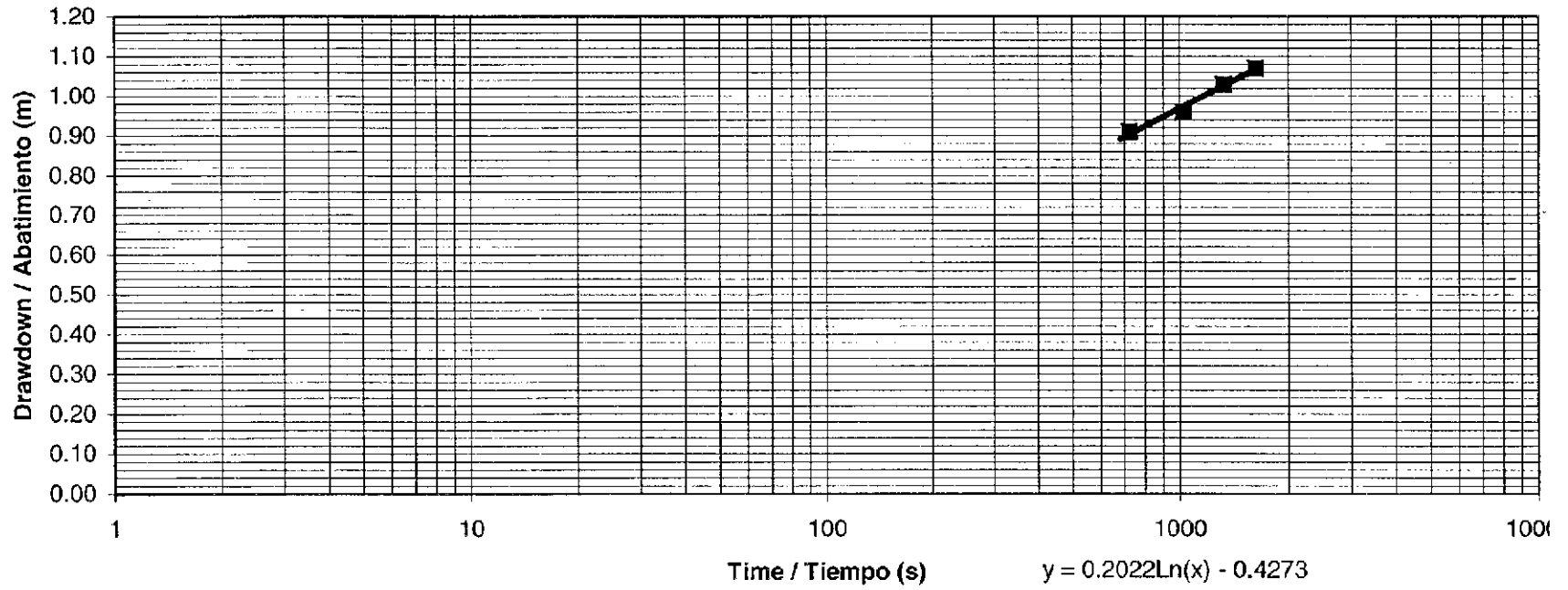
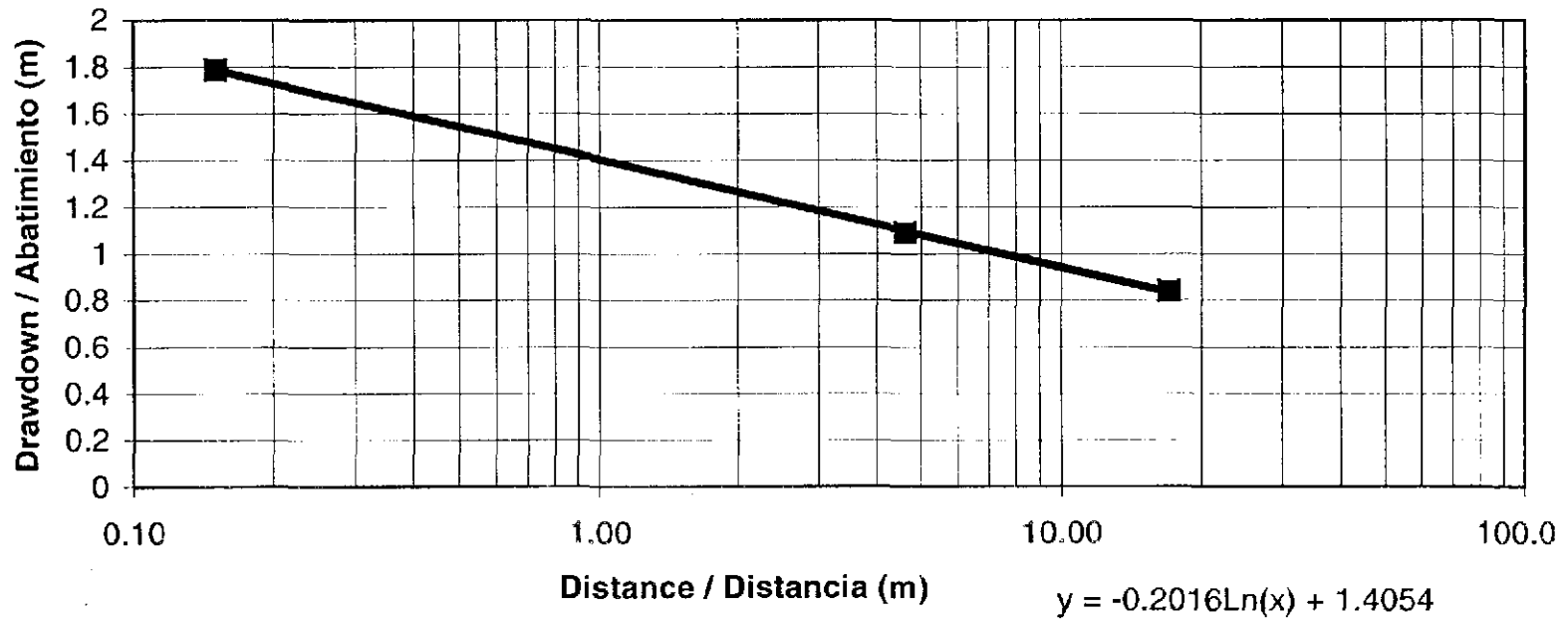


Figure 5.2. Graphical Jacob analysis of data from borehole 118Cd-1P / Análisis Gráfico de Jacob de los datos de 118Cd-1P.

**Thiem analysis / Análisis de Thiem- PP117**

Gradient / Gradiente = -0.4642 rr  
T = 750 m<sup>2</sup>/d



*Figure 5.3. Graphical Thiem analysis of 30 minute drawdown data from all three airport boreholes / Análisis gráfico de Thiem del abatimiento de 30 minutos En todos los tres pozos del aeropuerto.*

## APENDICES



**APENDICE 1**  
**HOJA DE CAMPO PARA MUESTREO HIDROQUIMICO Y PRUEBA DE**  
**POZO**

# APENDICE 1

## HOJA DE CAMPO PARA MUESTREO HIDROQUIMICO Y PRUEBAS DE POZO

Número de Pozo..... Ubicación del Pozo.....

Fecha..... Hora.....

Duración del bombeo de limpieza.....min.

**pH, CE y Temperatura durante el bombeo de Limpieza**

Tiempo desde el inicio del bombeo (min)	Temperatura (C)	pH	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

Lectura Final de pH = \_\_\_\_\_ usando \_\_\_\_\_ equipo

Lectura Final de temp = \_\_\_\_\_ °C usando \_\_\_\_\_ equipo

Lectura Final CE = \_\_\_\_\_  $\mu\text{S}/\text{cm}$  /  $\text{mS}/\text{m}$  usando \_\_\_\_\_ equipo

Lectura Final de redox = \_\_\_\_\_  $\text{mV}$  usando \_\_\_\_\_ equipo

**Alcalinidad :**  
 Titulación 1 =            meq/l  
 Titulación 2 =            meq/l  
 Titulación 3 =            meq/l  
 Promedio =                meq/l

**Muestras Tomadas:**

Muestra no. \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ ml frasco, filtrada a  $0.45 \mu\text{m}$  / no filtrada, preservada con \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ ml frasco, filtrada a  $0.45 \mu\text{m}$  / no filtrada, preservada con \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ ml frasco, filtrada a  $0.45 \mu\text{m}$  / no filtrada, preservada con \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ ml frasco, filtrada a  $0.45 \mu\text{m}$  / no filtrada preservada con \_\_\_\_\_

Observaciones (olor, apariencia, película de aceite, etc.)

**Recuperación / Prueba de bombeo**

Nivel del Agua antes del Bombeo = \_\_\_\_\_ m debajo del borde superior del pozo

Tiempo Total de Bombeo = \_\_\_\_\_ min.

Tasa Promedio de Bombeo = \_\_\_\_\_ l/min.

**Recuperación / Datos de Bombeo**

Tiempo (s. después del fin del bombeo del inicio ó antes del fin del bombeo/del inicio)	Nivel de agua (m. debajo del borde superior del pozo)

**APENDICE 2**  
**ANALISIS DE BOMBEO/DATOS DE RECUPERACION DE LAS**  
**PERFORACIONES MUESTREADAS DE AGUAS SUBTERRANEAS**

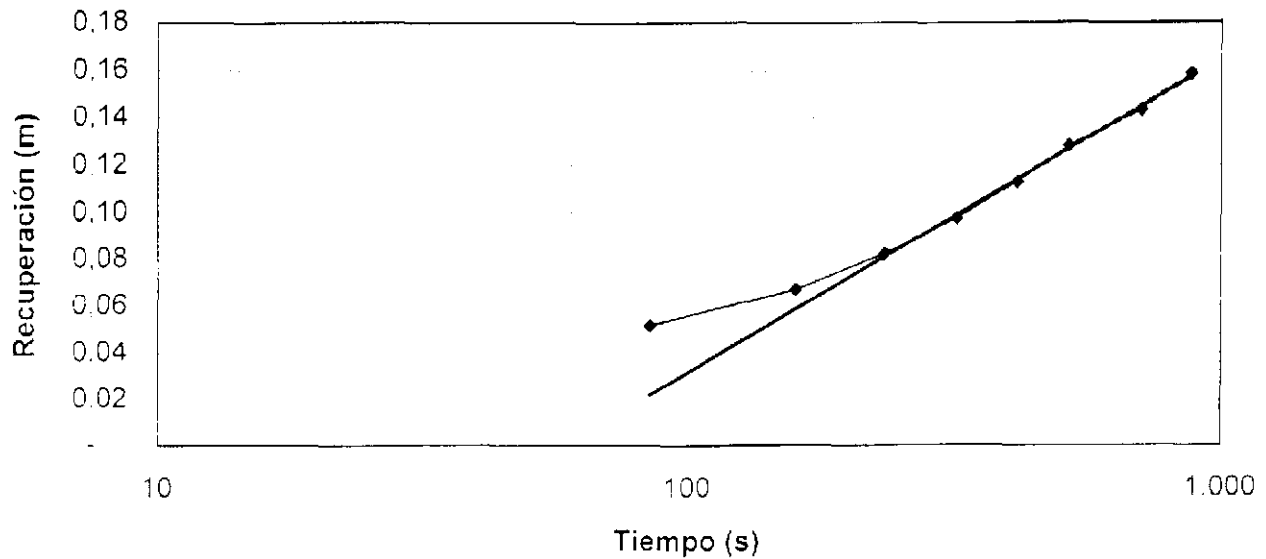
**APENDICE 2**  
**ANALISIS DEL BOMBEO / DATOS RECUPERADOS DEL MUESTREO**  
**DE LOS HOYOS DE PERFORACION DEL AGUA SUBTERRANEA**

PPSJ-1	Tiempo desde el cese del bombeo	Nivel de Agua bwt	Recuperación		Datos usados por la línea de Orientación
			pies	m	
		25,97	-	-	
	85	25,80	0,17	0,05	
	160	25,75	0,22	0,07	
	235	25,70	0,27	0,08	0,08
	320	25,65	0,32	0,10	0,10
	415	25,60	0,37	0,11	0,11
	520	25,55	0,42	0,13	0,13
	709	25,50	0,47	0,14	0,14
	879	25,45	0,52	0,16	0,16

Ingreso de datos revisado por DB 17/11/99

## Prueba de Recuperación PPSJ-1

$$y = 0,0578 \ln(x) - 0,2345$$



Tiempo	Tasa de Bombeo (l/s)
12:47:00	0,020
12:55:00	0,021
13:31:00	0,015
Promedio	0,019

Diámetro = 0.1 m

Método Jacob

$$T = Q/4 \cdot \pi \cdot \text{grad}$$

$$T = 0,00003 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$2 \text{ m}^2/\text{d}$$

Método Banks (1992)

$$\text{Abatimiento} = 25,97 \text{ ft} - 25,3 \text{ ft} = 0,67 \text{ ft} = 0,20 \text{ m}$$

$$\text{Capacidad Especifica} = 0,015 \cdot 0,001 \text{ m}^3/\text{s} / 0,20 \text{ m} = 0,000075 \text{ m}^2/\text{s} = 6,5 \text{ m}^2/\text{d}$$

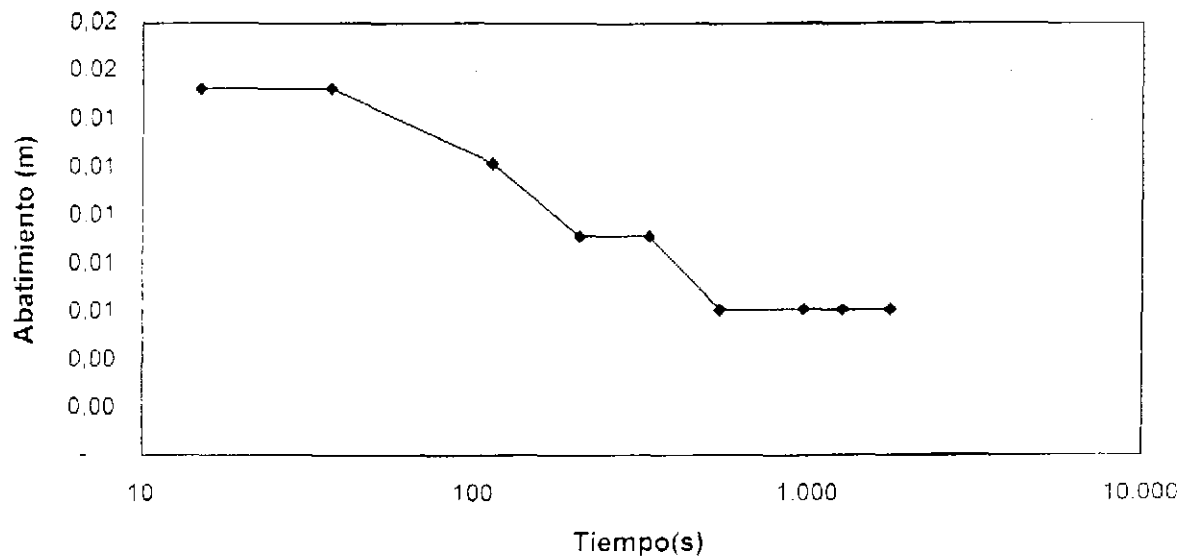
$$\text{Transmisividad} = 6,5 / 0,9 \text{ m}^2/\text{d} = 7,2 \text{ m}^2/\text{d}$$

Datos y Cálculos Revisados por DB 17/11/99

PPSJ7	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento	
			pies	m
	Tiempo	s	pies bwt	
	9:55:23	-	28.43	-
	9:55:38	15	28.48	0.05
	9:56:00	37	28.48	0.05
	9:57:16	113	28.47	0.04
	9:58:50	207	28.46	0.03
	10:00:57	334	28.46	0.03
	10:04:27	544	28.45	0.02
	10:11:32	969	28.45	0.02
	10:16:27	1.264	28.45	0.02
	10:24:44	1.761	28.45	0.02

Datos revisados por DB 17/11/99

### Prueba de Abatimiento PPSJ7



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
9:58:00	0.020
10:01:00	0.019
Promedio	0.020 l/s

Diametro = 0.1 m

#### Método Jacob

No fue posible

#### Método Banks (1992)

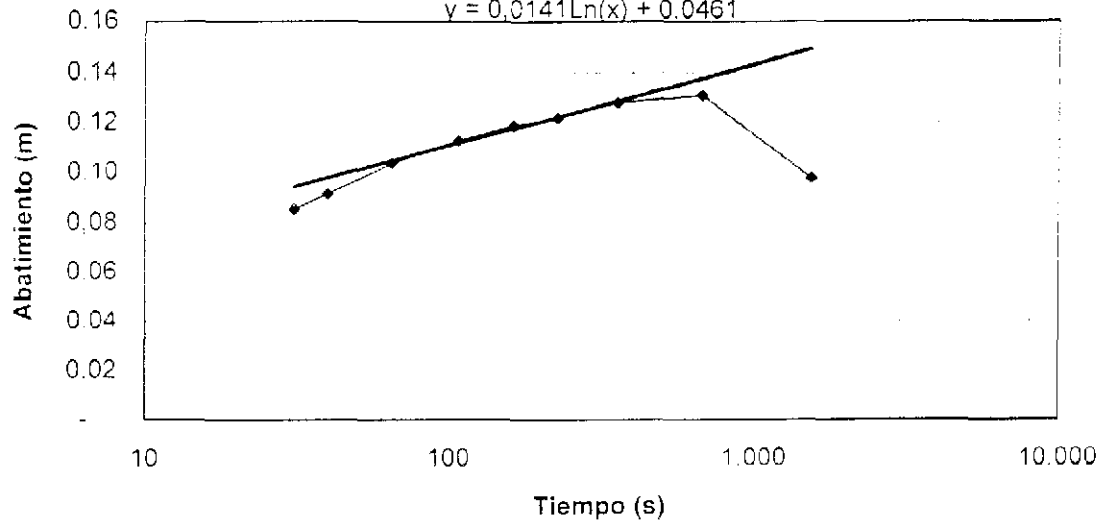
Abatimiento (pies)	0.050	0.02 m
Capacidad Especifica	111	m <sup>2</sup> /d
Transmisividad = Capacidad Especifica / 0.9 =		123 m <sup>2</sup> /d

Datos y cálculos revisados por DB 17/11/99

PPSJ-10	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento		Datos usados por la línea de Orientación
			pies	m	
		pies bwt			
	s				
	9:50:20	2,10	-	-	
	9:50:51	2,38	0,28	0,09	
	9:51:00	2,40	0,30	0,09	
	9:51:25	2,44	0,34	0,10	0,10
	9:52:07	2,47	0,37	0,11	0,11
	9:53:03	2,49	0,39	0,12	0,12
	9:54:06	2,50	0,40	0,12	0,12
	9:56:16	2,52	0,42	0,13	0,13
	10:01:30	2,53	0,43	0,13	
	10:15:48	2,42	0,32	0,10	

### Prueba de Abatimiento PPSJ-10

$$y = 0,0141 \ln(x) + 0,0461$$



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa de Bombeo (l/s)
9:52:30	0,077
9:54:37	0,079
9:56:40	0,081
9:58:46	0,079
10:00:55	0,078
10:21:20	0,048

Diámetro = 0,1 m

#### Método Jacob

$$T = Q/4 p \cdot \text{grad}$$

T

$$Q = 0,079 \text{ l/s}$$

$$0,00044 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$38 \text{ m}^2/\text{d}$$

#### Método Banks (1992)

$$\text{Abatimiento} = 0,43 \text{ ft} = 0,13 \text{ m}$$

$$\text{Capacidad Específica} = 0,079 * 0,001 \text{ m}^2/\text{s} / 0,13 \text{ m} = 0,00061 \text{ m}^2/\text{s} = 52 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$\text{Transmisividad} = 52 / 0,9 \text{ m}^2/\text{d} = 58 \text{ m}^2/\text{d}$$

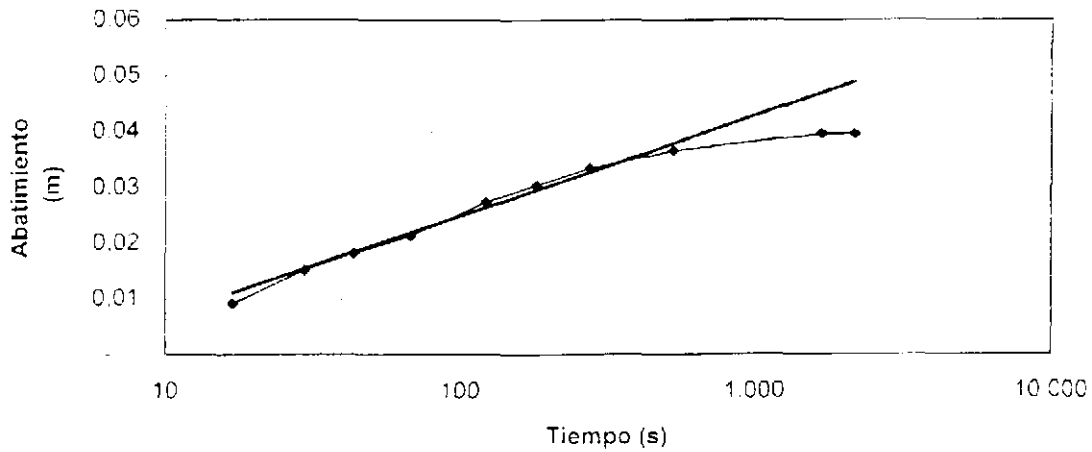
Datos y cálculos revisados por DB 17/11/99



PP 9	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento		Datos usados por la línea de Orientación
			pies	m	
	Tiempo	s	pies bwt		
	13:25:19	-	4.32	-	-
	13:25:36	17	4.35	0.03	0.01
	13:25:49	30	4.37	0.05	0.02
	13:26:03	44	4.38	0.06	0.02
	13:26:27	58	4.39	0.07	0.02
	13:27:21	122	4.41	0.09	0.03
	13:28:20	181	4.42	0.10	0.03
	13:29:52	273	4.43	0.11	0.03
	13:34:05	526	4.44	0.12	0.04
	13:53:06	1,667	4.45	0.13	0.04
	4:01:16	2,157	4.45	0.13	0.04

### Prueba de Abatimiento PP9

$$y = 0.0075 \ln(x) - 0.011$$



#### Datos de bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
13:27:00	0.043
13:30:00	0.050
13:31:00	0.045
13:27:00	0.051

Promedio 0.048

Diámetro = 0.3m

#### Método Jacob

Gradiente (ln) = 0.0078  
 $T = Q/4 \pi \text{ grad}$   
 $T = 0.00049 \text{ m}^2/\text{s}$   
 $42 \text{ m}^2/\text{d}$

#### Método Banks (1992)

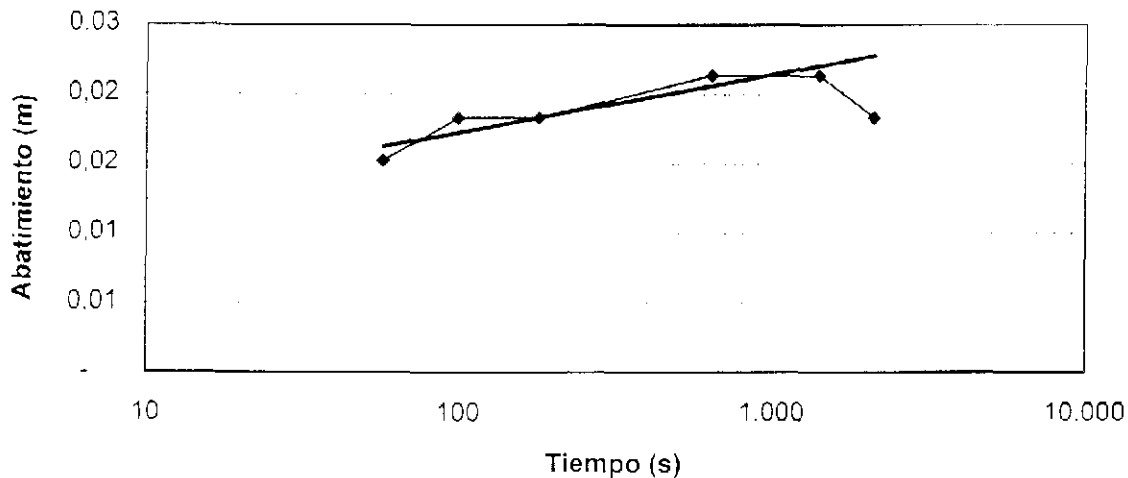
Abatimiento (ft) 0.13 0.04 m  
 Capacidad específica 104 m<sup>3</sup>/d  
 Transmisividad = Capacidad Específica / 0.9 = 115 m<sup>2</sup>/d

Datos y cálculos verificados por DB 17/1/99

PP 10	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento		Datos usados por la línea de Orientación
	s	pies bwt	pies	m	
	12:13:32	10,85	-	-	
	12:14:29	10,90	0,05	0,02	0,02
	12:15:11	10,91	0,06	0,02	0,02
	12:16:32	10,91	0,06	0,02	0,02
	12:24:10	10,92	0,07	0,02	0,02
	12:37:00	10,92	0,07	0,02	0,02
	12:48:40	10,91	0,06	0,02	

### Prueba de Abatimiento PP10

$$y = 0.0018 \ln(x) + 0,009$$



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
12:16:00	0,045
12:15:00	0,036
12:20:00	0,042
12:20:00	0,039
12:24:00	0,039
12:27:00	0,042
Promedio	0,041 l/s

Diámetro = 0,3m

#### Método Jacob

Gradiente (in) =	0,0018	
$T = Q/4 \pi i \text{ grad}$	Q =	0,041 l/s
T	0,00180 m <sup>2</sup> /s	
	155 m <sup>2</sup> /d	

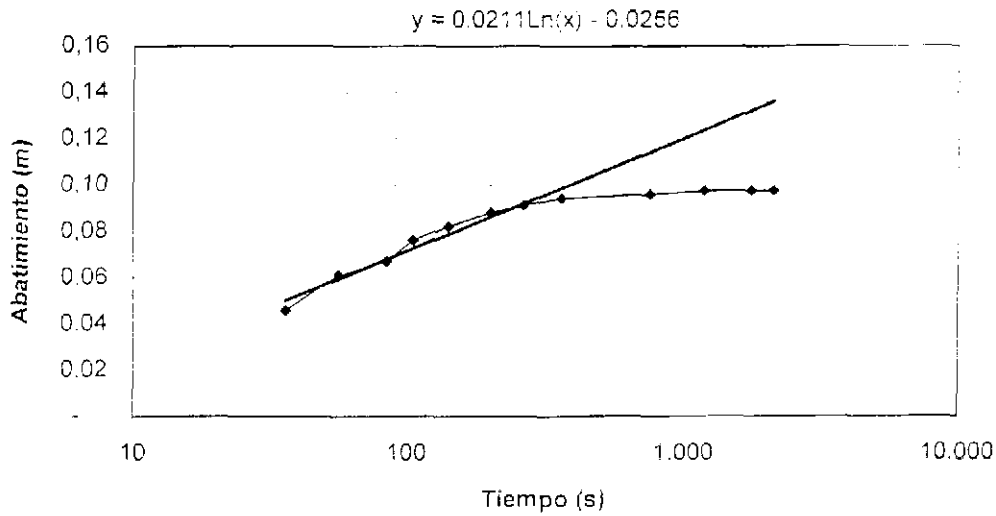
#### Método Banks (1992)

Abatimiento (ft)	0,07	0,02 m
Capacidad especi	164 m <sup>2</sup> /d	
Transmisividad = Capacidad específica / 0,9 =		183 m <sup>2</sup> /d

Datos y cálculos verificados por DB 17/11/99

PPA1	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento		Datos usados por la línea de Orientación
	s		pies bwt	pies	
	-	4.70	-	-	-
	36	4.85	0.15	0.05	0.05
	56	4.90	0.20	0.06	0.06
	84	4.92	0.22	0.07	0.07
	105	4.95	0.25	0.08	0.08
	141	4.97	0.27	0.08	0.08
	202	4.99	0.29	0.09	0.09
	265	5.00	0.30	0.09	0.09
	363	5.01	0.31	0.09	0.09
	753	5.02	0.32	0.10	
	1.188	5.02	0.32	0.10	
	1.759	5.02	0.32	0.10	
	2.128	5.02	0.32	0.10	

### Prueba de Abatimiento PPA1 (Aurora)



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
15:46:00	0.048
15:45:00	0.034
15:49:00	0.055
15:51:00	0.042

Promedio 0.045

Diametro = 0.2 m

#### Método Jacob

Gradiante (ln) =	0.0211	
$T = Q/4 \cdot \pi \cdot \text{grad}$	Q =	0.045 l/s
T	0.00017 m <sup>2</sup> /s	
	15 m <sup>2</sup> /d	

#### Método Banks (1992)

Abatimiento (ft)	0.32	0.10 m
Capacidad especif	40 m <sup>2</sup> /c	
Transmisividad = Capacidad especifica / 0.9 =		44 m <sup>2</sup> /d

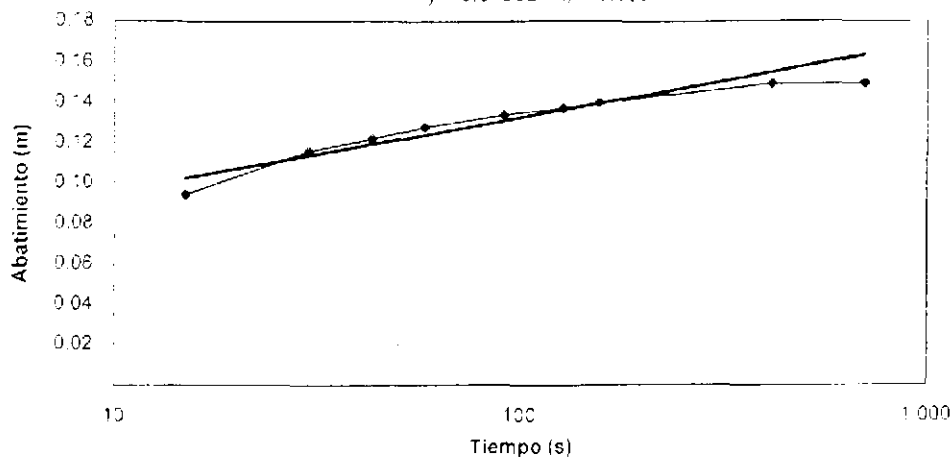
Datos y cálculos verificados por DB 17/11/99

PPO14	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento		Datos usados por la línea de Orientación
			pies	m	
	Tiempo	pies bwt			
	s				
	11:17:35	4.01	-	-	-
	11:17:45	4.20	0.19	0.06	
	11:18:09	4.27	0.26	0.08	
	11:18:23	4.28	0.27	0.08	
	11:18:04	4.27	0.26	0.08	
	11:22:50	4.17	0.16	0.05	
	11:26:46	4.05	0.34	0.01	
Cese de bombeo					
	12:01:50	4.01	-	-	-
	12:02:05	4.32	0.31	0.09	0.09
	12:02:20	4.39	0.38	0.12	0.12
	12:02:33	4.41	0.40	0.12	0.12
	12:02:48	4.43	0.42	0.13	0.13
	12:03:21	4.45	0.44	0.13	0.13
	12:03:57	4.46	0.45	0.14	0.14
	12:04:26	4.47	0.46	0.14	0.14
	12:08:44	4.50	0.49	0.15	0.15
	12:13:31	4.50	0.49	0.15	

Ingreso de datos verificado por DB 17/11/99

### Prueba de Abatimiento PPO14

$$y = 0.0158 \ln(x) + 0.0597$$



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
12:03:00	0.077
12:05:00	0.077
12:07:00	0.065
12:09:00	0.081
12:11:00	0.075
12:13:00	0.074
Promedio	0.078 l/s

Diámetro = 0.1 m

#### Método Jacob

Gradiente (ln) = 0.0158  
 $T = Q/4 \cdot p \cdot \text{grad}$   
 $T = 0.00039 \text{ m}^2/\text{s}$   
 $34 \text{ m}^3/\text{d}$

#### Método Banks (1992)

Abatimiento (ft) = 0.49 = 0.15 m  
 Capacidad específica = 45  $\text{m}^3/\text{ft}$   
 $\text{Transmisividad} = \text{Capacidad específica} \cdot 0.3 = 50 \text{ m}^2/\text{c}$

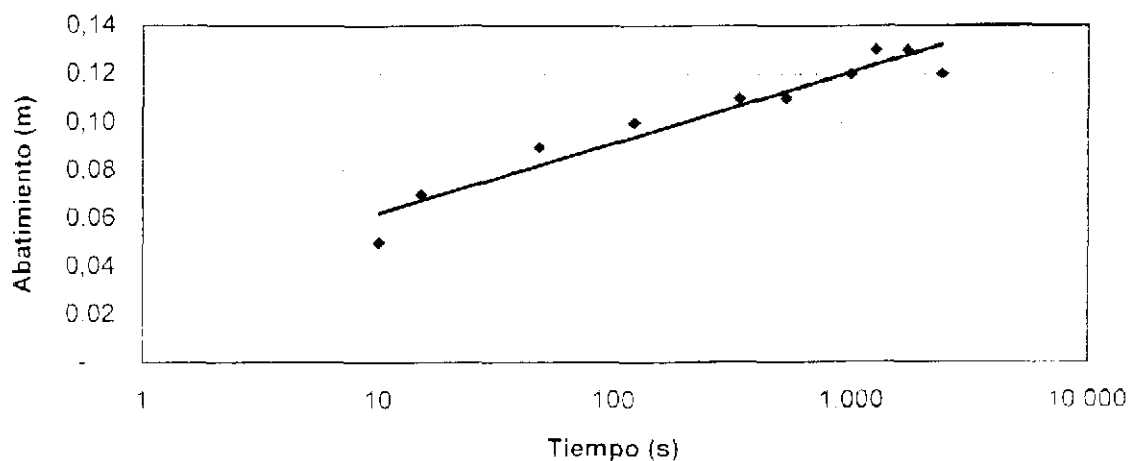
Datos y cálculos verificados por DB 18/11/99

PPO13	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento	Datos usados por la línea de Orientación
	s	m bwt	m	
	13:53:40	1,38	-	-
	13:53:50	1,43	0,05	0,05
	13:53:55	1,45	0,07	0,07
	13:54:28	1,47	0,09	0,09
	13:55:40	1,48	0,10	0,10
	13:59:13	1,49	0,11	0,11
	14:02:24	1,49	0,11	0,11
	14:10:02	1,50	0,12	0,12
	14:14:32	1,51	0,13	0,13
	14:22:00	1,51	0,13	0,13
	14:33:32	1,50	0,12	0,12

Datos verificados por DB 3/12/99

### Prueba de Abatimiento PPO13

$$y = 0,0127\ln(x) + 0,0329$$



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
13:54:50	0,075
13:55:30	0,086
13:56:10	0,088
13:56:50	0,081
13:58:15	0,087
Promedio	0,083 l/s

#### Método Jacob

Gradiente (n) =	0,0127	
$T = Q/4 \cdot \pi \cdot \text{grad}$	$Q =$	0,083 l/s
T	0,00052 m <sup>2</sup> /s	
	45 m <sup>2</sup> /d	

#### Método Banks (1992)

Abatimiento (ft)		0,13 m
Capacidad específica	55 m <sup>2</sup> /d	
Transmisividad = Capacidad específica / 0,9 =		62 m <sup>2</sup> /d

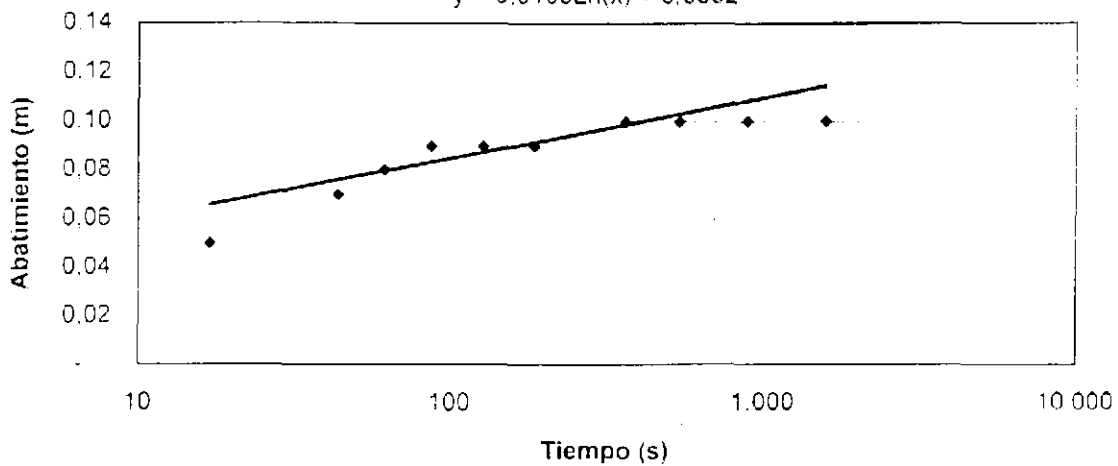
Cálculos verificados por DB 3/12/99

PPO15	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento	Datos usados por la línea de Orientación
Tiempo	s	m bwt	m	
11:17:23	-	1,56	-	
11:17:40	17	1,61	0,05	
11:18:07	44	1,63	0,07	0,07
11:18:25	62	1,64	0,08	0,08
11:18:50	87	1,65	0,09	0,09
11:19:30	127	1,65	0,09	0,09
11:20:28	185	1,65	0,09	0,09
11:23:25	362	1,66	0,10	0,10
11:26:22	539	1,66	0,10	0,10
11:32:06	883	1,66	0,10	
11:43:39	1.576	1,66	0,10	

Datos verificados por DB 3/12/99

### Prueba de Abatimiento PPO15

$$y = 0.0108 \ln(x) + 0.0352$$



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
11:18:30	0,072
11:19:00	0,089
11:20:00	0,088
11:20:40	0,082
11:22:00	0,093
Promedio	0,085 l/s

#### Método Jacob

Gradiente (h) =	0,0108	
$T = Q/4 \pi \text{ grad}$	Q =	0,085 l/s
T	0,00062	m <sup>2</sup> /s
	54	m <sup>2</sup> /d

#### Método Banks (1992)

Abatimiento (m)		0,10 m
Capacidad específica	73 m <sup>2</sup> /d	
Transmisividad = Capacidad específica / 0,9 =		81 m <sup>2</sup> /d

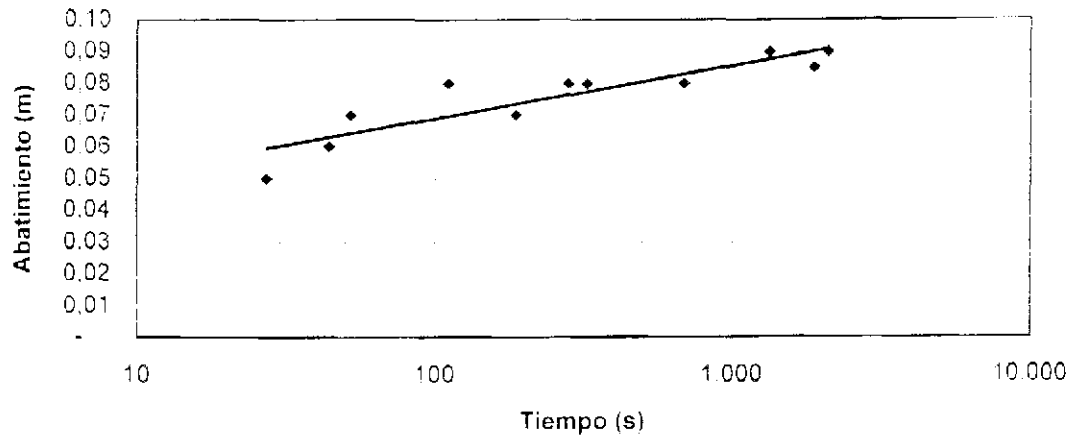
Cálculos verificados por DB 3/12/99

PPD16	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento	Datos usados por la línea de Orientación
Tiempo	s	m bwt	m	
9:42:42	-	1,83	-	-
9:43:09	27	1,88	0,05	0,05
9:43:26	44	1,89	0,06	0,06
9:43:34	52	1,90	0,07	0,07
9:44:33	111	1,91	0,08	0,08
9:45:49	187	1,90	0,07	0,07
9:47:23	281	1,91	0,08	0,08
9:48:07	325	1,91	0,08	0,08
9:54:10	688	1,91	0,08	0,08
10:04:49	1.327	1,92	0,09	0,09
10:13:53	1.871	1,92	0,09	0,09
10:17:23	2.081	1,92	0,09	0,09

Datos verificados por DB 3/12/99

### Prueba de Abatimiento PPO16

$$y = 0.0072 \ln(x) + 0.0357$$



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
9:44:00	0.050
9:44:00	0.064
9:45:00	0.062
9:47:30	0.056
9:48:00	0.056

Diámetro interno = 0.102 m

Promedio 0.058 l/s

#### Método Jacob

Gradiente (ln) =	0.0072		
$T = Q/4 \pi i \text{ grad}$	$Q =$	0.058	l/s
T	0.00084		$\text{m}^2/\text{s}$
	55		$\text{m}^2/\text{d}$

#### Método Banks (1992)

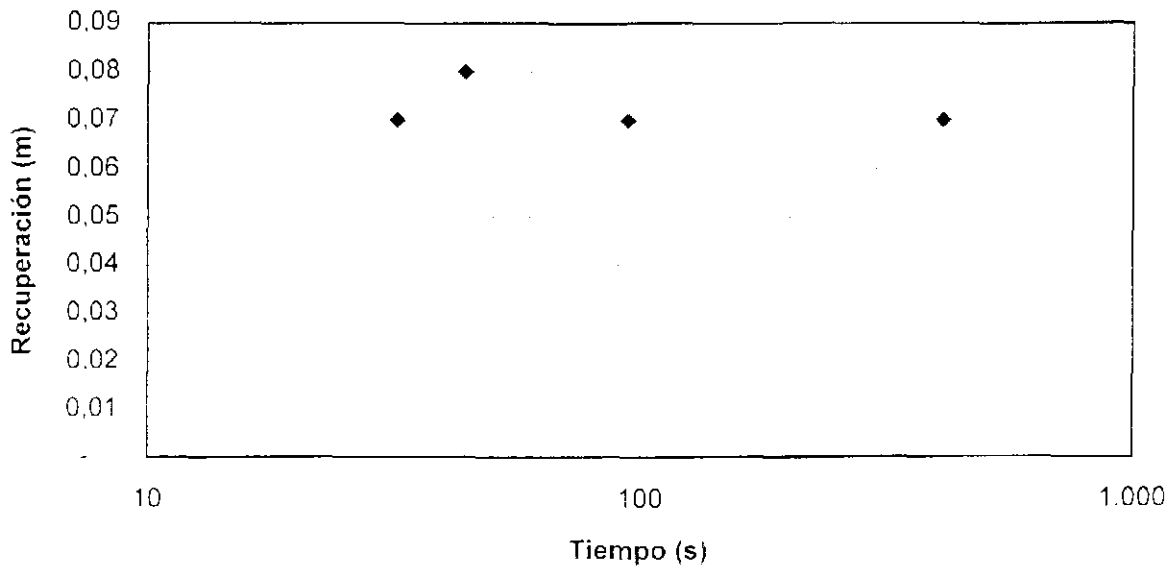
Abatimiento (m)		0.09	m
Capacidad específica	55		$\text{m}^2/\text{d}$
Transmisividad = Capacidad específica / 0.9 =		61	$\text{m}^2/\text{d}$

Cálculos verificados por DB 3/12/99

PPO16	Tiempo desde el cese del bombeo	Nivel del Agua	Recuperación
Tiempo	s	m bwt	m
10:36:24	-	1,91	-
10:36:56	32	1,84	0,07
10:37:08	44	1,83	0,08
10:37:58	94	1,84	0,07
10:43:15	411	1,84	0,07

Datos verificados por DB 3/12/99

### Recuperación PPO16



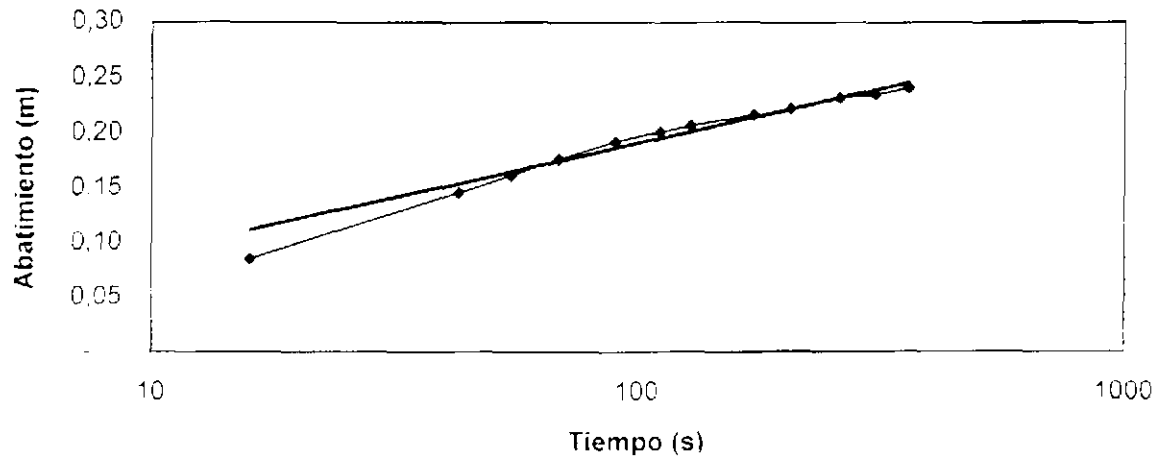
Prueba de recuperación no analizable



PPO22	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento		Datos usados por la línea de Orientación
			pies	m	
	s	pies bwt	pies	m	
16:44:23	0	6,82	-	-	
16:44:39	16	7,10	0,28	0,09	
16:45:06	43	7,30	0,48	0,15	0,15
16:45:18	55	7,35	0,53	0,16	0,16
16:45:32	69	7,40	0,58	0,18	0,18
16:45:53	90	7,45	0,63	0,19	0,19
16:46:14	111	7,48	0,66	0,20	0,20
16:46:31	128	7,50	0,68	0,21	0,21
16:47:15	172	7,53	0,71	0,22	0,22
16:47:48	205	7,55	0,73	0,22	0,22
16:48:42	259	7,58	0,76	0,23	0,23
16:49:30	307	7,59	0,77	0,23	0,23
16:50:23	360	7,61	0,79	0,24	0,24

### Prueba de Abatimiento PPO 22

$$y = 0.043\ln(x) - 0.0069$$



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
16:47:00	0,053
16:48:30	0,053

Diámetro = 0,1 m

#### Método Jacob

Gradiente (ln) = 0,0430  
 $T = Q / 4 \pi \cdot \text{grad}$   
 $T = 0,00010 \text{ m}^2/\text{s}$   
 $8 \text{ m}^2/\text{d}$

#### Método Banks (1992)

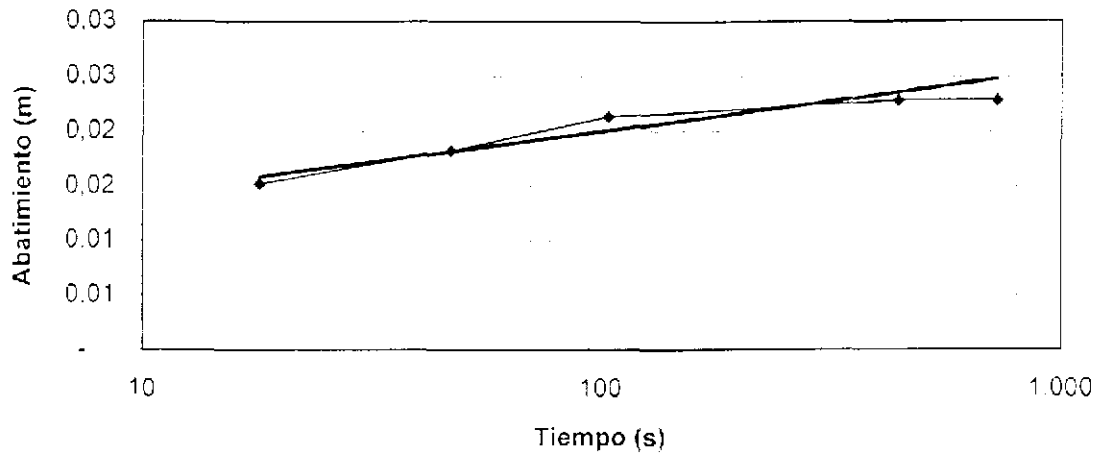
Abatimiento (ft) = 0,79      0,24 m  
Capacidad específica =  $19 \text{ m}^2/\text{d}$   
Transmisividad = Capacidad específica / 0,9 =  $21 \text{ m}^2/\text{d}$

Datos y cálculos verificados por DB 17/11/99

PPO PI 10	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento		Datos usados por la línea de Orientación
			pies	m	
	s	pies bwt			
9:22:20	-	12,36	-	-	-
9:22:38	18	12,41	0,05	0,02	0,02
9:23:07	47	12,42	0,06	0,02	0,02
9:24:03	103	12,43	0,07	0,02	0,02
9:29:39	439	12,44	0,08	0,02	0,02
9:34:24	724	12,44	0,08	0,02	

### Prueba de Abatimiento PPO PI10

$$y = 0,0024 \ln(x) + 0,0089$$



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
9:24:00	0,038
9:26:44	0,041
9:28:00	0,033
9:31:46	0,037
9:34:00	0,033
9:36:51	0,026
9:40:00	0,017

Cese de bombeo y reemplazado con batería de automóvil

9:51:00 0,037

Promedio para Jacob (hasta 09:31) 0,037

Diámetro = 0,1 m

#### Método Jacob

Gradiente (ln) = 0,0024  
 $T = Q/4 \cdot \pi \cdot \text{grad}$   
 $Q = 0,037 \text{ l/s}$   
 $T = 0,00123 \text{ m}^2/\text{s}$   
 $107 \text{ m}^2/\text{d}$

#### Método Banks (1992)

Abatimiento (ft) 0,075 0,02 m  
 Capacidad específica 141  $\text{m}^2/\text{d}$   
 Transmisividad = Capacidad específica / 0,9 = 156  $\text{m}^2/\text{d}$

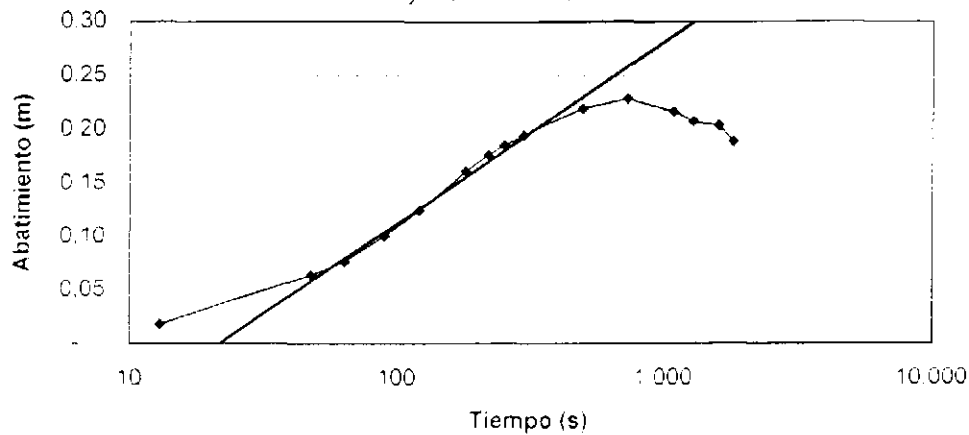
Datos y cálculos verificados por DB 17/11/99

PPO BP 111	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento		Datos usados por la línea de Orientación
			pies	m	
	s	pies bwt			
10:21:19	-	6.87	-	-	-
10:21:32	13	6.93	0.06	0.02	
10:22:07	48	7.08	0.21	0.06	
10:22:23	64	7.12	0.25	0.08	0.08
10:22:49	90	7.20	0.33	0.10	0.10
10:23:20	121	7.28	0.41	0.12	0.12
10:24:20	181	7.40	0.53	0.16	0.16
10:24:59	220	7.45	0.58	0.18	0.18
10:25:33	254	7.48	0.61	0.19	0.19
10:26:18	299	7.51	0.64	0.20	0.20
10:28:34	495	7.59	0.72	0.22	0.22
10:33:28	729	7.62	0.75	0.23	
10:39:16	1,077	7.58	0.71	0.22	
10:42:41	1,282	7.55	0.66	0.21	
10:47:52	1,593	7.54	0.67	0.20	
10:51:25	1,805	7.49	0.62	0.19	

Datos verificados por DB 17/11/99

### Prueba de Abatimiento PPO BP 111

$$y = 0.0736L\ln(x) - 0.2268$$



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
10:22:00	0.044
10:25:00	0.044
10:26:00	0.034
Promedio	0.041 l/s

Diámetro = 0.2 m

#### Método Jacob

Gradiente (ln) = 0.0736  
 $T = Q^2 / 4 \pi^2 S$        $Q = 0.041$  l/s  
 $T = 0.00904$  m<sup>2</sup>/s  
 4 m<sup>2</sup>/d

#### Método Banks (1992)

Abatimiento (ft) 0.75      0.23 m  
 Capacidad específica 16 m<sup>3</sup>/d  
 Transmisividad = Capacidad específica / 0.9 = 17 m<sup>2</sup>/d

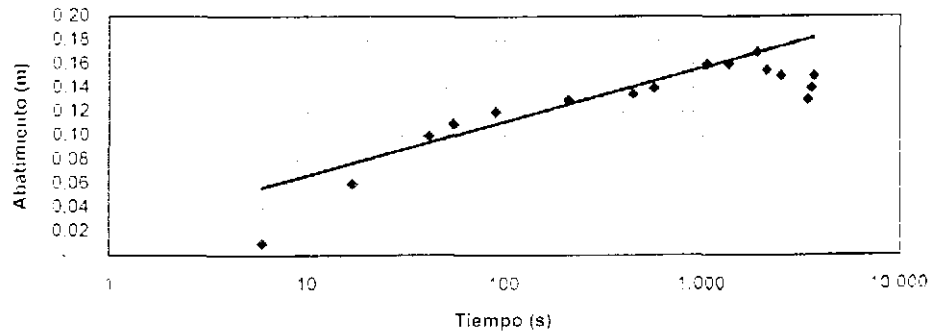
Datos y cálculos verificados por DB 15/11/99

DM1	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Abatimiento	Datos usados por la línea de Orientación
	s	m bwt	m	
	15:15:10	1,50	-	
	15:15:13	1,51	0,01	
	15:15:17	1,55	0,06	0,06
	15:15:51	1,60	0,10	0,10
	15:16:05	1,61	0,11	0,11
	15:16:40	1,62	0,12	0,12
	15:18:40	1,63	0,13	0,13
	15:22:39	1,64	0,14	0,14
	15:24:43	1,64	0,14	0,14
	15:32:42	1,66	0,16	0,16
	15:37:42	1,66	0,16	0,16
	15:46:39	1,67	0,17	0,17
	15:50:24	1,66	0,16	
	15:56:52	1,55	0,15	
	16:11:57	1,63	0,13	
	16:14:26	1,64	0,14	
	16:16:05	1,55	0,15	

Ingreso de datos verificado por DB 3/12/99

### Prueba de Abatimiento DM1

$$y = 0,0196 \ln(x) + 0,0215$$



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
15:16:00	0,050
15:17:30	0,060
15:18:18	0,062
15:20:00	0,051
15:22:22	0,060
15:23:00	0,053
15:25:15	0,060
15:23:00	0,057
15:28:00	0,059
Promedio	0,057 l/s

Diámetro =

#### Método Jacob

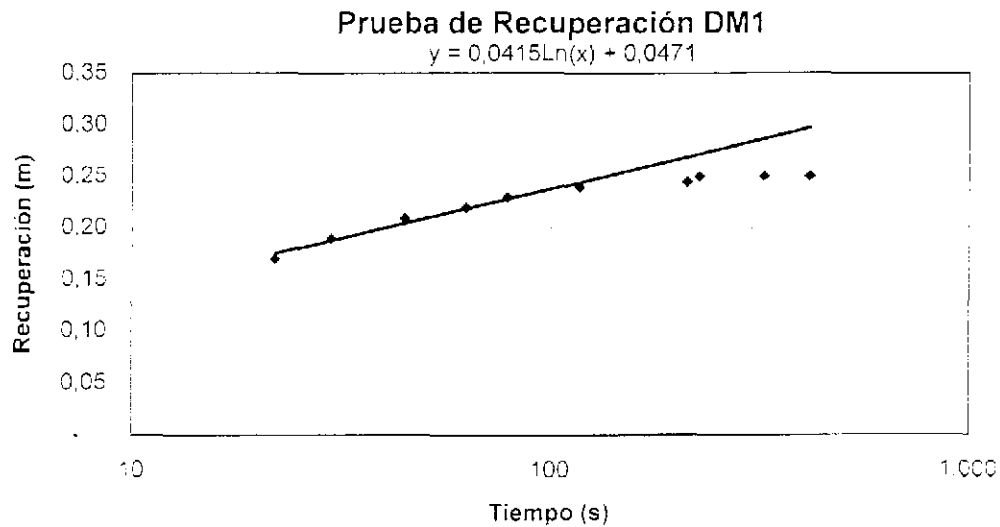
Gradiente (ln) = 0,0196  
 $T = Q/4 \cdot \pi \cdot \text{grad}$        $Q = 0,057 \text{ l/s}$   
 $T = 0,00023 \text{ m}^2/\text{s}$   
 $20 \text{ m}^2/\text{d}$

#### Método Banks (1992)

Abatimiento (m) = 0,17  
Capacidad específica =  $29 \text{ m}^3/\text{d}$   
Transmisividad = Capacidad específica / 0,9 =  $32 \text{ m}^3/\text{d}$

DM1	Tiempo desde el cese del bombeo	Nivel del Agua	Recuperación	Datos usados por la línea de Orientación
Tiempo	s	m bwt	m	
16:32:16		1,68		
16:32:23		1,69		
16:32:28		1,70		
16:32:34		1,71		
16:32:39		1,72		
16:32:46		1,73		
16:32:53		1,74		
16:33:07		1,75		
16:33:12		1,76		
16:33:20	-	1,79		
16:33:42	22	1,62	0,17	0,17
16:33:50	30	1,60	0,19	0,19
16:34:05	45	1,58	0,21	0,21
16:34:23	63	1,57	0,22	0,22
16:34:39	79	1,56	0,23	0,23
16:35:17	117	1,55	0,24	0,24
16:35:50	210	1,55	0,25	
16:37:05	225	1,54	0,25	
16:38:41	321	1,54	0,25	
16:40:14	414	1,54	0,25	

Datos verificados por DB 3/12/99



Bomba NB retirada del agua, mientras continuaba el bombeo a las 16:33:20

**Datos de Bombeo**

Tiempo	Tasa (l/s)
Bombeo	0,057
Promedio	0,057 l/s

Diametro =

**Método Jacob**

Gradiente (h) =	0,0415
$T = Q^2 / 4 \pi \text{ grad}$	$Q = 0,057 \text{ l/s}$
$T =$	$0,00011 \text{ m}^2/\text{s}$
	$9 \text{ m}^2/\text{d}$

Prueba de recuperación no es confiable debido a que el nivel del agua fue perturbado por la remoción de la bomba y escorrentía de agua de la manguera

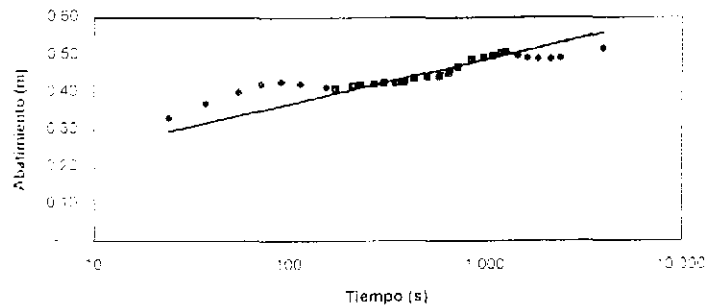
Cálculos verificados por DB 3/12/99

DM2	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Nivel de Agua	Abatimiento	Datos usados por la línea de Orientación
	s	pies bwt	m bwt	m	
	11:21:14	4.68	1.43	-	
	11:21:38	5.77	1.76	0.33	
	11:21:51	5.90	1.80	0.37	
	11:22:09	6.00	1.83	0.40	
	11:22:25	6.07	1.85	0.42	
	11:22:45	6.09	1.86	0.43	
	11:23:08	6.07	1.85	0.42	
	11:23:49	6.04	1.84	0.41	
	11:24:07	6.03	1.84	0.41	0.41
	11:24:45	6.05	1.84	0.42	0.42
	11:25:05	6.06	1.85	0.42	0.42
	11:25:46	6.07	1.85	0.42	0.42
	11:25:59	6.08	1.85	0.43	0.43
	11:27:03	6.08	1.85	0.43	0.43
	11:27:33	6.09	1.85	0.43	0.43
	11:28:27	6.12	1.87	0.44	0.44
	11:29:35	6.13	1.87	0.44	0.44
	11:30:57	6.14	1.87	0.45	0.45
	11:32:01	6.17	1.88	0.45	0.45
	11:33:10	6.22	1.90	0.47	0.47
	11:35:15	6.28	1.91	0.49	0.49
	11:37:18	6.30	1.92	0.49	0.49
	11:39:12	6.32	1.92	0.50	0.50
	11:41:01	6.34	1.93	0.51	0.51
	11:42:13	6.35	1.94	0.51	0.51
	11:45:21	6.32	1.93	0.50	
	11:48:05	6.30	1.92	0.49	
	11:51:47	6.29	1.92	0.49	
	11:55:45	6.29	1.92	0.49	
	12:03:55	6.30	1.92	0.49	
	12:27:04	6.38	1.94	0.52	

Registro de datos verificado por DB 8/12/99

### Prueba de Abatimiento DM2

$$y = 0.0517 \ln(x) + 0.1321$$



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
11:22:20	0.072
	0.083
11:24:40	0.074
	0.083
11:27:00	0.069
	0.083
11:29:17	0.077

Promedio = 0.077 l/s

Diámetro = 51 mm

#### Método Jacob

Gradiente (ln) = 0.0517  
 $T = 0.4$  a grad = 0.1 = 0.077 l/s  
 $1 = 0.00012$  m/s  
 $10$  m<sup>2</sup>/d

#### Método Banks (1992)

Abatimiento (m) = 0.51  
 Capacidad específica = 13 m<sup>2</sup>/d  
 Transmisividad = Capacidad específica / 0.9 = 15 m<sup>2</sup>/d

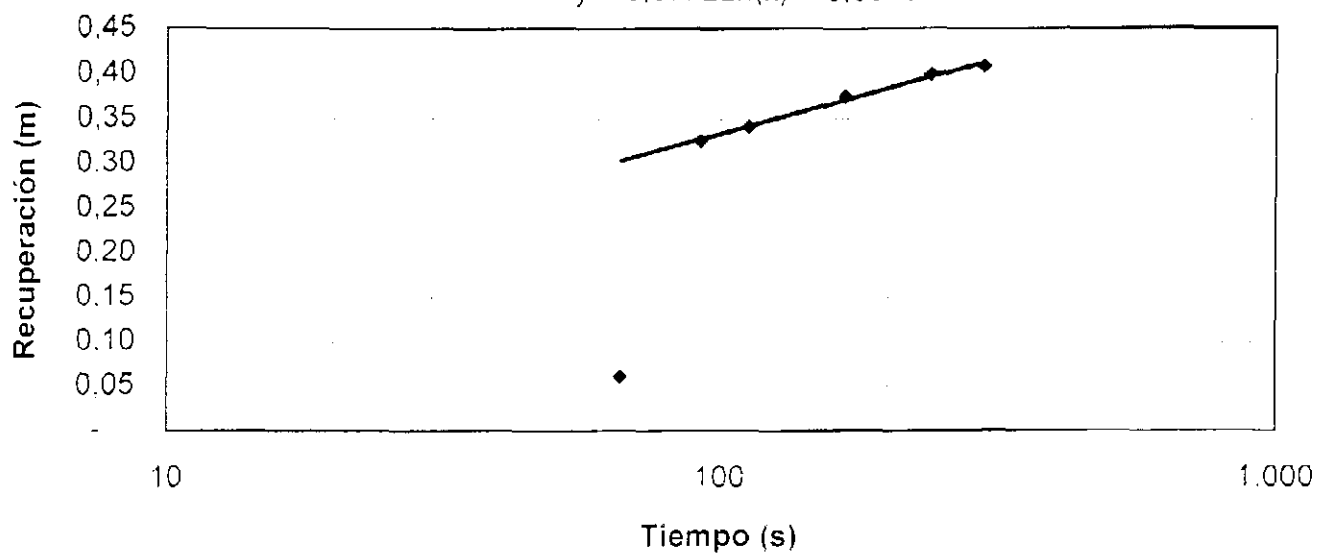
Cálculos verificados por DB 8/12/99

DM2	Tiempo desde el cese del bombeo	Nivel del Agua	Nivel del Agua	Recuperación	Datos usados por la línea de Orientación
	s	pies bwt	m bwt	m	
	12:27:04	6,38	1,94	-	
	12:28:10	6,18	1,88	0,06	
	12:28:36	5,31	1,62	0,33	0,33
	12:28:56	5,26	1,60	0,34	0,34
	12:29:51	5,15	1,57	0,37	0,37
	12:31:03	5,07	1,55	0,40	0,40
	12:32:00	5,04	1,54	0,41	0,41

Ingreso de datos verificado por DB 8/12/99

### Prueba de Recuperación DM2

$$y = 0,0722\ln(x) + 0,0013$$



#### Datos de Bombeo

Promedio	0,077	l/s
Diámetro =	51 mm	
<b>Método Jacob</b>		
Gradiente (ln) =	0,0722	
$T = Q/4 \cdot \pi \cdot \text{grad}$	Q =	0,077 l/s
T	0,00008	m <sup>2</sup> /s
	7	m <sup>2</sup> /d

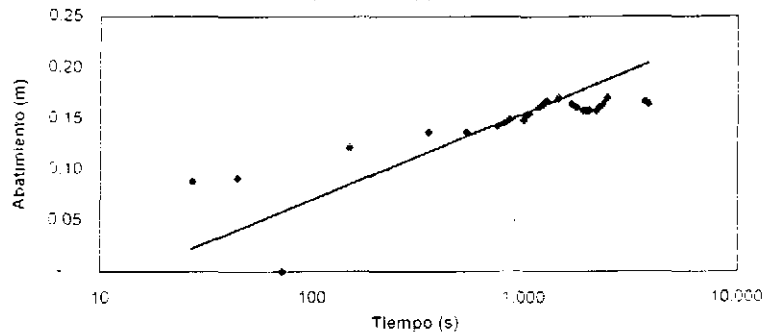
Cálculos verificados por DB 8/12/99

DM4	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Nivel de Agua	Abatimiento	Datos usados para línea de orientación
	s	pies bwt	m bwt	m	
9:51:40	-	8.50	2.59	-	
9:52:07	27	8.79	2.66	0.09	
9:52:24	44	8.80	2.68	0.09	
9:52:52	72	8.50	2.59	-	
9:54:10	150	8.90	2.71	0.12	
9:57:35	358	8.95	2.73	0.14	
10:00:39	539	8.95	2.73	0.14	0.14
10:04:10	750	8.97	2.73	0.14	0.14
10:05:05	805	8.98	2.74	0.15	0.15
10:05:50	850	8.99	2.74	0.15	0.15
10:08:10	990	8.99	2.74	0.15	0.15
10:09:04	1,044	9.01	2.75	0.16	0.16
10:11:02	1,162	9.03	2.75	0.16	0.16
10:11:53	1,213	9.04	2.76	0.16	0.16
10:12:41	1,261	9.05	2.76	0.17	0.17
10:15:34	1,434	9.06	2.76	0.17	0.17
10:19:12	1,652	9.04	2.76	0.16	
10:20:35	1,735	9.03	2.75	0.16	
10:22:53	1,873	9.02	2.75	0.16	
10:24:00	1,940	9.02	2.75	0.16	
10:25:00	2,000	9.02	2.75	0.16	
10:27:33	2,153	9.02	2.75	0.16	
10:28:36	2,216	9.03	2.75	0.16	
10:30:05	2,308	9.04	2.75	0.16	
10:32:04	2,424	9.06	2.76	0.17	
10:52:17	3,637	9.05	2.75	0.17	
10:54:30	3,770	9.04	2.75	0.16	

Entrada de Datos Revisados por DB 8/2/99

### DM4 Prueba de Abatimiento

$$y = 0.0369 \ln(x) - 0.0993$$



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
9:52:50	0.075
	0.077
	0.071
	0.077
9:55:00	0.068
Promedio	0.074 l/s
Diámetro =	102 mm

#### Método Jacob

Gradiente (ln) =	0.0369
$T = Q/4 \pi \text{ grad}$	$Q = 0.074 \text{ l/s}$
$T$	$0.00016 \text{ m}^2/\text{s}$
	$14 \text{ m}^2/\text{d}$

#### Método Banks (1992)

Abatimiento (m)	0.17
Capacidad Especifica	$37 \text{ m}^2/\text{d}$
Transmisividad = Capacidad Especifica / 0.9 =	$42 \text{ m}^2/\text{d}$

Cálculos revisados por DB 5/12/99

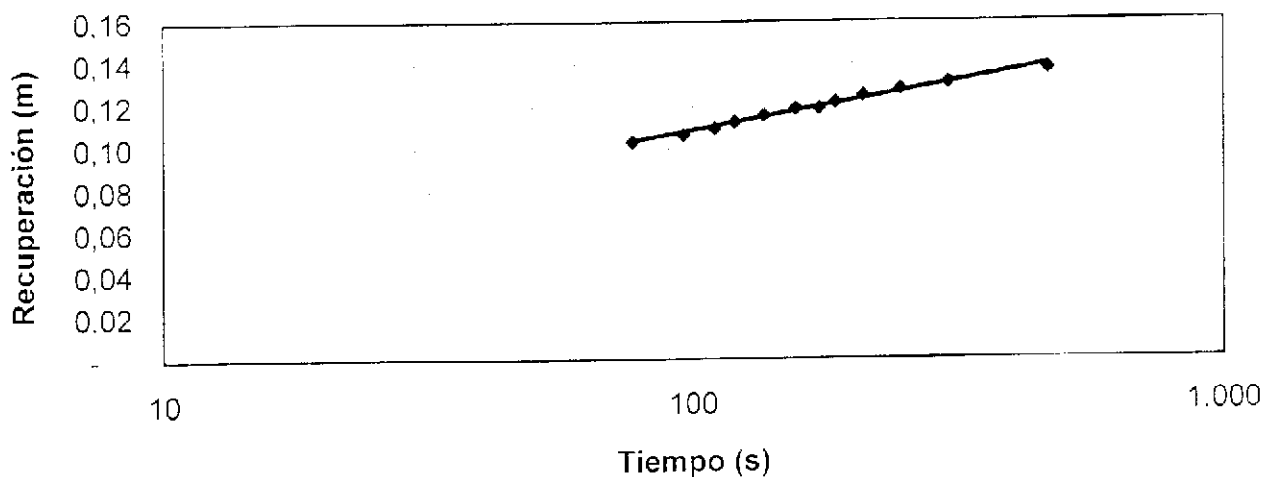


DM4	Tiempo desde el cese del bombeo	Nivel del Agua	Nivel del Agua	Recuperación	Datos usados por la línea de Orientación
Tiempo	s	ft bwt	m bwt	m	
10:54:30	-	9,04	2,76	-	-
10:55:47	77	8,70	2,65	0,10	0,10
10:56:06	96	8,69	2,65	0,11	0,11
10:56:20	110	8,68	2,65	0,11	0,11
10:56:30	120	8,67	2,64	0,11	0,11
10:56:46	136	8,66	2,64	0,12	0,12
10:57:06	156	8,65	2,64	0,12	0,12
10:57:23	173	8,65	2,64	0,12	0,12
10:57:36	186	8,64	2,63	0,12	0,12
10:58:00	210	8,63	2,63	0,12	0,12
10:58:37	247	8,62	2,63	0,13	0,13
10:59:35	305	8,61	2,62	0,13	0,13
11:02:19	469	8,59	2,62	0,14	0,14

Data input checked by DB 8/12/99

### Prueba de Recuperación DM4

$$y = 0,0196 \ln(x) + 0,0187$$



#### Datos de Bombeo

Promedio 0.074 l/s

Dámetro = 102 mm

#### Método Jacob

Gradiente (ln) = 0,0196

T = Q/4 pi grad Q = 0,074 l/s

T 0,00030 m<sup>2</sup>/s

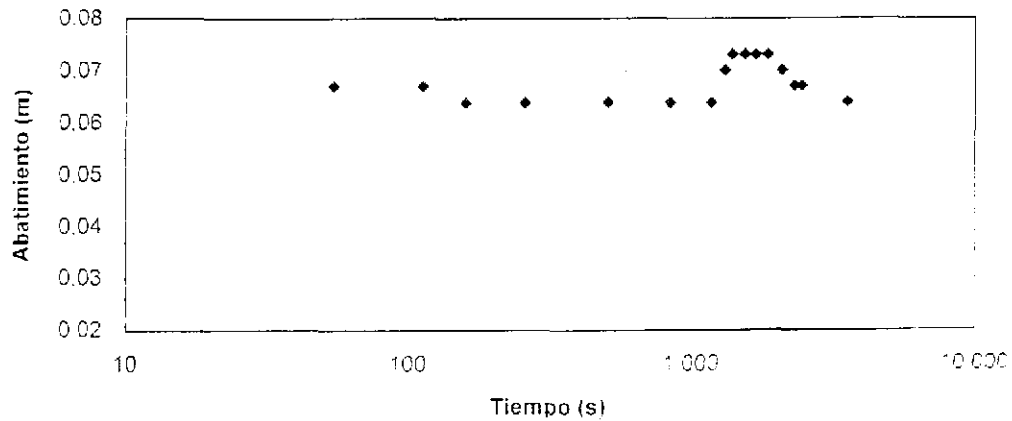
26 m<sup>2</sup>/d

Cálculos verificados por DB 8/12/99

DM5	Tiempo desde el inicio del bombeo	Nivel de Agua	Nivel de Agua	Abatimiento
	s	pies bwt	m bwt	m
14:27:00	-	17.40	5.30	-
14:27:54	54	17.62	5.37	0.07
14:28:52	112	17.62	5.37	0.07
14:29:36	159	17.61	5.37	0.06
14:31:18	258	17.61	5.37	0.06
14:35:26	506	17.61	5.37	0.06
14:40:55	835	17.61	5.37	0.06
14:46:24	1.164	17.61	5.37	0.06
14:48:45	1.305	17.63	5.37	0.07
14:50:00	1.380	17.64	5.38	0.07
14:52:30	1.530	17.64	5.38	0.07
14:54:50	1.670	17.64	5.38	0.07
14:57:40	1.840	17.64	5.38	0.07
15:01:20	2.060	17.63	5.37	0.07
15:05:00	2.280	17.62	5.37	0.07
15:07:20	2.420	17.62	5.37	0.07
15:25:25	3.506	17.61	5.37	0.06

Ingreso de datos verificado por DB 8/12/99

### Prueba de Abatimiento DM5



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
14:29:00	0.042
	0.063
14:32:30	0.056
	0.063
14:35:20	0.062
	0.063
Promedio	0.058 l/s
Diámetro =	51 mm

Método Jacob No analizado

#### Método Banks (1992)

Abatimiento (m)	0.07
Capacidad específica	71 m <sup>2</sup> /d
Transmisividad = Capacidad específica / 0.9 =	79 m <sup>2</sup> /d

Cálculos verificados por DB 8/12/99

## DM5 - Prueba de Recuperación

DM5	Tiempo desde el cese del bombeo	Nivel del Agua	Nivel del Agua	Recuperación
Tiempo	s	pies bwt	m bwt	m
15:25:50	-	17,61	5,37	-
15:25:54	4	17,51	5,34	0,03
15:26:29	39	17,40	5,30	0,06

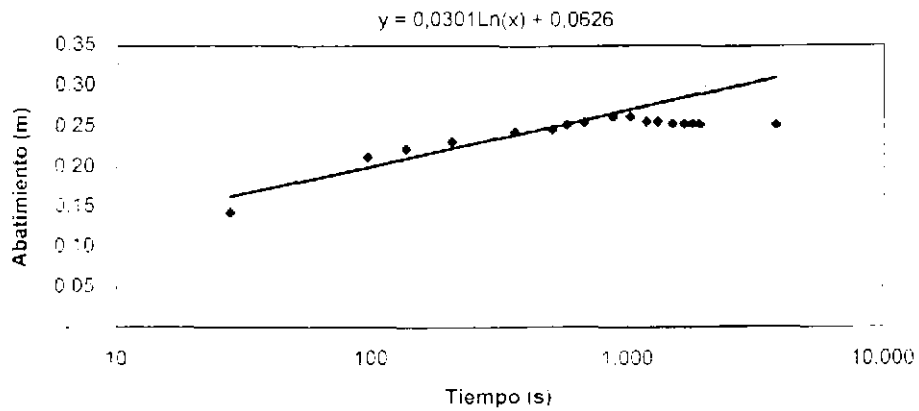
Datos verificados por DB 8/12/99

Datos no analizables

DM6	Tiempo desde el Inicio del bombeo	Nivel de Agua	Nivel de Agua	Abatimiento	Datos usados para línea de orientación
	s	pies bwt	m bwt	m	
	15:53:30	5,97	1,82	-	-
	15:53:58	6,44	1,96	0,14	0,14
	15:55:06	6,67	2,03	0,21	0,21
	15:55:46	6,70	2,04	0,22	0,22
	15:56:56	6,73	2,05	0,23	0,23
	15:59:30	6,77	2,06	0,24	0,24
	16:01:57	6,78	2,07	0,25	0,25
	16:03:03	6,80	2,07	0,25	0,25
	16:04:40	6,81	2,08	0,26	0,26
	16:08:01	6,83	2,08	0,26	0,26
	16:10:25	6,83	2,08	0,26	0,26
	16:13:00	6,81	2,08	0,26	
	16:15:07	6,81	2,08	0,26	
	16:18:15	6,80	2,07	0,25	
	16:20:57	6,80	2,07	0,25	
	16:23:08	6,80	2,07	0,25	
	16:25:00	6,80	2,07	0,25	
	16:56:27	6,80	2,07	0,25	

Datos verificados por DB 6/12/99

### Prueba de Abatimiento DM6



#### Datos de Bombeo

Tiempo	Tasa (l/s)
15:54:30	0,078
	0,091
15:56:40	0,079
	0,091
15:58:50	0,080
	0,091
Promedio	0,085 l/s
Diámetro =	102 mm

#### Método Jacob

Gradiente (m) =	0,0301	
$T = Q^2 / 4 \pi^2 \text{ grad}$	$Q =$	0,005 l/s
T	0,00022 m <sup>2</sup> /s	
	19 m <sup>2</sup> /d	

#### Método Banks (1992)

Abatimiento (m)		0,26
Capacidad específica	28 m <sup>3</sup> /d	
Transmisividad = Capacidad específica / C 9 =		31 m <sup>2</sup> /d

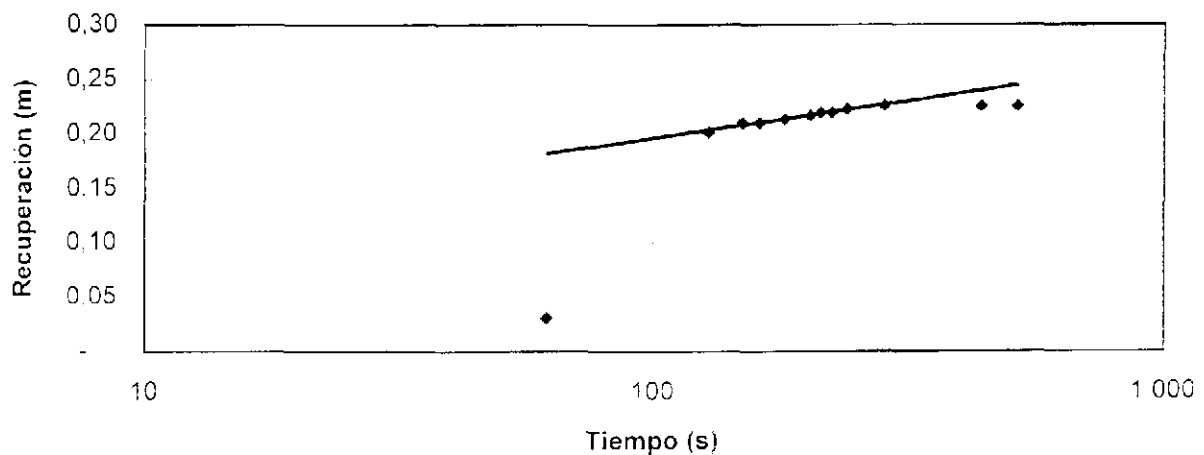
Cálculos verificados por DB 6/12/99

DM6	Tiempo desde el cese del bombeo	Nivel del Agua	Nivel del Agua	Recuperación	Datos usados por la línea de Orientación
	s	pies bwt	m bwt	m	
	16:56:27	6.80	2.07	-	
	16:57:29	6.70	2.04	0,03	
	16:58:35	6.14	1,87	0,20	0,20
	16:58:56	6,11	1,86	0,21	0,21
	16:59:08	6,11	1,86	0,21	0,21
	16:59:27	6,10	1,86	0,21	0,21
	16:59:49	6,09	1,86	0,22	0,22
	16:59:59	6,08	1,85	0,22	0,22
	17:00:10	6,08	1,85	0,22	0,22
	17:00:26	6,07	1,85	0,22	0,22
	17:01:10	6,06	1,85	0,23	0,23
	17:03:46	6,06	1,85	0,23	
	17:05:05	6,06	1,85	0,23	

Ingreso de datos verificado por DB 8/12/99

### Prueba de Recuperación DM6

$$y = 0,0295 \ln(x) + 0,0605$$



#### Datos de Bombeo

Promedio 0.085 l/s

Diámetro = 102 mm

#### Método Jacob

Gradiente (ln) = 0,0295

$T = Q/4 \cdot \pi \cdot \text{grad}$  Q = 0.085 l/s

T 0.00023 m<sup>2</sup>/s

20 m<sup>2</sup>/d

Cálculos verificados por DB 8/12/99

**APENDICE 3A**  
**RESULTADOS DE ANALISIS PARA AGUAS SUBTERRANEAS**  
**DE LABORATORIOS**

Pozo	Fecha	Tipo	Temp.	pH	Campo CE	Alcalinidad Campo (M)	Alcalinidad Campo (P)	Cl	SO4	PO4	F	pH (lab)	CE (lab)	HCO3	CO3	Alcal. (lab)	NO3+ NO2 como N	NO2-N
			°C		uS/cm	meq/l	meq/l						mg/l			mg/l	mg/l	
PP7	09-Nov-99	Y	14.0	7.83	796	4.98	0	68.7	146.0	<10	<1	na	na	286.7	12.0	na	1.07	<0.1
PP17	09-Nov-99	Y	13.0	7.93	782	5.13	0	63.2	191.0	<10	<1	na	na	250.1	15.0	na	1.38	<0.1
PP15	09-Nov-99	Y	15.0	8.10	817	5.70	0	72.6	134.0	<10	<1	na	na	292.8	18.0	na	1.29	<0.1
PP14	09-Nov-99	Y	16.0	8.06	895	5.70	0	134.0	106.0	<10	<1	na	na	292.8	18.0	na	0.79	<0.1
PP12	09-Nov-99	Y	14.0	8.08	764	5.43	0	68.4	112.0	<10	<1	na	na	289.8	15.0	na	0.93	<0.1
PP13	09-Nov-99	Y	15.0	8.03	842	6.07	0	88.2	111.0	<10	<1	na	na	314.2	18.0	na	0.50	<0.1
SeLA2	09-Nov-99	Y	14.5	7.86	1,231	6.67	0	215.0	103.0	<10	<1	na	na	356.9	9.0	na	0.85	<0.1
SeLA3	09-Nov-99	Y	14.5	7.75	1,563	6.17	0	404.0	71.8	<10	<1	na	na	320.3	21.0	na	<0.5	<0.1
PPO-BP-107	09-Nov-99	Y	13.0	8.03	1,301	4.27	0	225.0	228.0	<10	<1	na	na	207.4	6.0	na	<0.5	<0.1
Agua mina C.1	10-Nov-99	S	16.2	2.10	43,600	-	0	17,225.0	2,145.0	na	na	na	na	na	na	na	na	<0.1
Agua mina C.2	10-Nov-99	S	14.4	2.30	38,100	-	0	17,700.0	5,420.0	<200	<20	na	na	<5	<5	na	<0.5	<1
Rio Tagarete	10-Nov-99	S	17.6	8.41	6,380	5.32	0.67	2,630.0	670.0	<50	<5	na	na	256.2	27.0	na	5.93	<0.5
PPSJ-1	10-Nov-99	N	16.3	3.23	16,900	-	0	6,550.0	4,045.0	<50	<5	na	na	<5	<5	na	<0.5	<0.5
PPSJ-10	11-Nov-99	N	14.4	6.37	19,600	18.53	0	7,040.0	1,380.0	<25	<1	na	na	1,128.0	<3	17.50	<0.5	na
DUP	11-Nov-99	C	na	na	na	na	na	7,040.0	1,350.0	<25	<1	na	na	1,128.0	<3	17.55	<0.5	na
BLA	11-Nov-99	C	na	na	na	na	na	<0.2	<0.5	<10	<1	na	na	10.4	<3	0.17	<0.5	na
PPO14	11-Nov-99	N	14.8	7.05	43,800	6.60	0	15,500.0	1,540.0	<100	<1	na	na	402.6	<3	6.15	1.30	na
SeLA4	11-Nov-99	N	14.4	7.76	1,211	6.17	0	232.0	75.7	<10	<1	na	na	378.2	<3	6.15	<0.5	na
PPO22	11-Nov-99	N	15.6	7.82	1,399	4.53	0	389.0	31.7	<10	<1	na	na	274.5	<3	4.45	<0.5	na
PP10	12-Nov-99	N	21.8	7.17	1,790	8.63	0	327.0	90.5	<10	<1	na	na	500.2	<3	8.20	1.01	na
PP9	12-Nov-99	N	15.6	7.90	1,000	6.27	0	135.0	85.7	<10	<1	na	na	366.0	<3	6.00	0.60	na
PPA1	12-Nov-99	N	16.2	7.67	5,770	13.30	0	1,750.0	5.9	<10	<1	na	na	790.0	<3	12.95	<0.5	na
PP11	12-Nov-99	Y	15.1	7.80	863	6.23	0	88.5	103.5	<10	<1	na	na	369.1	<3	6.05	1.04	na
PPO PI-10	12-Nov-99	N	13.5	7.76	876	6.30	0	73.9	86.1	<10	<1	na	na	372.1	<3	6.10	0.51	na
PPO21	13-Nov-99	N	15.1	7.37	3,240	11.37	0	998.0	74.5	<10	<1	na	na	616.1	<3	10.10	<0.5	na
PPSJ-7	13-Nov-99	N	20.4	6.25	5,570	4.13	0	1,350.0	855.0	<10	<1	na	na	207.4	<3	3.40	<0.5	na
PPO-BP-112	13-Nov-99	N	14.5	7.32	850	3.85	0	51.2	288.0	<10	<1	na	na	176.9	<3	2.90	<0.5	na
PPO-BP-106	15-Nov-99	N	14.0	7.51	1,006	6.27	0	167.0	77.4	<10	<1	na	na	283.7	24.0	5.45	<0.5	na
PPO-BP-111	15-Nov-99	N	16.7	7.64	50,000	7.25	0	17,500.0	2,330.0	<100	<1	na	na	305.0	42.0	6.40	2.32	na
REX	29-Nov-99	Sp	13.8	7.54	1,706	5.63	0	356.0	356.2	<10	<1	na	na	335.5	<3	5.50	2.03	<0.1
PPO13	30-Nov-99	N	14.5	7.18	51,500	5.37	0	20,545.0	2,400.0	<10	<1	na	na	311.1	<3	5.10	1.85	<0.1
PPO15	30-Nov-99	N	14.1	7.15	22,000	8.00	0	8,729.0	1,590.0	<10	<1	na	na	433.1	<3	7.10	1.28	<0.1
PPO16	30-Nov-99	N	15.1	7.61	3,100	7.37	0	936.0	160.5	<10	<1	na	na	420.9	<3	6.90	0.12	<0.1
DM1	30-Nov-99	N	15.1	7.76	1,894	4.30	0	427.0	16.6	<10	<1	na	na	250.1	<3	4.10	0.25	<0.1
DM2	7-Dic-99	N	15.5	8.55	2,030	5.87	1.03	602.0	68.1	<10	<1	7.49	3,350.0	253.2	<3	4.15	0.56	na
DM4	7-Dic-99	N	13.8	7.00	8,200	5.80	0	2,910.0	328.0	<10	<1	8.15	8,870.0	302.0	<3	4.95	0.73	na
DM5	7-Dic-99	N	16.3	6.34	6,640	7.07	0	1,690.0	1,380.0	<10	<1	7.89	7,030.0	372.1	<3	6.10	9.80	na
DM6	7-Dic-99	N	14.1	7.21	40,700	9.03	0	16,310.0	3,350.0	<10	<1	7.45	62,200.0	524.6	<3	8.60	3.42	na
BLA2		C	na	na	na	na	na	<0.2	<0.5	<10	<1	5.72	1.2	14.0	<3	0.23	<0.5	na

na = no analizado

Y = pozo de producción N = pozo de monitoreo, Sp = vertiente C = muestra de control S = agua superficial









**APENDICE 3B**  
**RESULTADOS ANALITICOS DE LOS ANALISIS DE AGUA SUBTERRANEA**  
**COMPARADOS CON LOS ESTANDARES DE CALIDAD DE AGUA DE BOLIVIA Y**  
**DE LA USEPA**

Se presentan solamente las determinaciones de laboratorio

Los valores de elementos traza están en partes por billón. Los valores negativos son iguales a los No Detectados en ese límite inferior. Los valores > 99999 son mayores que los rangos de trabajo del instrumento.

Table with columns: Muestra ID, Li, Be, Mg, Al, Si, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr tot, Mn, Fe, Co, Ru, Pd, Ag, Cd. Rows include standards (Clase A, Clase B, USEPA, Boliviano) and samples (PF1-PF17, PLAGARETE, LA COLUMNA CANAL 2).

Table with columns: Muestra ID, In, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Ni, Cu, Zn. Rows include standards (Clase A, Clase B, USEPA, Boliviano) and samples (PF1-PF17, PLAGARETE, LA COLUMNA CANAL 2).

Table with columns: Muestra ID, Ga, Ge, As, Se, Br, Rh, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf. Rows include standards (Clase A, Clase B, USEPA, Boliviano) and samples (PF1-PF17, PLAGARETE, LA COLUMNA CANAL 2).

Table with columns: Muestra ID, Ta, W, Re, Os, Pt, Au, Tl, Pb, Bi, Th, U. Rows include standards (Clase A, Clase B, USEPA, Boliviano) and samples (PF1-PF17, PLAGARETE, LA COLUMNA CANAL 2).

**Actlabs - Hidrogeoquímica, Trabajo #: 18841**

Los valores de elementos traza están en partes por billón. Los valores negativos son iguales a los No Detectados en ese límite inferior.

Valores = 999999 son mayores que los rangos de trabajo del instrumento.

Muestra ID:	Cl <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	F <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	Nox	NO <sub>2</sub> <sup>-2</sup> -N	Hg	Na <sup>+1</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+1</sup>
<b>Estándar Boliviano, Clase A (agua potable)</b>	250 mg/l	300 mg/l	400 mg/l	1.7 mg/l	NPL	NPL	4.5 mg/l	0.30 mg/l	0.001 mg/l	200 mg/l	0.05 mg/l
<b>Estándar Boliviano, Clase B (agua de irrigación)</b>	300 mg/l	400 mg/l	500 mg/l	1.7 mg/l	NPL	NPL	11.3 mg/l	0.30 mg/l	0.001 mg/l	200 mg/l	1.0 mg/l
<b>Estándar USEPA</b>	250 mg/l	250 mg/l	NPL	2.0 mg/l	NPL	NPL	10 mg/l	1.00 mg/l	0.002 mg/l	NPL	5.14 mg/l
<b>Estándar Boliviano, (descargas líquidas)</b>	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	0.002 mg/l	NPL	NPL
S7-PP7	69	146	-10	-1	287	12	1.07	-0.10	-0.0010	172	-0.50
S7-PP12	68	112	-10	-1	290	15	0.93	-0.10	-0.0010	168	-0.50
S7PP13	88	111	-10	-1	314	18	0.50	-0.10	-0.0010	186	-0.50
S7-PP-14	134	106	-10	-1	293	18	0.79	-0.10	-0.0010	197	-0.50
S7-PP-15	73	144	-10	-1	293	18	1.29	-0.10	-0.0010	179	-0.50
S7-PP-17	63	191	-10	-1	250	15	1.38	-0.10	-0.0010	149	-0.50
S7-SELA2	215	103	-10	-1	357	9	0.85	-0.10	-0.0010	<b>231</b>	-0.50
S7-SELA3	<b>404</b>	72	-10	-1	320	21	-0.50	-0.10	-0.0010	<b>299</b>	-0.50
S7-BP-107	225	2	-10	-1	207	6	-0.50	-0.10	-0.0010	190	-0.50
S7-PP-SJ1	<b>6,550</b>	<b>4,045</b>	-50	-5	-5	-5	-0.50	-0.50	-0.0010	<b>2,836</b>	-0.50
RIO TAGARETE	<b>2,630</b>	<b>670</b>	-50	-5	256	27	<b>5.93</b>	-0.50	-0.0010	<b>1,850</b>	<b>2.9</b>
AGUA DE MINA, CANAL 2	<b>17,700</b>	<b>5,420</b>	-200	-20	-5	-5	-0.50	-1.00	-0.0010	<b>11,395</b>	-5.00



Actlabs - Hidrogeoquímica, Trabajo #: 18841

Los valores de elementos traza están en partes por billón. Los valores negativos son iguales a los No Detectados en ese límite inferior. Valores = 999999 son mayores que los rangos de trabajo del instrumento.

Muestra ID:	Hf	Ta	W	Re	Os	Pt	Au	Tl	Pb	Bi	Th	U
<b>Estándar Boliviano, Clase A (agua potable)</b>	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	50 ug/l	NPL	NPL	20 ug/l
<b>Estándar Boliviano, Clase B (agua de irrigación)</b>	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	50 ug/l	NPL	NPL	NPL
<b>Estándar USEPA</b>	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	2 ug/l	15 ug/l	NPL	NPL	NPL
<b>Estándar Boliviano (descargas líquidas)</b>	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	600 ug/l	NPL	NPL	NPL
S7-BLA	-0.002	-0.01	-0.02	-0.001	-0.002	-0.02	-0.002	-0.005	1.5	0.77	-0.003	0.001
S7-SELA-4	-0.002	-0.01	-0.02	-0.001	-0.002	-0.02	-0.002	-0.005	0.9	0.10	0.005	0.858
S7-PPO-22	-0.002	-0.01	0.18	-0.001	-0.002	-0.02	-0.002	-0.005	0.4	0.36	0.007	0.055
S7-PP-9	0.002	-0.01	0.04	0.002	-0.002	-0.02	-0.002	0.044	1.3	0.51	0.011	4.05
S7-PP-11	-0.002	-0.01	-0.02	0.005	-0.002	-0.02	-0.002	-0.005	0.4	0.07	0.006	7.41
S7-PPO-P110	-0.002	-0.01	-0.02	0.003	-0.002	-0.02	-0.002	0.022	0.5	0.19	0.005	1.02
S7-PPO-BP-112	-0.002	-0.01	-0.02	0.007	-0.002	-0.02	-0.002	-0.005	0.8	0.07	0.006	1.35
S7-BP-106	-0.002	-0.01	-0.02	0.003	-0.002	-0.02	0.002	0.044	7.3	0.04	-0.003	4.42
S7-BP-106 Rep	-0.002	-0.01	-0.02	0.004	-0.002	-0.02	-0.002	0.055	8.4	0.05	-0.003	5.22
S7-PP-10	-0.004	-0.02	-0.04	0.004	-0.004	-0.04	-0.004	0.05	1.5	0.20	-0.006	2.57
S7-PPA-1	-0.008	-0.04	-0.08	-0.001	-0.008	-0.08	-0.008	-0.02	<b>69.7</b>	0.45	-0.012	0.382
S7-PPO-21	-0.008	-0.04	-0.08	0.001	-0.008	-0.08	-0.008	-0.02	3.3	0.07	-0.012	0.403
S7-PPSJ-7	-0.008	-0.04	-0.08	0.022	-0.008	-0.08	0.009	-0.02	3.9	0.06	0.024	0.322
S7-PPSJ-10	-0.010	-0.2	-0.4	-0.02	-0.04	-0.4	-0.04	0.5	4.1	1.0	-0.06	<b>25.2</b>
S7-DUP	-0.040	-0.2	-0.4	-0.02	-0.04	-0.4	-0.04	0.6	6.6	1.0	-0.05	<b>30.6</b>
S7-DUP Rep	-0.040	-0.2	-0.4	-0.02	-0.04	-0.4	-0.04	0.6	6.9	0.8	-0.06	<b>32.6</b>
S7-PPO-14	-0.080	-0.4	-0.8	-0.04	-0.08	-0.8	-0.08	-0.2	-4.0	-0.4	-0.12	0.47
S7-PPO-BP-111	-0.080	-0.4	-0.8	-0.04	-0.08	-0.8	-0.08	-0.2	-4.0	-0.4	-0.12	0.37

Los valores de elementos traza están en partes por billón. Los valores negativos son iguales a los No Detectados en ese límite inferior. Valores = 999999 son mayores que los rangos de trabajo del instrumento.

Muestra ID:	Cl <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	F <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	No <sub>x</sub>	Hg	Na <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+1</sup>	Alc.(meq/l)
<b>Estándar Boliviano, Clase A (agua potable)</b>	250 mg/l	300 mg/l	400 mg/l	1.7 mg/l	NPL	NPL	4.5 mg/l	0.001 mg/l	200 mg/l	0.05 mg/l	NPL
<b>Estándar Boliviano, Clase B (agua de irrigación)</b>	300 mg/l	400 mg/l	500 mg/l	1.7 mg/l	NPL	NPL	11.3 mg/l	0.001 mg/l	200 mg/l	1.0 mg/l	NPL
<b>Estándar USEPA</b>	250 mg/l	250 mg/l	NPL	2.0 mg/l	NPL	NPL	10 mg/l	0.002 mg/l	NPL	5.14 mg/l	NPL
<b>Estándar Boliviano (descargas líquidas)</b>	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	0.002 mg/l	NPL	NPL	NPL
S7-BLA	-0.20	-0.50	-10.00	<1	10	0	-0.50	-0.0010	-0.20	-0.05	0.17
S7-SELA-4	232	76	-10	<1	378	0	-0.50	-0.0010	<b>252</b>	<b>0.02</b>	6.15
S7-PPO-22	<b>389</b>	32	-10	<1	275	0	-0.50	-0.0010	<b>254</b>	<b>0.71</b>	4.45
S7-PP-9	135	86	-10	<1	366	-3	0.60	-0.0010	<b>232</b>	<b>0.48</b>	6.00
S7-PP-11	89	104	-10	<1	369	-3	1.04	-0.0010	196	<b>0.10</b>	6.10
S7-PPO-P110	74	86	-10	<1	372	-3	0.51	-0.0010	200	-0.05	6.10
S7-PPO-BP-112	51	288	-10	<1	177	-3	-0.50	-0.0010	112	<b>0.17</b>	2.90
S7-BP-106	167	77	-10	<1	284	24	-0.50	-0.0010	<b>233</b>	-0.05	5.50
S7-PP-10	<b>327</b>	91	-10	<1	500	-3	1.01	-0.0010	<b>423</b>	<b>1.80</b>	8.20
S7-PPA-1	<b>1,750</b>	6	-10	<1	790	-3	-0.50	-0.0010	<b>1,307</b>	<b>11.25</b>	13.00
S7-PPO-21	<b>998</b>	75	-10	<1	616	-3	-0.50	-0.0010	<b>806</b>	<b>0.14</b>	10.10
S7-PPSJ-7	<b>1,350</b>	<b>855</b>	-10	<1	207	-3	-0.50	-0.0010	<b>731</b>	-0.05	3.40
S7-PPSJ-10	<b>7,040</b>	<b>1,380</b>	-25	<1	1,128	0	-0.50	-0.0010	<b>3,791</b>	<b>0.18</b>	17.50
S7-DUP	<b>7,040</b>	<b>1,350</b>	-25	<1	1,128	0	-0.50	-0.0010	<b>3,731</b>	<b>0.18</b>	17.55
S7-PPO-14	<b>15,500</b>	<b>1,540</b>	-100	<1	403	0	1.30	-0.0010	<b>10,565</b>	<b>0.19</b>	6.15
S7-PPO-BP-111	<b>17,500</b>	<b>2,330</b>	-100	<1	305	42	2.32	-0.0010	<b>12,380</b>	-0.05	6.40







Los valores de elementos traza están en partes por billón. Los valores negativos son iguales a los No Detectados en ese límite inferior

Valores < 0.001 son máximos que los rangos de trabajo del instrumento

Muestra ID:	Li	Be	Mg	Al	Si	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Cu	Ni	Ag	Cd	In
Estándar Boliviano, Clase A (agua potable)	2,500 ug/l	1.0 ug/l	100,000 ug/l	200 ug/l	NPL	NPL	200,000 ug/l	NPL	NPL	100 ug/l	50 ug/l <sub>(iron)</sub>	500 ug/l	300 ug/l	100 ug/l	50 ug/l	50 ug/l	5 ug/l	NPL
Estándar Boliviano, Clase B (agua de irrigación)	2,500 ug/l	1.0 ug/l	100,000 ug/l	500 ug/l	NPL	NPL	300,000 ug/l	NPL	NPL	100 ug/l	50 ug/l <sub>(Cr<sup>VI</sup>)</sub>	1,000 ug/l	300 ug/l	200 ug/l	50 ug/l	50 ug/l	5 ug/l	NPL
Estándar USEPA Estándar Boliviano (descargas líquidas)	NPL	4.0 ug/l	NPL	200 ug/l	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	100 ug/l <sub>(iron)</sub>	50 ug/l	300 ug/l	NPL	NPL	100 ug/l	5 ug/l	NPL
Agua de Mina, canal 1 (DM-10)	19,800	19	356,000	271,000	19,500	137,000	760,000	-100	79	197	172	10,100	886,000	306	497	882	1,270	182
Agua de Mina, canal 1 (DM-10) REP	20,100	18	366,000	279,000	17,800	138,000	782,000	-100	87	207	153	10,500	840,000	314	562	1,110	1,310	188

Muestra ID:	Sn	Sb	Te	I	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Cu	Zn	Ga	Ge
Estándar Boliviano, Clase A (agua potable)	2,000 ug/l	10 ug/l	NPL	NPL	NPL	1,000 ug/l	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	50 ug/l	200 ug/l	NPL	NPL
Estándar Boliviano, Clase B (agua de irrigación)	2,000 ug/l	10 ug/l	NPL	NPL	NPL	1,000 ug/l	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	1,000 ug/l	200 ug/l	NPL	NPL
Estándar USEPA Estándar Boliviano (descargas líquidas)	NPL	6 ug/l	NPL	NPL	NPL	2,000 ug/l	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	1,000 ug/l	5,000 ug/l	NPL	NPL
Agua de Mina, canal 1 (DM-10)	73	1,180	-20	134	7,480	147	8.2	24	3.6	20	7.1	3.1	8.2	1.6	8,880	37,800	42	-1
Agua de Mina, canal 1 (DM-10) REP	84	1,330	-20	-100	7,670	113	7.6	24	3.8	19	7.2	3.3	8.8	1.5	9,660	38,400	43	-1

Muestra ID:	As	Se	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ru	Pd	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf
Estándar Boliviano, Clase A (agua potable)	50 ug/l	10 ug/l	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL
Estándar Boliviano, Clase B (agua de irrigación)	50 ug/l	10 ug/l	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL
Estándar USEPA Estándar Boliviano (descargas líquidas)	50 ug/l	50 ug/l	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL
Agua de Mina, canal 1 (DM-10)	14,300	-20	5,310	1,060	12,800	46	-3	-1	30	-2	-2	9.5	1.7	4.2	0.5	2.9	0.4	-0.2
Agua de Mina, canal 1 (DM-10) REP	14,100	36	5,370	1,090	13,300	47	-3	-1	18	-2	-2	9.4	1.6	4.2	0.5	2.9	0.4	-0.2

Muestra ID:	Ta	W	Re	Os	Pt	Au	Tl	Pb	Bi	Th	U
Estándar Boliviano, Clase A (agua potable)	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	50 ug/l	NPL	NPL	20 ug/l
Estándar Boliviano, Clase B (agua de irrigación)	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	50 ug/l	NPL	NPL	NPL
Estándar USEPA Estándar Boliviano (descargas líquidas)	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	NPL	2 ug/l	15 ug/l	NPL	NPL	NPL
Agua de Mina, canal 1 (DM-10)	-1	-2	0.1	0.2	2	0.5	36	31,700	32	5	23
Agua de Mina, canal 1 (DM-10) REP	-1	-2	0.1	0.2	2	0.5	38	32,400	50	7	18

Muestra ID:	TSS	TDS	Cl <sup>-1</sup>	SO4 <sup>2-</sup>	Na <sup>+1</sup>	Hg	Nox	NO2 <sup>-N</sup>	NH4 <sup>+</sup>
Estándar Boliviano, Clase A (agua potable)		NPL	250 mg/l	300 mg/l	200 mg/l	0.001 mg/l	4.5 mg/l	0.304 mg/l	0.05 mg/l
Estándar Boliviano, Clase B (agua de irrigación)		NPL	300 mg/l	400 mg/l	200 mg/l	0.001 mg/l	11.3 mg/l	0.304 mg/l	1.0 mg/l
Estándar USEPA Estándar Boliviano (descargas líquidas)	50.0 mg/l	NPL	250 mg/l	250 mg/l	NPL	0.002 mg/l	10 mg/l	1.0 mg/l	5.14 mg/l
Agua de Mina, canal 1 (DM-10)	384	38,014	17,225	2,148	8,645	-0.0010	---	<0.1	---

## APENDICE 4A

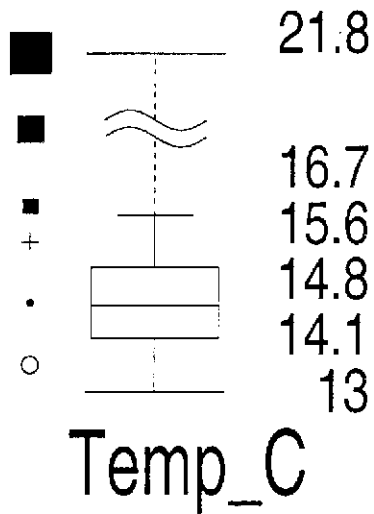
### MAPAS HIDROGEOQUIMICOS DE DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS SELECCIONADOS EN AGUAS SUBTERRANEAS DEL SISTEMA DEL ACUIFERO CUATERNARIO

El encabezado de cada mapa describe el determinante y la unidad de concentración.

Por ejemplo Cu,  $\mu\text{g/l}$  = cobre en  $\mu\text{g/l}$

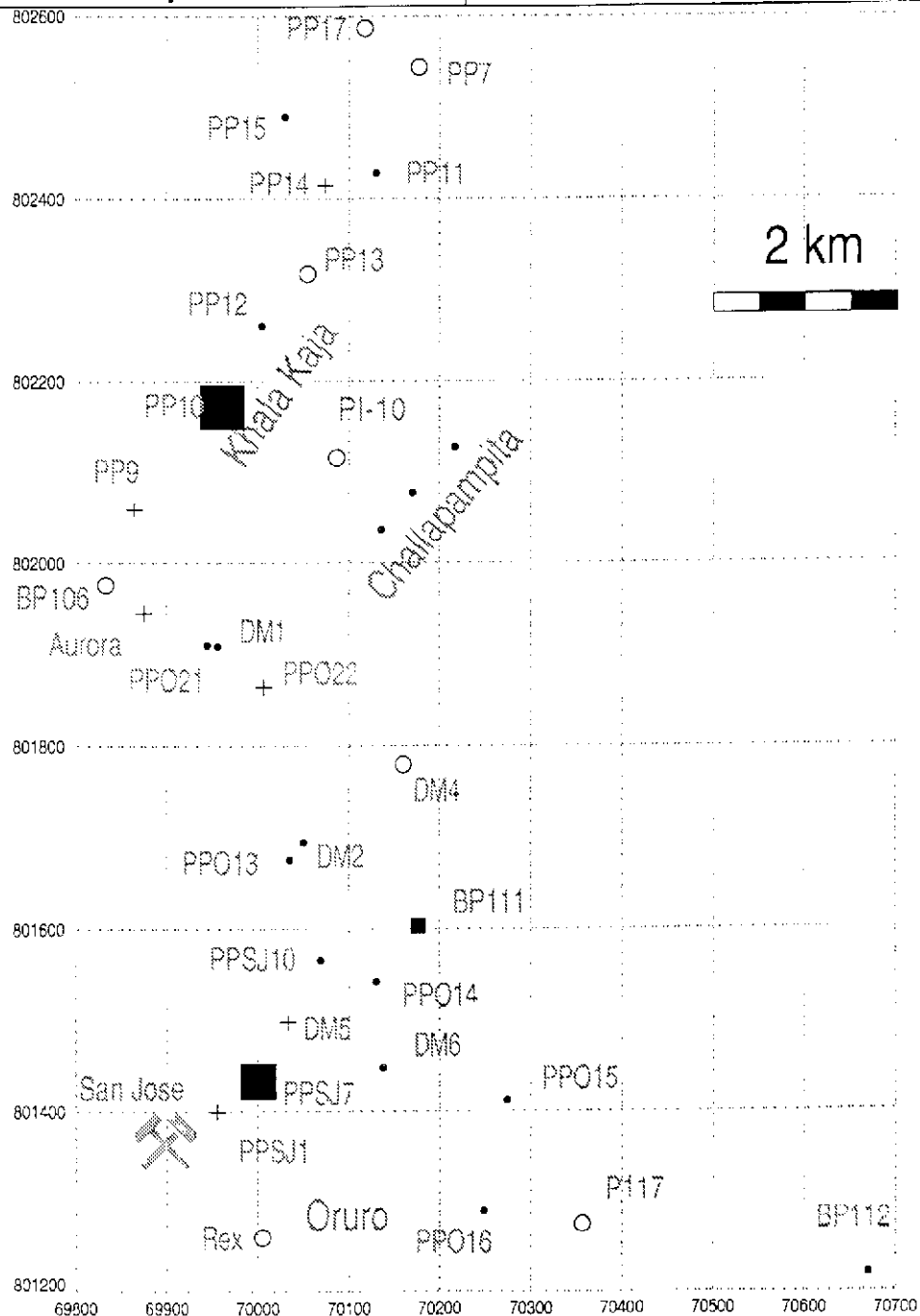
Se presentan los siguientes mapas:

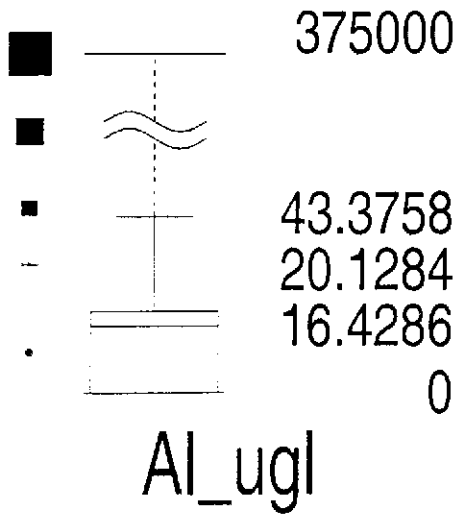
Temperatura, °C. medida en el campo	Th, $\mu\text{g/l}$
Conductividad Eléctrica (CE), $\mu\text{S/cm}$ . medida en campo	Tl, $\mu\text{g/l}$
pH. medido en el campo	U, $\mu\text{g/l}$
Ag, $\mu\text{g/l}$	V, $\mu\text{g/l}$
Al, $\mu\text{g/l}$	Y, $\mu\text{g/l}$
Alcalinidad, meq/l. titulado en el campo	Zn, $\mu\text{g/l}$
As, $\mu\text{g/l}$	
Au, $\mu\text{g/l}$	
B, $\mu\text{g/l}$ (junto de datos incompletos)	
Ba, $\mu\text{g/l}$	
Be, $\mu\text{g/l}$	
Bi, $\mu\text{g/l}$	
Br, $\mu\text{g/l}$	
Ca, mg/l	
Cd, $\mu\text{g/l}$	
Ce, $\mu\text{g/l}$	
Cl, mg/l	
Co, $\mu\text{g/l}$	
Cr, $\mu\text{g/l}$	
Cs, $\mu\text{g/l}$	
Cu, $\mu\text{g/l}$	
Eu, $\mu\text{g/l}$	
Fe, mg/l	
I, $\mu\text{g/l}$	
K, mg/l	
La, $\mu\text{g/l}$	
Li, $\mu\text{g/l}$	
Mg, mg/l	
Mn, mg/l	
Mo, $\mu\text{g/l}$	
Na, mg/l	
$\text{NH}_4^+$ , mg/l	
Ni, $\mu\text{g/l}$	
$\text{N}_{\text{ox}}$ , mg/l	
Pb, $\mu\text{g/l}$	
Rb, $\mu\text{g/l}$	
Sb, $\mu\text{g/l}$	
Se, $\mu\text{g/l}$	
Si, mg/l	
Sn, $\mu\text{g/l}$	
$\text{SO}_4^{2-}$ , mg/l	
Sr, $\mu\text{g/l}$	



Dames & Moore Norge 1999

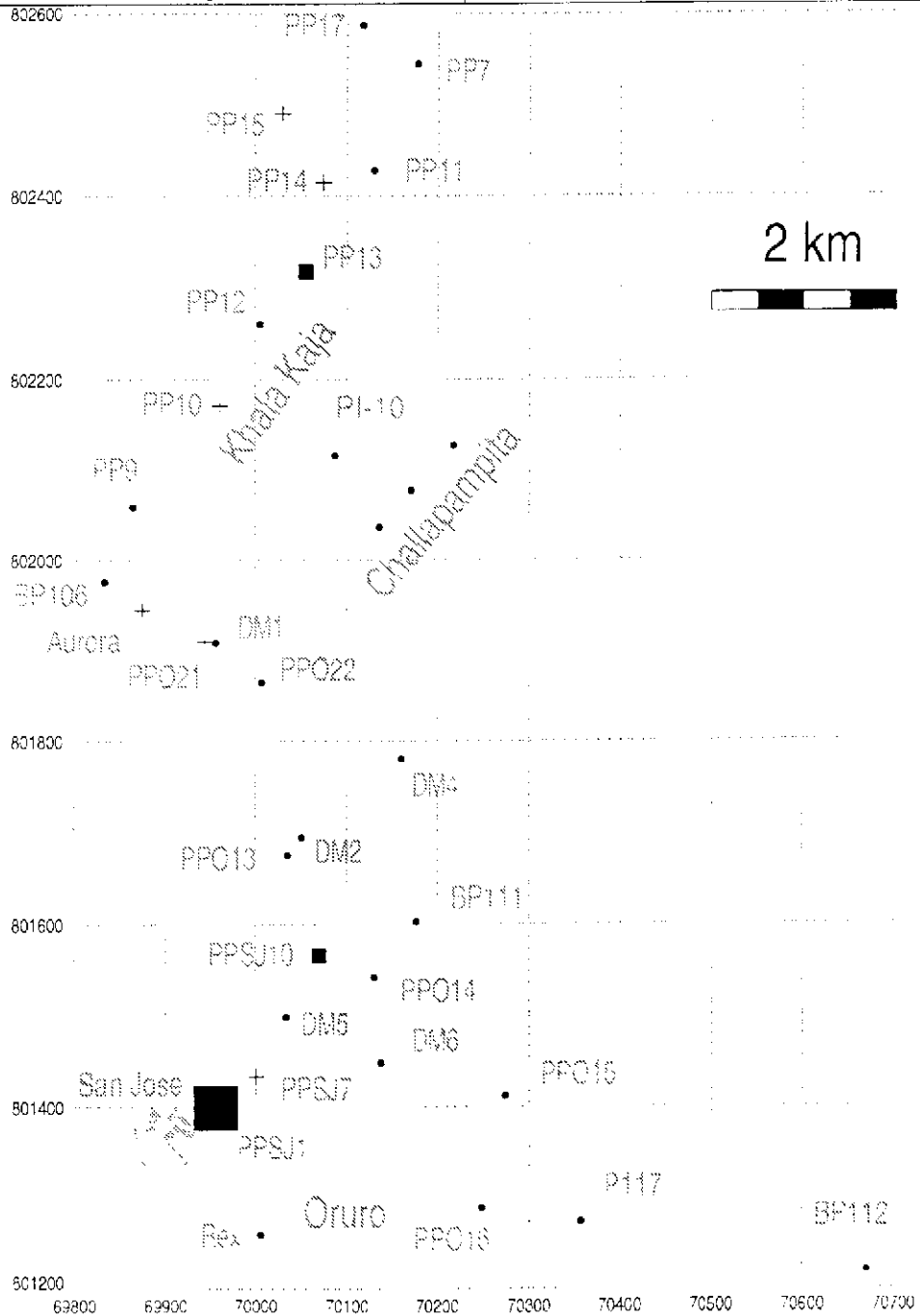
Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

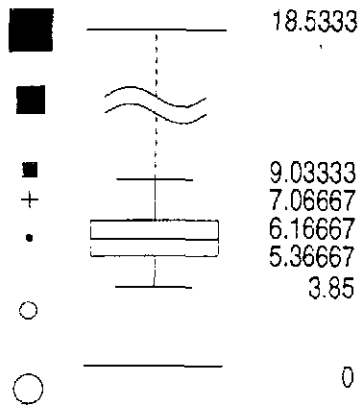




Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

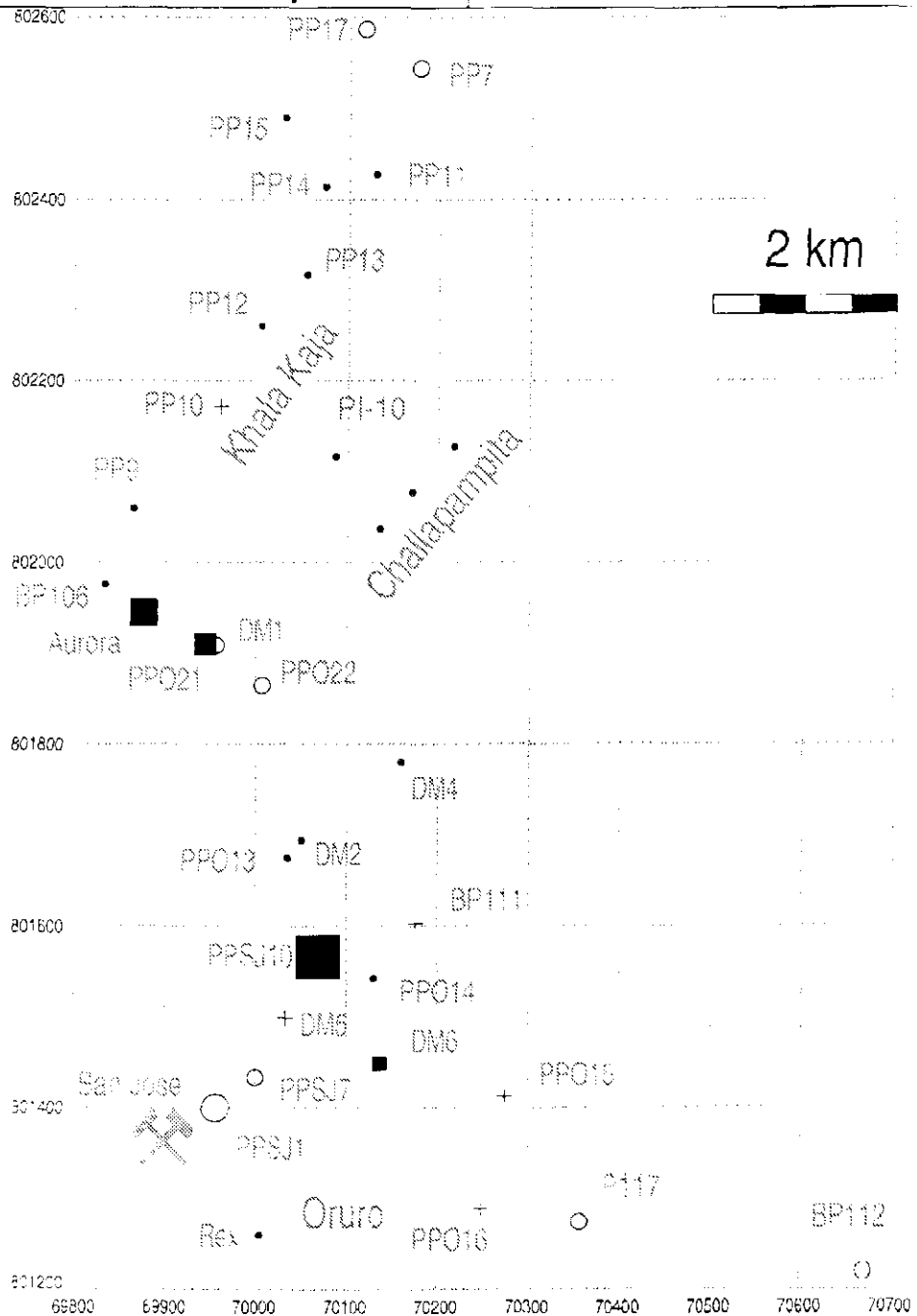


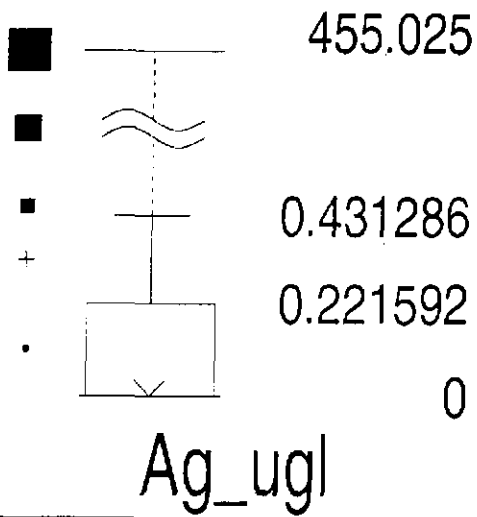


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

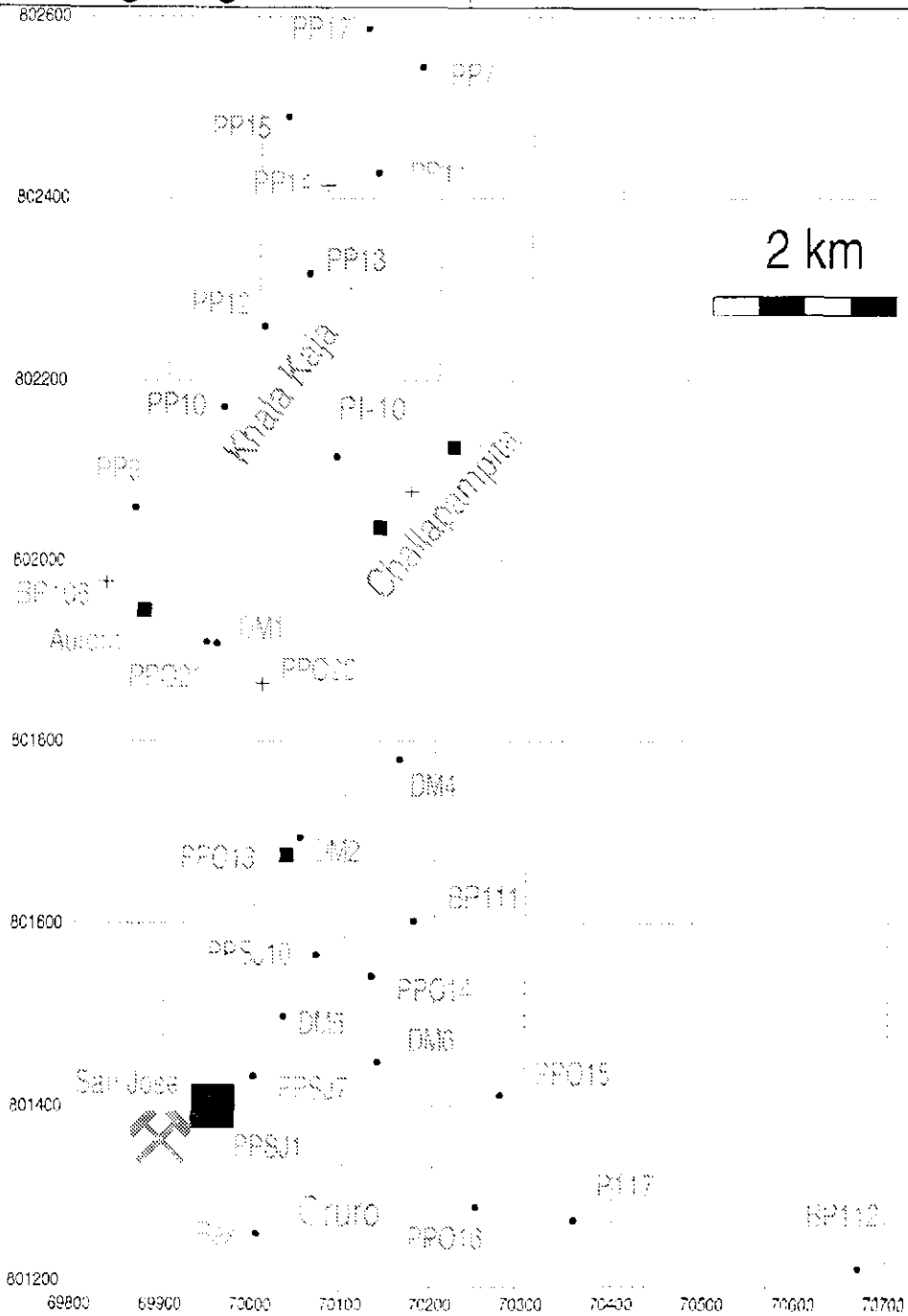
AlkM\_meql

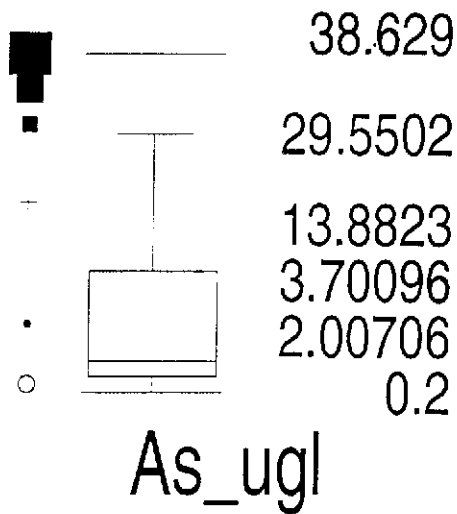




Dames & Moore Norge 1999

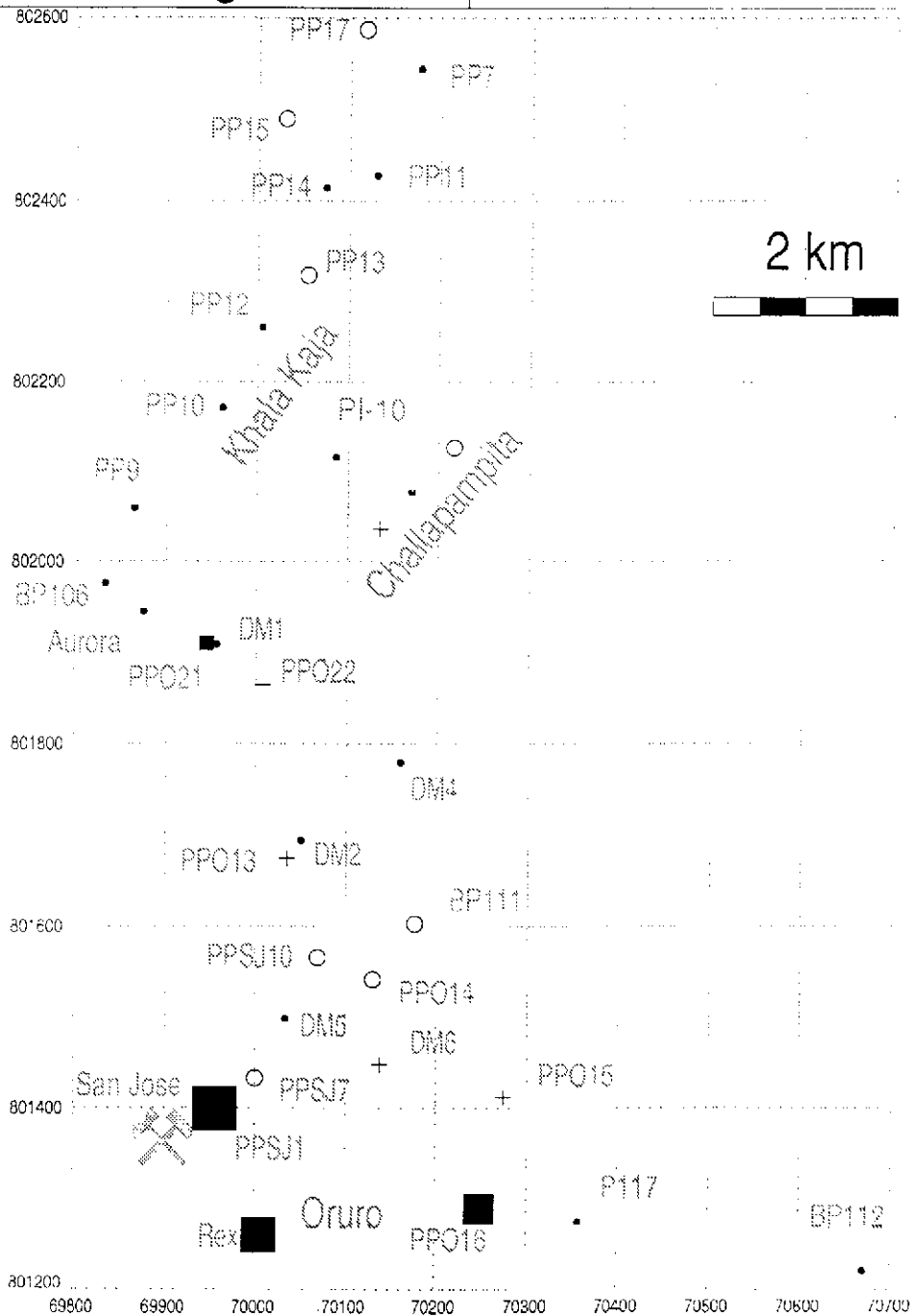
Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario



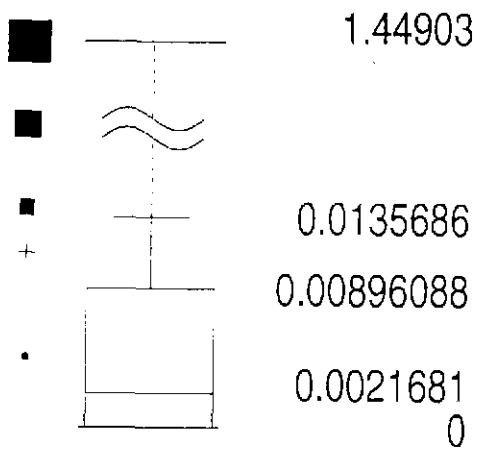


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario



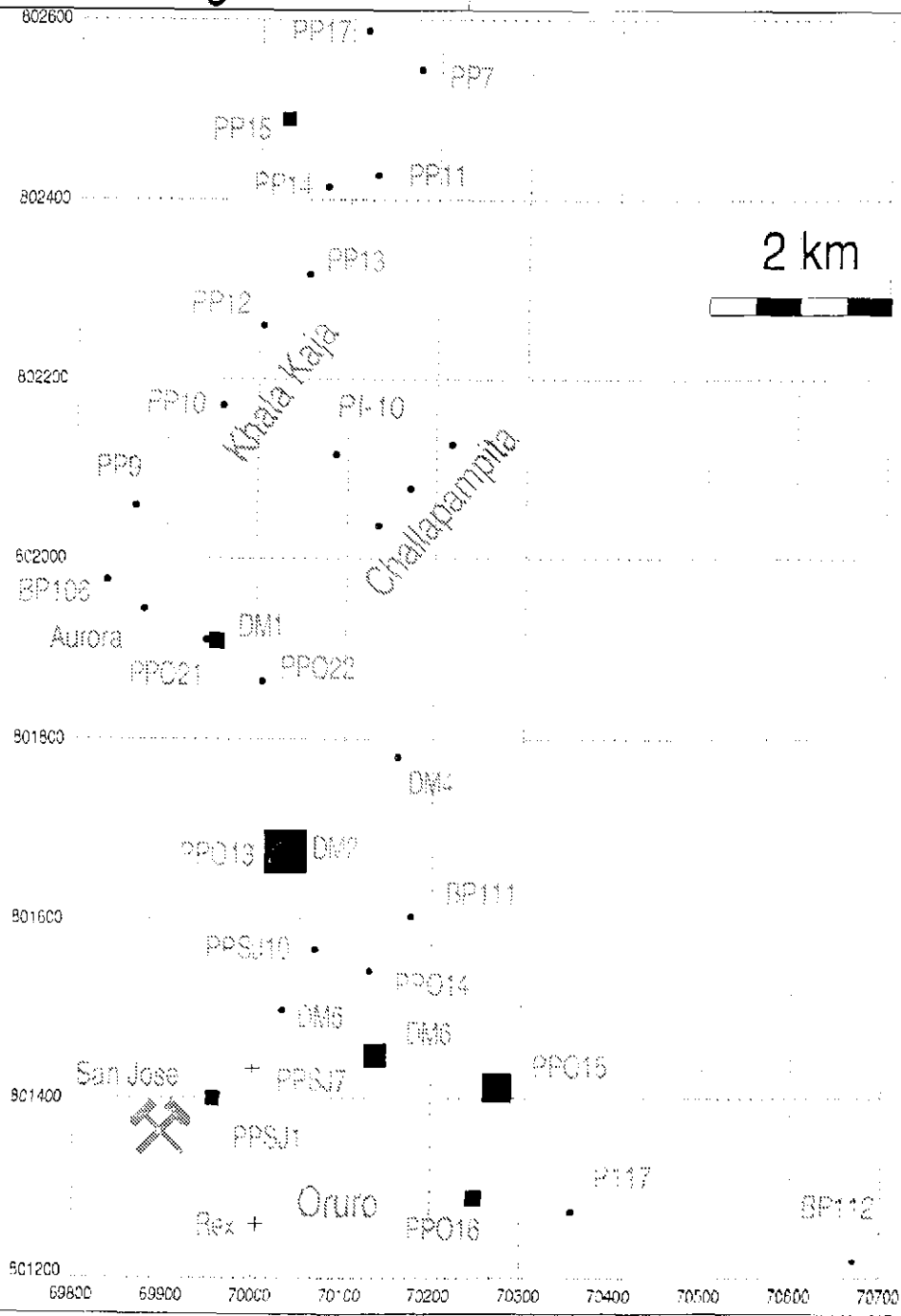


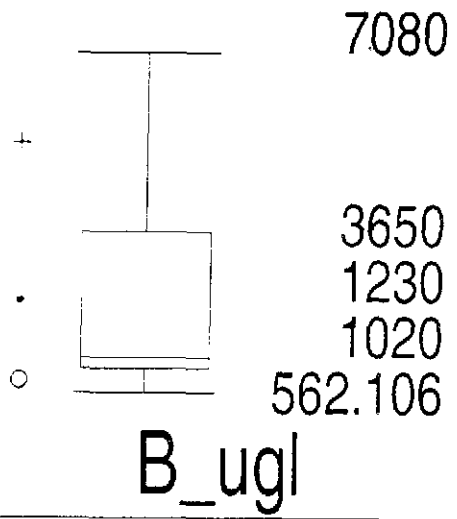


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

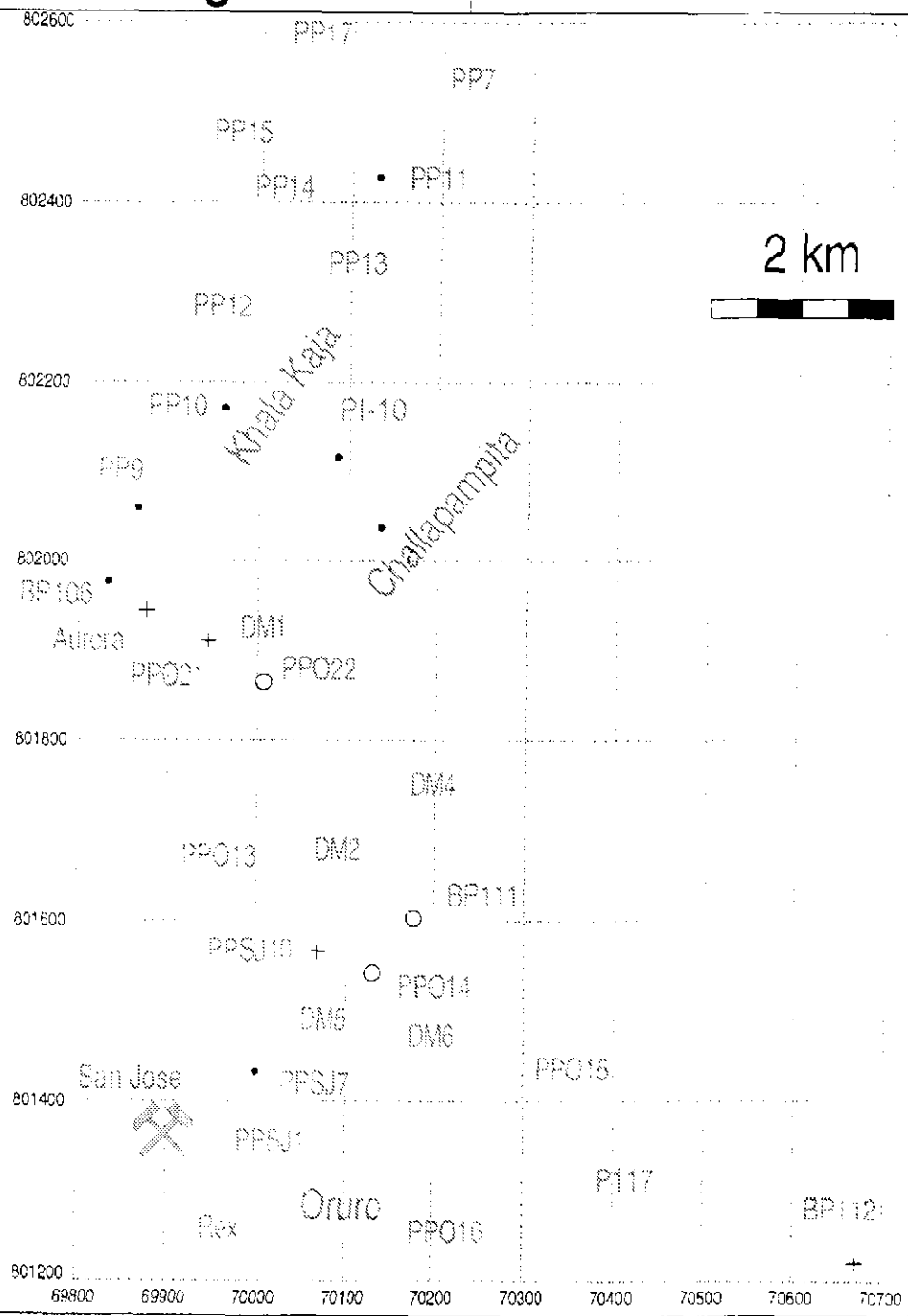
Au\_ugl

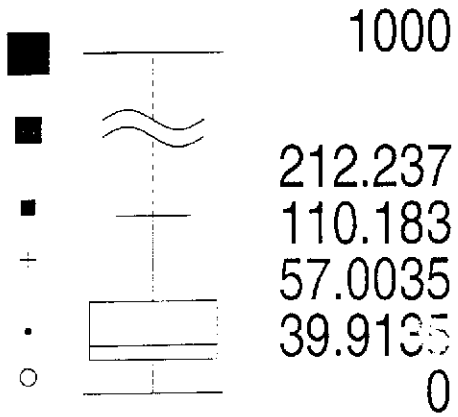




Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

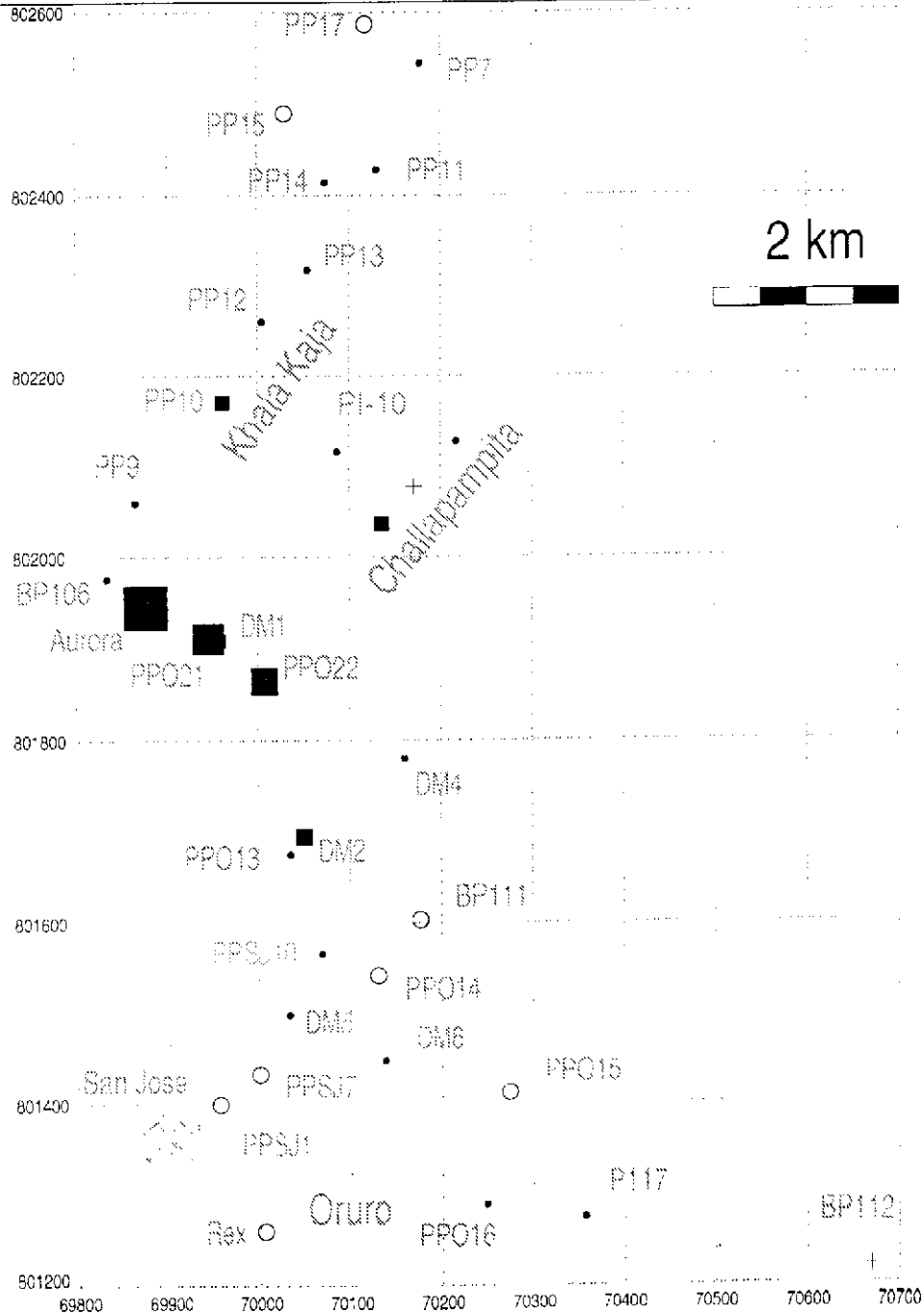




Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

Ba<sub>ugl</sub>



Large square (PPSJ1) = 43 ug/l

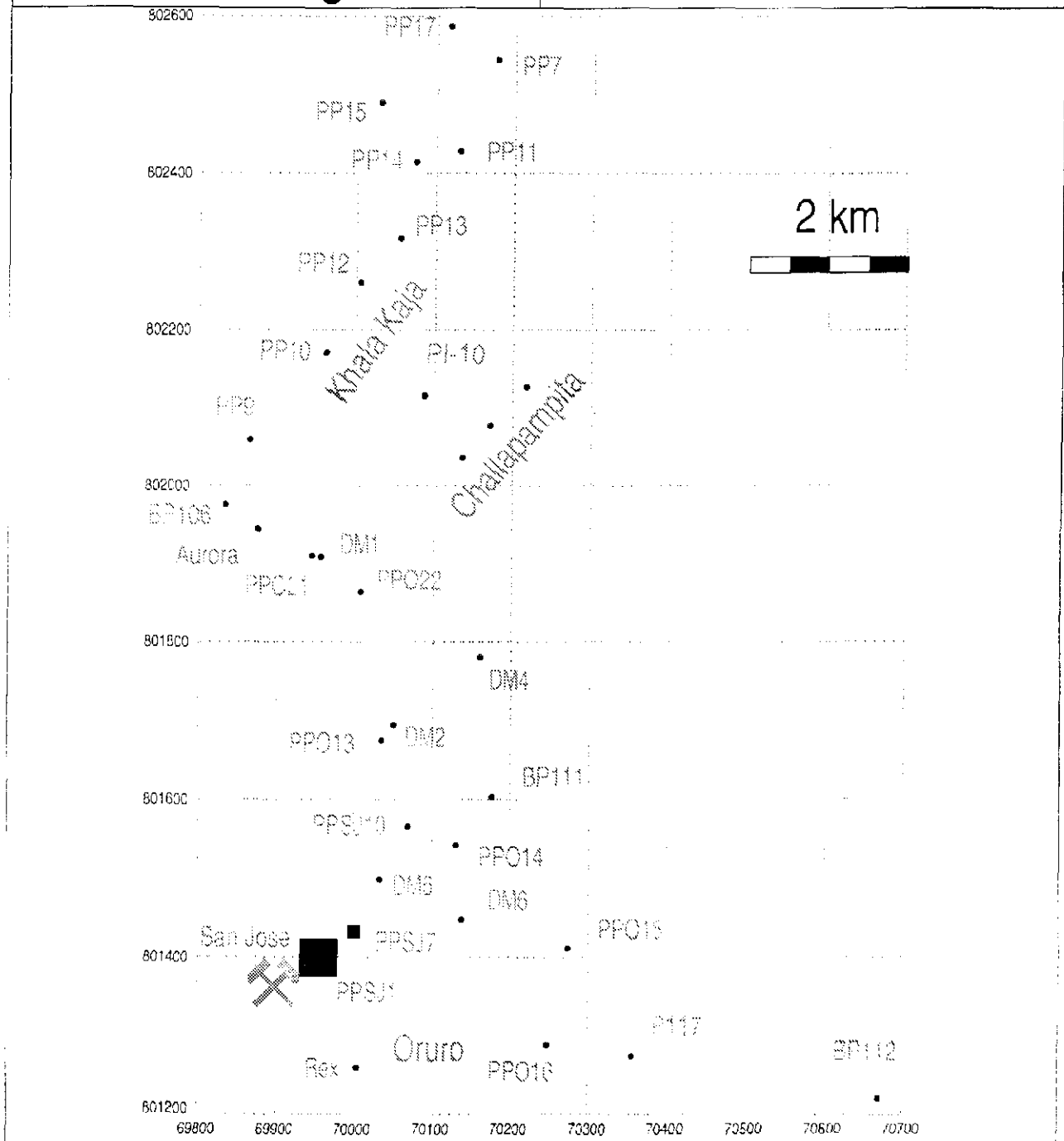
Smaller square (PPSJ7) = 0.5 ug/l

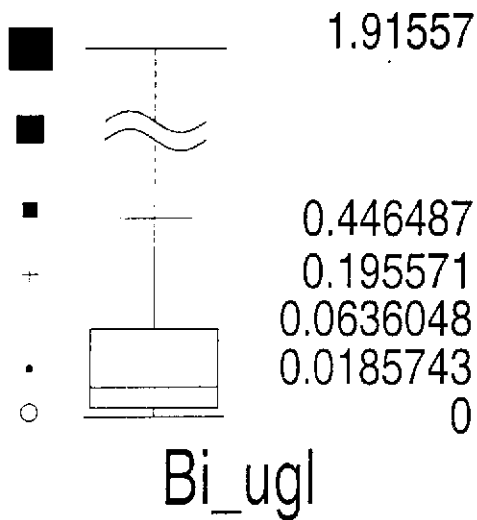
All other samples are below detection limit

Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

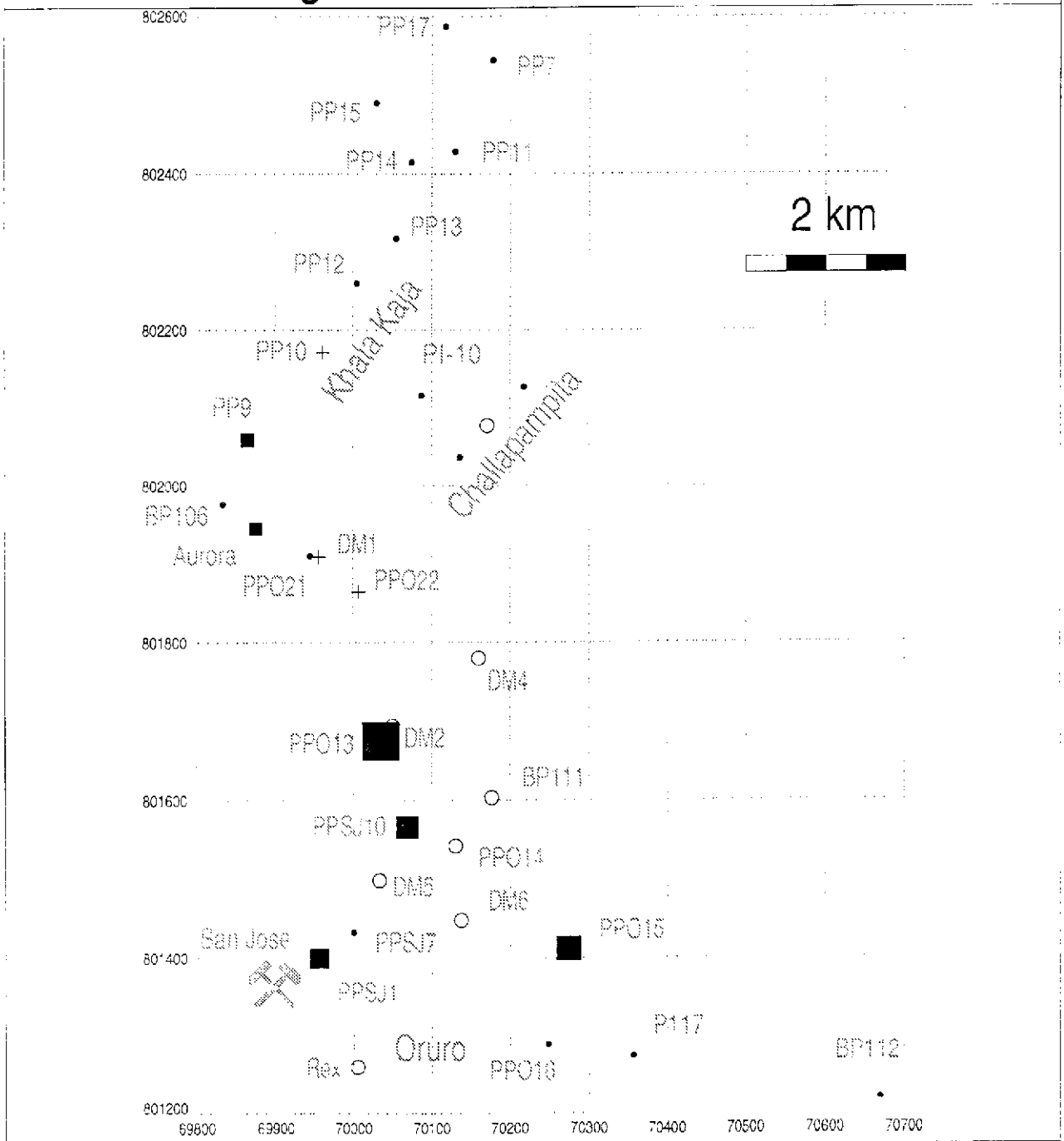
Be\_ugl

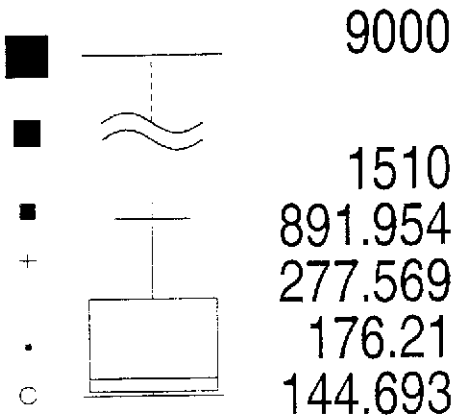




Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

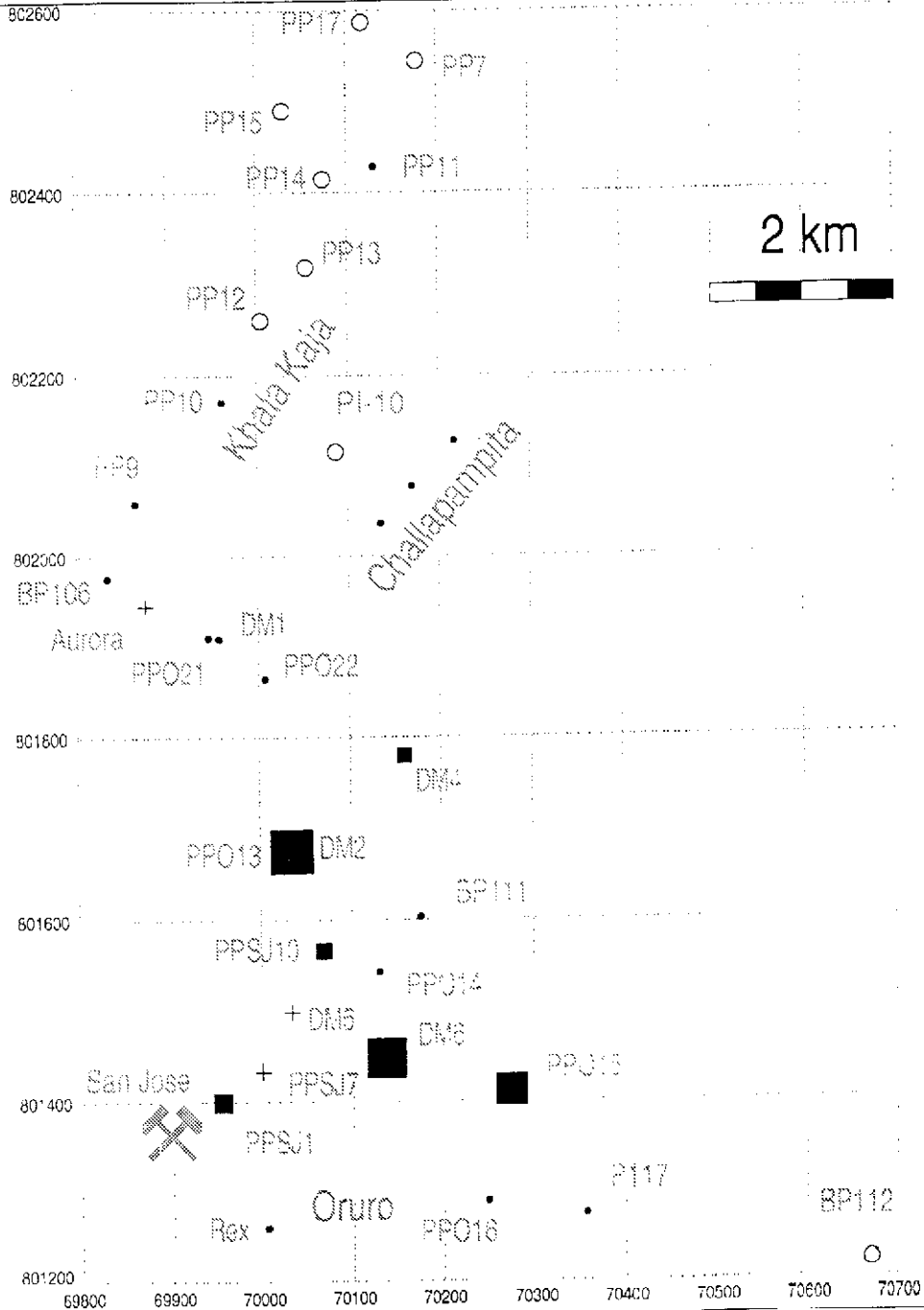


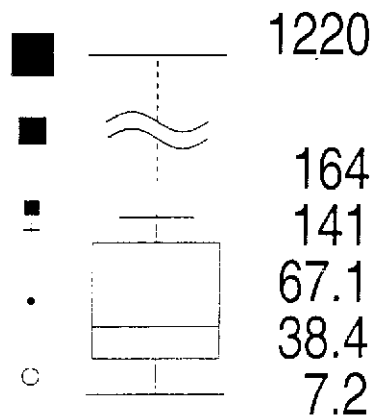


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

Br\_ugl

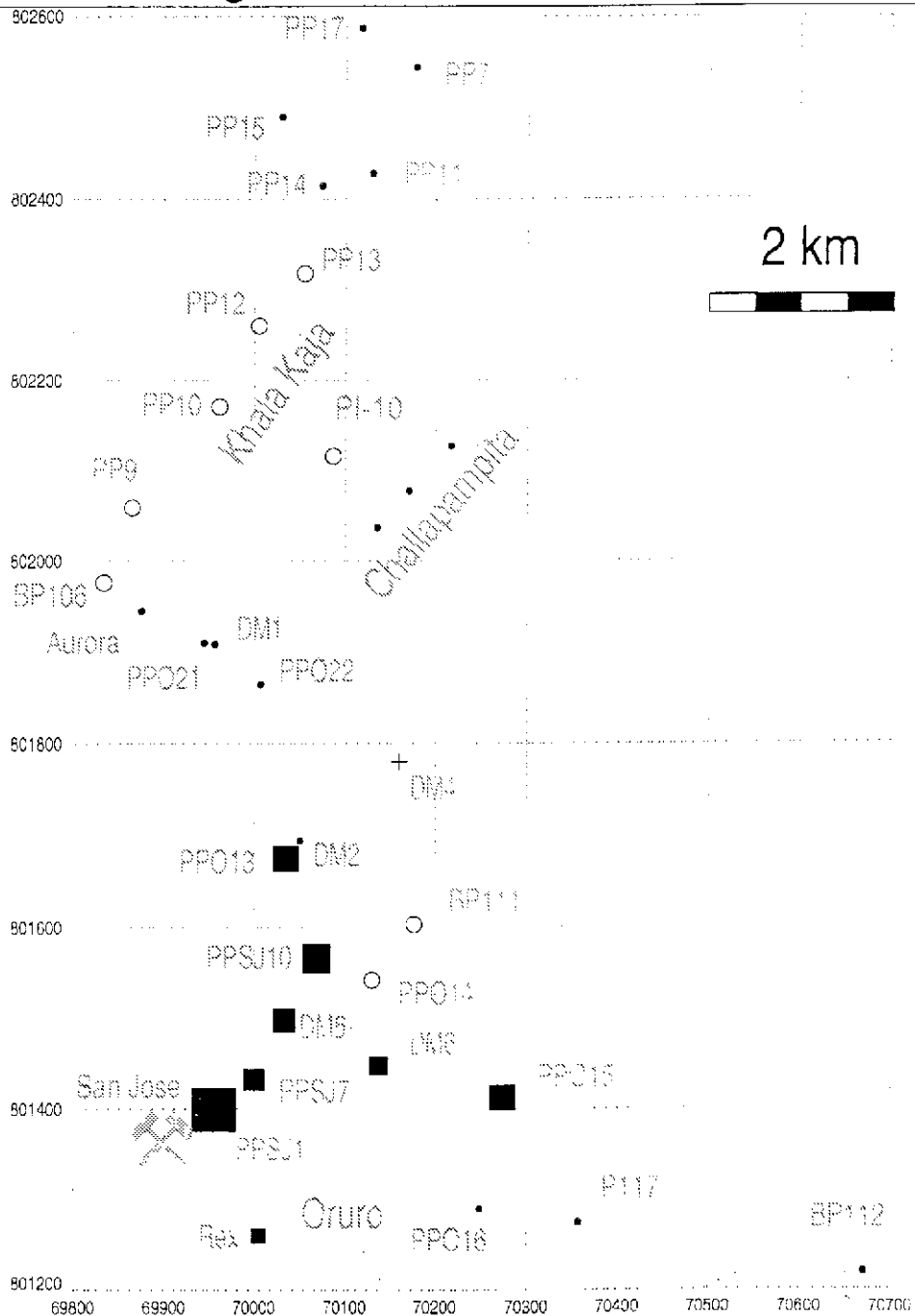


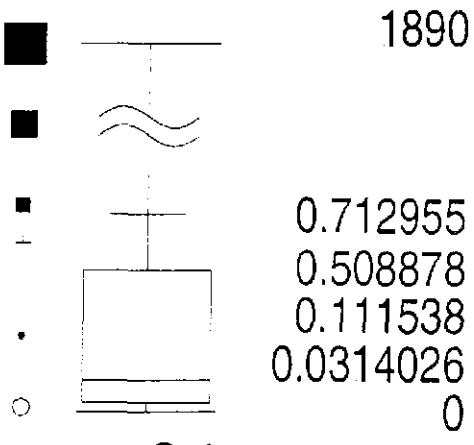


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

Ca\_mgl

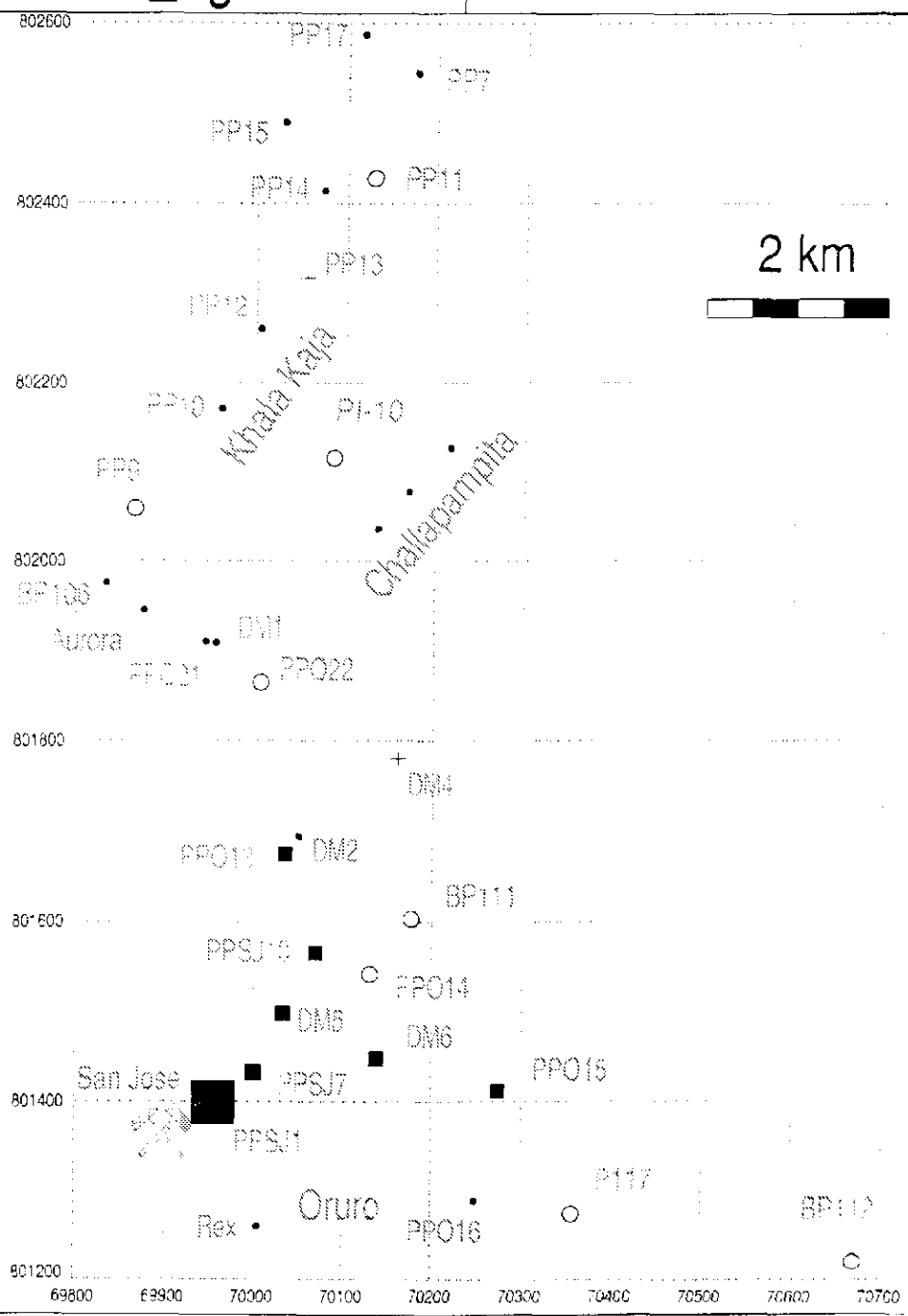




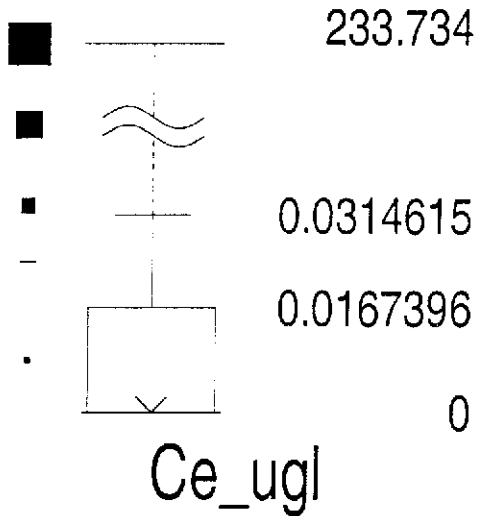
Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

Cd\_ugl

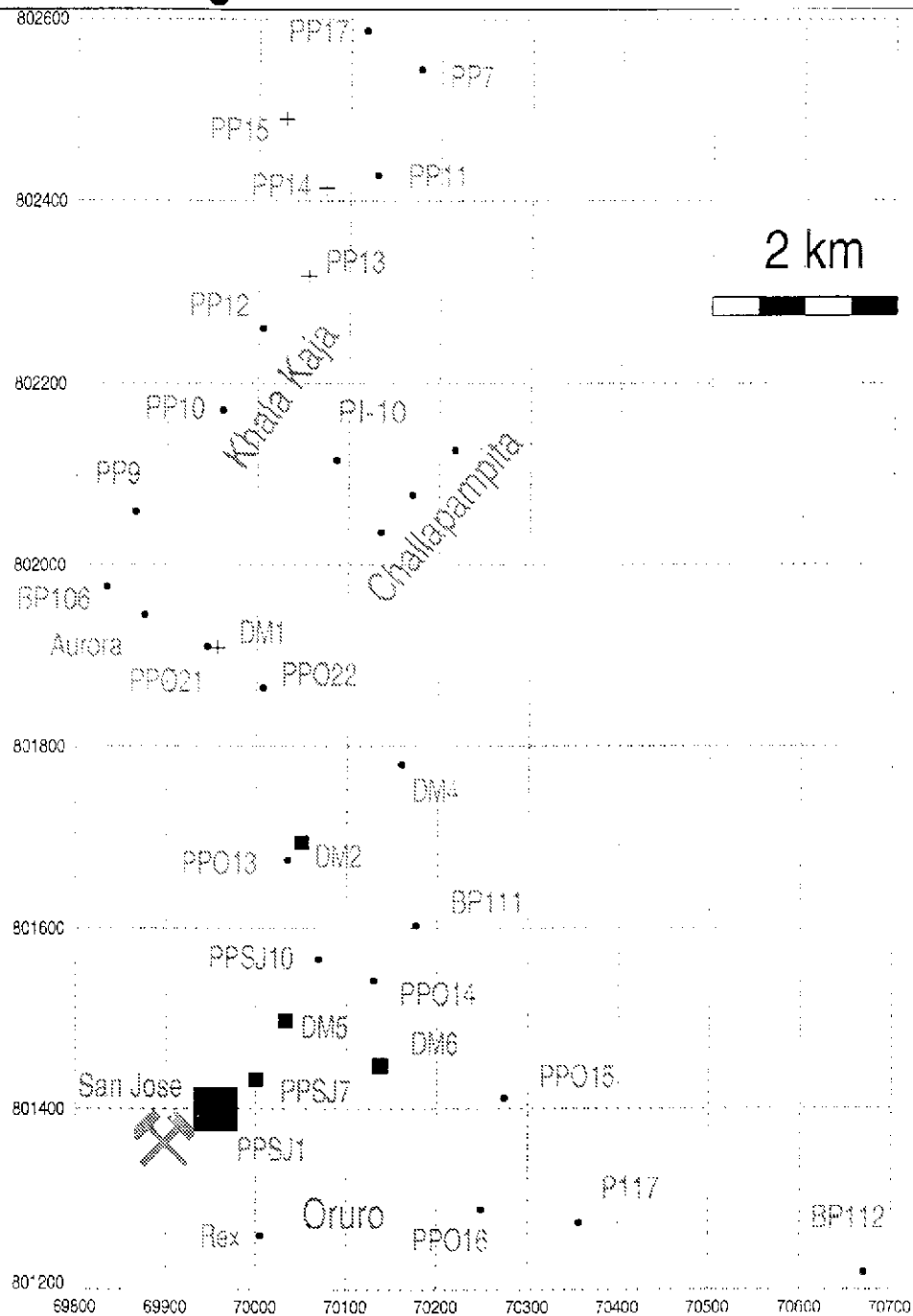


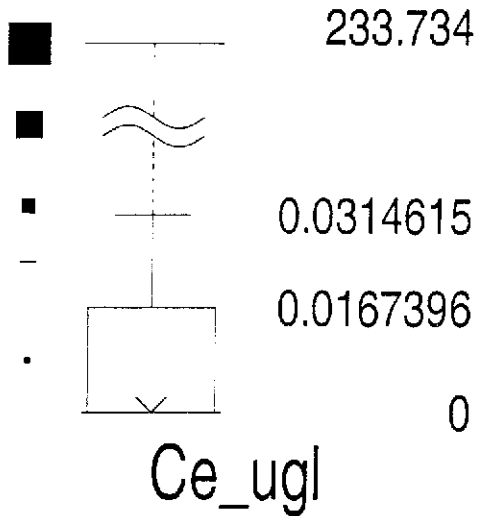




Dames & Moore Norge 1999

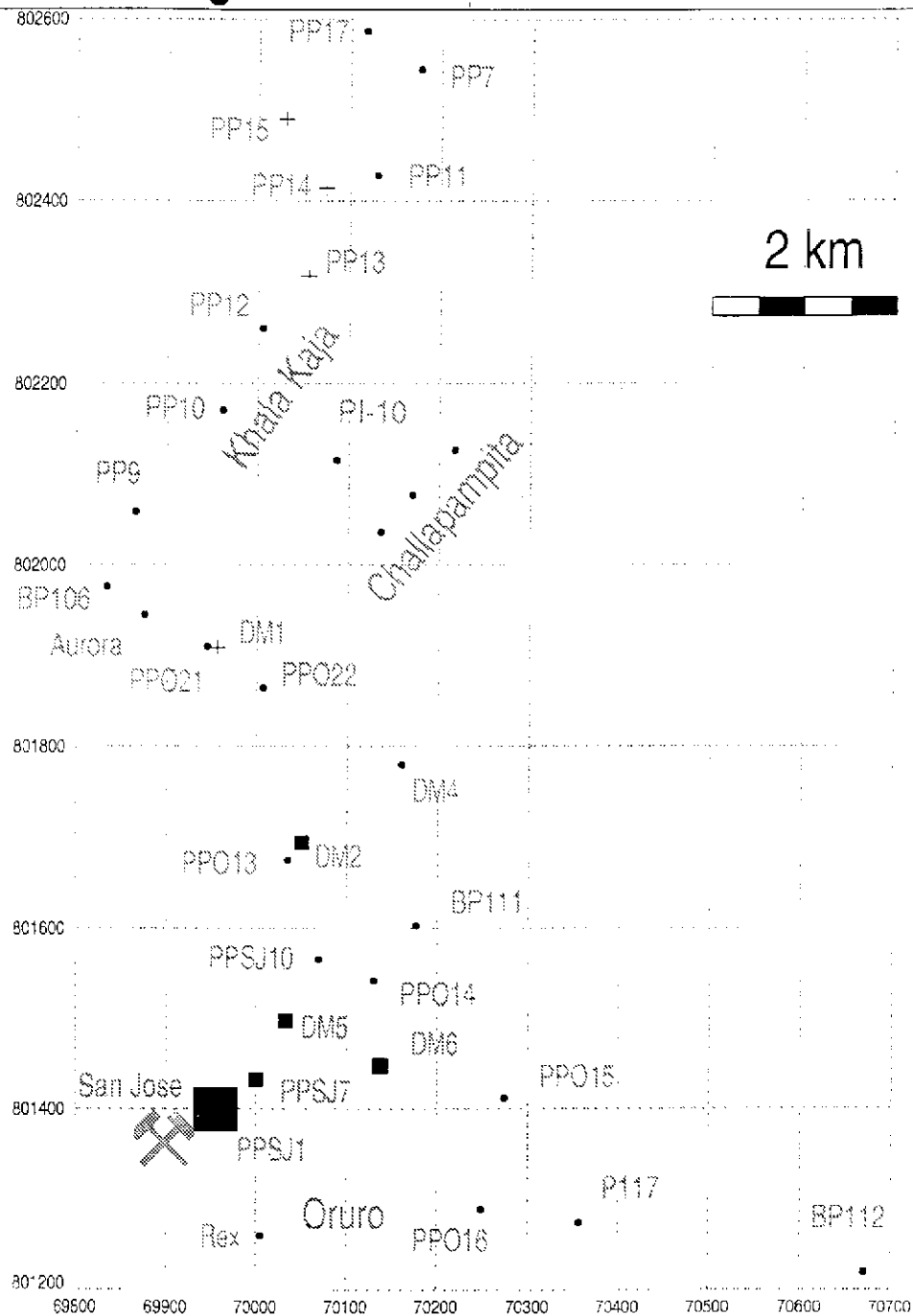
Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

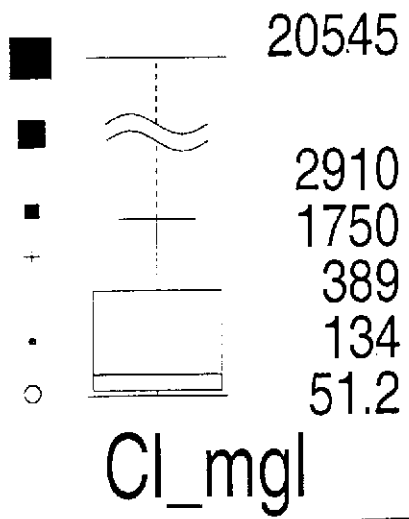




Dames & Moore Norge 1999

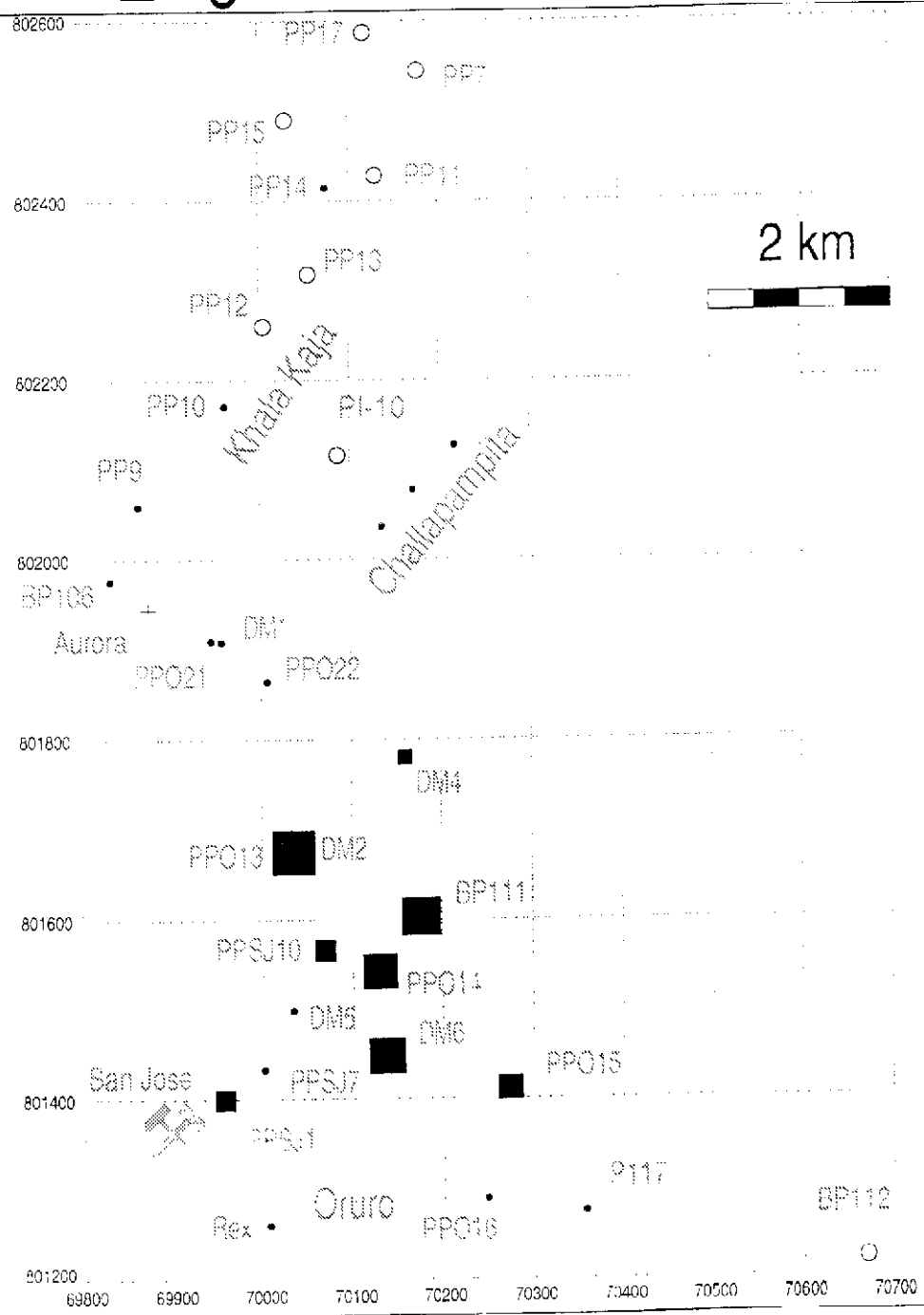
Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

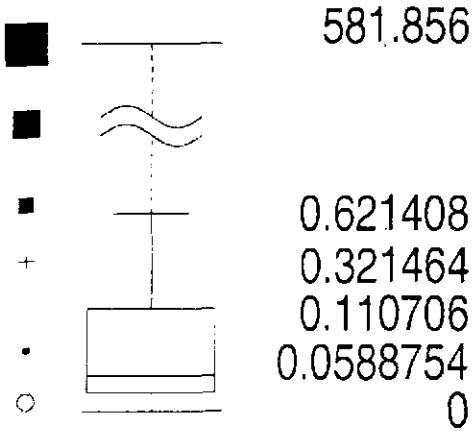




Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

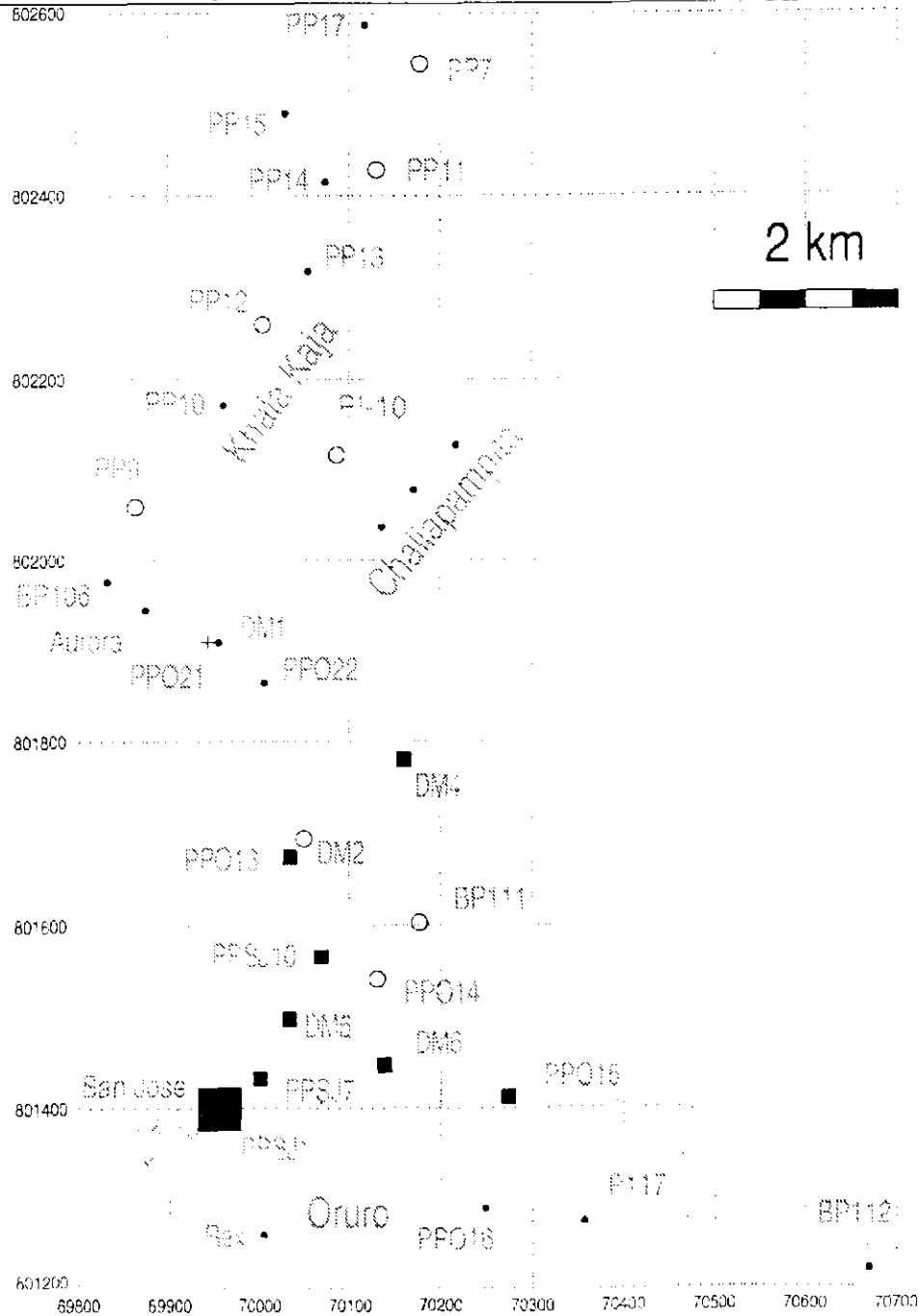


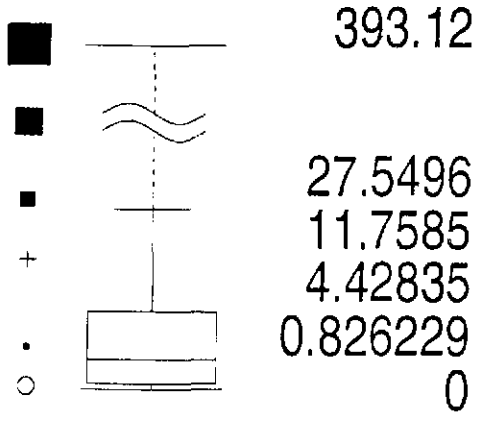


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

Co\_ugl

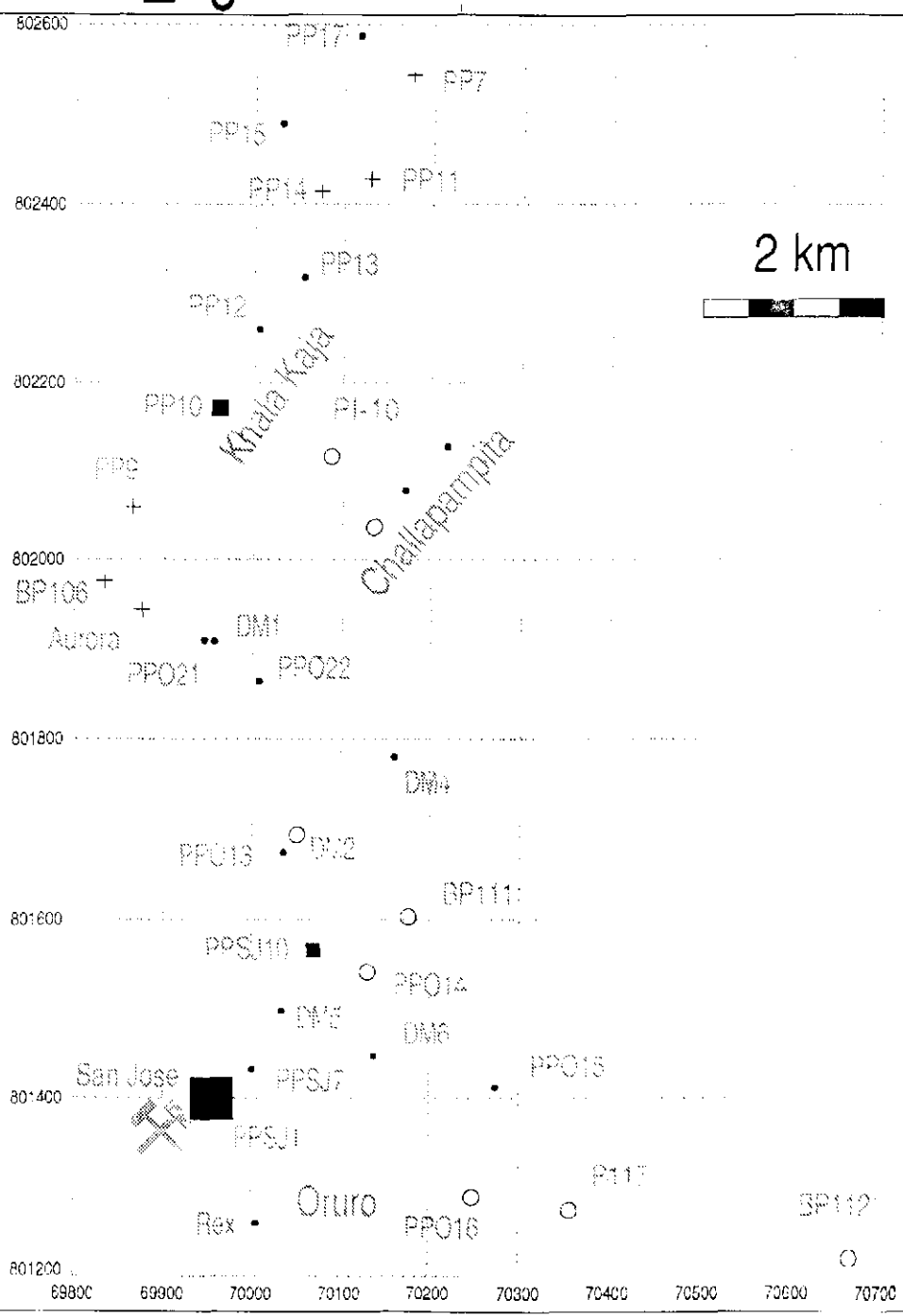


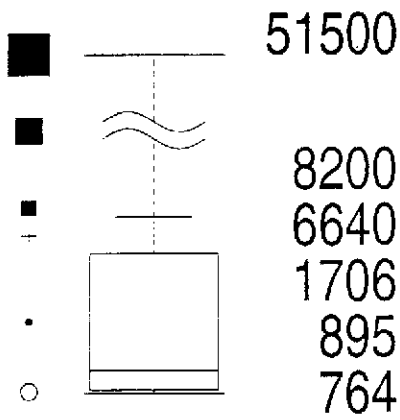


Cs\_ugl

Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

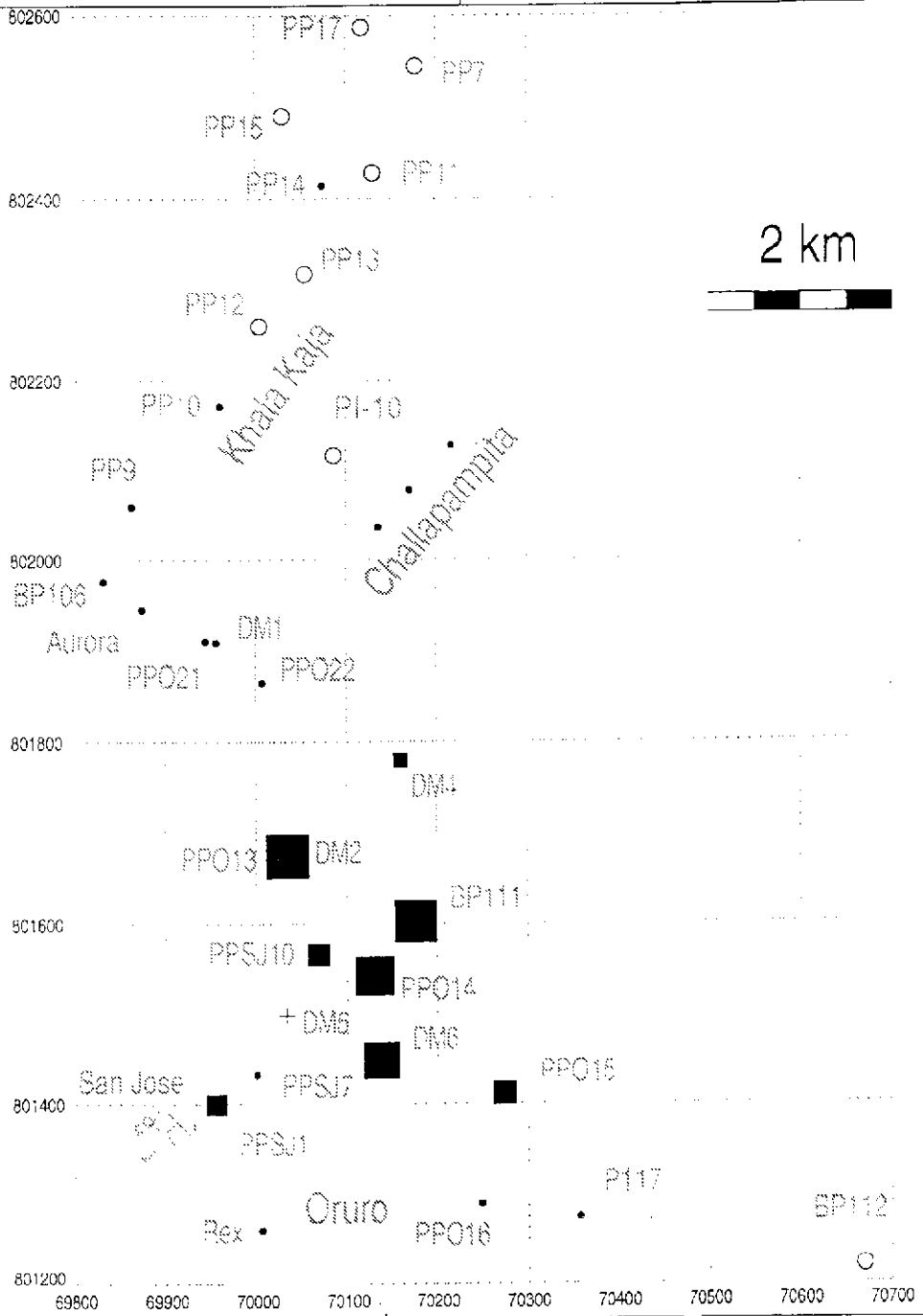


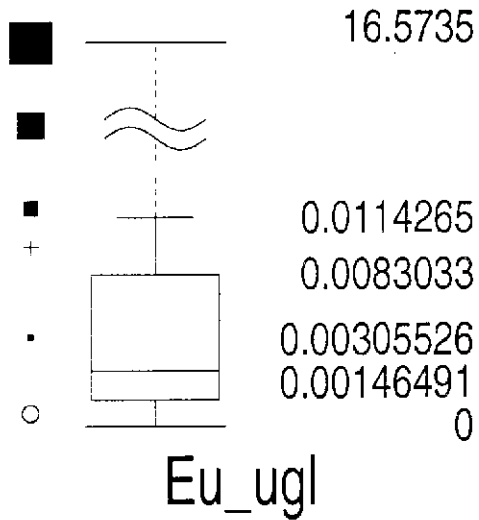


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

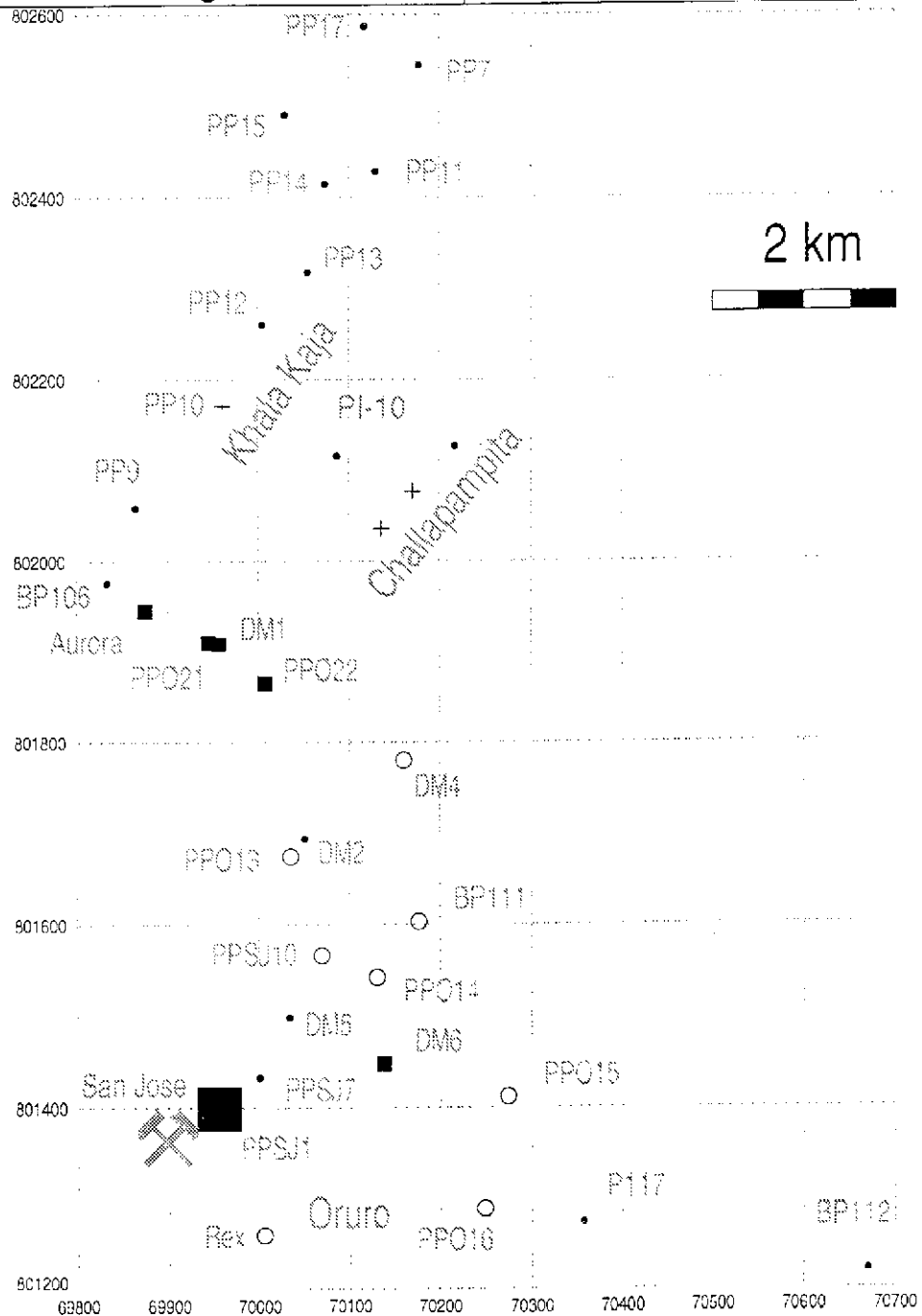
EC\_uScm

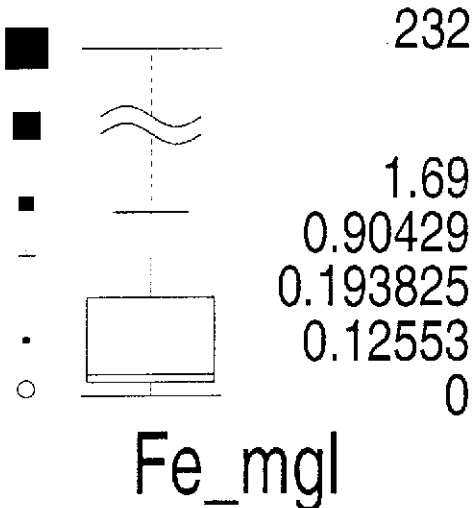




Dames & Moore Norge 1999

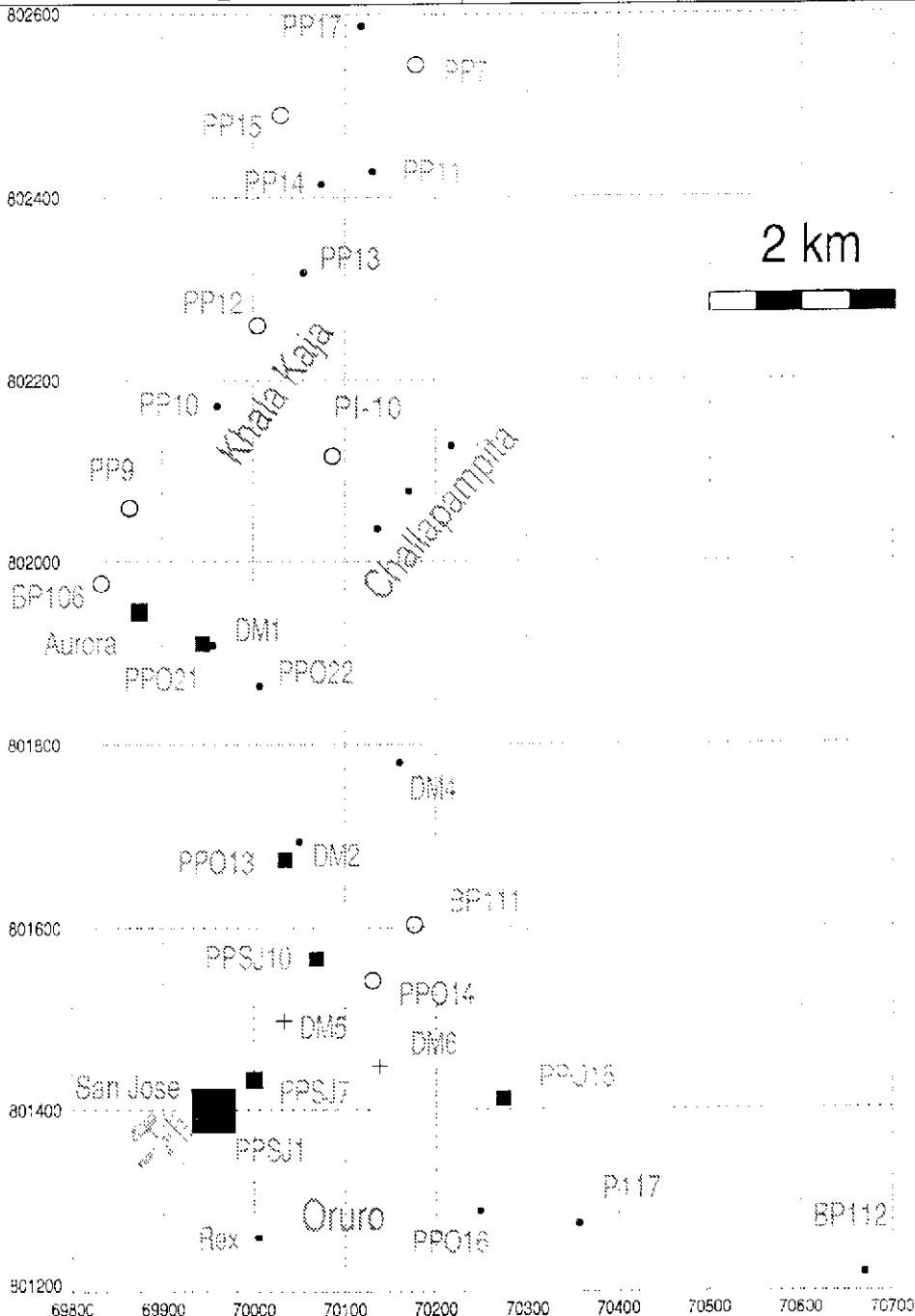
Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario





Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario





38200

Dames & Moore Norge 1999

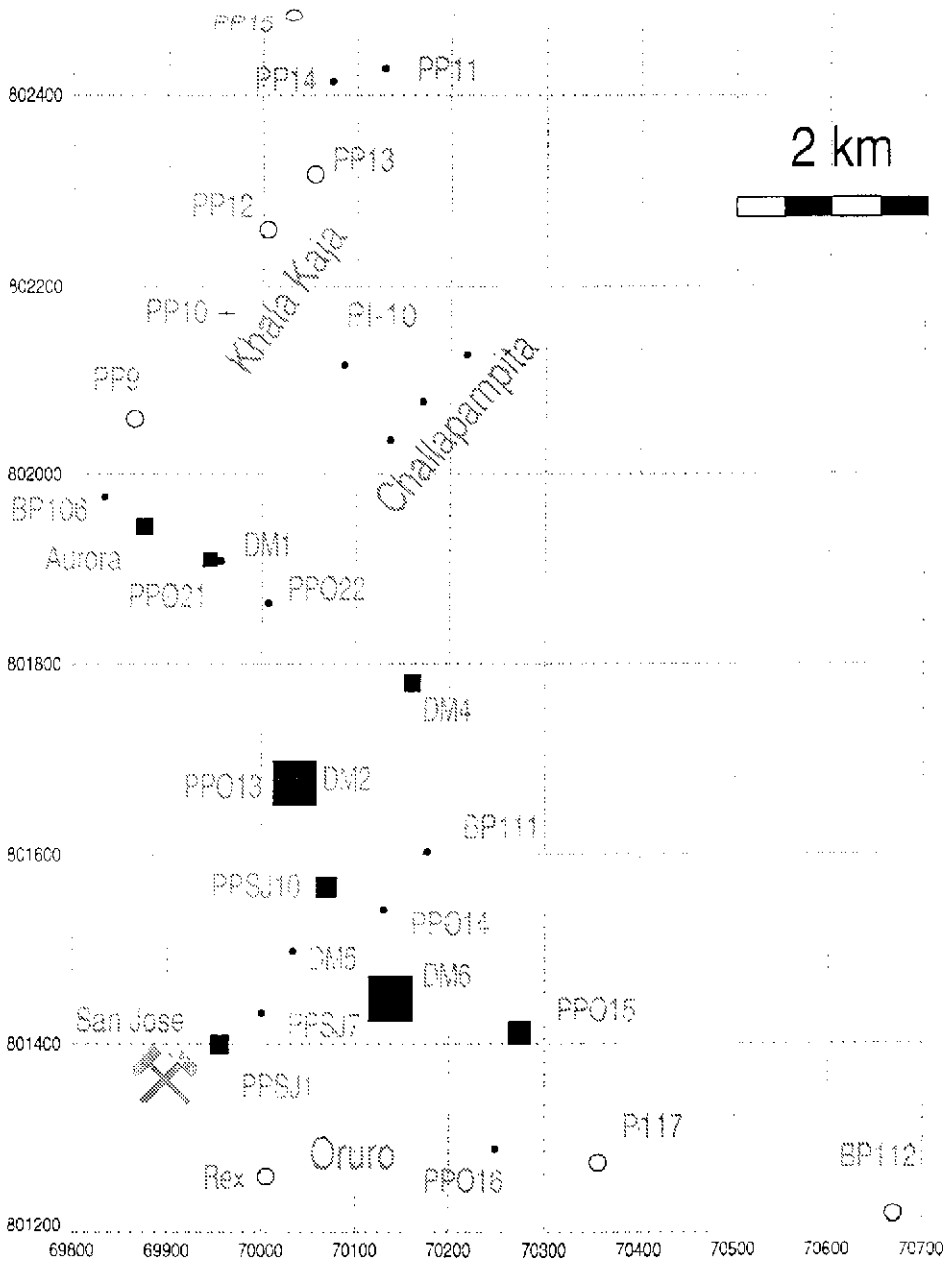
Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

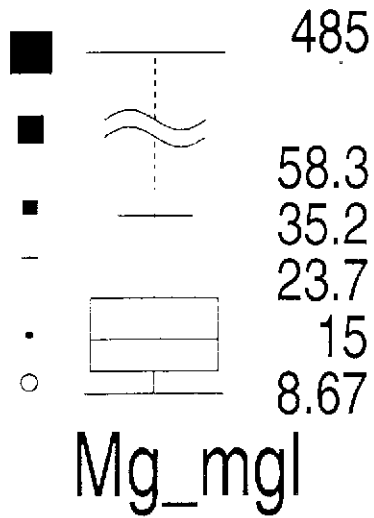
2830

1790

1070

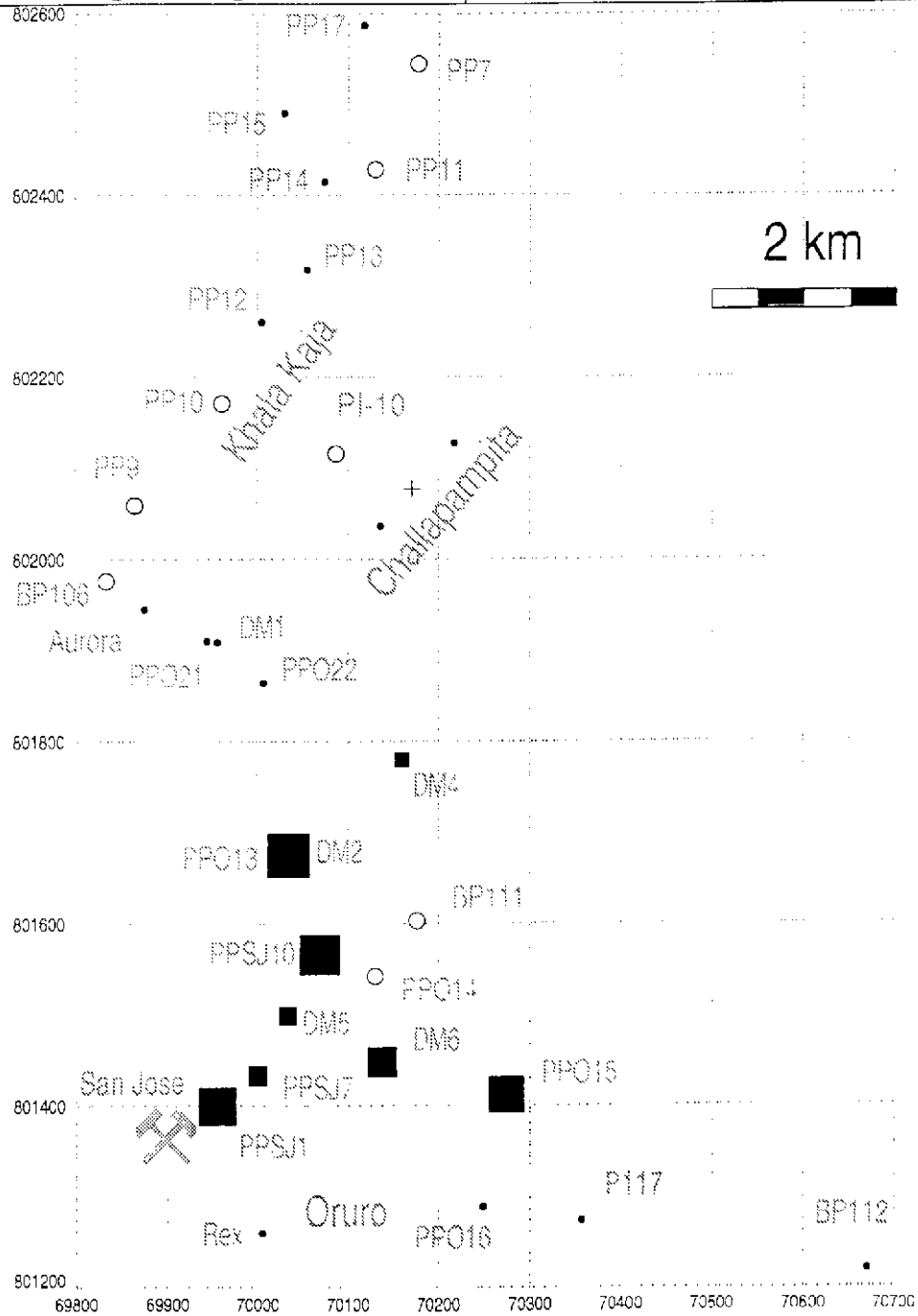
917 983

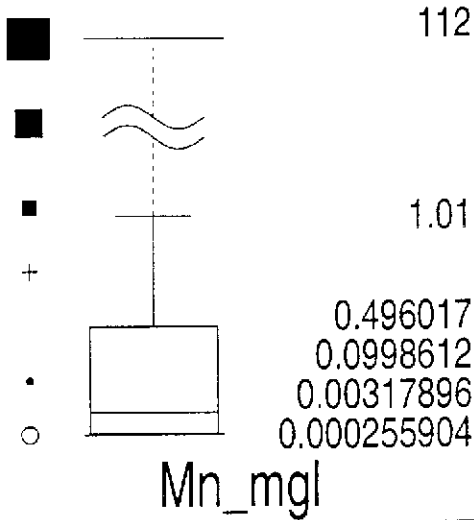




Dames & Moore Norge 1999

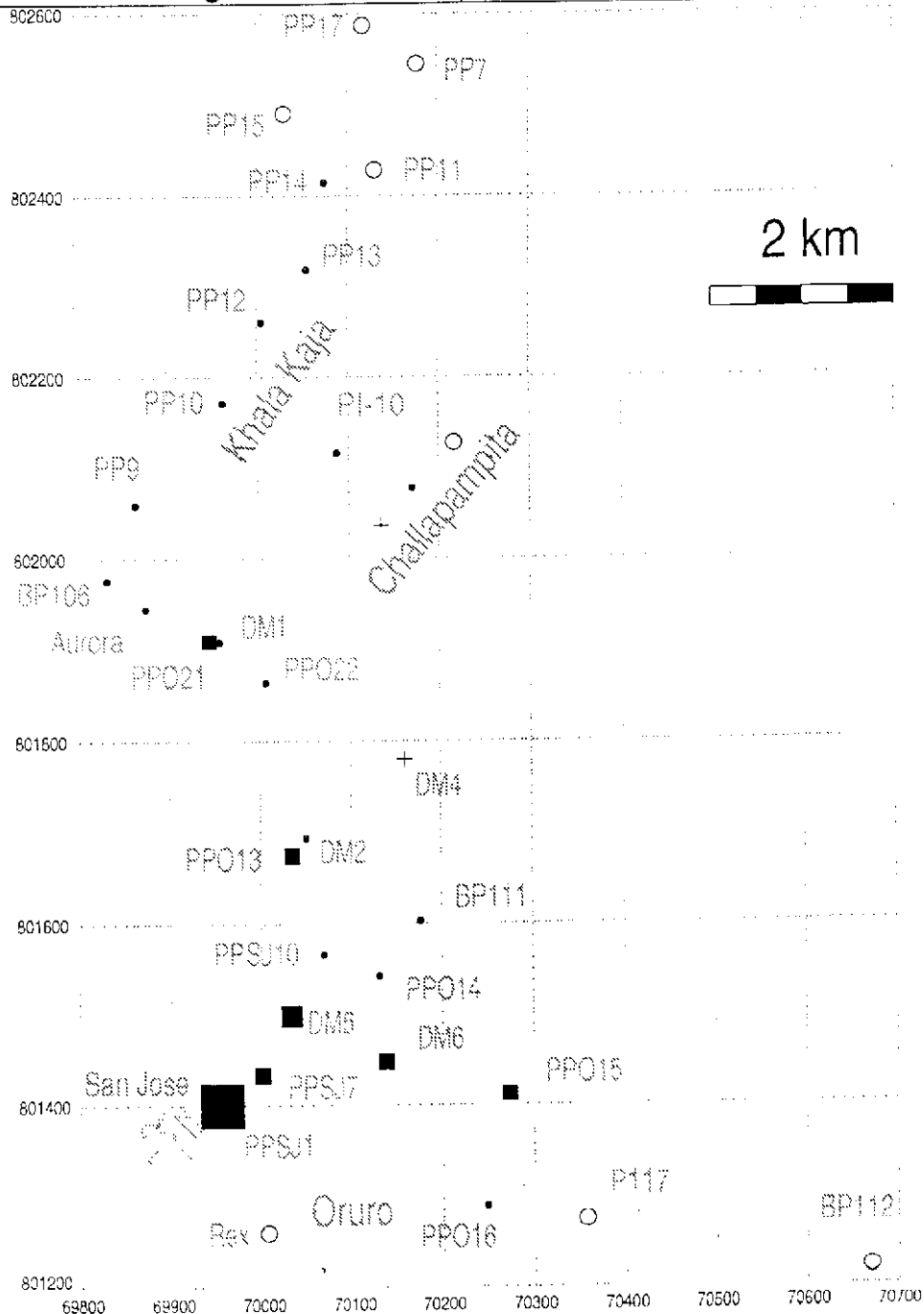
Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

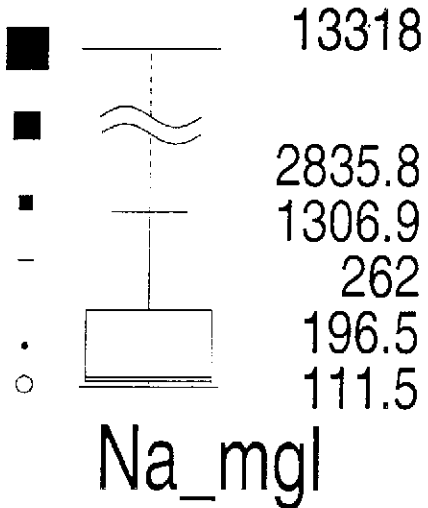




Dames & Moore Norge 1999

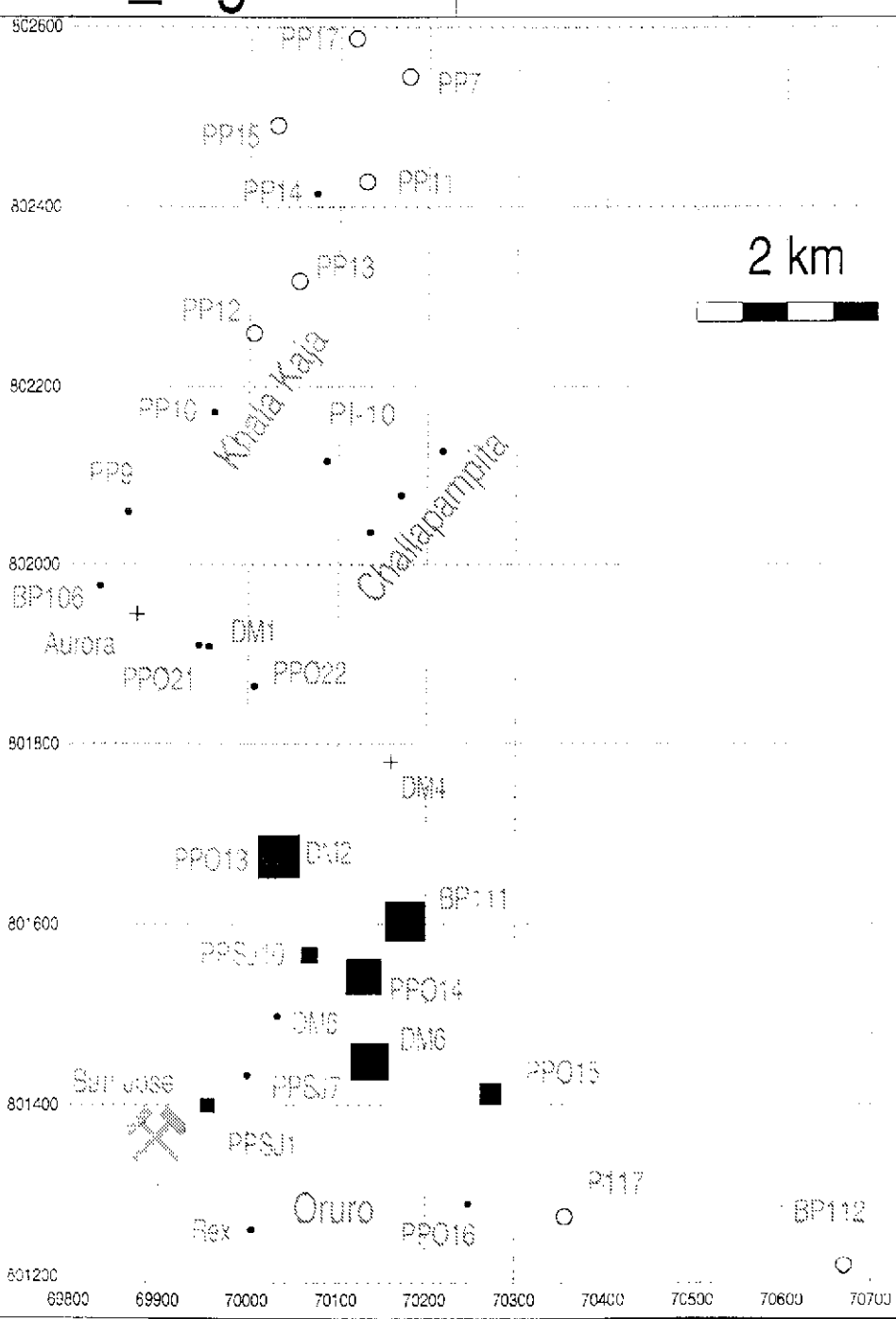
Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

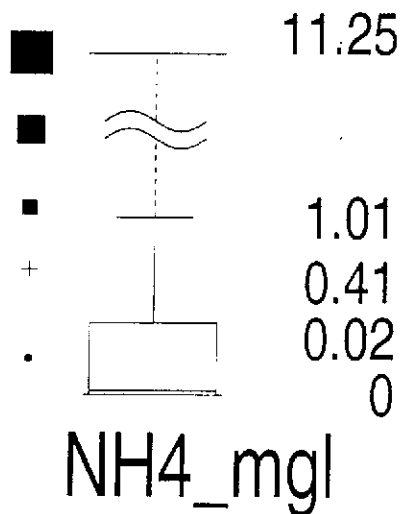




Dames & Moore Norge 1999

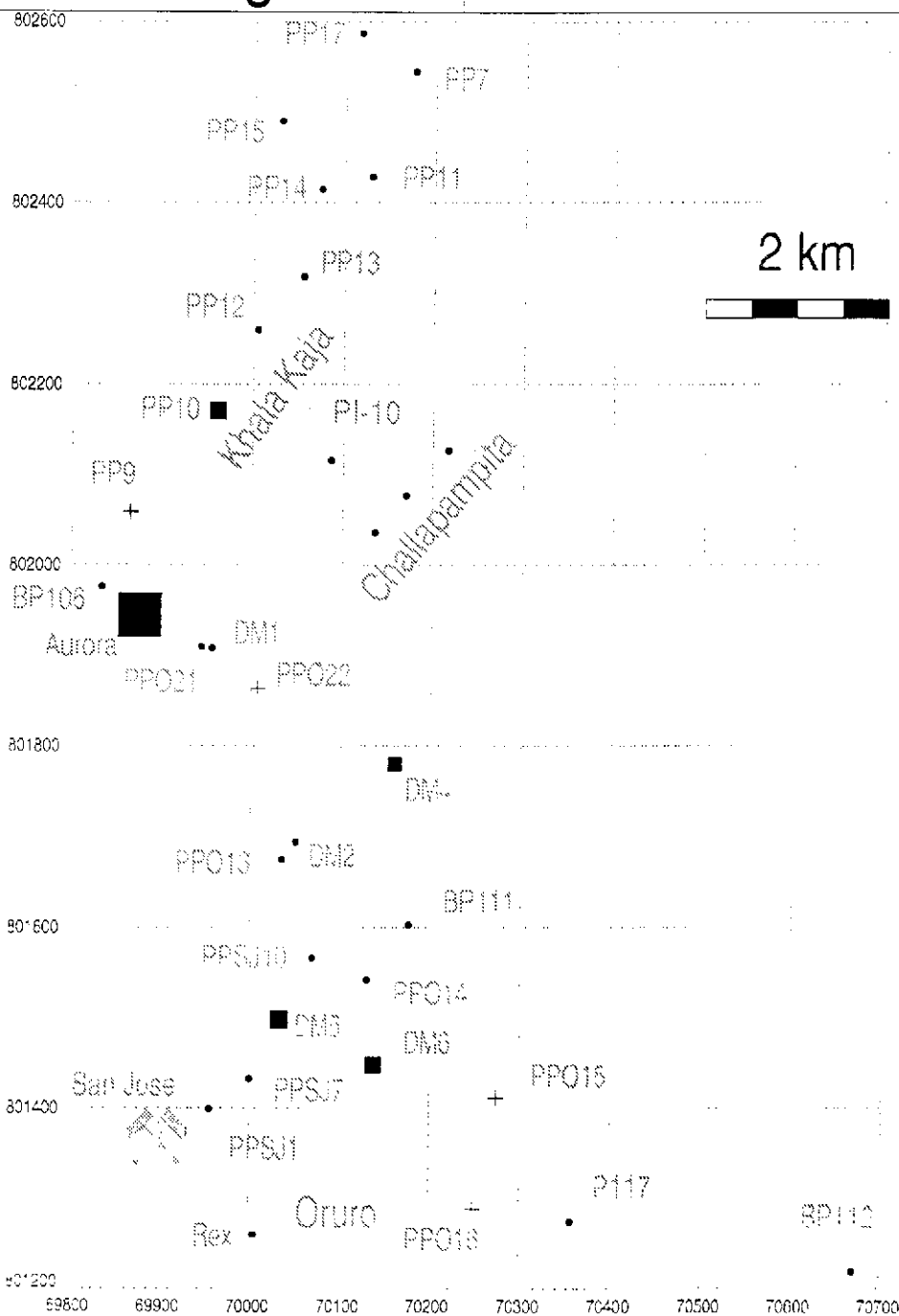
Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

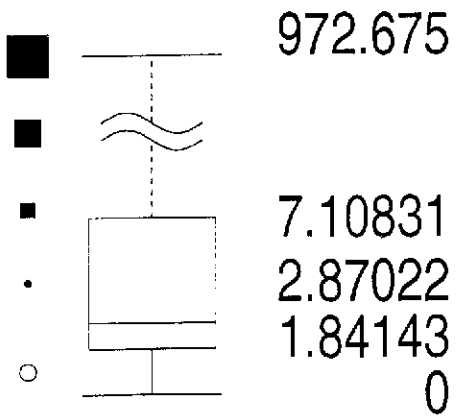




Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

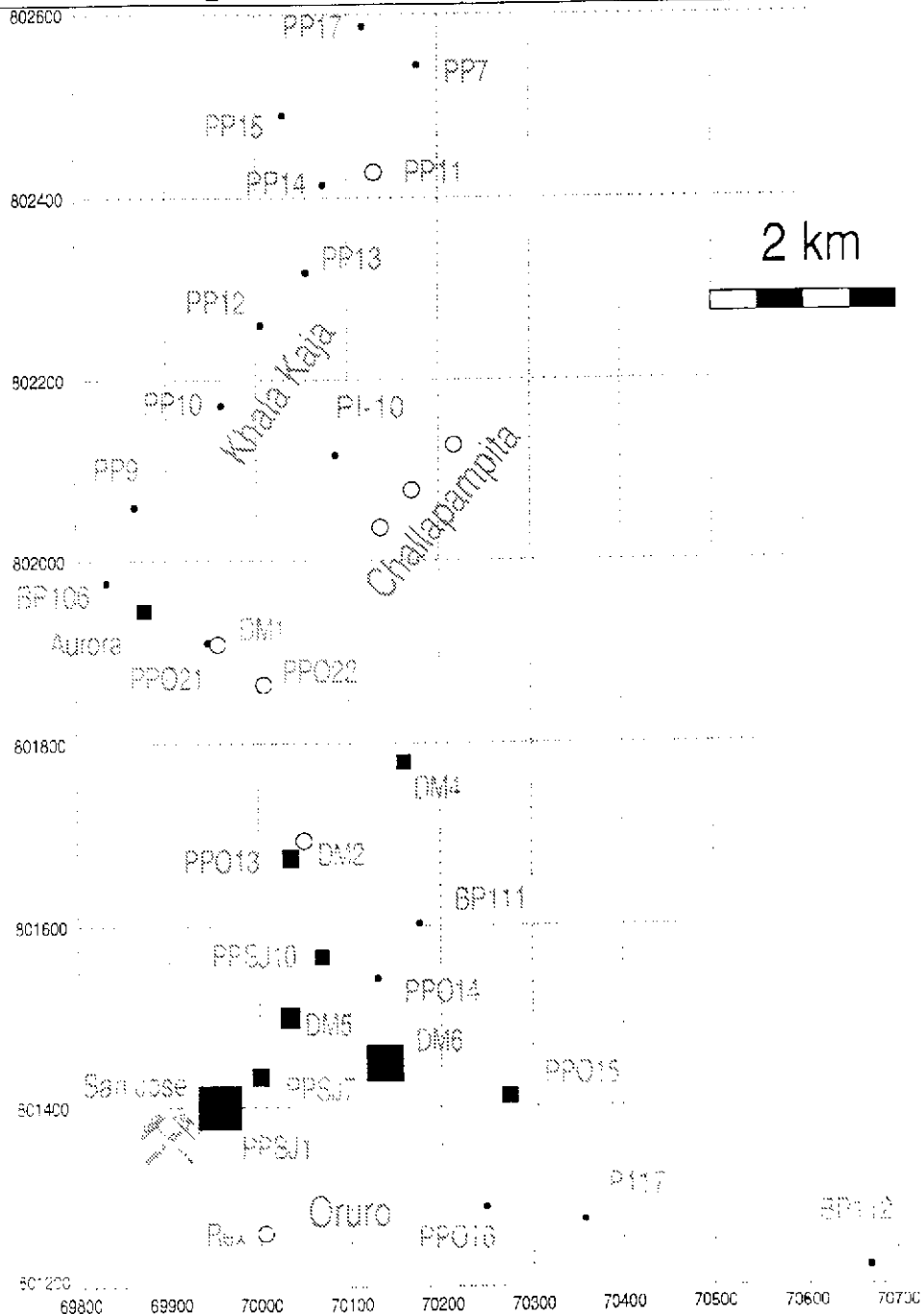


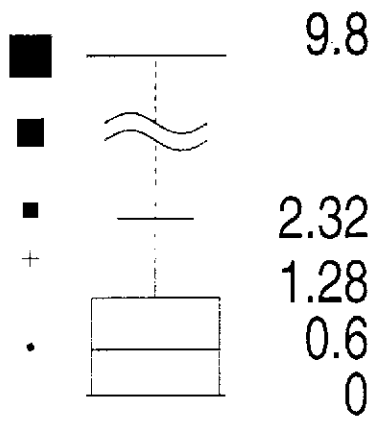


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

Ni\_ugl

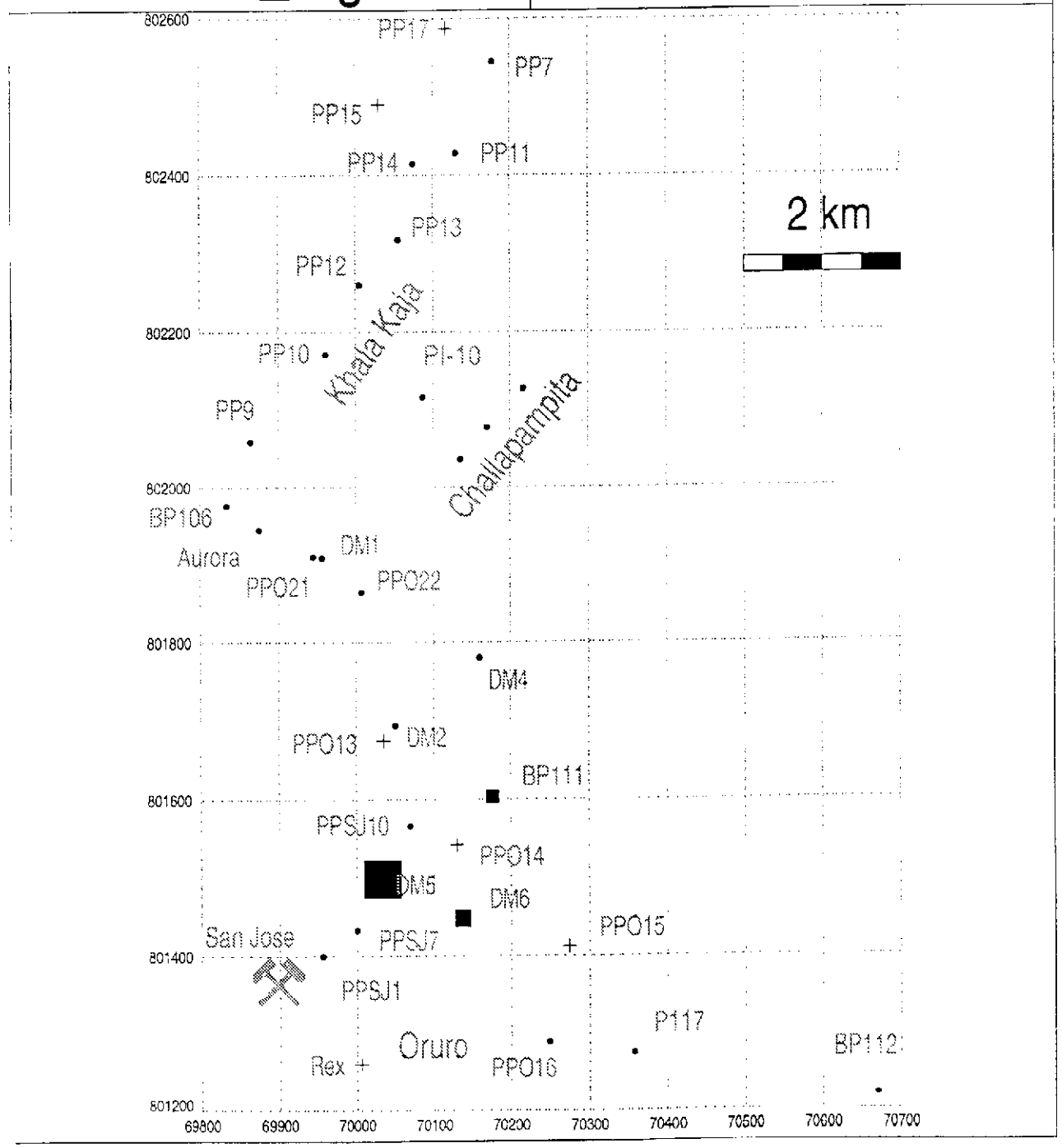


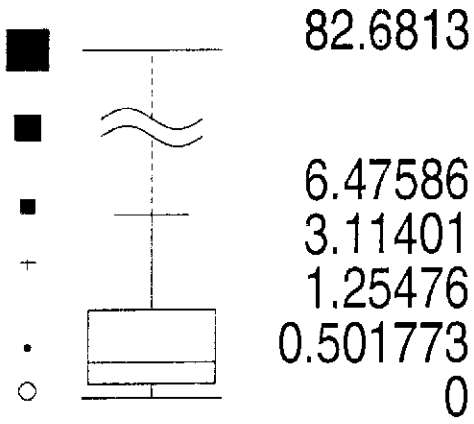


Nox\_mgl

Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

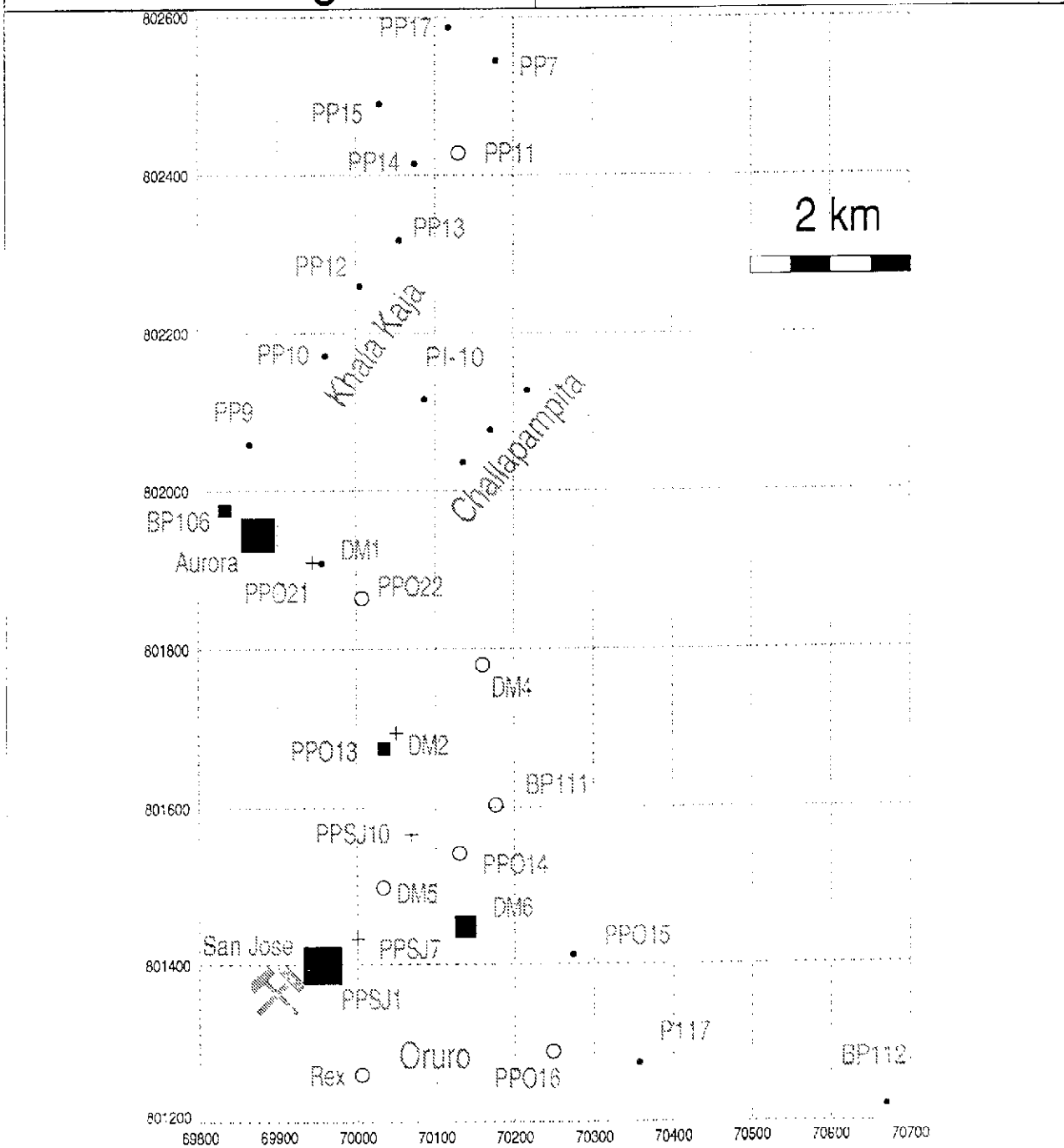




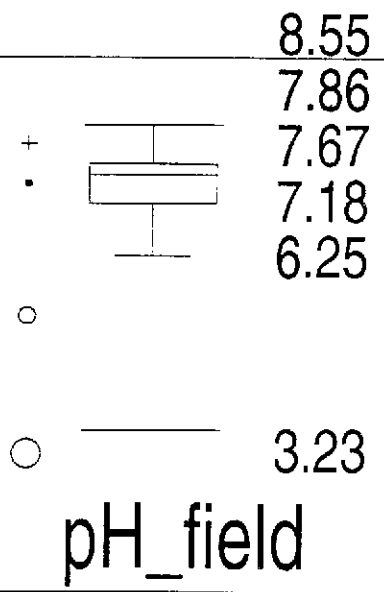
Pb\_ugl

Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

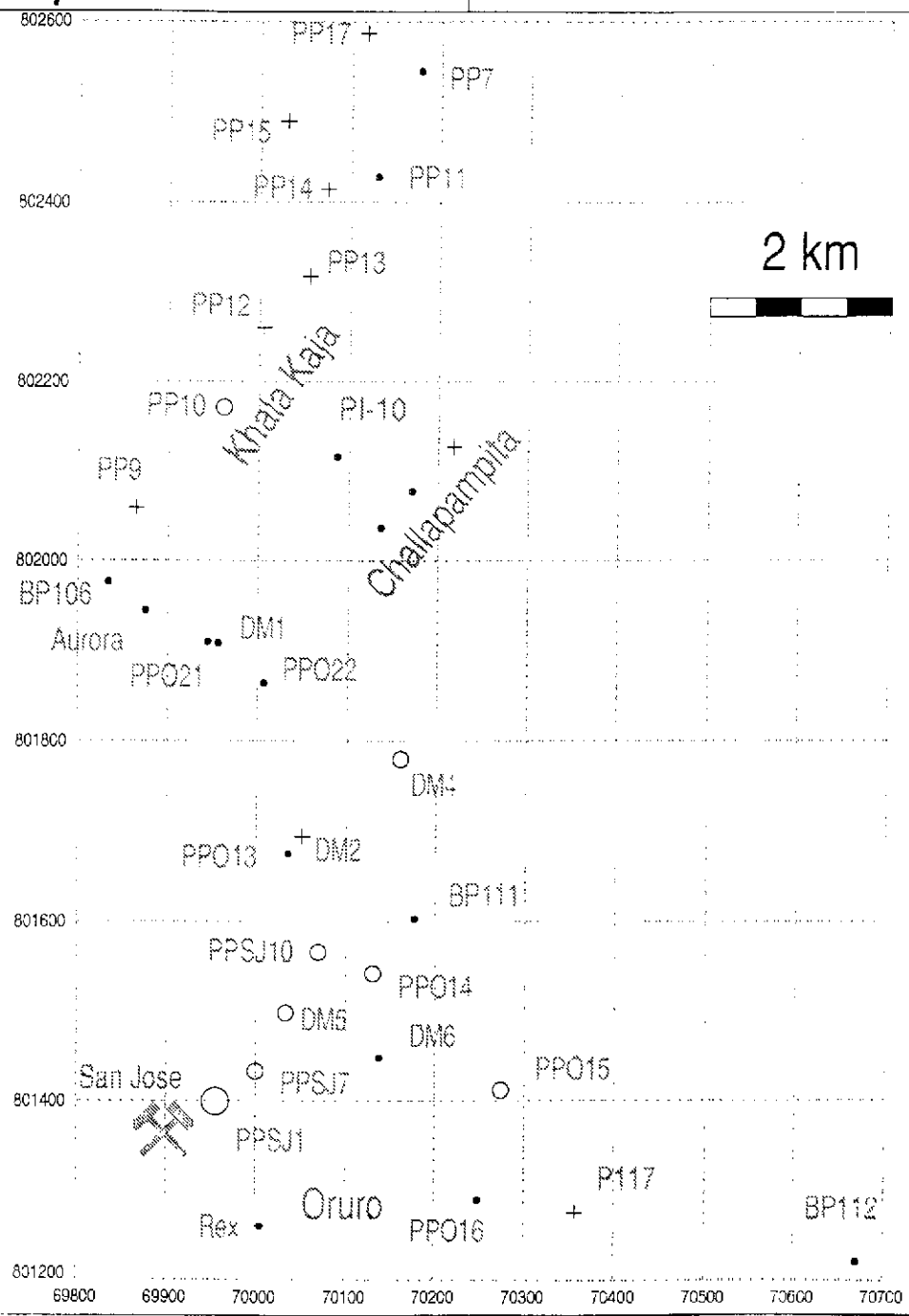


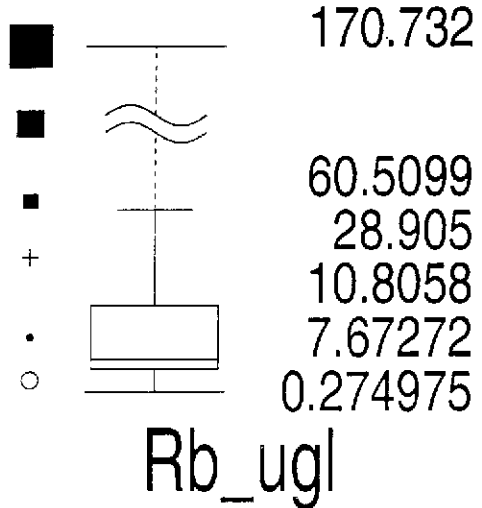




Dames & Moore Norge 1999

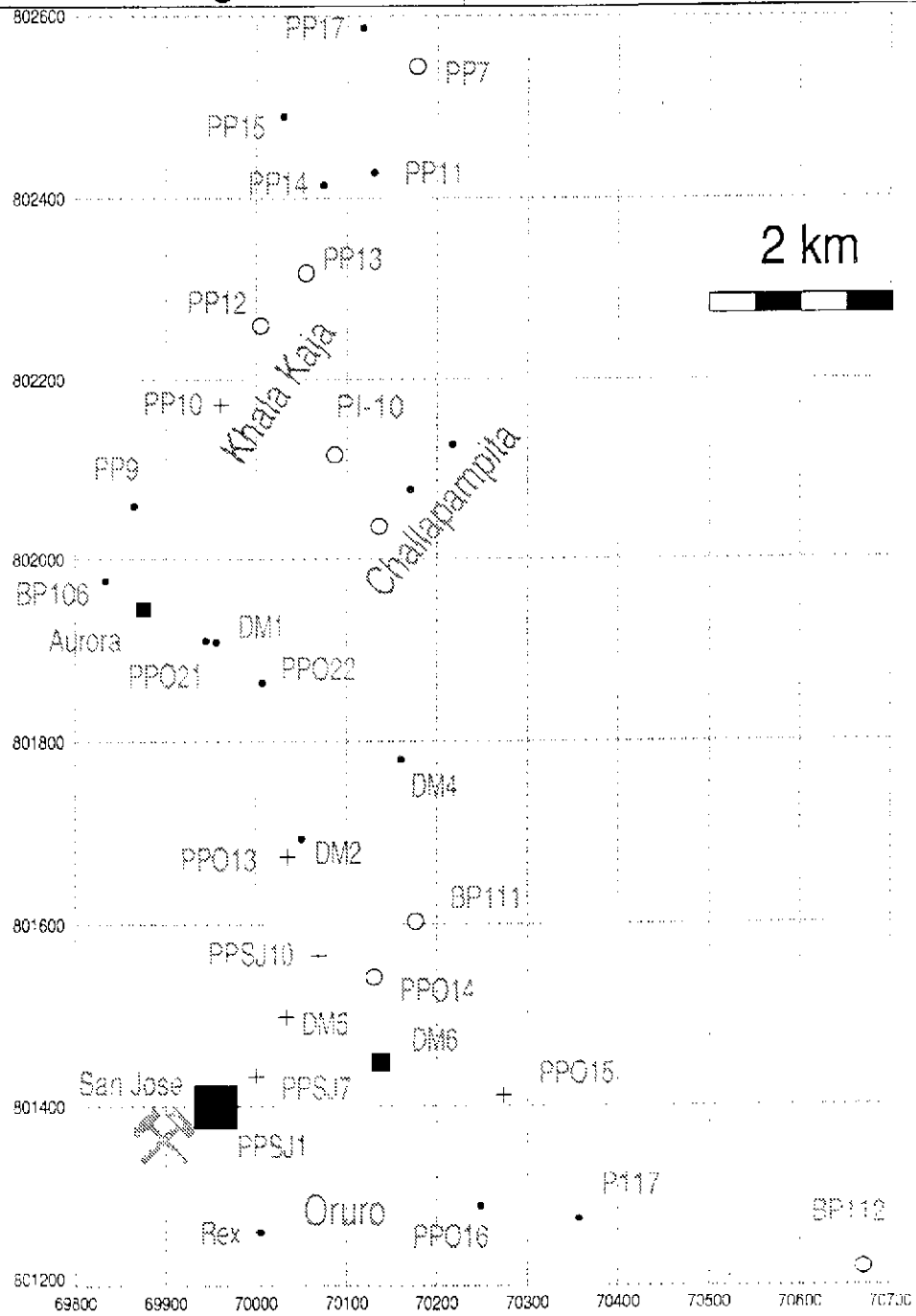
Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

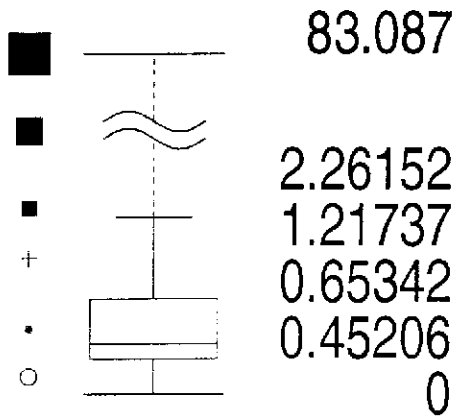




Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

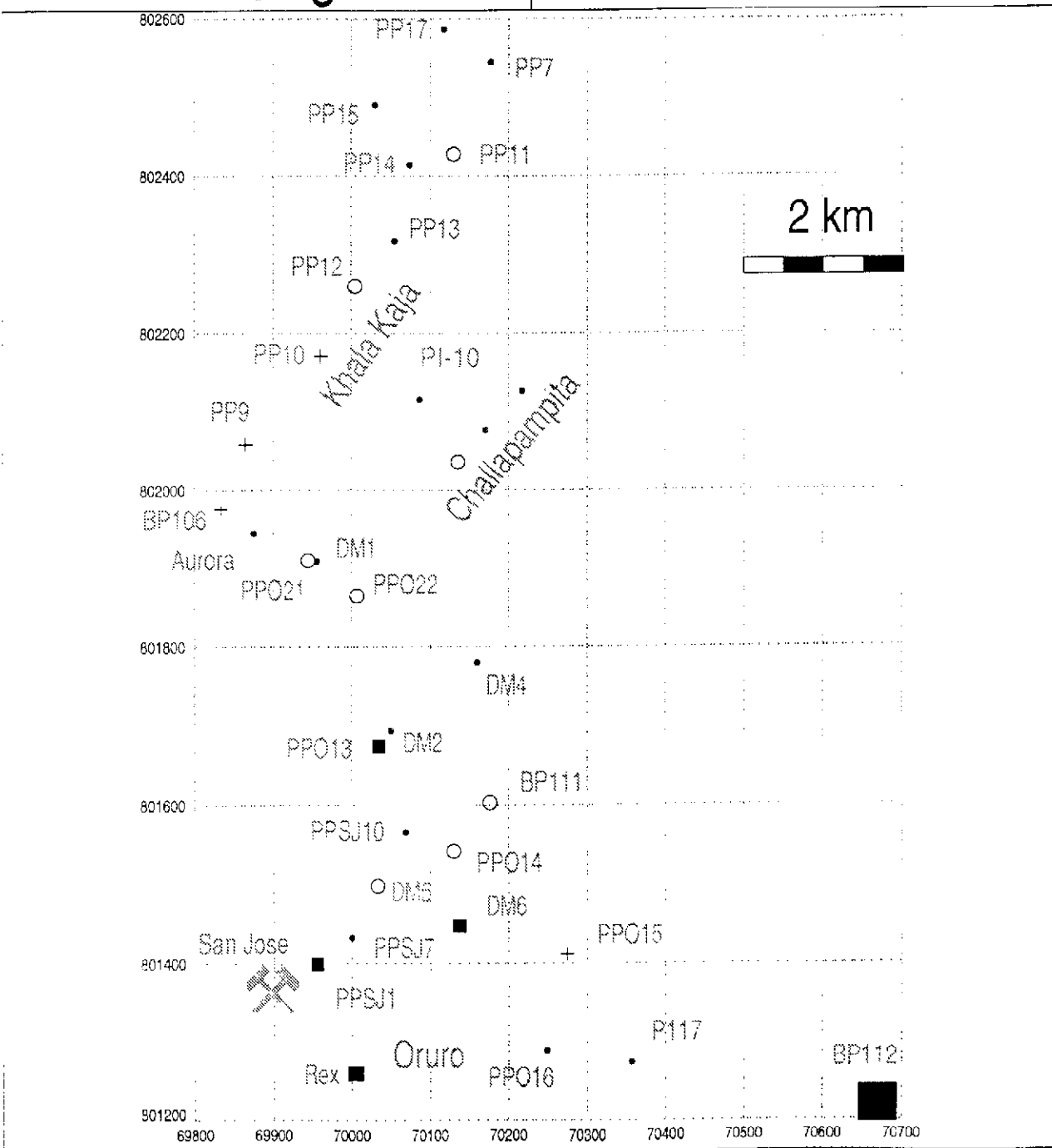


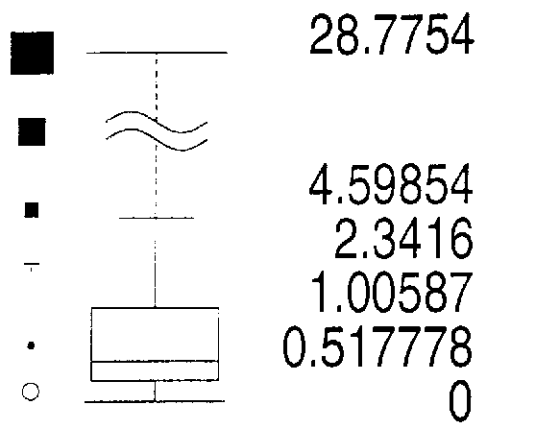


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

Sb\_ugl

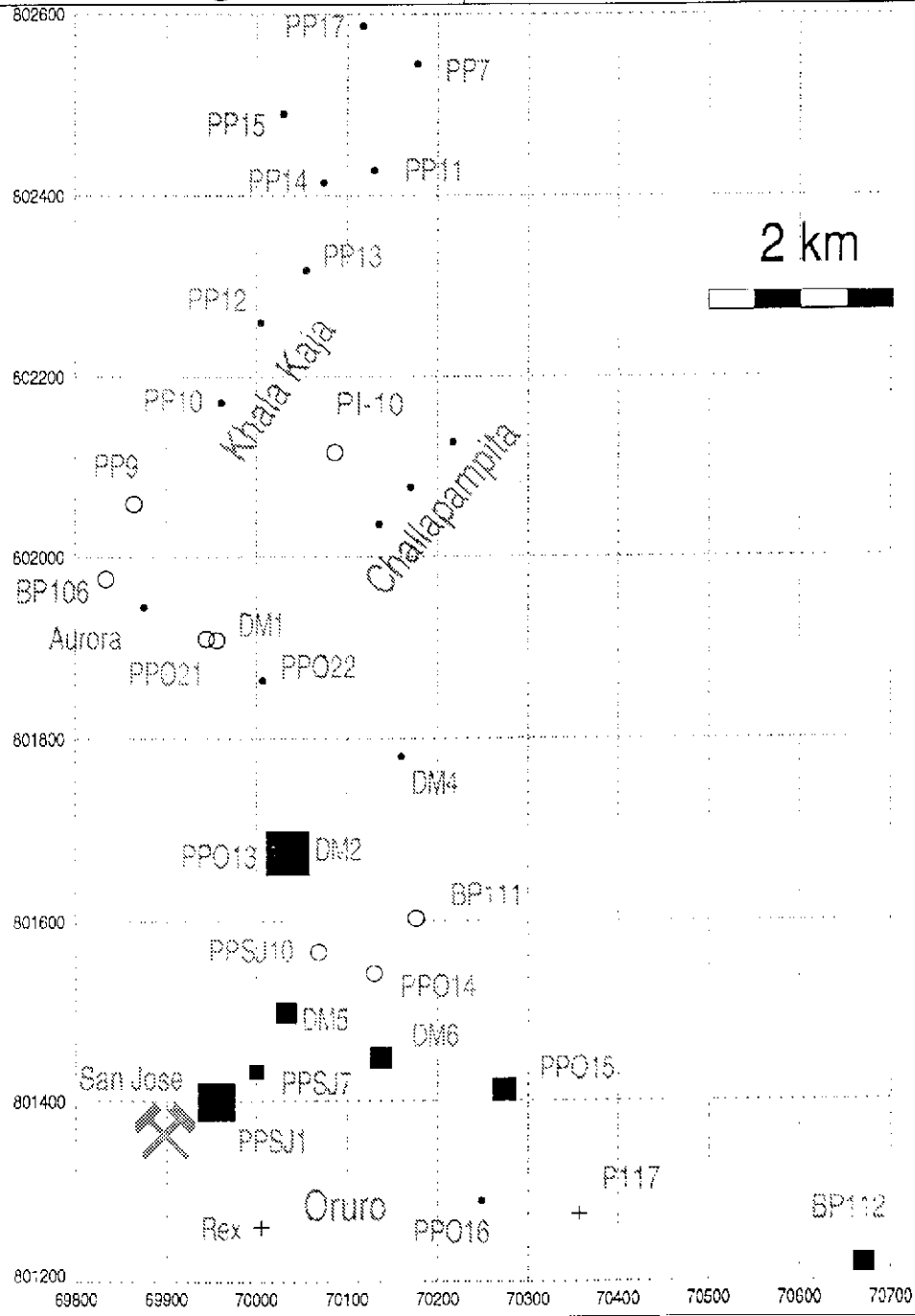


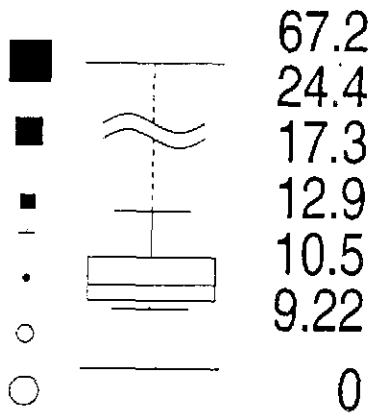


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

Se\_ugl

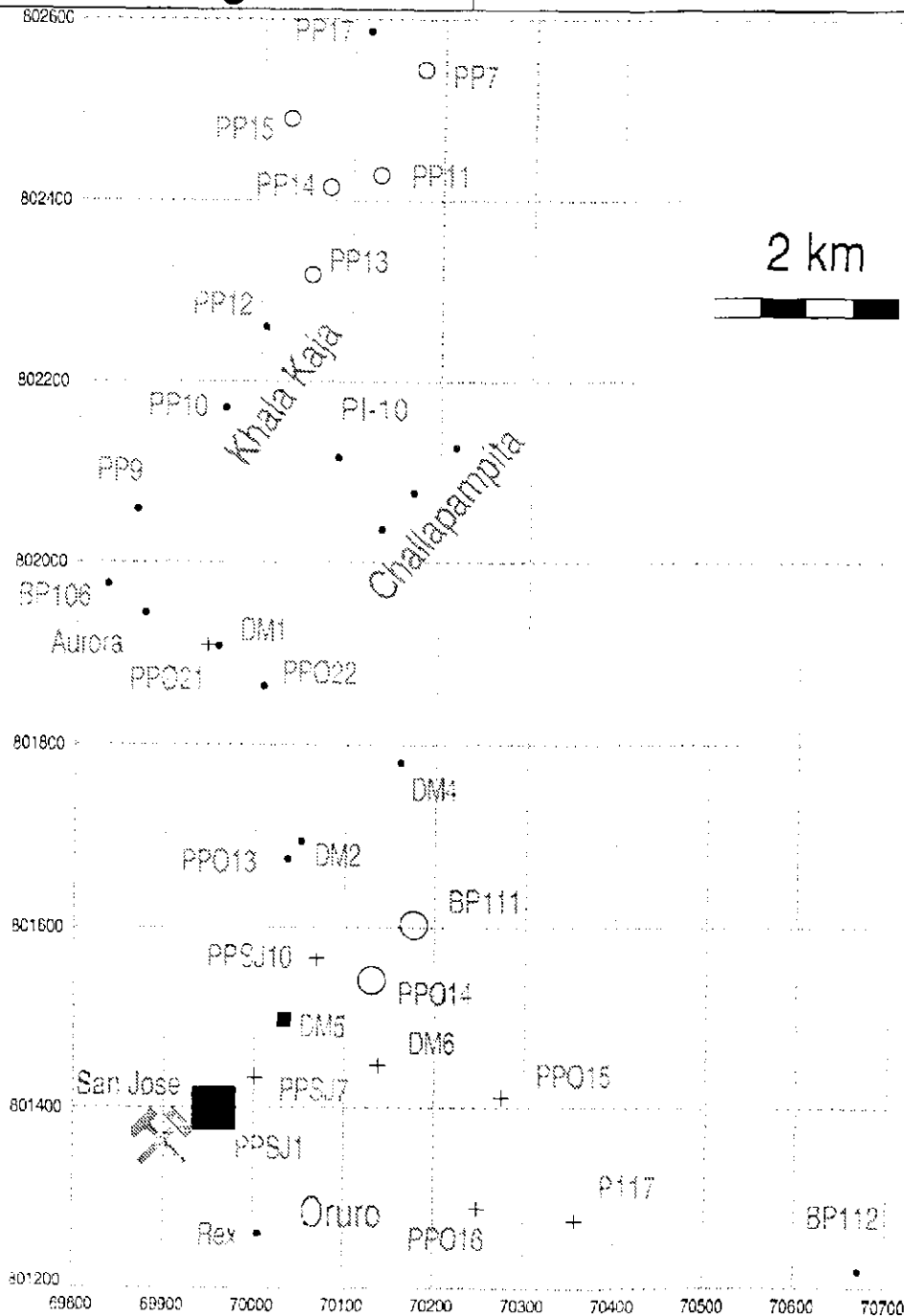


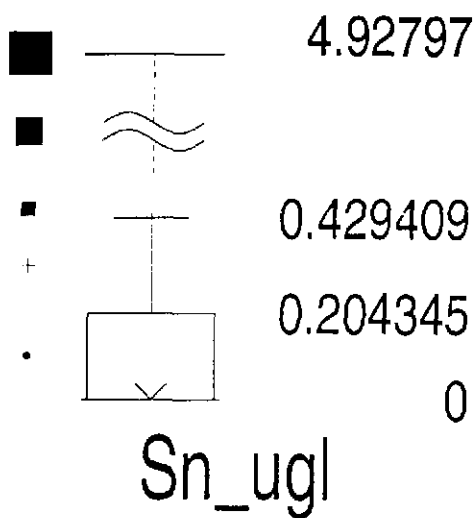


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

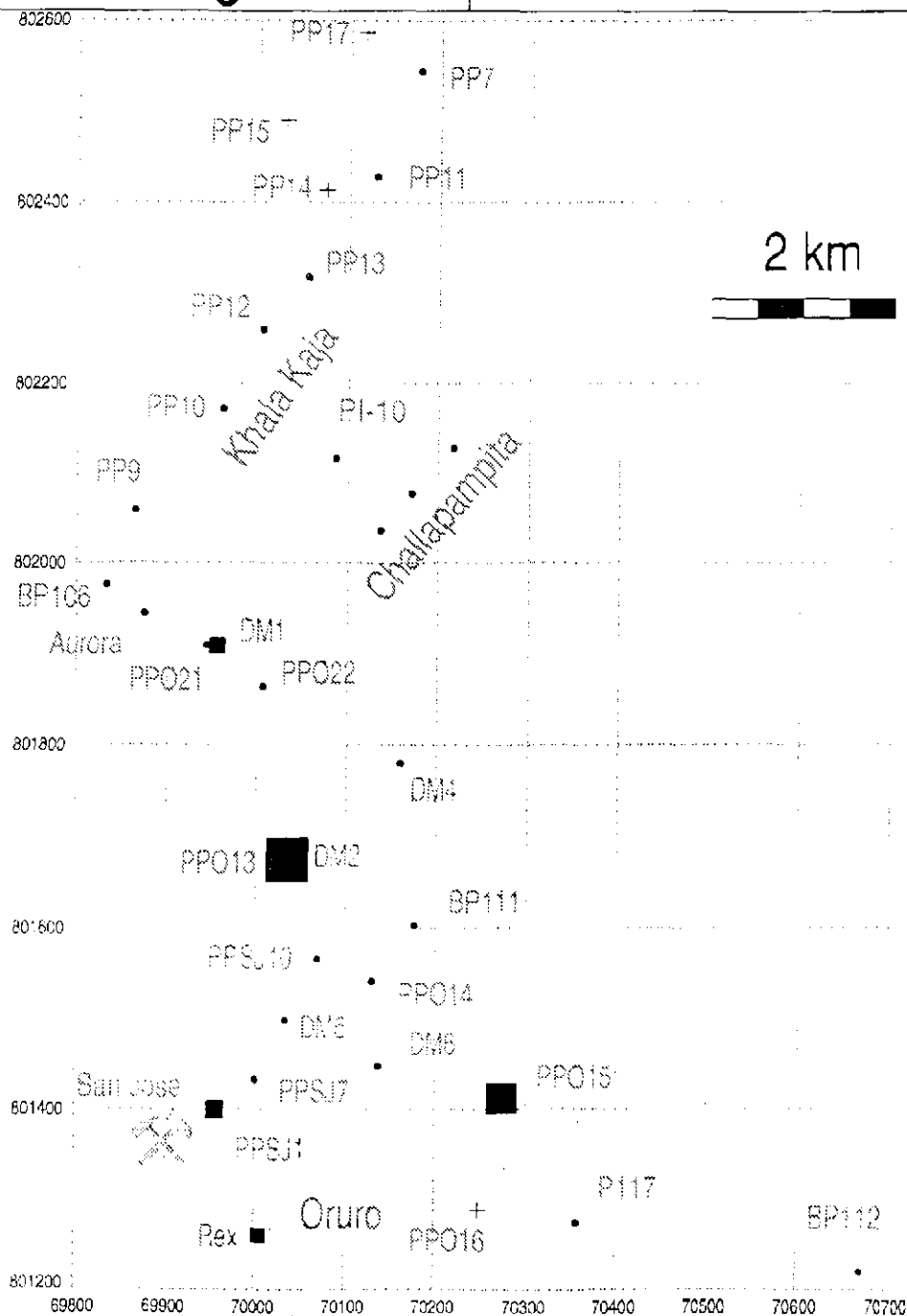
Si\_mgl

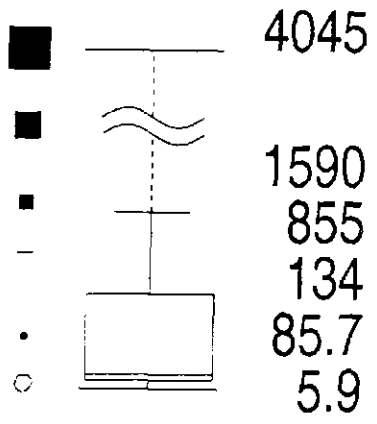




Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

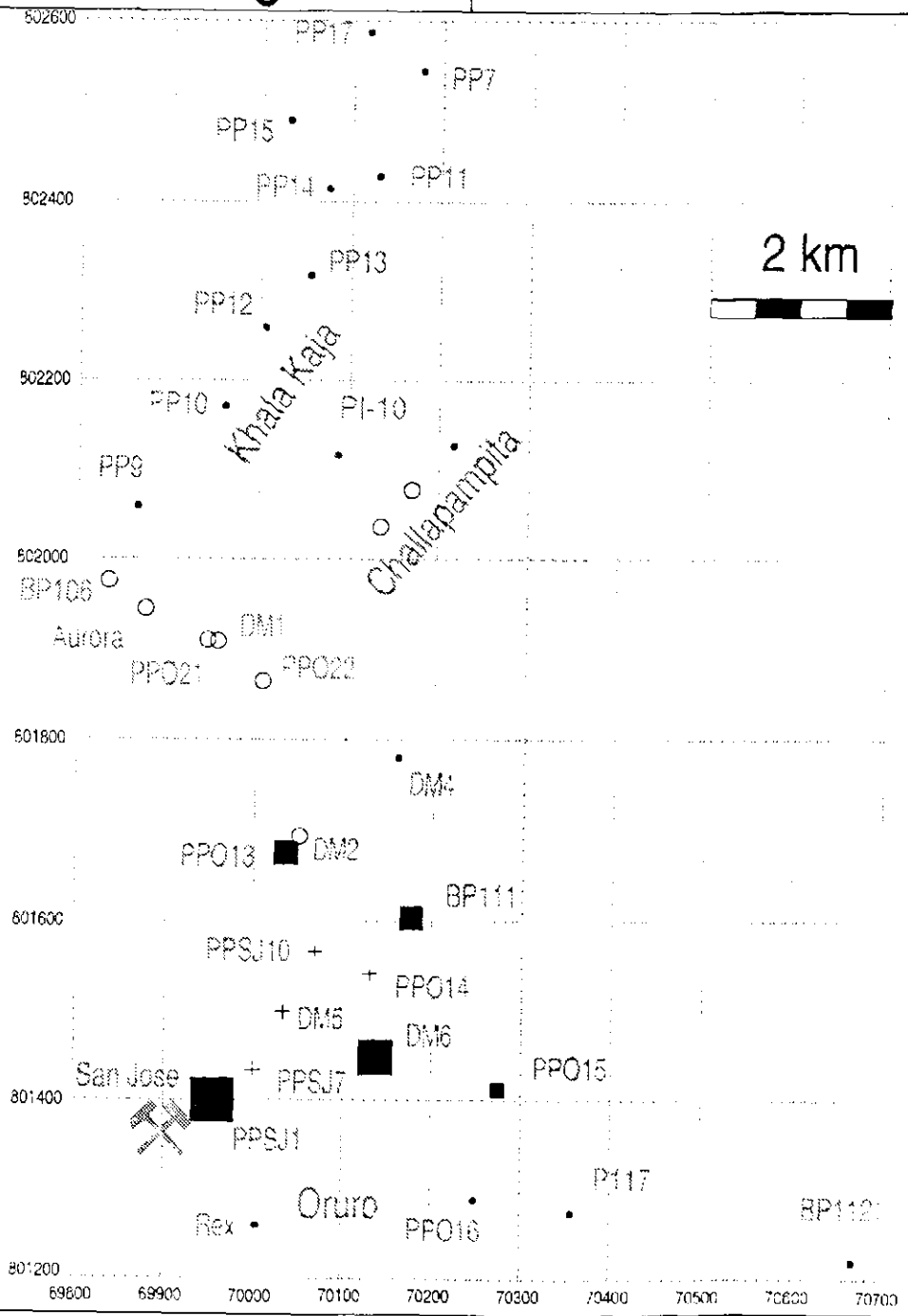


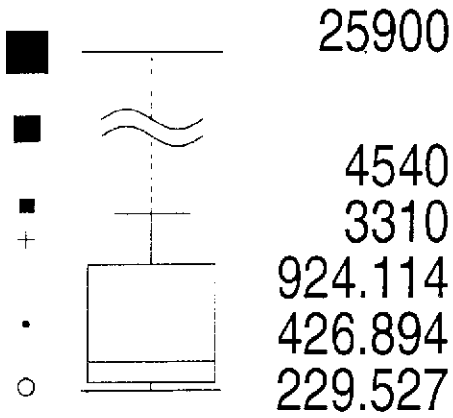


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

SO4\_mgl

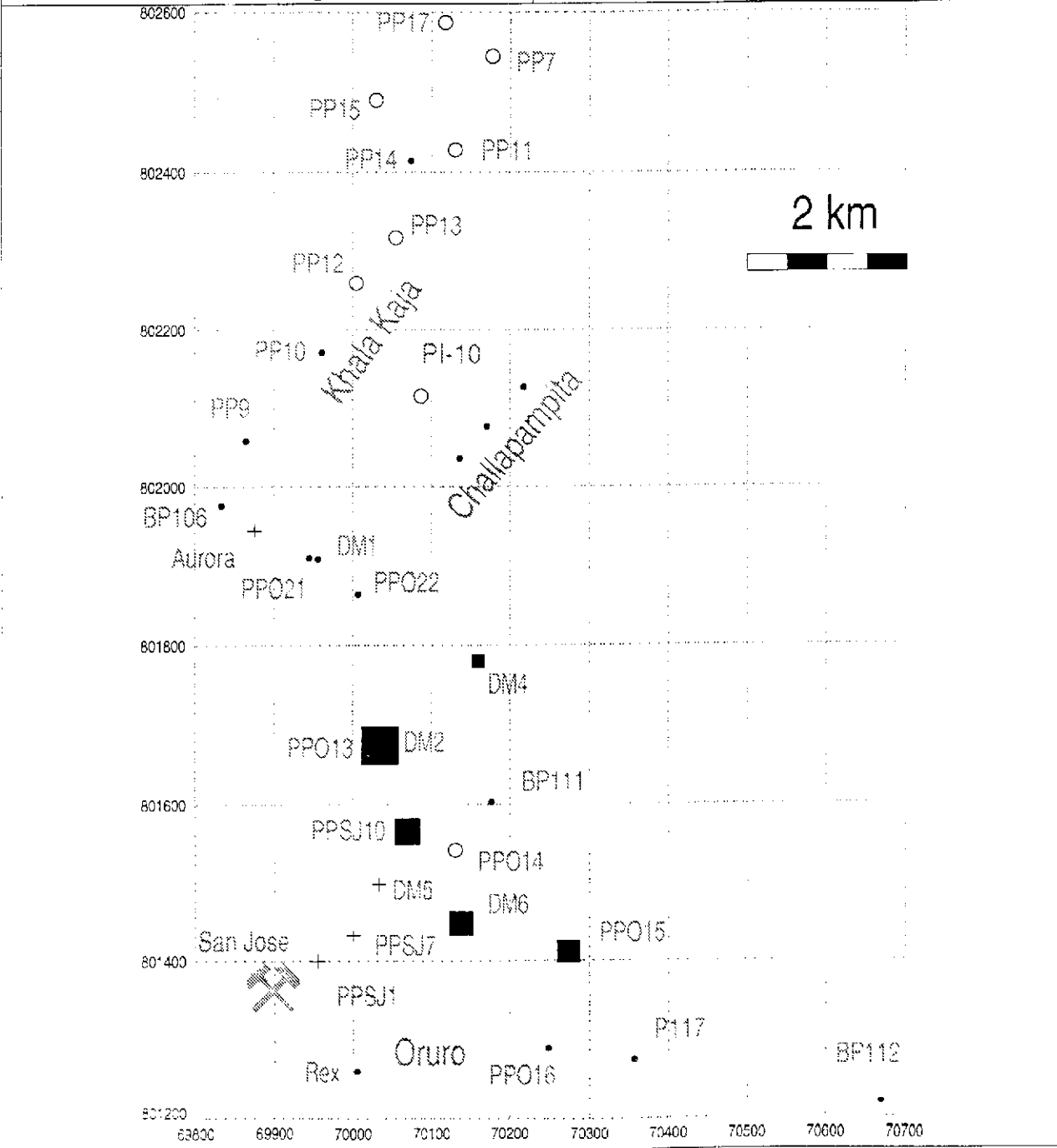




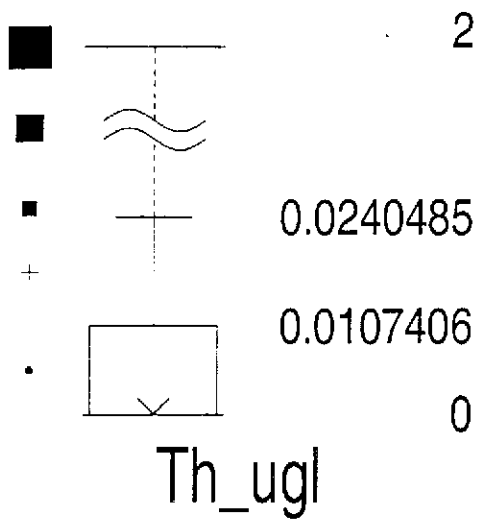
Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

Sr\_uql

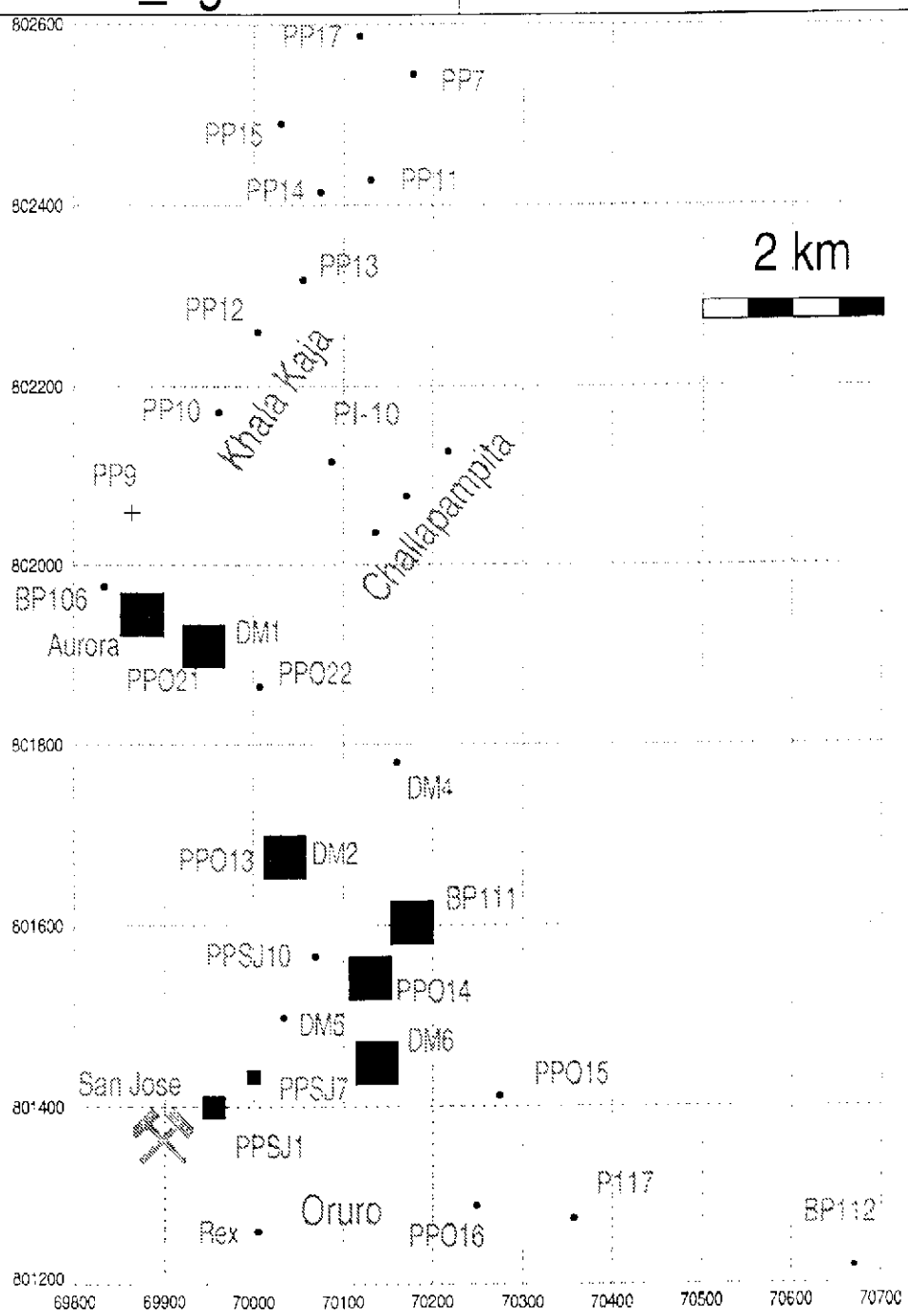


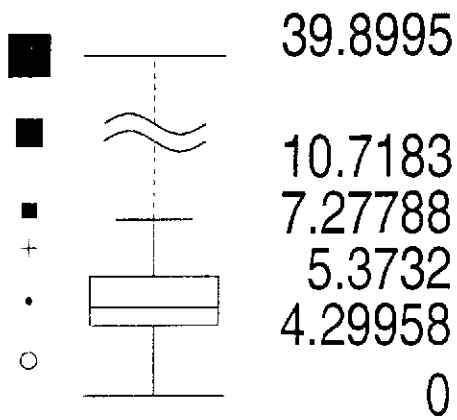




Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

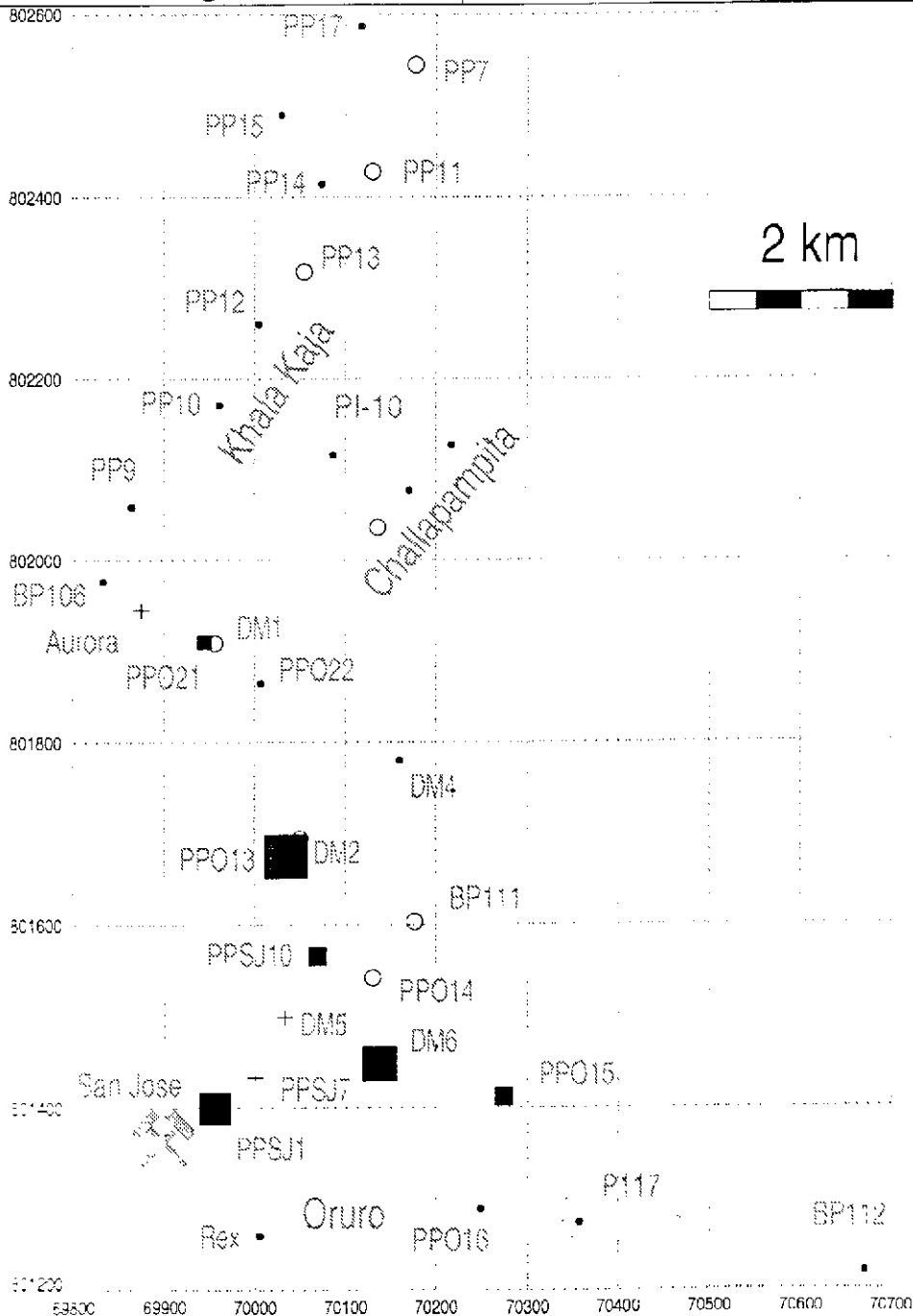


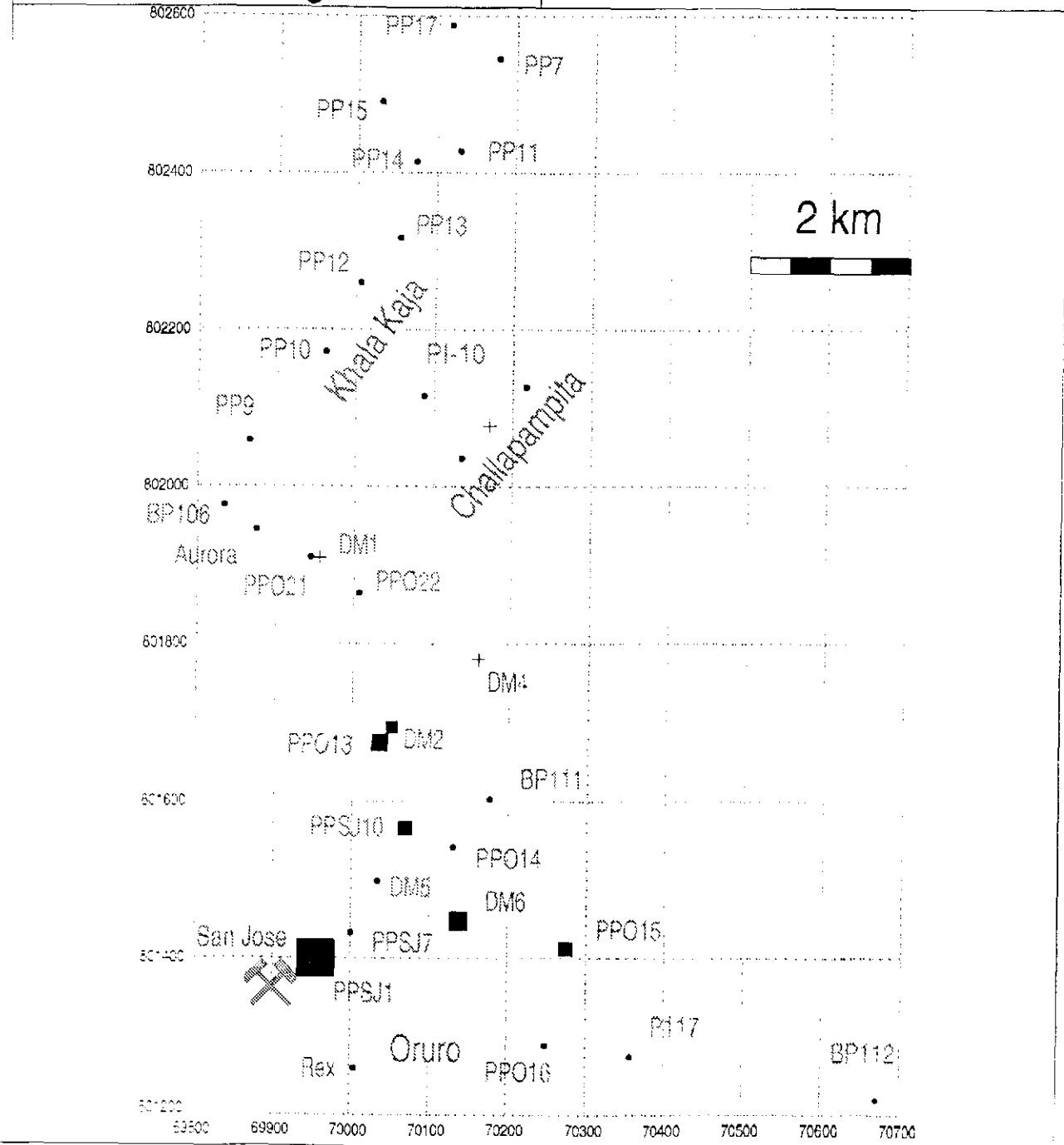
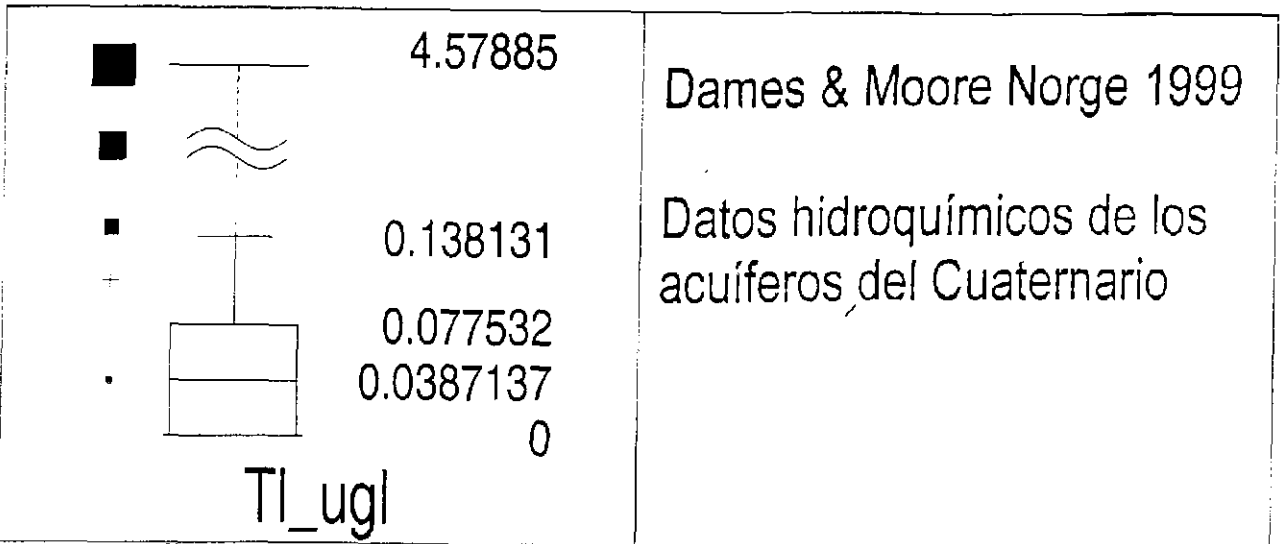


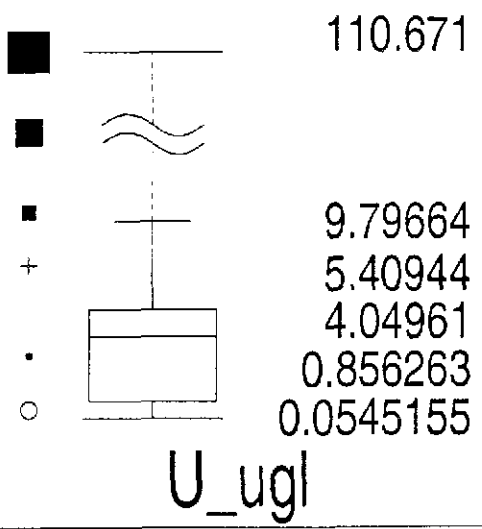
Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

Ti\_ugl

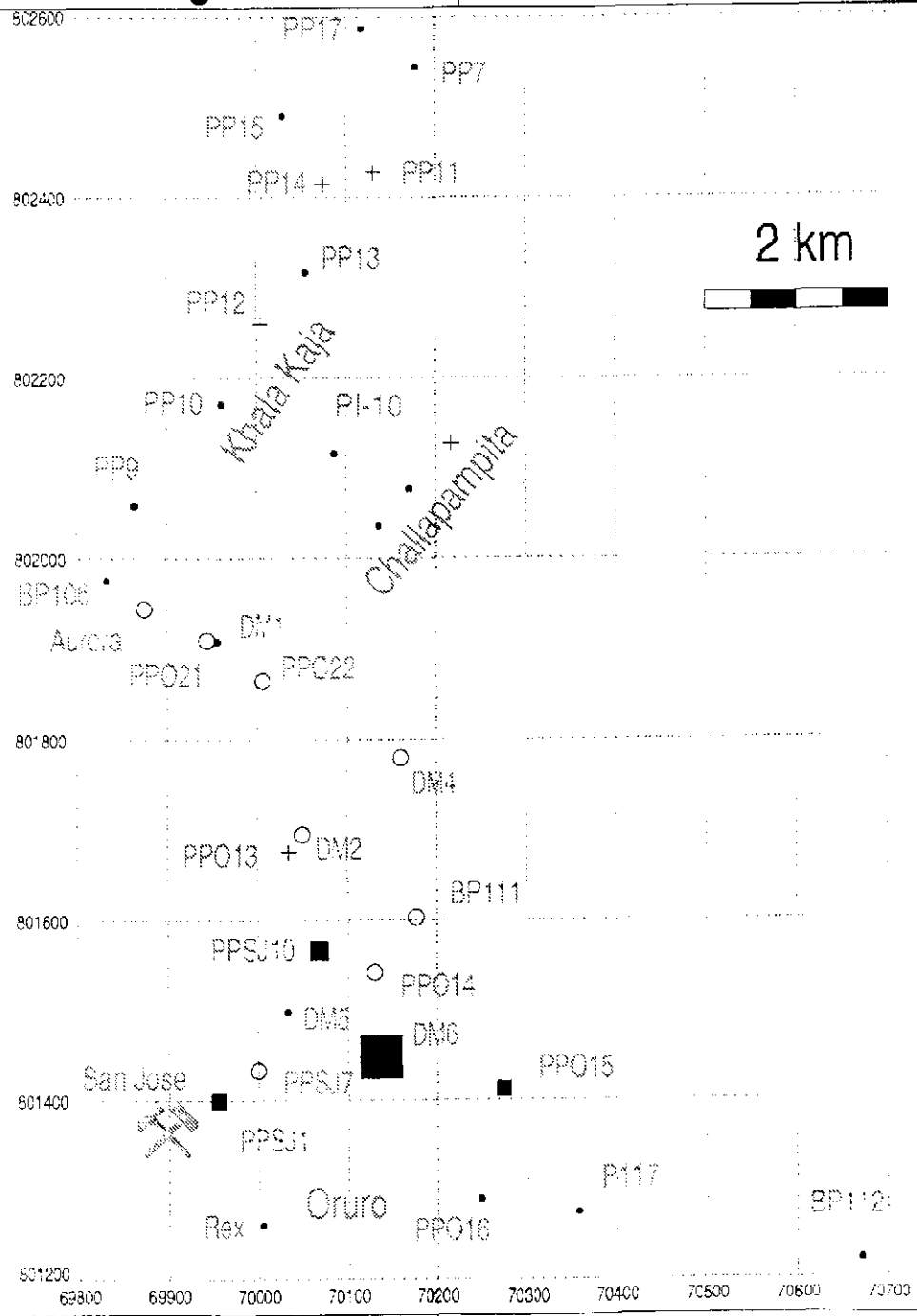


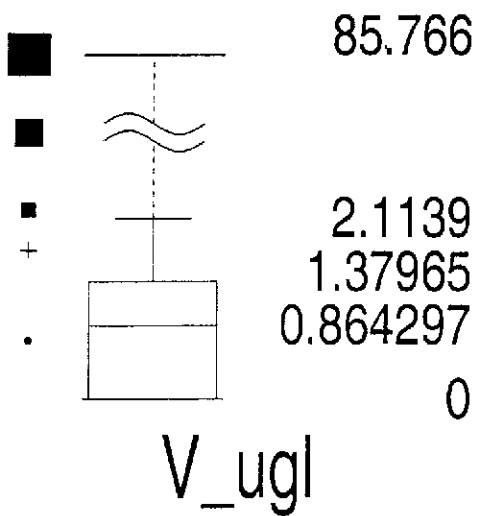




Dames & Moore Norge 1999

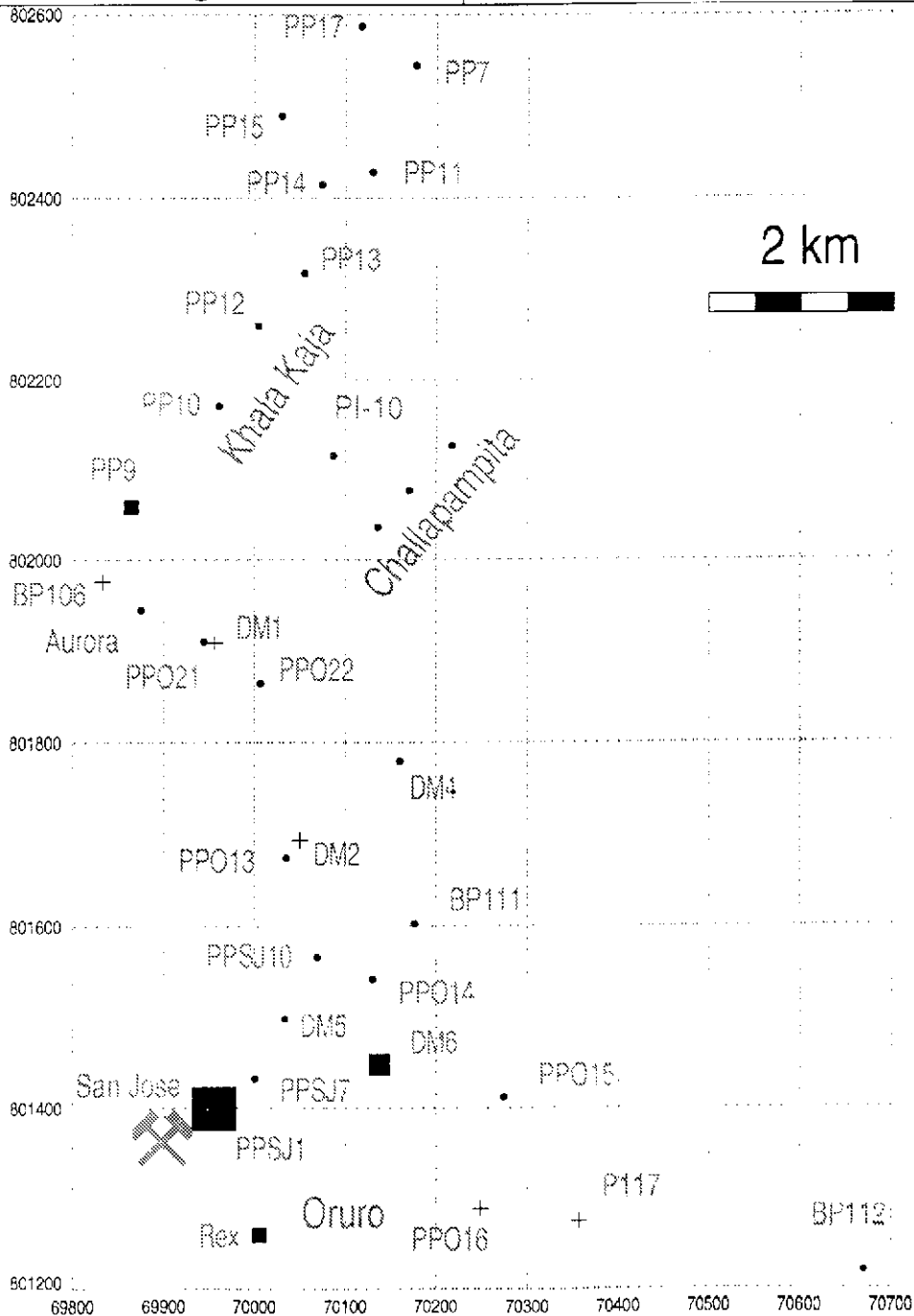
Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario

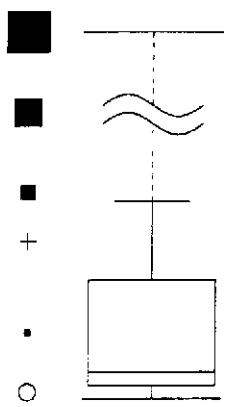




Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario





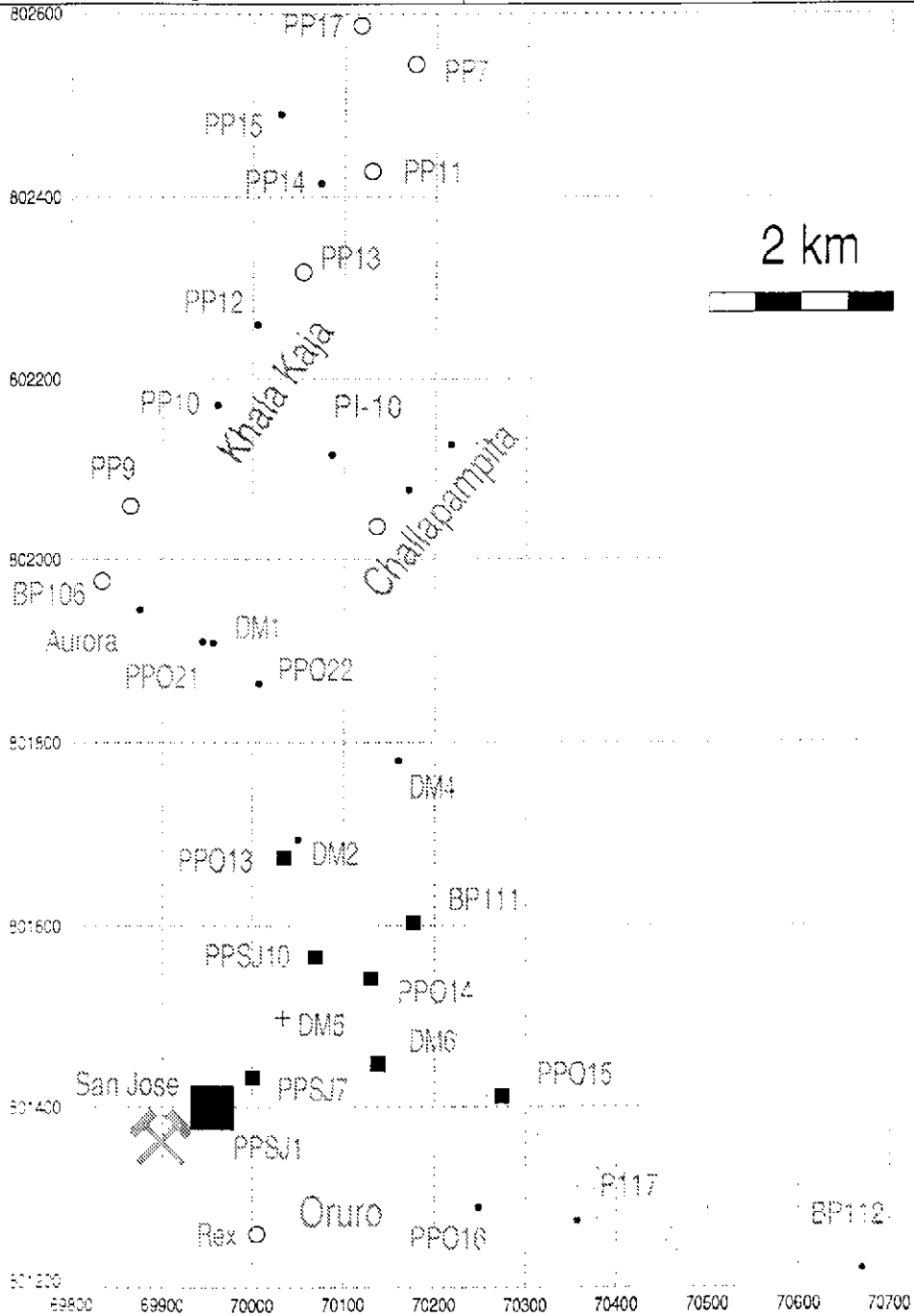
281.114

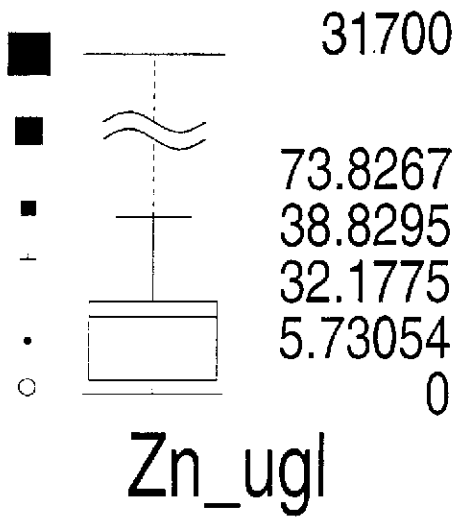
Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario

0.125562  
0.0801216  
0.026709  
0.0187634  
0.0116014

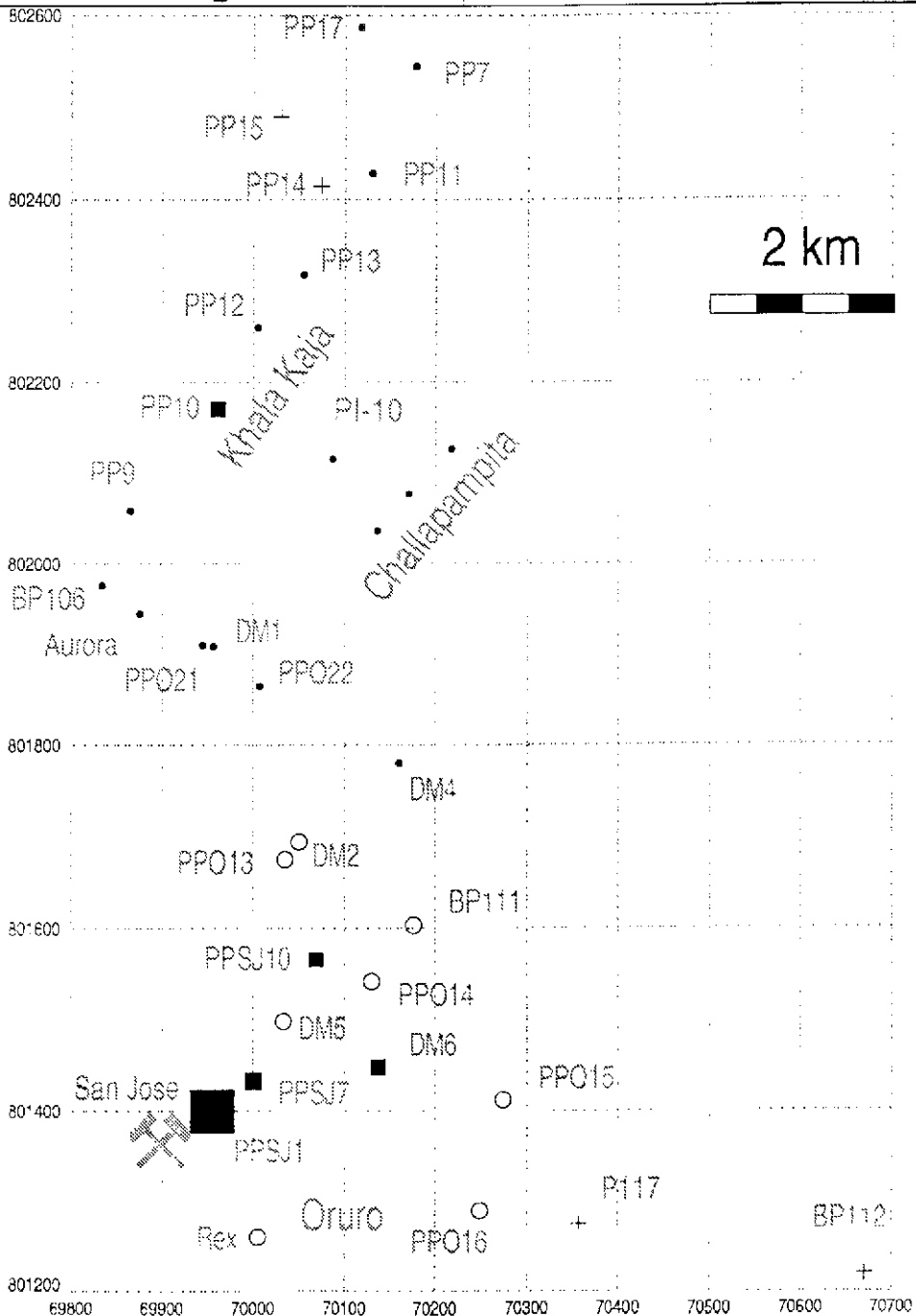
Y\_ugl





Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario



**APENDICE 4B**  
**MAPAS HIDROGEOQUIMICOS DE DISTRIBUCION DE ELEMENTOS**  
**SELECCIONADOS EN AGUAS SUBTERRANEAS DEL SISTEMA**  
**ACUIFERO CUATERNARIO Y AGUAS SUPERFICIALES DEL CANAL**  
**DE AGUAS DE MINA Y EL RIO TAGARETE EN LOS ALREDEDORES**  
**DEL CANAL/RIO TAGARETE**



**APENDICE 4B**  
**MAPAS HIDROGEOQUIMICOS DE DISTRIBUCION DE LOS**  
**ELEMENTOS SELECCIONADOS EN AGUAS SUBTERRANEAS DEL**  
**SISTEMA DEL ACUIFERO CUATERNARIO Y DE AGUAS**  
**SUPERFICIALES DEL CANAL DE AGUA DE LA MINA Y DEL RIO**  
**TAGARETE EN LOS ALREDEDORES DEL CANAL DE AGUA DE LA**  
**MINA / RIO TAGARETE**

El encabezado de cada mapa describe el determinante y la unidad de concentración.

Por ejemplo Cu ug/l = cobre en ug/l

Se presentan los siguientes mapas:

pH, determinado en el campo

Alcalinidad, meq/l, titulado en el campo

Cd, ug/l

Cl, mg/l

Cu, ug/l

I, ug/l

K, mg/l

La, ug/l

Mg, mg/l

Mn, ug/l

NH<sub>4</sub>, mg/l

Ni, mg/l

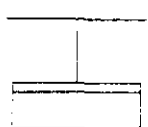

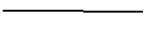
Pb, ug/l

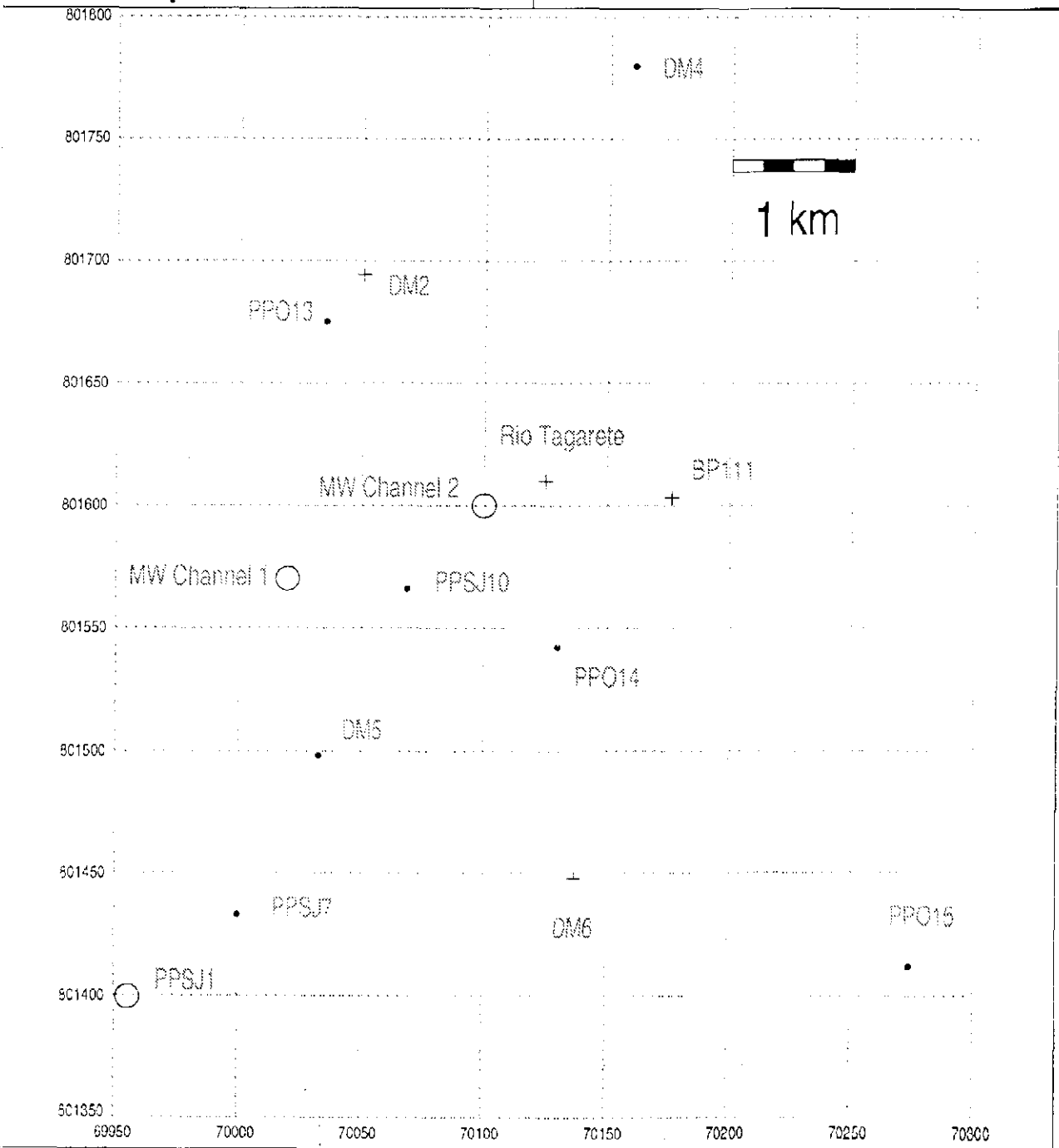
Se, ug/l

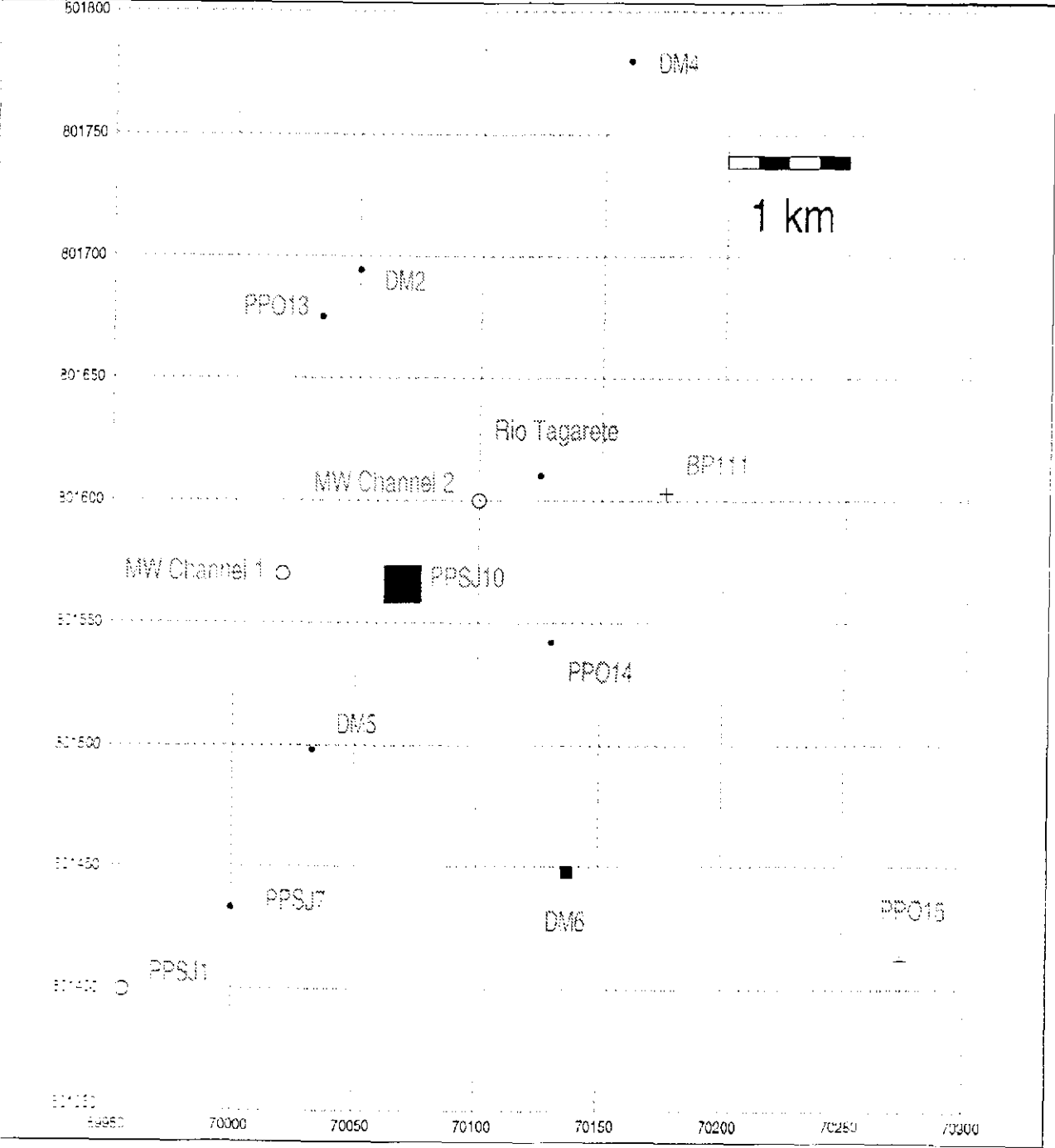
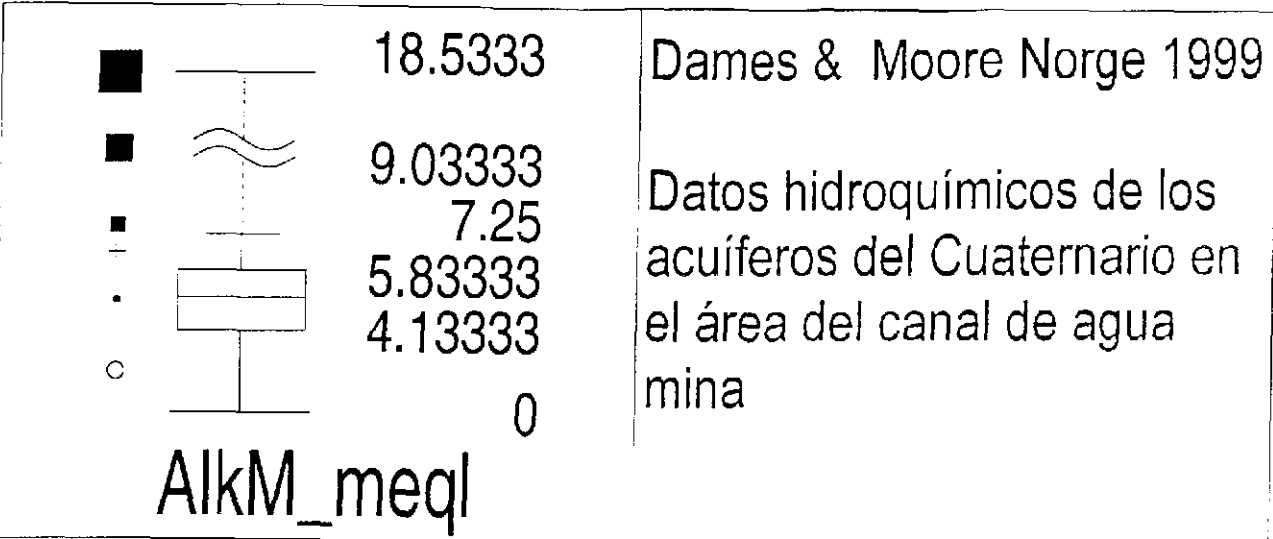
Ti, ug/l

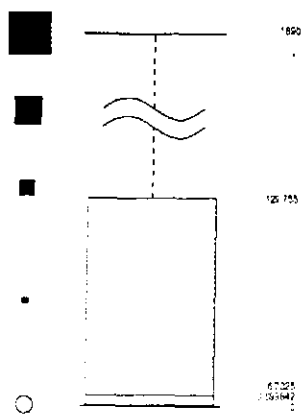
V, ug/l

Zn, ug/l

+		8.55	Dames & Moore Norge 1999
		7.21	
•		7.025	
		6.25	
○		2.1	
pH_field			



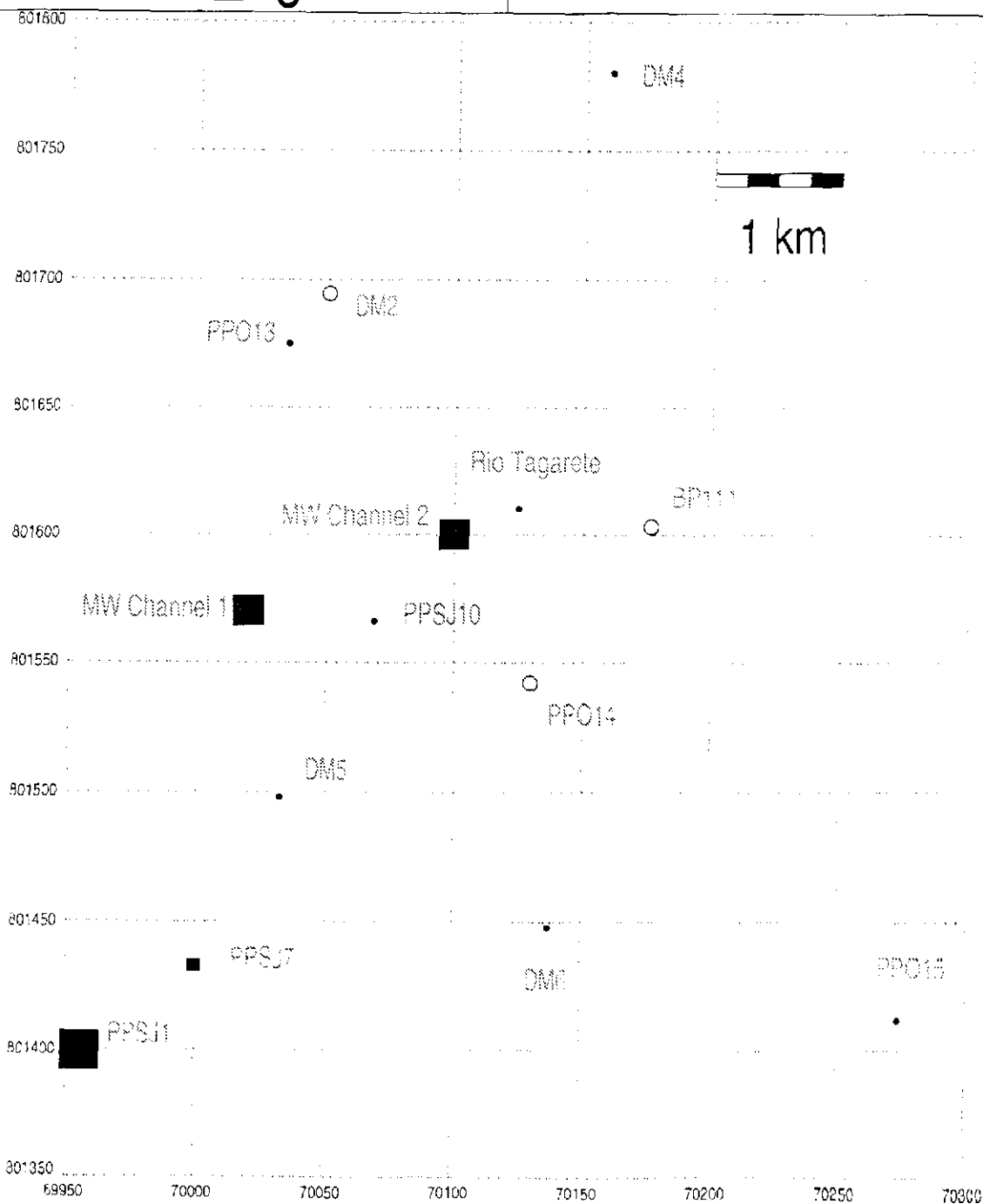


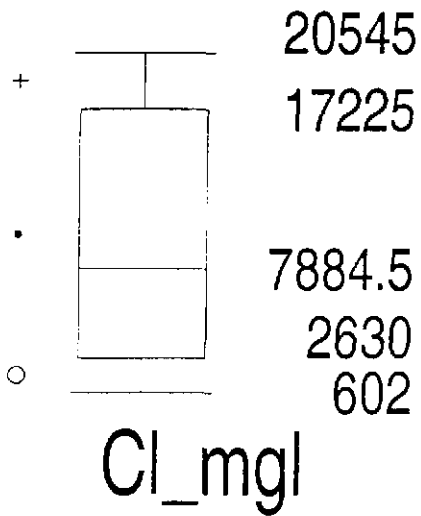


Cd\_ugl

Dames & Moore Norge 1999

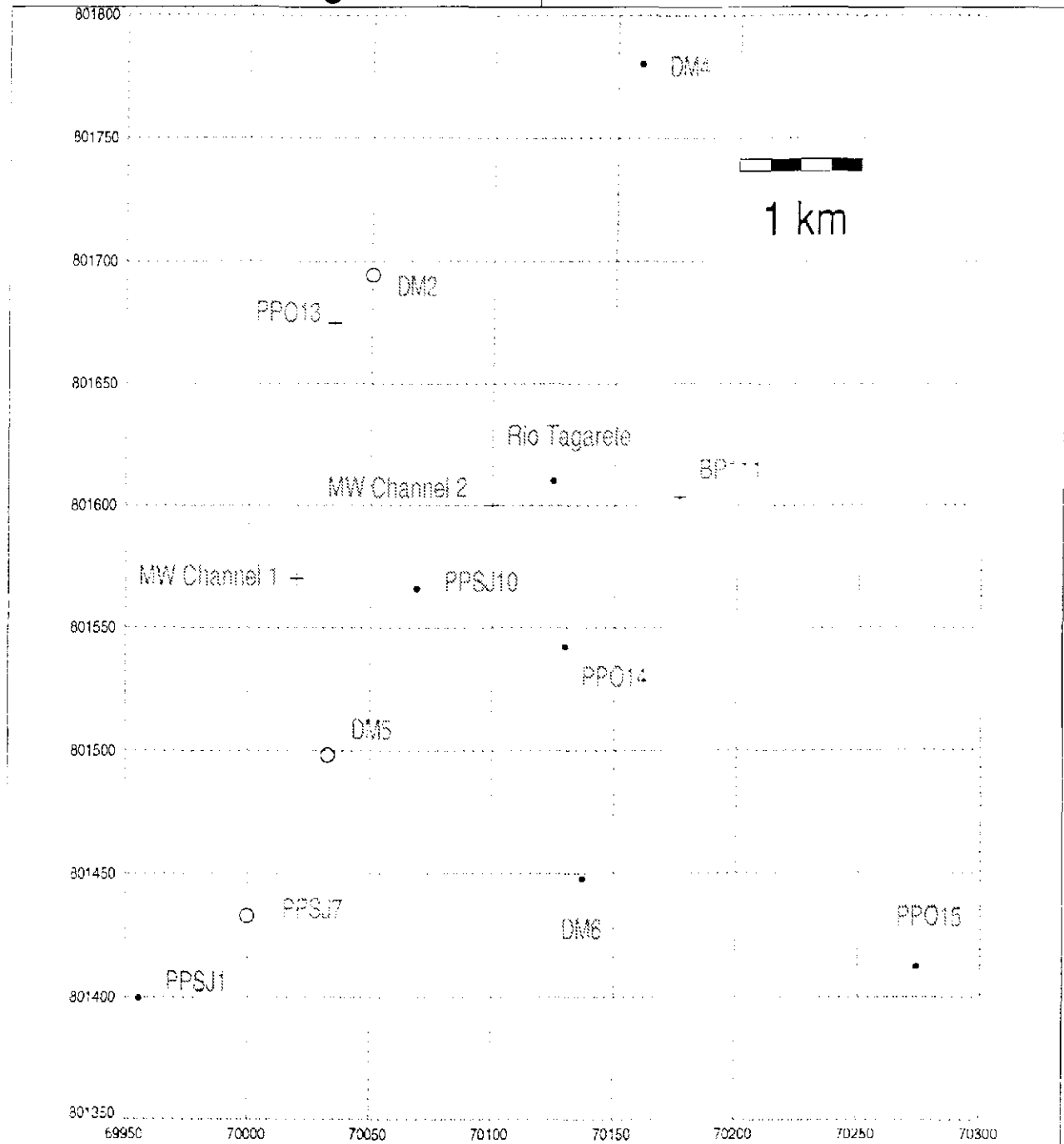
Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario en  
el área del canal de agua  
mina

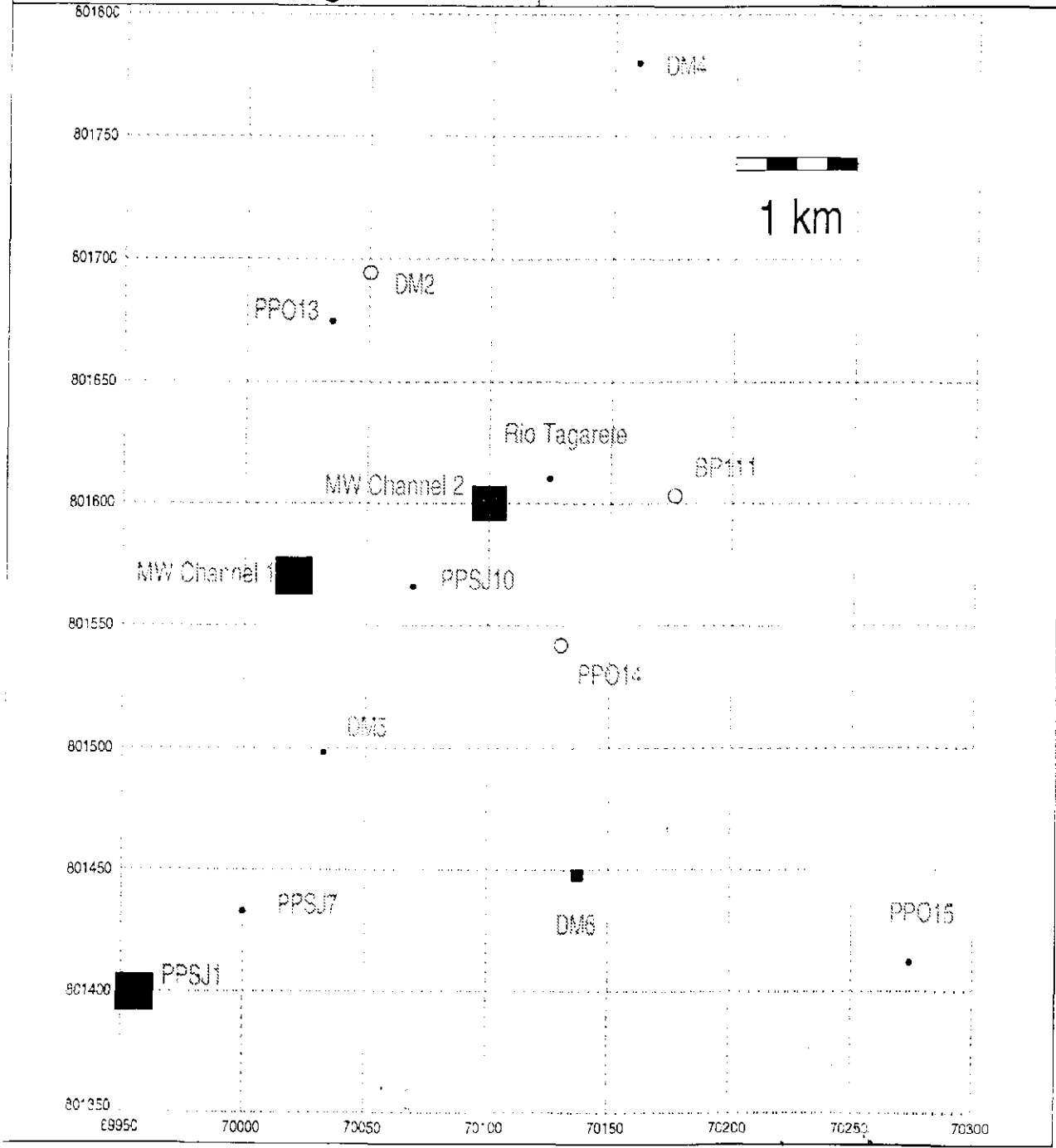
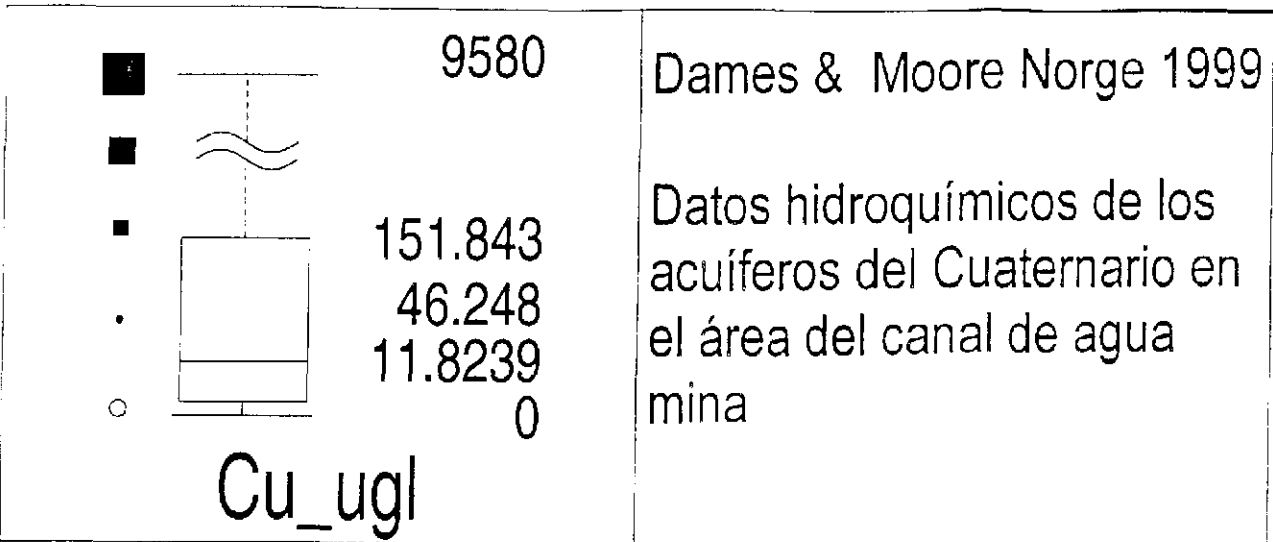


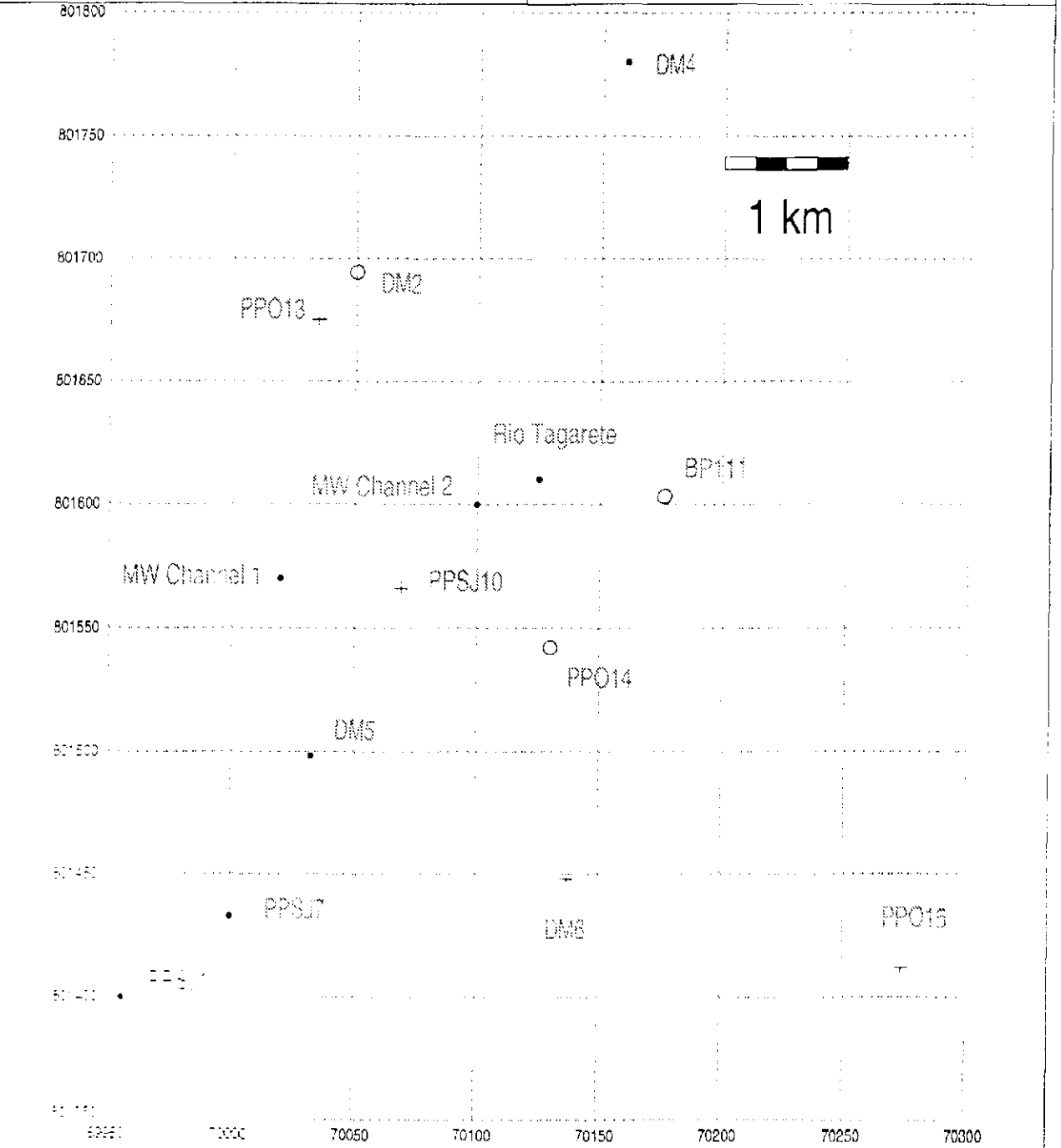
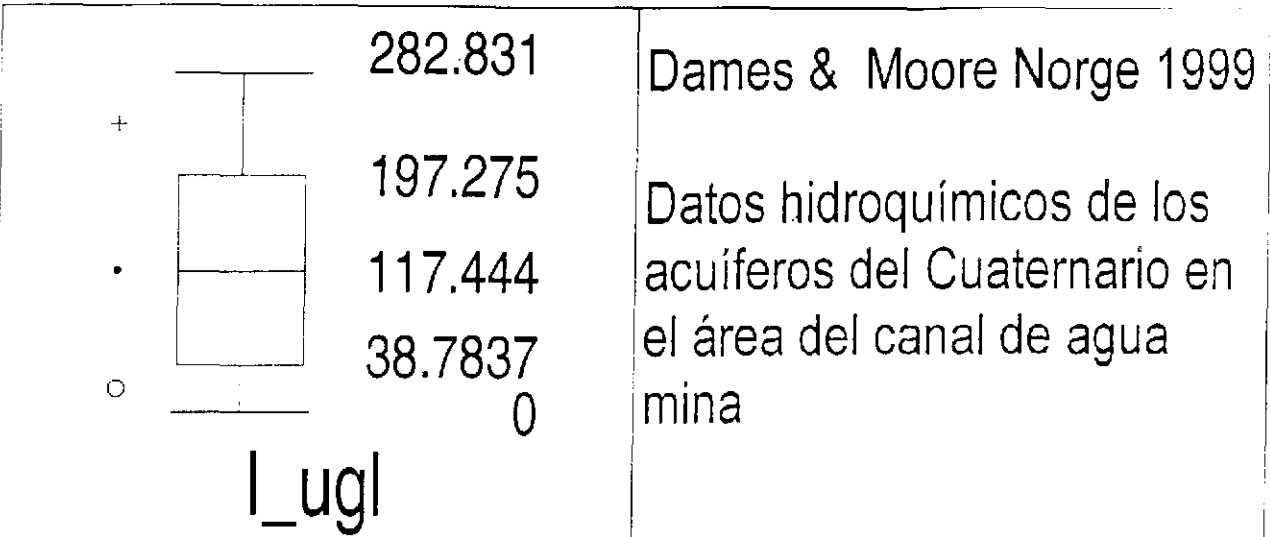


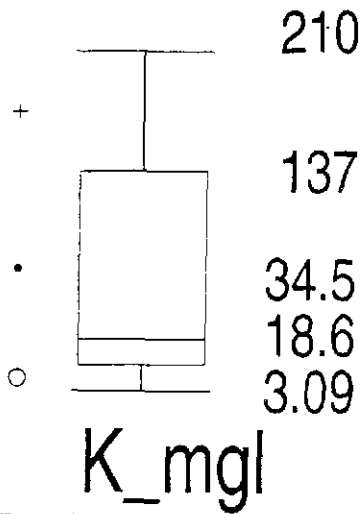
Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario en el área del canal de agua mina



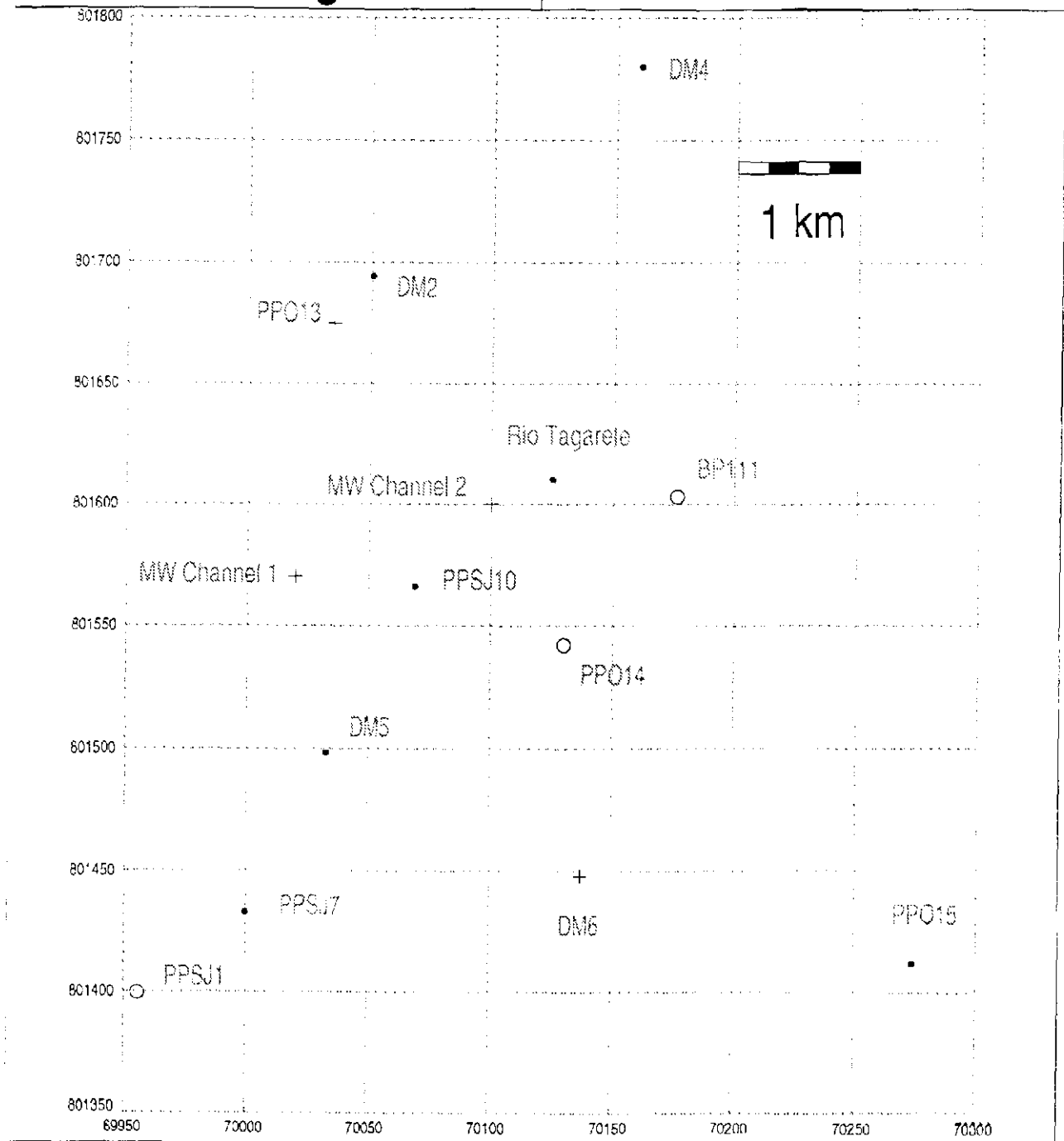




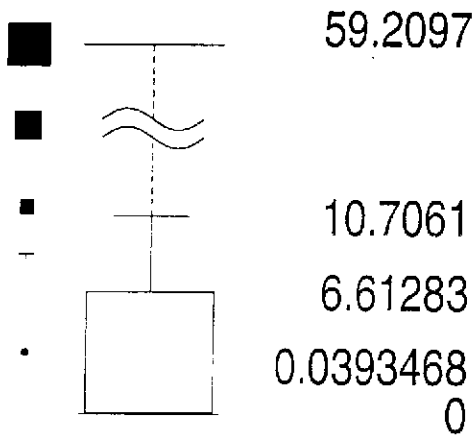


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario en el área del canal de agua mina



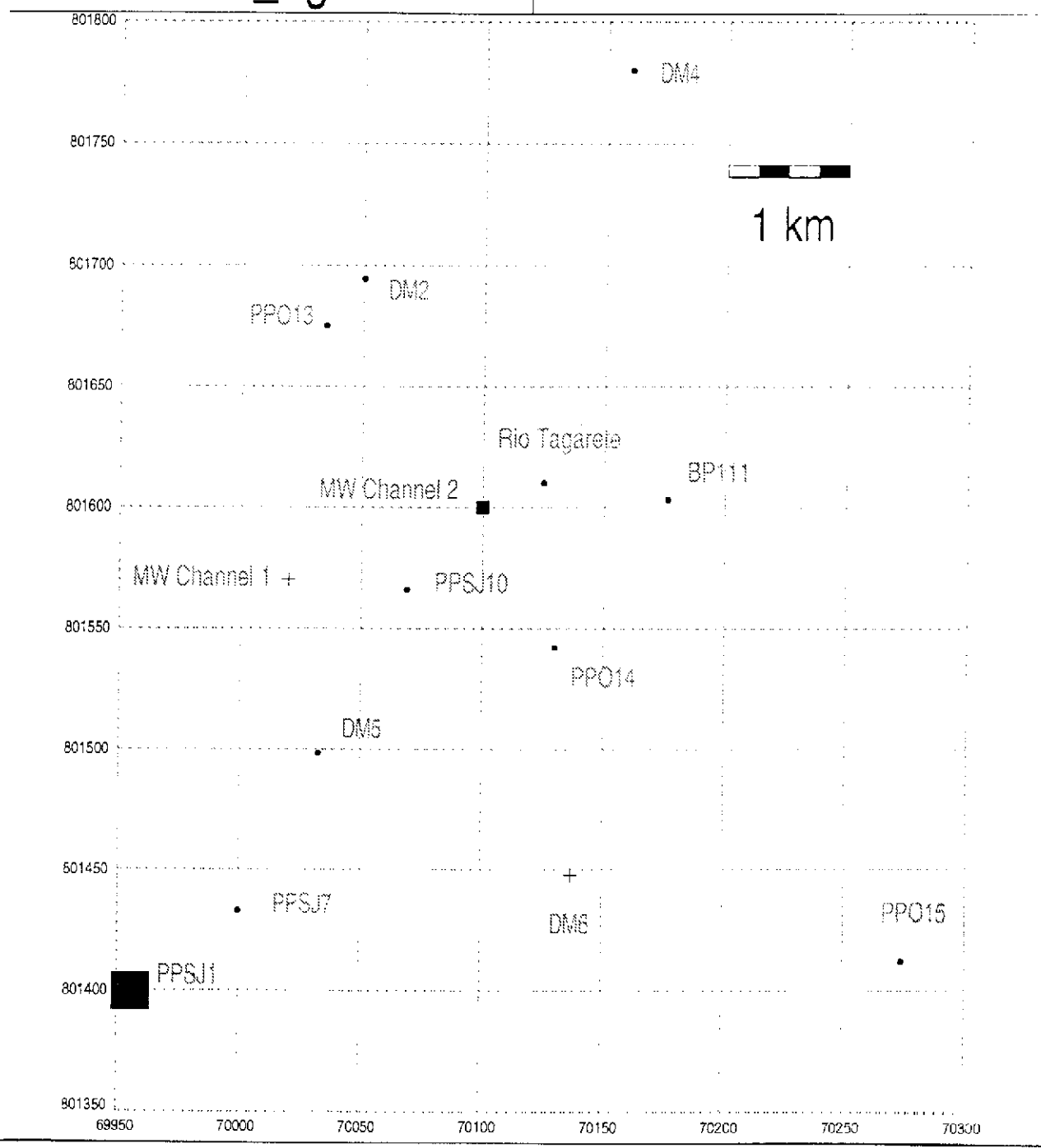


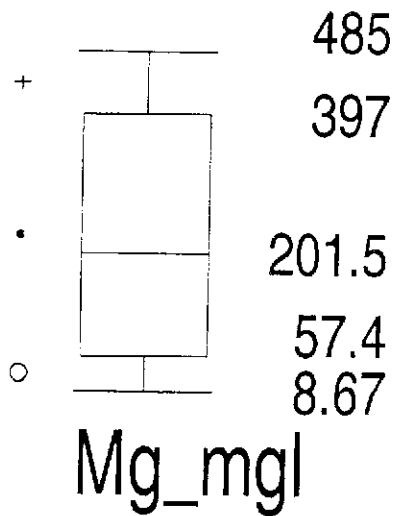


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario en el área del canal de agua mina

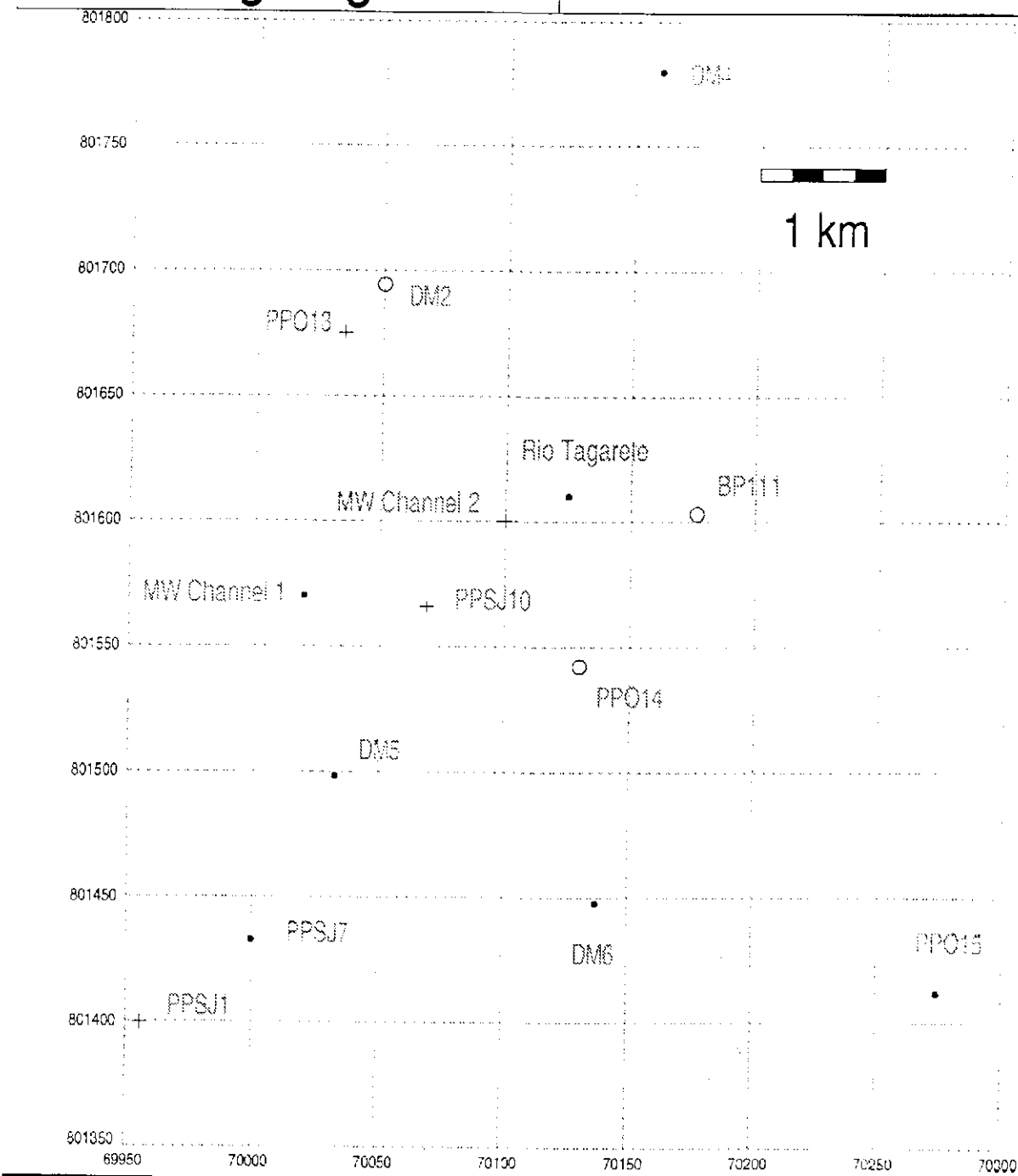
La\_ugl

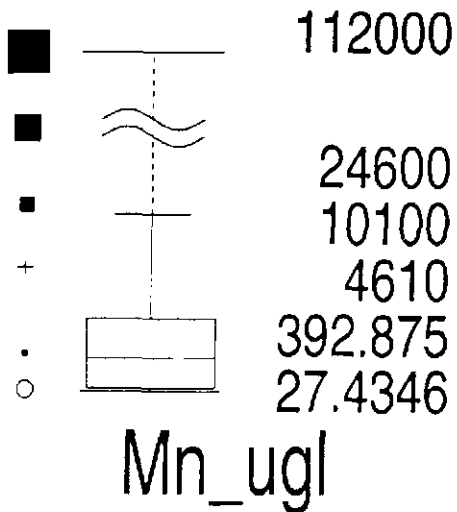




Dames & Moore Norge 1999

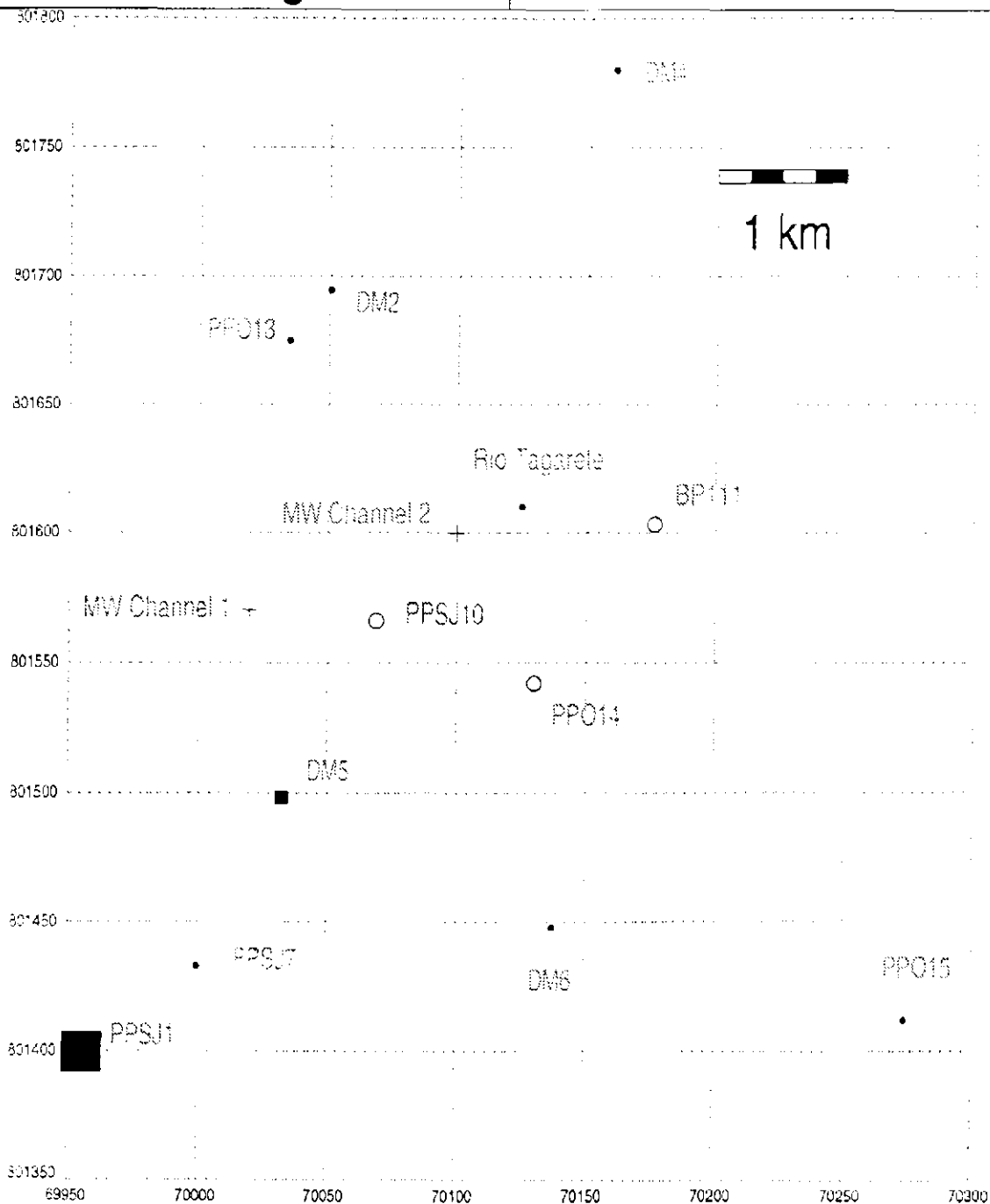
Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario en  
el área del canal de agua  
mina





Dames & Moore Norge 1999

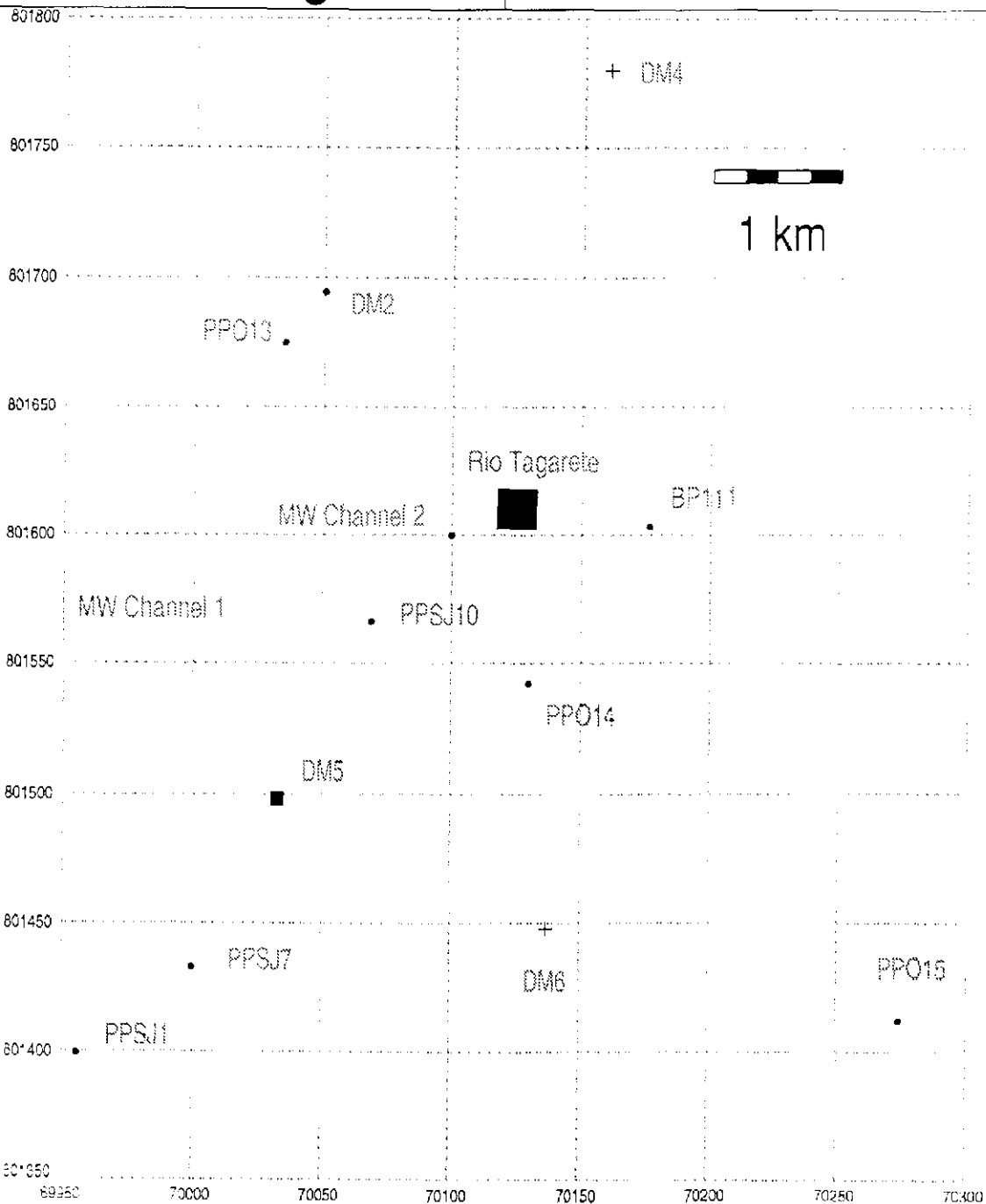
Datos hidroquímicos de los  
 acuíferos del Cuaternario en  
 el área del canal de agua  
 mina

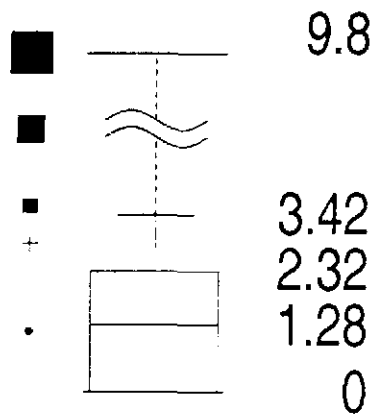




Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario en  
el área del canal de agua  
mina

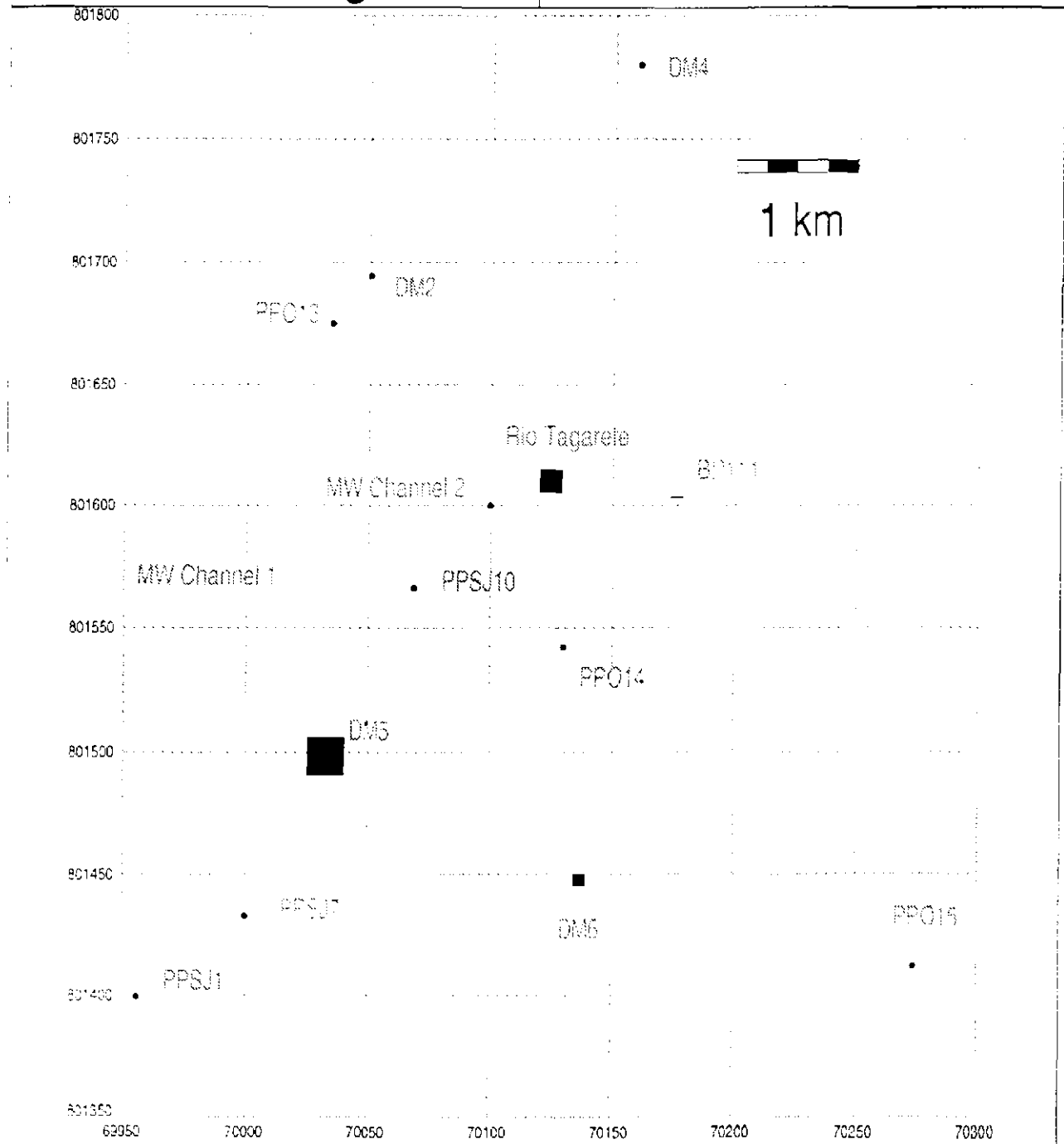


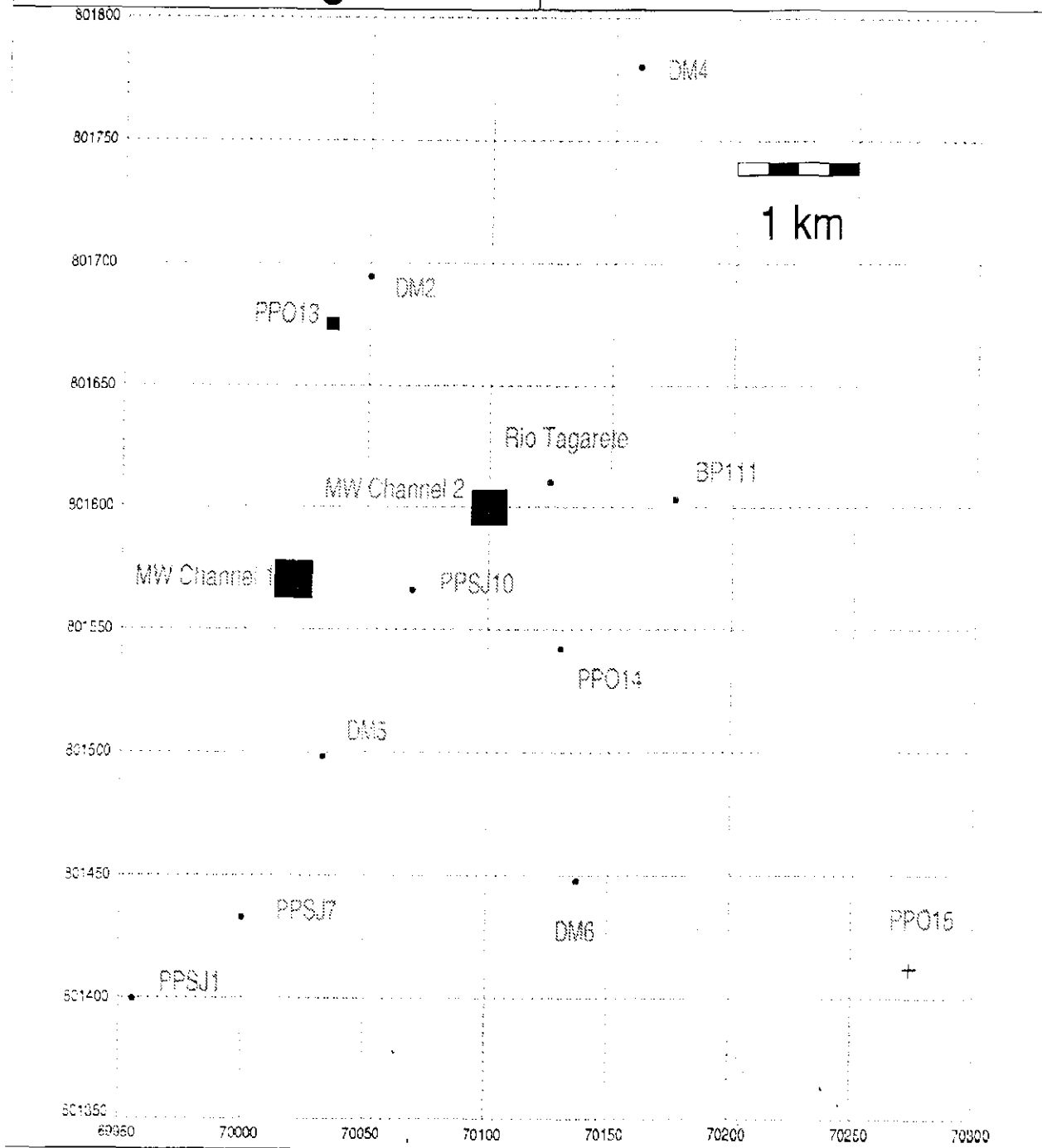
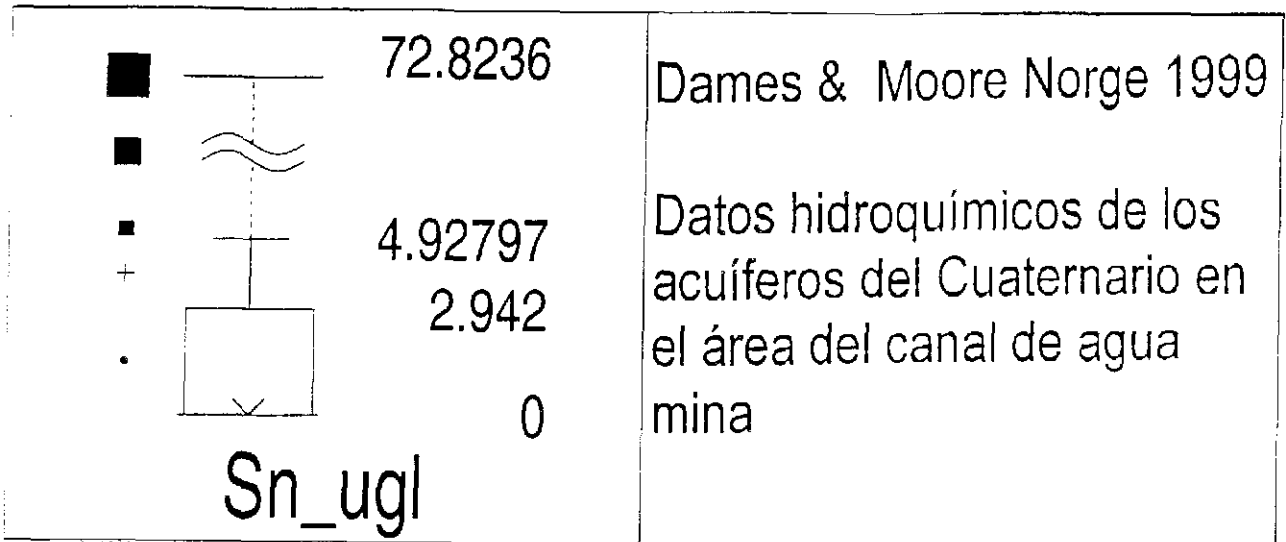


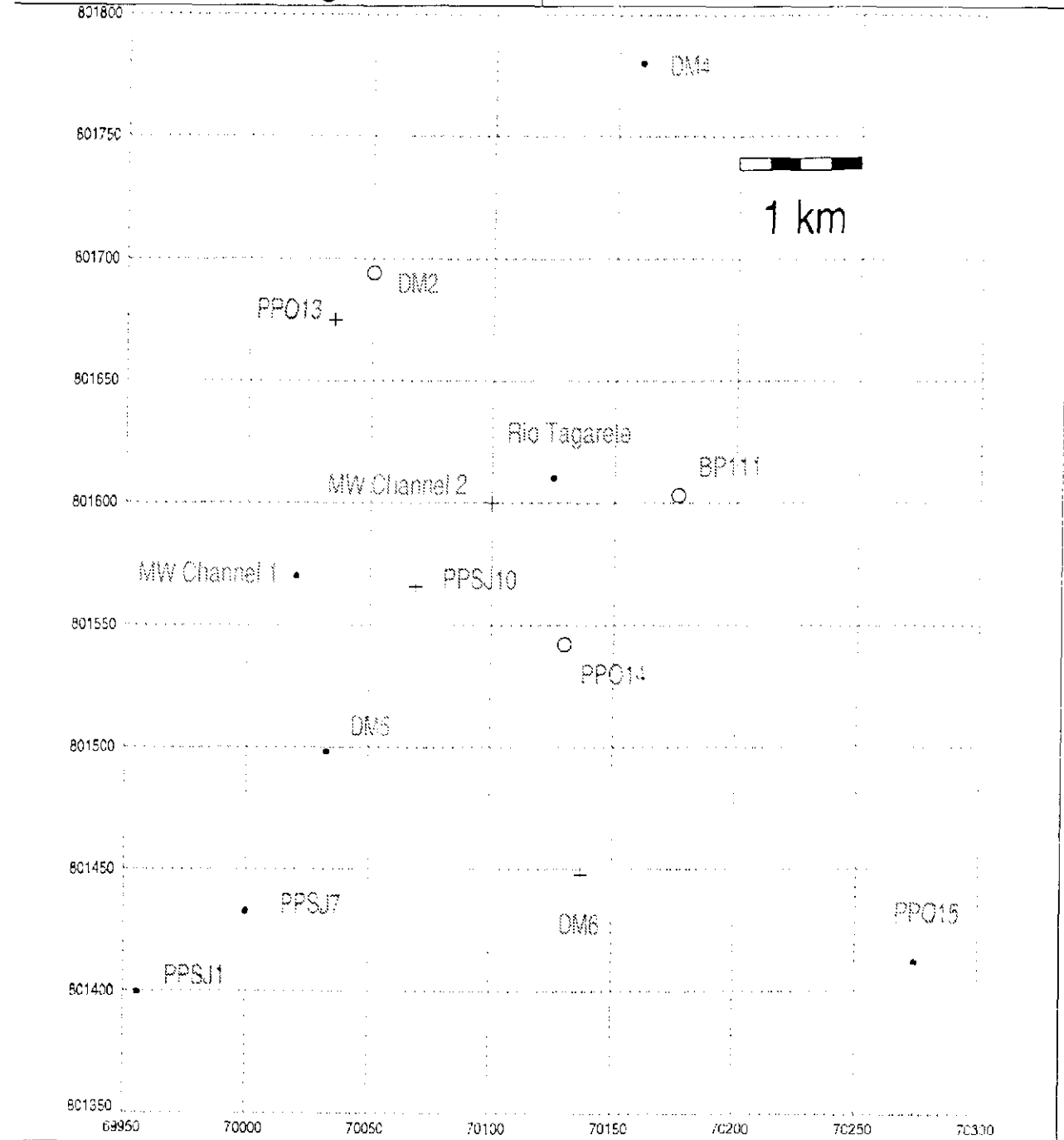
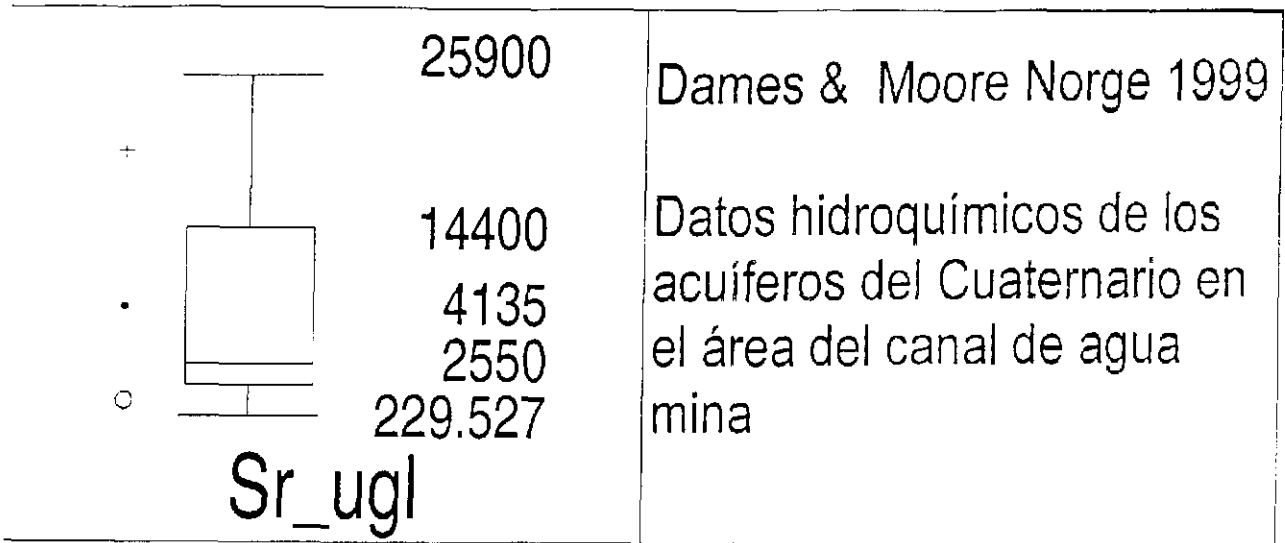
Nox\_mgl

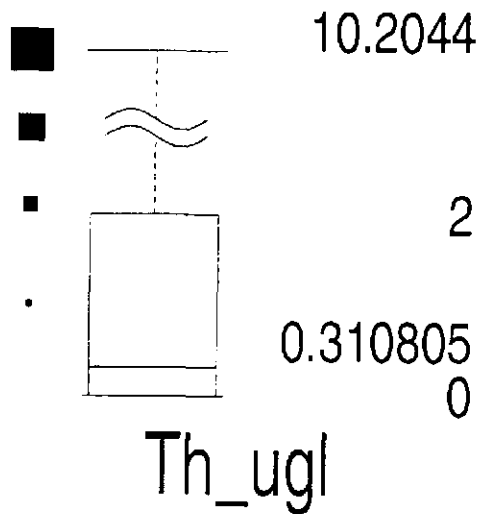
Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los acuíferos del Cuaternario en el área del canal de agua mina



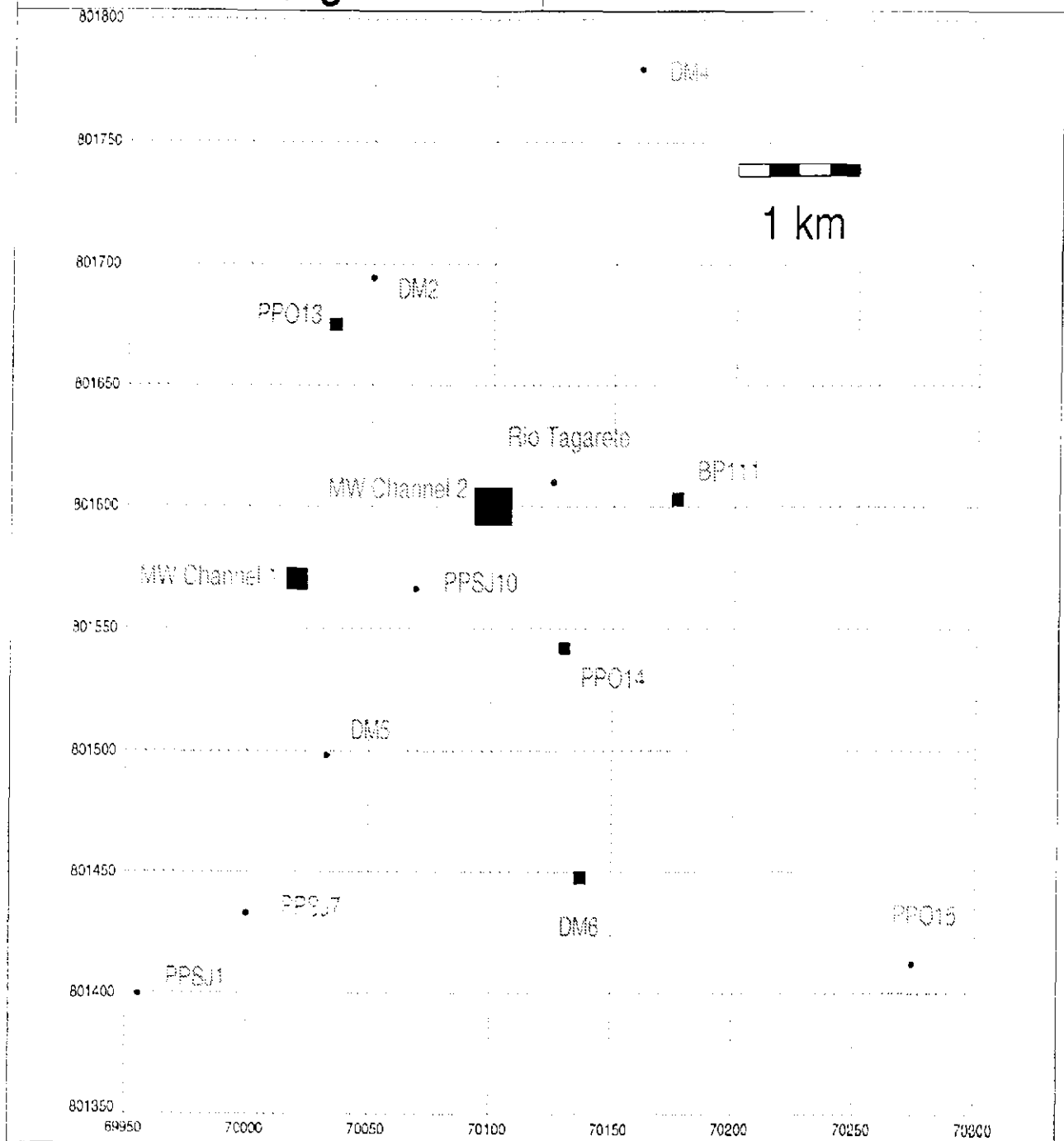




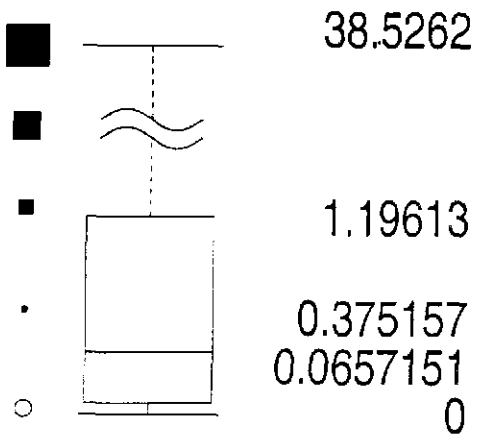


Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario en  
el área del canal de agua  
mina



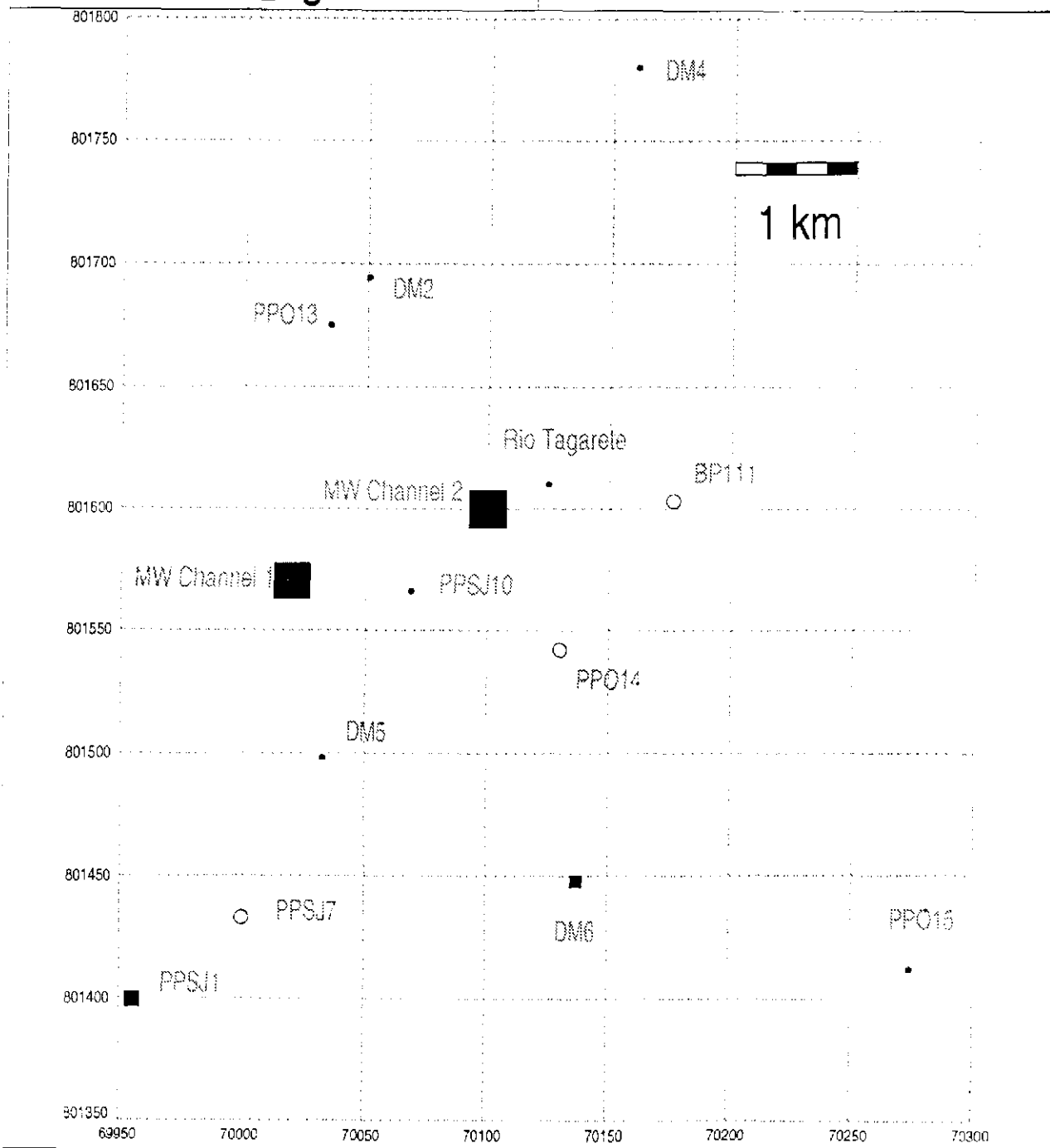


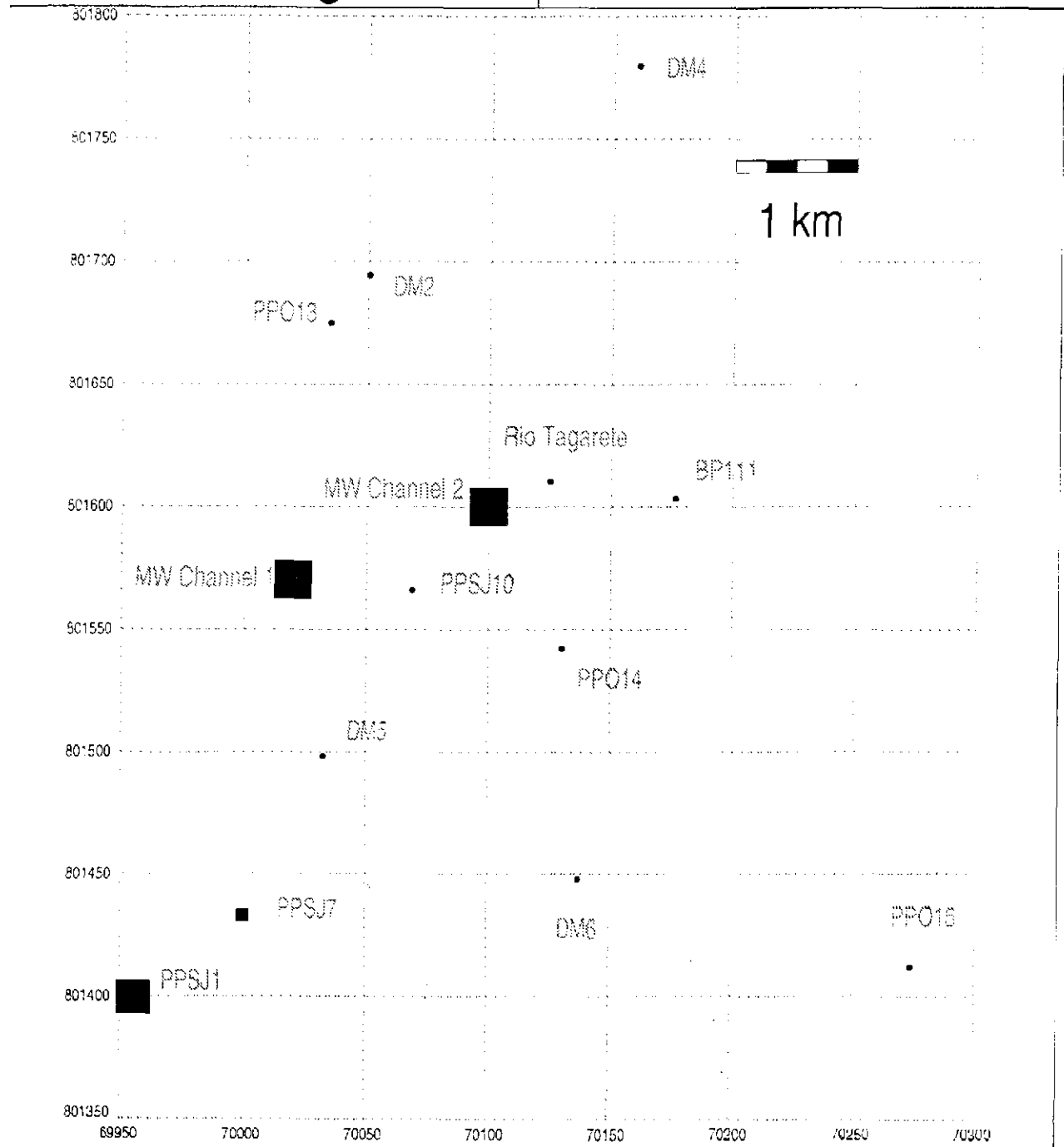
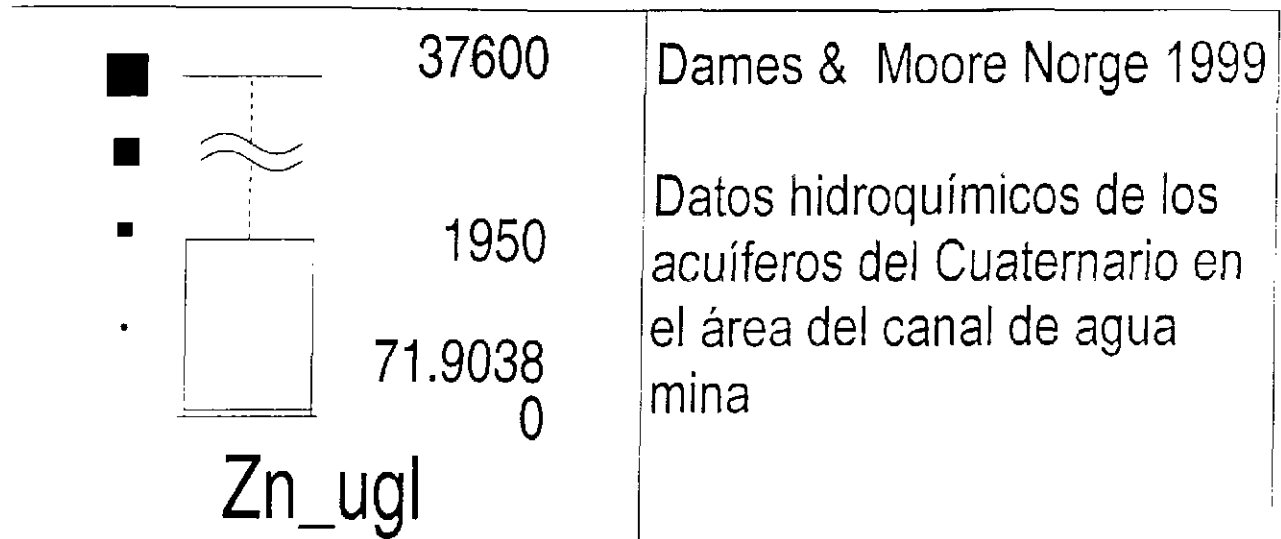


TI\_ugl

Dames & Moore Norge 1999

Datos hidroquímicos de los  
acuíferos del Cuaternario en  
el área del canal de agua  
mina





**APENDICE 5**  
**ANALISIS DE PRUEBAS DE LUGEON DE POZOS DM-2 Y DM-5.**

## DM2

51.5 a 54.5 m

PASO	1	2	3	4	5
------	---	---	---	---	---

P <sub>m</sub> =	10	15	30	15	10
P <sub>m</sub> (kg/cm <sup>2</sup> ) =	0.70	1.05	2.11	1.05	0.70
Delta h (m) =	3.71	3.71	3.71	3.71	3.71
Diámetro del Hoyo de Perf: (")	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96
r (m) =	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038
L (m) =	3	3	3	3	3

Q1 (l en 2 min) =	42	33	37	30	45
Q2 (l en 2 min) =	37	54	45	48	40
Q3 (l en 2 min) =	30	31	42	35	35
Q4 (l en 2 min) =	35	47	50	45	32
Q5 (l en 2 min) =	42	31	47	29	40
Q <sub>prom</sub> (l por 2 min) =	37.2	39.2	44.2	37.4	38.4
Q (l/s) =	0.31	0.33	0.37	0.31	0.32
Q (m <sup>3</sup> /s) =	0.00031	0.000327	0.000368	0.000312	0.00032
Q espec (l/m/min) =	6.20	6.53	7.37	6.23	6.40

Delta p (kg/cm <sup>2</sup> ) =	0.39	0.48	0.41	0.48	0.39
---------------------------------	------	------	------	------	------

P <sub>ef</sub> (kg/m <sup>2</sup> ) =	0.69	0.95	2.07	0.95	0.69
P <sub>ef</sub> (m del nivel piezométrico) =	6.88	9.47	20.65	9.47	6.88

Lugeon (1 medida.)	90.15	68.98	35.67	65.81	93.06	Promedio
K (m/s) basado en Moye	9.9E-06	7.6E-06	3.9E-06	7.3E-06	1.0E-05	7.8E-06
Alfa	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	
K (m/s) basado en Banks	1.1E-05	8.6E-06	4.4E-06	8.2E-06	1.2E-05	8.8E-06

P<sub>m</sub> = presión del manómetro

Delta h = nivel piezométrico hidrostático entre el nivel de agua del acuífero medido por un manómetro

Delta p = pérdida de presión por fricción entre el manómetro y el tapón

Q<sub>espec</sub> = flujo específico hacia la fractura de la sección en l/m/min

L = longitud de la sección de prueba del hoyo de perforación

r = radio del hoyo de perforación

P<sub>ef</sub> = presión efectiva en el tapón (medida en m de nivel piezométrico o kg/cm<sup>2</sup>)

K (Moye) está basada en 1 Lugeon = 1.102 x 10<sup>-7</sup> m/s

K (Banks) está basada en  $K = Q / (\text{alfa} * P_{ef} * L)$ , donde Q está en m<sup>3</sup>/s y P<sub>ef</sub> está en m, donde  $\text{alfa} = (2 * \pi) / (1 + \ln(L/2r))$ .

Datos de entrada revisados DB 19/1/00

DM2

54.5 to 57.5 m

PASO	1	2	3
Pm =	10	20	25
Pm (kg/cm <sup>2</sup> ) =	0.70	1.41	1.76
Delta h (m) =	4.13	4.13	4.13
Diámetro del Hoyo de Perf: (")	2.96	2.96	2.96
r (m) =	0.038	0.038	0.038
L (m) =	3	3	3

Q1 (l en 2 min) =	47	52	76
Q2 (l en 2 min) =	49	58	75
Q3 (l en 2 min) =	28	67	75
Q4 (l en 2 min) =	64	57	76
Q5 (l en 2 min) =	49	62	75
Qprom (l por 2 min) =	47.4	61.2	75.4
Q (l/s) =	0.40	0.51	0.63
Q (m <sup>3</sup> /s) =	0.000395	0.00051	0.000628
Q espec (l/m/min) =	7.90	10.20	12.57

Delta p (kg/cm <sup>2</sup> ) =	0.49	0.61	0.77
---------------------------------	------	------	------

Pef (kg/m <sup>2</sup> ) =	0.62	1.21	1.40
Pef (m del nivel piezométrico) =	6.24	12.08	14.04

Lugeon (1 medida )	126.65	84.47	89.51
K (m/s) basado en Moye	1.4E-05	9.3E-06	9.9E-06
Alfa	1.34	1.34	1.34
K (m/s) basado en Banks	1.6E-05	1.1E-05	1.1E-05

Promedio
1.1E-05
1.2E-05

Pm = presión del manómetro

Delta h = nivel piezométrico hidrostático entre el nivel de agua del acuífero medido por un ma

Delta p = pérdida de presión por fricción entre el manómetro y el tapón

Qespec = flujo específico hacia la fractura de la sección en l/m/min

L = longitud de la sección de prueba del hoyo de perforación

r = radio del hoyo de perforación

Pef = presión efectiva en el tapón (medida en m de nivel piezométrico o kg/cm<sup>2</sup>)

K (Moye) está basada en 1 Lugeon =  $1.102 \times 10^{-7}$  m/s

K (Banks) está basada en  $K = Q / (\text{alfa} \cdot Pef \cdot L)$ , donde Q está en m<sup>3</sup>/s y Pef está en m y donde  $\text{alfa} = (2 \cdot \pi) / (1 + \ln(L/2r))$ .

Datos de entrada revisados DB 19/1/00

DM5

14 m a 17 m

PASO	1	2	3	3 (max)
------	---	---	---	---------

Pm =	14.5	29	40	
Pm (kg/cm <sup>2</sup> ) =	1.02	2.04	2.81	
Delta h (m) =	5.52	5.52	5.52	
Diámetro del Hoyo de Perf: (")	2.96	2.96	2.96	
r (m) =	0.038	0.038	0.038	
L (m) =	3	3	3	

Q1 (l en 2 min) =	69	119	0	
Q2 (l en 2 min) =	62	60	0	
Q3 (l en 2 min) =	64	0	0	
Q4 (l en 2 min) =	90	0	0	
Q5 (l en 2 min) =	90	0	0	
Qprom (l por 2 min) =	75	35.8	0	<0.2
Q (l/s) =	0.63	0.30	0.00	<0.0017
Q (m <sup>3</sup> /s) =	0.000625	0.000298	0	<1.7E-06
Q espec (l/m/min) =	12.50	5.97	0.00	<0.03

Delta p (kg/cm <sup>2</sup> ) =	0.77	0.33	0.00	0
---------------------------------	------	------	------	---

Pef (kg/m <sup>2</sup> ) =	0.80	2.26	3.36	3.36
Pef (m del nivel piezométrico) =	7.98	22.58	33.63	33.63

Lugeon (1 medida.)	156.64	26.42	0.00	<0.10
K (m/s) basado en Moye	1.7E-05	2.9E-06	0.0E+00	<1.1E-08
Alfa	1.34	1.34	1.34	1.34
K (m/s) basado en Banks	1.9E-05	3.3E-06	0.0E+00	<1.2E-08

Promedio	
	7.2E-06
	8.2E-06

Pm = presión del manómetro

Delta h = nivel piezométrico hidrostático entre el nivel de agua del acuífero medido por un manóm

Delta p = pérdida de presión por fricción entre el manómetro y el tapón

Qespec = flujo específico hacia la fractura de la sección en l/m/min

L = longitud de la sección de prueba del hoyo de perforación

r = radio del hoyo de perforación

Pef = presión efectiva en el tapón (medida en m de nivel piezométrico o kg/cm<sup>2</sup>)

K (Moye) está basada en 1 Lugeon =  $1.102 \times 10^{-7}$  m/s

K (Banks) está basada en  $K = Q / (\text{alfa} * Pef * L)$ , donde Q está en m<sup>3</sup>/s y Pef está en m y donde  $\text{alfa} = (2 * \pi) / (1 + \ln(L/2r))$ .

Datos de entrada revisados DB 19/1/00

DM5

20 a 23 m

PASO	1	2	3
------	---	---	---

Pm =	14.5	29	40
Pm (kg/cm <sup>2</sup> ) =	1.02	2.04	2.81
Delta h (m) =	5.53	5.53	5.53
Diámetro del Hoyo de Perf. (")	2.96	2.96	2.96
r (m) =	0.038	0.038	0.038
L (m) =	3	3	3

Q1 (l en 2 min) =	30	35	54
Q2 (l en 2 min) =	29	33	57
Q3 (l en 2 min) =	29	33	51
Q4 (l en 2 min) =	30	30	54
Q5 (l en 2 min) =	30	31	50
Qprom (l por 2 min) =	29.6	32.4	53.2
Q (l/s) =	0.25	0.27	0.44
Q (m <sup>3</sup> /s) =	0.000247	0.00027	0.000443
Q espec (l/m/min) =	4.93	5.40	8.87

Delta p (kg/cm <sup>2</sup> ) =	0.33	0.35	0.53
---------------------------------	------	------	------

Pef (kg/m <sup>2</sup> ) =	1.24	2.24	2.83
Pef (m del nivel piezométrico) =	12.42	22.40	28.30

Lugeon (1 medida.)	39.72	24.11	31.33
K (m/s) basado en Moye	4.4E-06	2.7E-06	3.5E-06
Alfa	1.34	1.34	1.34
K (m/s) basado en Banks	4.9E-06	3.0E-06	3.9E-06

Promedio
3.5E-06
3.9E-06

Pm = presión del manómetro

Delta h = nivel piezométrico hidrostático entre el nivel de agua del acuífero medido por un manómetro

Delta p = pérdida de presión por fricción entre el manómetro y el tapón

Qespec = flujo específico hacia la fractura de la sección en l/m/min

L = longitud de la sección de prueba del hoyo de perforación

r = radio del hoyo de perforación

Pef = presión efectiva en el tapón (medida en m de nivel piezométrico o kg/cm<sup>2</sup>)

K (Moye) está basada en 1 Lugeon = 1.102 x 10<sup>-7</sup> m/s

K (Banks) está basada en  $K = Q / (\alpha * P_{ef} * L)$ , donde Q está en m<sup>3</sup>/s y Pef está en m, donde  $\alpha = (2 * \pi) / (1 + \ln(L/2r))$ .

Datos de entrada revisados DB 19/1/00

DM5

23 a 26 m

PASO	1	2	3	4	
P <sub>m</sub> =	14.5	29	40	29	
P <sub>m</sub> (kg/cm <sup>2</sup> ) =	1.02	2.04	2.81	2.04	
Delta h (m) =	5.35	5.35	5.35	5.35	
Diámetro del Hoyo de Perf. (")	2.96	2.96	2.96	2.96	
r (m) =	0.038	0.038	0.038	0.038	
L (m) =	3	3	3	3	
Q1 (l en 2 min) =	70	53	102	73	
Q2 (l en 2 min) =	64	81	59	59	
Q3 (l en 2 min) =	59	55	86	83	
Q4 (l en 2 min) =	67	40	100	54	
Q5 (l en 2 min) =	67	40	98	85	
Q <sub>prom</sub> (l por 2 min) =	65.4	53.8	89	70.8	
Q (l/s) =	0.55	0.45	0.74	0.59	
Q (m <sup>3</sup> /s) =	0.000545	0.000448	0.000742	0.00059	
Q espec (l/m/min) =	10.90	8.97	14.83	11.80	
Delta p (kg/cm <sup>2</sup> ) =	0.67	0.55	0.75	0.74	
P <sub>ef</sub> (kg/m <sup>2</sup> ) =	0.89	2.03	2.60	1.84	
P <sub>ef</sub> (m del nivel piezométrico) =	8.87	20.25	26.01	18.35	
Lugeon (1 medida.)	122.89	44.28	57.03	64.31	Promedio
K (m/s) basado en Moye	1.4E-05	4.9E-06	6.3E-06	7.1E-06	7.9E-06
Alfa	1.34	1.34	1.34	1.34	
K (m/s) basado en Banks	1.5E-05	5.5E-06	7.1E-06	8.0E-06	9.0E-06

P<sub>m</sub> = presión del manómetro

Delta h = nivel piezométrico hidrostático entre el nivel de agua del acuífero medido por un manómetro

Delta p = pérdida de presión por fricción entre el manómetro y el tapón

Q<sub>espec</sub> = flujo específico hacia la fractura de la sección en l/m/min

L = longitud de la sección de prueba del hoyo de perforación

r = radio del hoyo de perforación

P<sub>ef</sub> = presión efectiva en el tapón (medida en m de nivel piezométrico o kg/cm<sup>2</sup>)

K (Moye) está basada en 1 Lugeon = 1.102 x 10<sup>-7</sup> m/s

K (Banks) está basada en  $K = Q / (\text{alfa} * P_{ef} * L)$ , donde Q está en m<sup>3</sup>/s y P<sub>ef</sub> está en m

, donde alfa =  $(2 * \pi) / (1 + \ln(L/2r))$ .

Datos de entrada revisados DB 19/1/00



PASO	1	2	3	4
$P_m =$	14.5	29	40	29
$P_m$ (kg/cm <sup>2</sup> ) =	1.02	2.04	2.81	2.04
Data h (m) =	5.52	5.52	5.52	5.52
Diámetro del Hoyo de Perf. (")	2.96	2.96	2.96	2.96
$r =$	0.038	0.038	0.038	0.038
$L =$	3	3	3	3

Q1 (en 2 min) =	61	91	54	88
Q2 (en 2 min) =	49	96	89	90
Q3 (en 2 min) =	55	93	99	96
Q4 (en 2 min) =	57	55	101	87
Q5 (en 2 min) =	52	65	88	71
Q promedio por 2 min) =	54.8	80	86.2	86.4
$Q_1$ (s) =	0.46	0.67	0.72	0.72
$Q_1$ (m <sup>3</sup> /s) =	0.000457	0.000667	0.000718	0.00072
Q espec (l/m/min) =	9.13	13.33	14.37	14.40

Data p (kg/cm <sup>2</sup> ) =	0.51	0.83	0.88	0.88
--------------------------------	------	------	------	------

$P_{ef}$ (kg/m <sup>2</sup> ) =	1.06	1.76	2.49	1.71
$P_{ef}$ (m del nivel piezométrico) =	10.58	17.63	24.85	17.13

Lugeon (1 medida)	86.33	75.63	57.81	84.06
$K$ (m/s) basado en Moye	9.5E-06	8.3E-06	6.4E-06	9.3E-06
Alfa	1.34	1.34	1.34	1.34
$K$ (m/s) basado en Banks	1.1E-05	9.4E-06	7.2E-06	1.0E-05

Promedio	8.4E-06
	9.4E-06

$P_m$  = presión del manómetro

Data h = nivel piezométrico hidrostático entre el nivel de agua del acuífero medido por un manómetro

Data p = pérdida de presión por fricción entre el manómetro y el tapón

Q espec = flujo específico hacia la fractura de la sección en l/m/min

$L$  = longitud de la sección de prueba del hoyo de perforación

$r$  = radio del hoyo de perforación

$P_{ef}$  = presión efectiva en el tapón (medida en m de nivel piezométrico o kg/cm<sup>2</sup>)

$K$  (Moye) está basada en  $1 \text{ Lugeon} = 1.102 \times 10^{-7} \text{ m/s}$

$K$  (Banks) está basada en  $K = Q / (\text{alfa} \cdot P_{ef} \cdot L)$ , donde  $Q$  está en m<sup>3</sup>/s y  $P_{ef}$  está en m

donde  $\text{alfa} = (2 \cdot \pi) / (1 + \ln(L/2r))$

Fecha de entrada revisados DB 19/1/00

DW5

30 a 33 m

	1	2	3	4	5
$P_m =$	14.5	29	40	29	14.5
$P_{ef} \text{ (kg/cm}^2\text{)} =$	1.02	2.04	2.81	2.04	1.02
DATA (m) =	5.53	5.53	5.53	5.53	5.53
Diámetro del Hoyo de Perf: (")	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96
$r =$	0.038	0.038	0.038	0.038	0.038
$L =$	3	3	3	3	3
Q1 en 2 min) =	2	0	0	0	0.5
Q2 en 2 min) =	2	0	0	0.5	0
Q3 en 2 min) =	2	0	0	0	0
Q4 en 2 min) =	1	0	0	0	0
Q5 en 2 min) =	1	1	1	0.5	0
Q promedio por 2 min)=	1.6	0.2	0.2	0.2	0.1
$Q \text{ (m}^3\text{/s)} =$	0.013	0.002	0.002	0.002	0.001
$Q \text{ (m}^3\text{/s)} =$	1.33E-05	1.67E-06	1.67E-06	1.67E-06	8.33E-07
Q espec (l/m/min) =	0.27	0.03	0.03	0.03	0.02
DATA (kg/cm <sup>2</sup> ) =	0.08	0.07	0.07	0.07	0.04
$P_{ef} \text{ (kg/m}^2\text{)} =$	1.49	2.52	3.29	2.52	1.54
$P_{ef} \text{ (m del nivel piezométrico)} =$	14.92	25.21	32.94	25.21	15.37
Lugeon (1 medida.)	1.79	0.13	0.10	0.13	0.11
K (m/s) basado en Moye	2.0E-07	1.5E-08	1.1E-08	1.5E-08	1.2E-08
Alfa	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34
K (m/s) basado en Banks	2.2E-07	1.6E-08	1.3E-08	1.6E-08	1.3E-08

Promedio
5.0E-08
5.6E-08

$P_m$  = presión del manómetro

DATA = nivel piezométrico hidrostático entre el nivel de agua del acuífero medido por un manómetro

DATA (p) = pérdida de presión por fricción entre el manómetro y el tapón

Q espec = flujo específico hacia la fractura de la sección en l/m/min

$L$  = longitud de la sección de prueba del hoyo de perforación

$r$  = radio del hoyo de perforación

$P_{ef}$  = presión efectiva en el tapón (medida en m de nivel piezométrico o kg/cm<sup>2</sup>)

- Moye está basada en  $1 \text{ Lugeon} = 1.102 \times 10^{-7} \text{ m/s}$

- Banks está basada en  $K = Q / (\text{alfa} * P_{ef} * L)$ , donde Q está en m<sup>3</sup>/s y  $P_{ef}$  está en m

donde  $\text{alfa} = (2 * \pi) / (1 + \ln(L/2r))$ .

Datos de entrada revisados DB 19/1/00

**APENDICE 6**  
**METODOLOGIA DE LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO**  
**ELEVACIONES Y COORDENADAS DE LOS POZOS ESTUDIADOS**

## APENDICE 6

### METODOLOGIA DE LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO ELEVACIONES Y COORDENADAS DE LOS POZOS ESTUDIADOS

#### Metodología del Levantamiento Topográfico

Esta sección describe la metodología aplicada por la Empresa de Servicio Técnico (EST) para determinar las ubicaciones y elevaciones de los pozos.

#### *Levantamiento Topográfico de las Ubicaciones de los Pozos*

EST subcontrató al Instituto Geográfico Militar de Bolivia (IGM) para determinar las ubicaciones de los pozos. El levantamiento topográfico se realizó utilizando un instrumento del Sistema de Ubicación Geográfica (GPS) TRIMBLE 4000. Este equipo está diseñado para determinar ubicaciones con alta precisión, obteniendo coordenadas con la ayuda de 12 satélites en el sistema WGS – 84.

Para cada pozo bajo estudio, se ubicó un punto de referencia en la parte superior del entubado. Se instaló un trípode nivelado adecuadamente sobre el punto de referencia y se colocó el TRIMBLE en el trípode. En este punto, el operador de campo notificó a una estación central, donde se activó el equipo para iniciar la operación del TRIMBLE. Una vez que se activó el equipo, se esperó unos 45 minutos para permitir que el equipo “adquiera” información desde los 12 satélites. Los valores determinados de elevación elipsoidal, latitud, longitud y las efemérides del satélite GPS fueron referenciados al Sistema Mundial Geodésico WGS. El sistema WGS – 84 es similar al norteamericano DATUM-NAD83, utilizado en los Estados Unidos.

El receptor TRIMBLE 4000 SE requiere de recepción lineal de las señales del satélite, y cualquier obstáculo reduce su efectividad. Sin embargo, los puntos de referencia de cinco de los pozos bajo estudio estaban ubicados dentro de pequeñas casas. En estos pozos, se tuvo que instalar una estaca auxiliar a una distancia medida, tan próxima a los pozos como fue posible, generalmente a casi 10 metros. Luego se efectuó el levantamiento topográfico de la estaca y posteriormente se llevaron los resultados a la posición actual del pozo, usando equipo convencional de levantamiento topográfico. Estos cinco pozos anteriormente eran utilizados como pozos de producción, pero debido a varios problemas físicos/químicos fueron abandonados y actualmente están siendo utilizados como pozos de observación. Los pozos en cuestión son los siguientes:

- PP-9, PP-10, PP-16, PP-18 (Khala Kaja)
- PPA-1 (Aurora)

El levantamiento topográfico empezó el 22 de octubre de 1999, aproximadamente a las 8:00 am. El levantamiento topográfico se inició con la ubicación de un punto topográfico de referencia BM-115, al lado de la intersección entre la avenida Circunvalación de Oruro y la carretera La Paz – Oruro. El trabajo de campo del levantamiento topográfico se completó el domingo 24 de octubre de 1999. El levantamiento topográfico de los pozos se realizó en el orden indicado en la Tabla A6.1.

**Tabla A6.1 Ubicación y orden del levantamiento topográfico de los pozos.**

1	PPO-22	13	PPO-17	25	PPSJ-10
2	Sela-4	14	PPO-18	26	DM-2
3	PPO-PI-3 / PP4-S	15	PPSJ-3	27	PPO-P1-5 <sup>a</sup>
4	NUPO3	16	PPSJ-4	28	PPO-P1-5
5	PP-18 / NU-VI	17	PPSJ-6	29	PPO-P1-6 / PP6-S
6	PP-16 / NU-VII	18	PPSJ-8	30	PP-10
7	PP-11	19	PPSJ-9	31	PP-9
8	PPO-PI-2 / OBINU	20	PPO-BP-114	32	PPA-1 (Aurora)
9	DM-1	21	PPO-BP-112	33	PPSJ-7
10	PPO-21	22	118Cd-IPO	34	PPSJ-1
11	PPO-PI-10 / PI-10	23	118Cd-1P	35	*Ver nota
12	NUPO2	24	PPO-14	36	PESJ-1

\*Nota de referencia para posteriores levantamientos topográficos de residuos mineros (SubProyecto 6), ubicado en el centro de la chancadora 1, hacia el norte y al frente de PIO (Planta Industrial de Oruro).

La determinación exacta de las ubicaciones de los pozos fue considerada menos crítica que la determinación exacta de las elevaciones de éstos, debido a que la diferencia en los niveles del agua entre pozos adyacentes es crucial para determinar la dirección del flujo y la tasa de flujo.

#### *Levantamiento Topográfico de Elevación de Pozos*

Dames & Moore Norge encargó el levantamiento topográfico de las elevaciones de los pozos para permitir la normalización de los niveles de las aguas subterráneas y de la superficie de la zona madre a un punto común (nivel medio sobre el mar). EST realizó el trabajo del levantamiento topográfico, así como también la colocación de estacas a intervalos regulares a lo largo de los perfiles geofísicos, además del levantamiento topográfico de los pozos mencionados anteriormente. El levantamiento topográfico se realizó utilizando el instrumento NK2 WILD. Las elevaciones fueron derivadas mediante el levantamiento de los puntos topográficos de referencia de elevaciones conocidas ubicadas en el área de Oruro, y de las líneas base secundarias derivadas de estos puntos topográficos de referencia.

La determinación de las elevaciones de los pozos hacia el norte de Oruro se inició mediante el levantamiento topográfico de una línea base a partir del punto topográfico de referencia BM 108 hacia el pozo PP-9 y pozo PP-15. Esta línea corre a lo largo de la carretera Oruro-La Paz al norte de Oruro. Las elevaciones a lo largo de esta línea se determinaron dos veces, una vez en cada dirección. A partir de ese punto, la línea topográfica continuó en dirección norte hacia la estación de peaje. Las elevaciones de varios pozos al norte de la ciudad de Oruro se calcularon con referencia a ésta línea base, incluyendo PPO-P1-6, PPO-P1-5A, PPO-PI-5, PPO-BP-106 (también conocido como 118BC-IPO) y PPA-1 (también conocido como el pozo Aurora). Algunos pozos de la sección norte se calcularon con referencia de uno hacia el otro, siempre en un circuito cerrado para asegurar que la elevación topográfica final corresponda a la lectura final.

Se tomó una línea base, desde el pozo PP-9, enlazando los pozos PP-11, PP-12, PP-13 y PP-10. Esta línea también se determinó dos veces. Con referencia a esta línea base, se levantaron

topográficamente las elevaciones para los siguientes pozos: PP-16, NU-PO3, PPO-P1-3 (PP4-5), PP-18, PPO-P1-2 (OBI-NU) y NU-PO2.

Para el levantamiento topográfico de los pozos se utilizaron los siguientes puntos topográficos de referencia (Tabla A6.2):

**Tabla A6.2 Ubicación de los puntos topográficos de referencia utilizados para el levantamiento topográfico de las elevaciones de los pozos específicos (columna izquierda).**

Pozos	Ubicación del Punto Topográfico de Referencia
Cerca al aeropuerto	En el aeropuerto
PPSJ-4, PPO-P1-3, PPO-17, PPO-18	Iroco, sobre la Avenida Dehene y España
PPSJ-6	A 100 metros
PPSJ-8 y PPSJ-9	Avenida América y Pisagua
PPSJ-1	Sobre la Avenida Minero
PPSJ-1 en SERGEOMIN	Calle Petot y Cuba
PPSJ-10	Sobre el puente

### Resultados

En las Tablas A6.3 y A6.4 se presenta una tabulación completa del levantamiento topográfico de las elevaciones de los pozos y sus respectivas coordenadas.

**Tabla A6.3 Resultados del levantamiento topográfico de los pozos de observación del área de estudio.**

Código del Pozo				UTM (PSA-56)		Elevación (msnm)	
SeLA	PPO	UN	Otro	Este	Norte	Nivel del Suelo	Tope del Pozo
SELA-1	PPA-1			698754,373	8019449,473	3.700,552	3.701,265
PP-1	PP9-CC			698650,509	8020589,942	3.701,195	3.701,840
PP-2	PP10-CC			699612,673	8021710,587	3.702,094	3.702,760
PP-3		UN-PO2		699707,825	8023111,212	3.704,290	3.704,737
PP-4	PPO-P1-2		OBI-UN	700915,056	8024178,179	3.705,299	3.705,669
PP-5		UN-VII		701147,277	8025008,244	3.706,756	3.707,397
		UN-PO3		701141,156	8025768,593	3.705,405	3.705,812
	PPO-P1-3		PP4-S	700222,945	8026452,476	3.704,881	3.705,425
PP-6		UN-VI		702007,579	8024581,992	3.705,654	3.706,384
	PPO-P1-10		PI-10	700866,946	8021158,043	3.701,931	3.702,319
	PP0-22			700068,905	8018645,065	3.701,099	3.701,474
	PPO-14			701301,014	8015421,302	3.700,683	3.700,972
SELA-4	PS-4			701357,267	8020363,334	3.701,147	3.702,746
	PPO-P1-5			697922,601	8023788,403	3.703,544	3.705,735
	PPO-P1-5A			697907,229	8023774,613	3.703,252	3.704,240
	PPO-P1-6		PP6-S	698276,589	8022038,384	3.702,335	3.702,778
			PPSJ-10	700689,044	8015657,445	3.701,081	3.701,513
			PPSJ-7	699999,000	8014330,000	3.714,707	3.715,057
			PPSJ-1	699557,248	8013995,868	3.724,278	3.724,628
	PPO-21			699448,957	8019100,848	3.700,785	3.701,253
	SI-PPO-004		PPSJ-4	696078,894	8014222,065	3.703,084	3.703,565
	SI-PPO-005		PPSJ-3	695794,643	8013956,327	3.700,718	3.701,013

Código del Pozo				UTM (PSA-56)		Elevación (msnm)	
SeLA	PPO	UN	Otro	Este	Norte	Nivel del Suelo	Topo del Pozo
	PPO-17			695726,619	8013936,515	3.699,975	3700,287
	PPO-18			695728,954	8014002,293	3.699,486	3.699,870
	PPO-114		118CE-1P	708109,855	8012274,936	3.723,105	3.723,540
	PESJ-1			699573,655	8012706,564	3.718,531	3.718,813
	PPO-BP-112		1180C-1PO	700004,000	8012307,000	3.713,712	3.713,712
			PPSJ-8	700804,010	8010421,081	3.697,505	3.697,849
			PPSJ-9	700825,657	8010427,788	3.697,501	3.697,852
			PPSJ-6	697911,813	8010984,624	3.700,448	3.700,735
	118CD-1PO			703532,738	8012743,724	3.700,856	3.701,740
			118CD-1P	703551,098	8012751,114	3.700,913	3.701,062
	BP-106		118BC-1PO	698338,812	8019760,413	3.700,355	3.700,355
	BP-111		118CH-3P	701763,874	8016031,359	3.701,063	3.701,828
	PPO-13			700350(RM)	8016750(RM)	3.701,436	3.701,706
	PPO-15			702738,890	8014120,330	3.699,896	3700,226
	PPO-16			702482,890	8012892,310	3.699,374	3.699,684
	P-POLICIA			703161,900	8013250,317	3.700,199	3.700,319
			DM-1	699564,700	8019086,100	3700,900	3.701,200
			DM-2	700503,900	8016944,300	3.701,300	3.701,700
			DM-3	701257,190	8020794,490	-	
			DM-4	700486,800	8020021,760	3.701,917	3.701,917
			DM-5	700329,850	8014982,339	3.707,256	3.707,256
			DM-6	701373,780	8014479,333	3.700,357	3.700,357

*Tabla A6.4 Resultados del levantamiento topográfico de los pozos de producción en el área de estudio*

Código				UTM (PSA-56)		Elev.*
SeLA	PPO	UN	Otro	Este	Norte	msnm
PP-7				701771,9	8025445	3.706,672
PP-11				701298,2	8024279	3.706,524
PP-12		UN-II		700548,8	8023175	3.704,320
PP-13		UN-III		700046,8	8022397	3.704,320
PP-14	CH-PP-UN-I	UN-I		700740,8	8024143	3.706,524
PP-15	PPO-19	UN-VIII		700297,8	8024633	3.706,672
PP-17		UN-V		701171,8	8025871	3.706,672
SELA-2	PS-2			702168,9	8021270	3.701,186
SELA-3	PS-3			701704,9	8020773	3.701,186
PP-117	BP-107		Aeropuerto	703565,9	8012744	3.700,920

*(notar que se asumió la mayoría de las elevaciones)*

**\*Notas sobre las elevaciones**

- Se asumió que las elevaciones de SELA-2 y SELA-3 eran las mismas que SELA-4: 3.701,186 SELA-4
- Se asumió que la elevación de PP-117 era la misma que el pozo 118-Cd-1PO adyacente 3.700,920 118-Cd-1PO
- Se asumió que las elevaciones de PP-7, PP-17, PP-15 eran las mismas el pozo PP16 adyacente 3.706,672 PP-16
- Se asumió que la elevación de PP-14 era la misma que el pozo PP11 adyacente 3.706,524 PP-11
- Se asumió que las elevaciones de PP-12, PP-13 eran las mismas que PP-11 y PP-10 3.704,320 PP-11&10

**APENDICE 7**  
**PROCEDIMIENTOS DE PERFORACION**



## APENDICE 7 PROCEDIMIENTOS DE PERFORACION

### Descripción de los Pozos

#### *Pozo DM-1*

El pozo está ubicado a 500 m al este de la urbanización Aurora, dentro del área conocida como Chapampita-Norte.

La construcción del pozo empezó el 26 de octubre de 1999 y terminó el 15 de noviembre de 1999. La perforación alcanzó una profundidad total de 125 m sin encontrar roca madre. La perforación se realizó con una broca tricónica de 6½" de diámetro. Luego el diámetro del hueco se expandió con una broca de 8½" hasta una profundidad de 50 metros, para facilitar la instalación de los dispositivos de monitoreo del pozo. Las lecturas de la viscosidad del lodo de bentonita de perforación tomadas con el embudo Marsh variaron entre 40 y 45 s. Se realizó un grupo de registros geofísicos que comprendieron, resistividad normal gamma de 16" y 64", y potencia en la perforación llena de lodo.

Se examinaron visualmente las muestras obtenidas de la perforación. Los registros derivados de estas muestras se presentan junto con los registros litológicos, geofísicos y de tasa de penetración, en la Figura 3.1.

El pozo se terminó de la siguiente manera:

*Tabla A7.1. Construcción del pozo de monitoreo DM-1.*

Intervalo de profundidad (m debajo del nivel del suelo)	Material
+0.50 - 0	Tubería de 4" PVC Schedule 40 blank
0 - 3	Sellante sanitario en el anillo (annulus)
0 - 37	Tubería de 4" PVC Schedule 40 blank
32 - 35	Sellante de cemento en el anillo (annulus)
37 - 42	Tubería ranurada de 4" PVC Schedule 40
42 - 43	Tubería de 4" PVC Schedule 40 blank (sumidero)
35 - 46	Empaque de grava
46 - 48	Sellante de cemento en el anillo (annulus)
125 - 48	Relleno con grava gruesa

Para limpiar los sedimentos finos del hueco y eliminar el lodo de bentonita usado en la perforación, se lavó el pozo con agua inyectada a presión. Posteriormente se desarrolló el pozo y se efectuó una limpieza mediante una bomba de presión de aire durante 8 horas.

Al examinar los datos obtenidos del pozo, se determinó que los sedimentos que subyacen al sitio de perforación son de origen fluvio-lacustre. En su parte más profunda (debajo de los 72 m) el estrato se torna cada vez más arcilloso y compacto (la tasa de penetración disminuye). Debajo de los 87 m el estrato está compuesto de sedimentos compactos de alta resistividad de color gris-

material oscuro, con algunas intercalaciones de arenas finamente estratificadas, las cuales pueden haberse originado como depósitos de origen lacustre.

#### Pozo DM-2

El pozo está ubicado a 300 m al sur de la intersección del gasoducto de YPFB con la Avenida Circunvalación, al este de la ciudad de Oruro. El pozo está ubicado al este de la Avenida Circunvalación.

La construcción de este pozo empezó el 20 de noviembre de 1999 y terminó el 24 de noviembre de 1999. La perforación alcanzó una profundidad total de 64,60 m. El hueco fue perforado con una broca tricónica hasta que se encontró roca madre, a una profundidad de 46 m. Subsecuentemente, dentro de la roca madre se utilizó una diamantina (NQ) con un diámetro interno de 2,96" hasta la base de la perforación y se obtuvieron muestras de "cores" continuos de los materiales encontrados, para una longitud total de "core" de 18,60 m. La perforación y el proceso de sacar "cores" se realizó de la siguiente manera:

Se colocó el entubado temporal de 4,5" de diámetro hasta una profundidad de 6 m.

Se colocó el entubado de 3,5" de diámetro hasta una profundidad de 46 m. La perforación en los sedimentos cuaternarios se realizó utilizando una broca tricónica o una broca de carburo de tungsteno conocida localmente como broca *Vidia*.

Después de que se encontró roca madre a los 46 m, la perforación continuó con una diamantina NQ (diámetro externo de 2,96"; diámetro interno de 1,87").

Se obtuvieron "cores" de roca madre para una longitud total de 18,60 m.

Se llevaron a cabo tres pruebas Lugeon (Packer) dentro la roca madre. Las pruebas se efectuaron a intervalos de 3 m cada una, a profundidades entre 51,50 y 54,50 m, 54,50 y 57,50 m, y 61,50 y 64,50 m respectivamente.

Se examinaron visualmente las muestras obtenidas de la perforación. Las descripciones se presentan junto con los registros litológicos y de construcción, en la Figura 3.2. El pozo se terminó de la siguiente manera:

**Tabla A7.2. Construcción del pozo de monitoreo DM-2.**

Intervalo de profundidad (m debajo el nivel del suelo)	Material
+0,50 - 0	Tubería de 2" PVC Schedule 40 blank
0 - 1	Sellante sanitario en el anillo (annulus)
0 - 17,5	Tubería de 2" PVC Schedule 40 blank
17,5 - 22,5	Tubería ranurada de 2" PVC Schedule 40
22,5 - 23,5	Tubería de 2" PVC Schedule 40 blank (sumidero)
1 - 45	Relleno con grava en el anillo (annulus)
45 - 64,6	Relleno con cemento

Para limpiar los sedimentos finos del agujero y eliminar el lodo de bentonita usado para la perforación, se lavó el pozo con agua inyectada a presión. Antes del muestreo se desarrolló el pozo y se efectuó una limpieza mediante una bomba de presión de aire.

Aparentemente el sitio de la perforación está ubicado en la parte inferior de una depresión alargada, de dirección N-S. Esta depresión presenta material sedimentado en la roca madre y se sitúa entre la ciudad de Oruro y el Cerro Huajara. El tamaño del grano de los sedimentos cuaternarios sugiere un ambiente fluvial de baja turbulencia. La roca madre encontrada en DM-2 está compuesta en su mayoría de pizarra/esquistos paleozoicos, con algunos sectores de roca ígnea básica. No se pudo aclarar adecuadamente las relaciones de rocas sedimentarias e ígneas a partir del "core". Se pudo observar que la estratificación en los esquistos se tiene un lanzamiento muy inclinado (cerca de 70°).

### *Pozo DM-3*

El pozo DM-3 se ubica aproximadamente a 450 m al NO del pozo SeLA-4 (hacia el norte de la línea del ferrocarril), dentro del área conocida como Challapampita. Se examinaron visualmente las muestras obtenidas de los cortes de la perforación. Las descripciones se presentan junto con los registros litológicos, geofísicos y de tasa de penetración, en la Figura 3.3.

La perforación empezó el 16 de noviembre de 1999 y terminó el 22 de noviembre de 1999. La profundidad del pozo fue de 90 m y se encontró roca madre a los 89,5 m. Se observó una disminución significativa en la tasa de penetración y un aumento en la resistividad (como en DM-1) aproximadamente a los 64 m. Esto implica sedimentos altamente compactos arenosos, los cuales persistieron hasta que se encontró la roca madre.

El diámetro de perforación fue de 6½". La viscosidad del lodo de bentonita varió entre 38-42 s en el embudo de Marsh. Se realizó un registro eléctrico (auto potencia y resistividad) en el pozo lleno de lodo.

En esta perforación no se instaló un pozo de monitoreo debido a la proximidad de otros pozos de monitoreo como el SeLA-4. Por lo tanto, la perforación se rellenó con grava gruesa de 90 a 60 m. Se colocó un sellante de cemento – bentonita entre los 60 y 56 m para proteger los horizontes más profundos del acuífero, y el resto de la perforación se rellenó con grava gruesa hasta 1 m por debajo de la superficie. Se aplicó un sellante sanitario desde 0 a 1 m por debajo del nivel del suelo.

El pozo DM-3 se perforó encima de la posible línea de una dorsal de roca madre, enterrada entre el cerro Huajara y el cerro Khala Khala. El hecho de que se encontrara roca madre a una profundidad mayor (89,5 m) sugiere que la existencia de tal dorsal es improbable, o que si existiese, se encontraría a tal profundidad que no ejercería ninguna función como barrera hidráulica.

Como en el pozo DM-1, se encontró alta resistividad y sedimentos compactos a profundidad en la perforación. Aparentemente las investigaciones de refracción sísmica han identificado incorrectamente esta litología como roca madre. Los sedimentos compactos de DM-1 eran arcillosos, mientras que los de DM-3 eran más arenosos. Se puede pensar que estos sedimentos representan una secuencia sedimentaria considerablemente más antigua que los sedimentos menos compactos que descansan sobre los mismos.

#### Pozo DM-4

La ubicación de este pozo coincidió con la estaca 2+000 de la línea geofísica G1, situada ligeramente al SO del cerro Chapi Kkollu (un afloramiento de limolita / arenisca de grano fino paleozoico). La perforación del pozo empezó el 26 de noviembre de 1999 y terminó el 1 de diciembre de 1999.

La perforación alcanzó una profundidad total de 36 m, en un diámetro de perforación de 6½". Subsiguientemente, la parte superior del pozo fue ensanchada a un diámetro de 8½" hasta una profundidad de 26 m, para permitir la instalación de los dispositivos de monitoreo del pozo. La viscosidad del lodo de bentonita durante la perforación varió entre 40 - 45 s en el embudo Marsh. Se efectuó un registro eléctrico en el hueco lleno de lodo. Este registro consistió en pruebas de auto-potencia y de resistividad. Se examinaron visualmente las muestras obtenidas de los cortes de la perforación. Las descripciones se presentan junto con los registros geofísicos, litológicos y de tasa de penetración, en la Figura 3.4. El pozo se terminó de la siguiente manera:

*Tabla A7.3. Construcción del pozo de monitoreo DM-4.*

Intervalo de profundidad (m debajo del nivel del suelo)	Material
+0,50 - 0	Tubería de 4" PVC Schedule 40 blank
0 - 2	Sellante sanitario
0 - 19	Tubería de 4" PVC Schedule 40 blank
19 - 24	Tubería ranurada de 4" PVC Schedule 40
24 - 25	Tubería de 4" PVC Schedule 40 blank (sumidero)
14 - 15	Sellante de cemento en el anillo (annulus)
15 - 30	Relleno con grava selecta en el anillo (annulus)
30 - 36	Relleno con grava gruesa

Para limpiar los sedimentos finos del agujero y eliminar el lodo de bentonita usado en la perforación, se lavó el pozo con agua inyectada a presión. Posteriormente se desarrolló el pozo y se efectuó una limpieza mediante una bomba de presión de aire durante 8 horas.

El sitio donde se encuentra la perforación es parte de una depresión en la roca madre. Esta depresión presenta material sedimentado de aparente origen fluvio-lacustre. A una profundidad de aproximadamente 31m, se encontró limolita/arenisca de grano muy fino de color marrón, similar a la expuesta en el cerro Huajara, que corresponde a la parte superior de la roca madre.

#### Pozo DM-5

El pozo está ubicado frente a la entrada principal (sur) al estadio de Oruro. La construcción de este pozo empezó el 27 de noviembre de 1999 y terminó el 1 de diciembre de 1999.

La perforación alcanzó una profundidad total de 33 m. La perforación se realizó con una broca mecánica hasta que se encontró roca madre a una profundidad entre 13 y 16 m. Luego, dentro de la roca madre, se utilizó una diamantina (NQ) con un diámetro externo de 2.96" hasta la base del pozo y se obtuvieron "cores" continuos del material encontrado, hasta una longitud total de

14 m. La roca madre encontrada es una combinación de ignimbrita breccia de explosión y roca madre sedimentaria paleozóica.

Se examinaron visualmente las muestras obtenidas de los cortes de la perforación. Las fotografías se presentan junto con los registros geofísicos y litológicos, en la Figura 3.5. La perforación y el proceso de extracción de núcleos se realizaron de la siguiente manera:

1. Perforación de entubado temporal de 4,5" de diámetro a una profundidad de 6 m.
2. Perforación de entubado de 3,5" de diámetro a una profundidad de 14 m. La perforación en los sedimentos cuaternarios se realizó utilizando una broca tricónica o de carburo de tungsteno, conocida localmente como broca *Vidia*.
3. Después de que se encontró la roca madre, aproximadamente a los 14 m, la perforación continuó con una diamantina NQ (diámetro externo de 2,96"; diámetro interno de 1,87").
4. Se obtuvieron "cores" de roca madre hasta una longitud total de aproximadamente 19 m.
5. Se llevaron a cabo seis pruebas Lugeon (Packer) dentro de la roca madre. Las pruebas fueron realizadas a intervalos de 3 m cada una y a profundidades entre 14 y 17 m, 17 y 20 m, 20 y 23 m, 23 y 26 m, 26 y 29 m, y 30 y 33 m respectivamente.

El pozo se terminó de la siguiente manera:

*Tabla A7.4. Construcción del pozo de monitoreo DM-5.*

Intervalo de profundidad (m debajo del nivel del suelo)	Material
+0.50 – 0	Tubería de 2" PVC Schedule 40 blank
0 – 1	Sellante sanitario en el anillo (annulus)
0 – 9	Tubería de 2" PVC Schedule 40 blank
9 – 14	Tubería ranurada de 2" PVC Schedule 40
14 – 15	Tubería de 2" PVC Schedule 40 blank (sumidero)
1 – 16	Relleno con grava selecta en el anillo (annulus)
16 – 33	Relleno con grava gruesa

Para limpiar los sedimentos finos del agujero y eliminar el lodo de bentonita usado en la perforación, se lavó el pozo con agua inyectada a presión. Antes de efectuar el muestreo se desarrolló el pozo y se realizó una limpieza mediante una bomba de presión de aire durante 8 horas.

#### *Pozo DM - 6*

Este pozo se perforó en la calle Jordán en Papel Pampa Este, a unos 300 m al OSO de la Avenida Circunvalación. La perforación del pozo empezó el 3 de diciembre y terminó el 6 de diciembre de 1999.

La perforación alcanzó una profundidad total de 20 m, con un diámetro de 6½". Subsecuentemente, la parte superior del pozo fue ensanchada a un diámetro de 8½" hasta una profundidad 16 m, para permitir la instalación de los dispositivos de monitoreo. La viscosidad del lodo de bentonita durante la perforación varió entre 40 y 45 s en el embudo Marsh. Se