



**Proyecto
As - Bolivia**

**Proyecto
Detección y remoción de arsénico natural en áreas
desfavorecidas abastecidas con aguas subterráneas
(Bolivia)**

Financiado por AECID



**Informe de las actividades llevadas a cabo por
Geólogos del Mundo**

Julio de 2020

Código: GM-20-IF-01	Preparado: J. M^a Suso Llamas F. Pérez Méndez
Revisión: r0	Fecha: 16 de julio de 2020
Nº páginas: 44	Firmas: 

Detección y remoción de arsénico natural en áreas desfavorecidas abastecidas con aguas subterráneas (Bolivia).

Informe de las actividades llevadas a cabo por Geólogos del Mundo

Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.2 OBJETIVOS	4
2. TRABAJOS REALIZADOS.....	5
2.1 DOCUMENTACIÓN PRELIMINAR	5
2.2 VISITAS A POZOS DE ABASTECIMIENTO (TAREAS R2A1 Y R2A4)	7
2.3 CAPACITACIÓN Y DIVULGACIÓN (TAREA R4A1).....	9
2.4 VISITAS INSTITUCIONALES (TAREA R4A1)	9
2.5 VIAJES REALIZADOS.....	10
3. PRESENCIA DE ARSÉNICO EN EL ACUÍFERO DE COCHABAMBA (R2A1 Y R2A4)	11
3.1 ENCUADRE GEOLÓGICO	11
3.2 HIDROGEOLOGÍA	15
3.2.1 Inventario de puntos de agua	15
3.2.2 Piezometría	23
3.2.3 Funcionamiento hidrogeológico y flujo subterráneo	24
3.2.4 Alcance de la contaminación por arsénico.....	27
3.2.5 Origen de la contaminación por arsénico.....	33
4. CAPACITACIÓN Y DIVULGACIÓN (TAREA R4A1).....	36
5. REFERENCIAS.....	38

Tablas

Tabla 3.1. Inventario de puntos de agua visitados.	16
Tabla 3.2. Contenidos de As y conductividad eléctrica del agua.....	28

Figuras

Figura 3.1.	Mapa geológico del valle de Cochabamba (Renner y Velasco, 2000). ...	12
Figura 3.2.	Esquema conceptual de la cubeta tectónica de Cochabamba.....	13
Figura 3.3.	Nivel de conglomerados del borde norte de la cubeta de Cochabamba.....	14
Figura 3.4.	Abanico aluvial en el borde norte de la cubeta de Cochabamba.	15
Figura 3.5.	Emboquille de pozo sin ningún tipo de protección.	22
Figura 3.6.	Arquetas inundadas.	22
Figura 3.7.	Almacenamiento de materiales potencialmente contaminantes en el interior de las arquetas de los pozos.	22
Figura 3.8.	Mapa de isopiezas del acuífero del valle de Cochabamba (Renner y Velasco, 2000).	23
Figura 3.9.	Hidrograma de dos pozos del valle de Cochabamba (Renner y Velasco, 2000).	24
Figura 3.10.	Esquema de flujo subterráneo.....	26
Figura 3.11.	Comparación de las concentraciones de As en las campañas de noviembre de 2018 y mayo de 2019.....	29
Figura 3.12.	Comparación de las conductividades eléctricas del agua en las campañas de noviembre de 2018 y mayo de 2019	30
Figura 3.13.	Concentración de As en las muestras de las campañas de noviembre de 2018 y mayo de 2019.	31
Figura 3.14.	Perfil hidroquímico.....	34

Anejos

- Anejo nº 1: Hoja divulgativa
- Anejo nº 2: Presentación efectuada en Cochabamba el 19 de mayo de 2019
- Anejo nº 3: Presentación efectuada en La Paz el 22 de julio de 2019
- Anejo nº 4: Presentación efectuada en Cochabamba el 27 de febrero de 2020

Planos

- Plano nº 1: Inventario de puntos de agua.
- Plano nº 2: Primera campaña de muestreo (noviembre de 2018)
- Plano nº 3: Segunda campaña de muestreo (mayo de 2019)

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

La ONGD Geólogos del Mundo (GM), el Instituto Geológico Minero de España (IGME), la Universidad Privada Boliviana (UPB) y la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), han llevado a cabo conjuntamente el proyecto “Detección y remoción de arsénico natural en áreas desfavorecidas abastecidas con aguas subterráneas (Bolivia)”. El proyecto, cuya duración ha sido de 18 meses distribuidos a lo largo de 2018 y 2019, ha estado dirigido por el IGME y financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y el propio IGME.

El objetivo general del proyecto ha sido la puesta a punto de un sistema de fotorreactores para la eliminación del arsénico del agua. Su finalidad ha sido mejorar las condiciones de vida de poblaciones desfavorecidas que utilizan para su abastecimiento acuíferos con aguas cuyo contenido de arsénico es superior al permitido por la normativa vigente en Bolivia y las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS). El desarrollo de los fotorreactores ha estado a cargo de la UPB con el apoyo de la UMSA. En fases anteriores a este proyecto se había puesto a punto y ensayado en laboratorio un modelo de fotorreactor. En el presente proyecto los fotorreactores se han mejorado y robustecido instalándose dos prototipos a escala real: uno de ellos en el sistema de abastecimiento de una escuela de Santuario de Quillacas, en el Altiplano, al sur del lago Poopo, y otro en el comedor de la UPB en Cochabamba.

En paralelo al desarrollo de los fotorreactores se ha evaluado el alcance de los problemas de contaminación del agua subterránea en general —y por arsénico en particular— en Quillacas, en Cochabamba y su área de influencia y, en la llanura Chaco-Beniana. Para ello la UPB y la UMSA han llevado a cabo muestreos de aguas subterráneas a la vez que, con el apoyo del IGME y Geólogos del Mundo, se procuraba la obtención de datos para mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos de los que se abastecen las poblaciones de las zonas mencionadas. Por último, otro de los objetivos fundamentales del proyecto ha sido la identificación de los posibles problemas sociales, ambientales y sanitarios relacionados con la utilización de las aguas subterráneas y su impacto en la vida de las personas de las áreas investigadas.

Las actividades de Geólogos del Mundo en el proyecto se centraron en dos de sus aspectos: en la mejora del conocimiento hidrogeológico del acuífero del que se abastece una parte importante de la población del valle de Cochabamba y los problemas relacionados con el aprovechamiento de sus recursos hídrico; y, la realización de talleres de información y divulgación orientados tanto a los usuarios directos de aguas subterráneas como a los organismos y empresas interesados en su gestión.

Por parte de Geólogos del Mundo han participado en el proyecto:

- José Abril Hurtado: responsable del proyecto por parte de Geólogos del Mundo.
- Fernando Pérez Méndez: geólogo especializado en calidad ambiental y recursos hídricos voluntario de Geólogos del Mundo.
- Jesús M^a Suso Llamas: especialista en hidrogeología, coordinador de Geólogos del Mundo para el proyecto As-Bolivia,.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general de los trabajos realizados ha sido la mejora de las condiciones de vida y sanitarias de poblaciones desfavorecidas cuyo abastecimiento de agua se realiza fundamentalmente a partir de acuíferos con un elevado contenido de arsénico. En el caso de las tareas llevadas a cabo por Geólogos del Mundo en este objetivo general del proyecto se concreta fundamentalmente en:

- El análisis de los problemas socio-sanitarios y técnicos relacionados con los abastecimientos efectuados con aguas subterráneas en las zonas periurbanas de Cochabamba (R2A1, R2A4).
- La evaluación del alcance de la contaminación por As en las zonas periurbanas de Cochabamba (R2A1, R2A4). Reconocimiento del marco geológico e hidrogeológico que condiciona la contaminación por As del agua en el valle de Cochabamba.
- La realización de talleres divulgativos y de capacitación relacionados con los problemas identificados en relación con la utilización de aguas subterráneas para abastecimiento humano (R4A1).

2. TRABAJOS REALIZADOS

2.1 DOCUMENTACIÓN PRELIMINAR

Previamente al primer viaje a Bolivia se hizo una recopilación de la información de interés hidrogeológico e hidroquímico relacionada con las zonas de Cochabamba y Santuario de Quillacas. La búsqueda de información se efectuó por medio de varios recursos de libre acceso disponibles a través de Internet.. Entre la numerosa documentación localizada cabe destacar por su interés para el proyecto:

Arthur Heijstek (2014). "Groundwater use in the high valley of Cochabamba, Bolivia. An inventory on water quantity, water quality and users perspective". BSc Thesis 920702-338-010, Wageningen University (The Netherlands), 32 pp.

Erickson, M. (2005). "Arsenic in Upper Midwest ground water: occurrence and geochemical mobilization mechanisms". BSc Dissertation, Faculty of the Graduate School of the University of Minnesota, pp. 128.

Erickson, M., Malenda, H. y Berquist, E. (2018). "How or When Samples Are Collected Affects Measured Arsenic Concentration in New Drinking Water Wells". Groundwater, Vol. 56, no. 6, pp. 921-933.

Escalera, R. y Ormachea, M. (2009). "Remoción de arsénico (v) asistida por oxidación UV solar en un foto-reactor tubular de sección circular". Investigación & desarrollo, n°. 9, pp. 58–70.

Escalera, R. y Ormachea, M. (2017). "Hidroquímica de la presencia natural de arsénico en aguas subterráneas de áreas suburbanas de Cochabamba-Bolivia y evaluación de la viabilidad técnica de procesos de remoción". Investigación & desarrollo, n°. 17, Vol. 1, pp. 27–41.

Gotkowitz, M., Schreiber, M., y Simo, J. (2004). "Effects of Water Use on Arsenic Release". Groundwater, Vol. 42, no. 4, pp. 568-575.

Castro de Esparza, M.L. (2006). "Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública". International Congress Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America, Mexico City, 20-24 June 2006.

Gouzes, R. y Delpont G. (1990). "Evaluación de los recursos de agua y abastecimiento en agua potable de la ciudad de Cochabamba, Bolivia". Consorcio BRGM - SEURECA, 30 pp y anexos.

INTECSA, (1994). "Plan director global binacional de protección – prevención de inundaciones y aprovechamiento de los recursos del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó, y lago Salar de Coipasa (sistema T.D.P.S.). Estudio de hidrogeología." Convenios ALA/86/03 y ALA/87/23 Perú-Bolivia, 127 pp.

Montes de Oca, I. (sin datar). "Geología de Bolivia". 10 pp.

Neumann-Redlin, Chr. Renner, S, y Torrez, J. (sin datar). "Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba, Bolivia". 8pp.

Ormachea, M., Wern, H., Johnsson, F., Bhattacharya, P., Sracek, O., Thunvik, R., Quintanilla, J., y Bundschuh, J. (2013). "Geogenic arsenic and other trace elements in the shallow hydrogeologic system of Southern Poopó Basin, Bolivian Altiplano". *Journal of Hazardous Materials*, 262, pp 924-940.

Ormachea, M. y Quintanilla, J. (2014). "Distribution of geogenic arsenic in superficial and groundwater in Central Bolivian Highlands". *Revista Boliviana de Química*, Vol. 31, nº 2, pp.51-60.

Renner, S. y Velasco, C. (2000). "Geología e Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba". *Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería* nº 34, SERGEOMIN, 113 pp.

Winston, R. y Ayotte, D. (2018). "Performance Assessments of a Novel Well Design for Reducing Exposure to Bedrock-Derived Arsenic". Vol. 56, no. 5, pp. 762-769

Asimismo, se han obtenido diversas capas de información georreferenciada en formato vectorial del catálogo SIG del portal de SERGEOMIN (<https://www.sergeomin.gob.bo/>), entre las cuales destacan las siguientes temáticas relativas al Plan Director de cuenca del río Rocha en la que se encuentra Cochabamba:

- Hidrología: red hidrográfica
- Topografía: curvas de nivel (20 metros)
- Geología
- Geomorfología
- Unidades hidrogeológicas
- Puntos de agua de la base de datos SIASBO (sistema de información de aguas subterráneas de Bolivia)
- Límites de cuenca y microcuencas

Del portal de Geobolivia (<https://geo.gob.bo>) se han descargado las capas del Modelo Digital de Elevaciones en formato ráster :

- ASTER (Global Digital Elevation Model - GDEM) Hojas S18W066 y S18W067

Por otra parte, también a través de Internet, se descargaron las hojas topográficas a escala 1/50.000 del Instituto Geográfico de Bolivia correspondientes a las dos zonas de interés:

- Hoja topográfica 6136-II, Pampa Aullagas
- Hoja topográfica 6236-III, Santuario de Quillacas
- Hoja topográfica 6341-I, Cochabamba
- Hoja topográfica 6341-IV, Quillacollo
- Hoja topográfica 6441-IV, Colomi

Además de la documentación de libre acceso descargada a través de Internet, durante el primer viaje se completó la información con la adquisición en las oficinas de

Sergeomin¹ en Cochabamba de los mapas geológicos 1/100.000 en formato digital de las áreas de trabajo²:

- Hoja geológica 6136, Pampa Aullagas (Departamento Nacional de Geología, 1963)
- Hoja geológica 6236 Huari, (Departamento Nacional de Geología, 1962)
- Hoja geológica 6341, Cochabamba (Geobol, 1994)
- Hoja geológica 6342, Cordillera del Tunari (Geobol, 1994)

Asimismo, se recopiló información de los proyectos de algunos sondeos del proyecto CABAS.

2.2 VISITAS A POZOS DE ABASTECIMIENTO (TAREAS R2A1 Y R2A4)

Para alcanzar los objetivos propuestos, la metodología seguida se ha basado en la realización de visitas a una serie de captaciones de aguas subterráneas destinadas al abastecimiento humano con el fin de, además de tomar muestras de agua para su análisis en laboratorio, mantener entrevistas con sus propietarios o gestores para, por una parte, recabar información sobre las mismas y, por otra, hacer un reconocimiento del entorno en el que se encuentran ubicadas. Las visitas a los pozos fueron programadas por la UPB. Al concertarlas se solicitaba a los gestores que, en el momento de hacer la visita y tomar las muestras de agua, aportasen una copia de toda la información técnica relacionada con los pozos que tuviesen disponible: informes finales de perforación; columnas litológicas; informes de los trabajos de mantenimiento y limpieza realizados; análisis de agua, etc.

Entre los datos recopilados por cada sondeo visitado cabe señalar:

- Posición y año de perforación.
- Características técnicas: profundidad; tipo de entubación y diámetro; posición de los tramos filtrantes; características del engravillado y la cabeza del pozo.
- Informes finales de perforación y columnas geológicas de los sondeos si los hubiera.
- Equipo de extracción: características de la bomba de extracción y su profundidad en el sondeo.
- Nivel del agua (cuando fue posible se midió el nivel del agua durante la visita) y datos de ensayos hidráulicos o caudal.
- Población abastecida (número de familias abastecidas) y sistema de almacenamiento y distribución del agua.

¹ Sergeomin: Servicio Geológico y Minero de Bolivia.

² Esta documentación fue pagada por la UPB con cargo al proyecto.

- Características del entorno del sondeo: geología de superficie; protección de la captación y estado de la cabeza de pozo; posibles focos de contaminación —alcantarillado, fosas sépticas—; posibles actividades potencialmente contaminantes del entorno —posibilidad de acceso de ganadería u otros animales, almacenamiento de sustancias contaminantes, etc.—.
- Problemas técnicos y averías relacionados con la explotación del pozo: arrastre de arenas y limos; frecuencia de sustitución de las bombas (vida útil); obturación de filtros y colapso de tuberías, etc.

Se prestó especial atención al estado del emboquille de las captaciones y su protección frente a la contaminación. Por cada punto de agua visitado se abrió una ficha de inventario en la que se reflejó la información suministrada por los gestores de cada sondeo. En general esta información es muy heterogénea. Frecuentemente incluye: la columna litológica del pozo recogida en los informes de las compañías de perforación; los niveles del agua en el momento de perforarse o de efectuarse alguna limpieza; algunos niveles estáticos o dinámicos medidos de forma ocasional; y, el caudal de la bomba de extracción.

Se realizaron dos campañas de muestreo en la zona periurbana de Cochabamba. La primera de ellas fue noviembre de 2018 y la segunda en mayo de 2019. La primera campaña puso de manifiesto que los problemas más relevantes —y bastante frecuentes— de los puntos visitados eran una deficiente protección de los emboquilles de las captaciones y la falta de mantenimiento y limpieza del entorno en el que se ubican. Por ello, para la segunda campaña se preparó una hoja divulgativa sobre la protección de las captaciones frente a la contaminación superficial y subsuperficial para distribuir y comentar con los gestores de las captaciones visitadas. Asimismo, al finalizar la segunda campaña de muestreo, se organizó una charla divulgativa al respecto (ver epígrafe 4 Capacitación y divulgación).

Por otra parte, con el fin de evaluar la incidencia sobre la calidad del agua del deficiente estado de muchos emboquilles de las captaciones visitadas en la segunda campaña de muestreo se incluyó la determinación de algunos parámetros microbiológicos —coliformes totales y coliformes termotolerantes—. La toma de muestras para las determinaciones microbiológicas y los análisis se encargaron a una compañía local (CIQ, Centro de Investigaciones Químicas)³. El muestreo para la determinación de los parámetros físico-químicos y el microbiológico se realizaron simultáneamente.

El total en el área de Cochabamba en la primera campaña se visitaron 41 puntos y en la segunda 42 —de los que 20 ya se habían visitado y muestreado también en la primera campaña—. Aunque los sondeos visitados se distribuyeron por todo el valle de Cochabamba con el fin de evaluar el alcance de la contaminación por arsénico, la mayor concentración está en las proximidades de la ciudad. Todos los pozos se utilizan para abastecimiento de agua potable y en su mayor parte son propiedad de

³ El muestreo microbiológico y los análisis fueron pagados por la UPB con cargo al proyecto.

Organizaciones Territoriales de Base (OTB⁴), urbanizaciones privadas (condominios) y, en algún, caso del Semapa⁵. Todos ellos están equipados con bombas sumergibles para su explotación. En el sector de Santuario de Quillacas, que ya había sido muestreado en proyectos anteriores, se visitaron tres puntos aprovechando un viaje para la localización del fotorreactor.

Para completar la información de los pozos facilitada por los propietarios se realizó una serie de vistas a la delegación de Sergeomin en Cochabamba. En la primera se mantuvo una entrevista con su Director el Ingeniero Herbert C. Chávez Flores quien, tras explicarle los objetivos del proyecto As-Bolivia y su alcance, puso a su disposición los archivos de sondeos existentes en la oficina. En las siguientes visitas se recopiló la documentación ya mencionada más arriba.

Toda la información obtenida en las campañas fue revisada y organizada al final de cada una de ellas. La de mayor interés se incorporó a un mapa interactivo en Google para facilitar su visualización, y se incluyó en una página web desarrollada por la UPB, con el fin de compartir los datos más relevantes con el resto de participantes del proyecto.

En el epígrafe 3 (Presencia de arsénico en el acuífero de Cochabamba) se presentan los principales datos obtenidos y los resultados de las visitas realizadas.

2.3 CAPACITACIÓN Y DIVULGACIÓN (TAREA R4A1)

Uno de los principales problemas identificados durante las visitas de los pozos de abastecimiento del entorno de Cochabamba fue la falta de protección de los emboquilles de las captaciones y su entorno lo que implica, especialmente en zonas con abundante población como es el caso de Cochabamba, un riesgo elevado de contaminación tanto para los sondeos como para los acuíferos. Por ello las tareas de divulgación y capacitación de Geólogos del Mundo se han centrado en transmitir a los gestores y usuarios de aguas subterráneas los riesgos de contaminación de sus captaciones por la infiltración de aguas superficiales y las formas de prevenirlos y minimizarlos (ver epígrafe 4 Capacitación y divulgación).

2.4 VISITAS INSTITUCIONALES (TAREA R4A1)

A parte de las visitas a la delegación de Sergeomin en Cochabamba para la presentación del proyecto y la búsqueda de información se ha mantenido conjuntamente con el resto de las organizaciones participantes en As-Bolivia otras reuniones institucionales concertadas para divulgar los objetivos del proyecto y los trabajos que se estaban realizando:

⁴ Organizaciones Territoriales de Base (OTB): organizaciones vecinales legalmente constituidas para gestionar los servicios de un barrio o de un conjunto de vecinos.

⁵ Semapa: Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Cochabamba (empresa municipal)

- Visita al Servicio Geológico Minero (Sergeomin) en La Paz

Tuvo lugar el día 22 de julio de 2019. Por parte de Sergeomin asistieron a la reunión: Dennis M. Flores Ruiz (Director de Sergeomin); Herman Mamani Mamani (Jefe Regional de La Paz); y, tres técnicos más. Los asistentes por parte del proyecto As-Bolivia fueron: José Luis García Aróstegui (IGME); María Eugenia García Moreno (UMSA) y Jesús M^a Suso (Geólogos del Mundo).

Además de la presentación del proyecto As-Bolivia, se habló del tipo de información recogida en la base de datos del Sistema de Información Hidrogeológica de Bolivia (SIHIBO) y la posibilidad de incorporar los datos obtenidos en el proyecto.

- Visita al Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA)

El día 23 de julio de 2019 se mantuvo una reunión en el Viceministerio de recursos hídricos y riego del MMAyA con el Director General de Cuencas y Recursos Hídricos, Luis Marka Saravia, acompañado de cuatro técnicos de su departamento. Por parte de As-Bolivia participaron José Luis García Aróstegui (IGME), M^a Eugenia García Moreno (UMSA) y Jesús M^a Suso (Geólogos del Mundo).

Después de la presentación del proyecto As-Bolivia se mostraron especialmente interesados en el tema de la perforación de pozos ya que estaban preparando una normativa sobre las características mínimas que deben cumplir los sondeos– y en los datos sobre la calidad del agua que se están obteniendo en el proyecto As-Bolivia y la posibilidad de incorporarlos a sus bases de datos.

- Visita a las Autoridades Locales de Santuario de Quillacas

Se ha participado en tres ocasiones en reuniones con las Autoridades Locales de Santuario de Quillacas. La primera de ellas tuvo lugar en noviembre de 2018 con el objetivo de presentar el proyecto As-Bolivia y buscar un emplazamiento para la instalación del fotorreactor para la eliminación de As. La segunda tuvo lugar en diciembre del mismo año, con ocasión de la realización de un evento de formación para divulgar a las Autoridades Locales y la población de Quillacas los resultados de los estudios previos realizados en la región y entregar de la correspondiente documentación. La tercera fue para transferir oficialmente el fotorreactor instalado en la escuela de enseñanza primaria a las Autoridades Locales.

Las reuniones fueron organizadas por la UPB y la UMSA.

2.5 VIAJES REALIZADOS

En total, el tiempo de estancia en Bolivia de los participantes de Geólogos del Mundo para la realización de los trabajos fue superior a 120 días distribuidos en 6 viajes: dos del voluntario, Fernando Pérez Mendez (72 días) y cuatro del coordinador; Jesús M^a Suso Llamas (49 días).

3. PRESENCIA DE ARSÉNICO EN EL ACUÍFERO DE COCHABAMBA (R2A1 Y R2A4)

Uno de los objetivos de las actividades llevadas a cabo por Geólogos del Mundo fue la evaluación, en el entorno de Cochabamba, del alcance de la contaminación por As y los factores que la condicionan. Con este fin se ha completado la información de las características químicas de las aguas analizadas por el proyecto As-Bolivia con la información geológica-hidrogeológica del acuífero de Cochabamba y de los puntos muestreados.

La información utilizada procede fundamentalmente de la síntesis de los principales estudios de geología e hidrogeología llevados a cabo en el valle de Cochabamba realizada por Renner y Velasco (2000) y de la cartografía geológica a escala 1/100.00 de la zona (Geobol 1994 a y b). Esta información se ha revisado y contrastado con las observaciones hechas durante las visitas a los pozos de abastecimiento muestreados, y se ha integrado con los datos facilitados por sus propietarios sobre las características técnicas de las captaciones y las columnas litológicas de algunos sondeos facilitadas por Sergeomin.

3.1 ENCUADRE GEOLÓGICO

La ciudad de Cochabamba se encuentra enclavada en el extremo occidental de un extenso valle de forma arriñonada, situado a una altitud entre ≈ 2.600 y 2.800 m s.n.m. El valle está rodeado por cadenas montañosas que por el norte y noroeste alcanzan cotas en torno a 5.000 m s.n.m. (en la cordillera del Tunari) mientras que por el sur y sureste el relieve, con altitudes entre 3.000 y 3.300 m s.n.m., es mucho más suave.

Desde el punto de vista geológico (Figura 3.1) el valle de Cochabamba constituye una cubeta tectónica rellena de materiales sedimentarios del Cuaternario —aunque no se puede descartar que los sedimentos más profundos correspondan al Plioceno— limitada por fracturas.

El entorno montañoso de la cubeta está constituido fundamentalmente por materiales del Paleozoico con bajo metamorfismo (lutitas, limolitas, cuarcitas areniscas) con pliegues y cabalgamientos de orientación NO-SE. En el extremo occidental hay algunas escamas de materiales calcáreos margosos y arenosos del Cretácico superior y de arcillas arenosas y conglomerados del Paleógeno (Geobol et al. 1994 a y b).

De acuerdo con las distintas campañas de geofísica llevadas a cabo en el valle de Cochabamba (Renner y Velasco, 2000) la profundidad del zócalo de la cubeta tectónica varía de unos sectores a otros. Las mayores profundidades están en el borde norte, al pie de la cordillera del Tunari, donde se estima que son del orden de 800 - 1.100 m. La profundidad disminuye desde el norte hacia el sur en donde se reduce hasta 150 - 200 m (Figura 3.2).

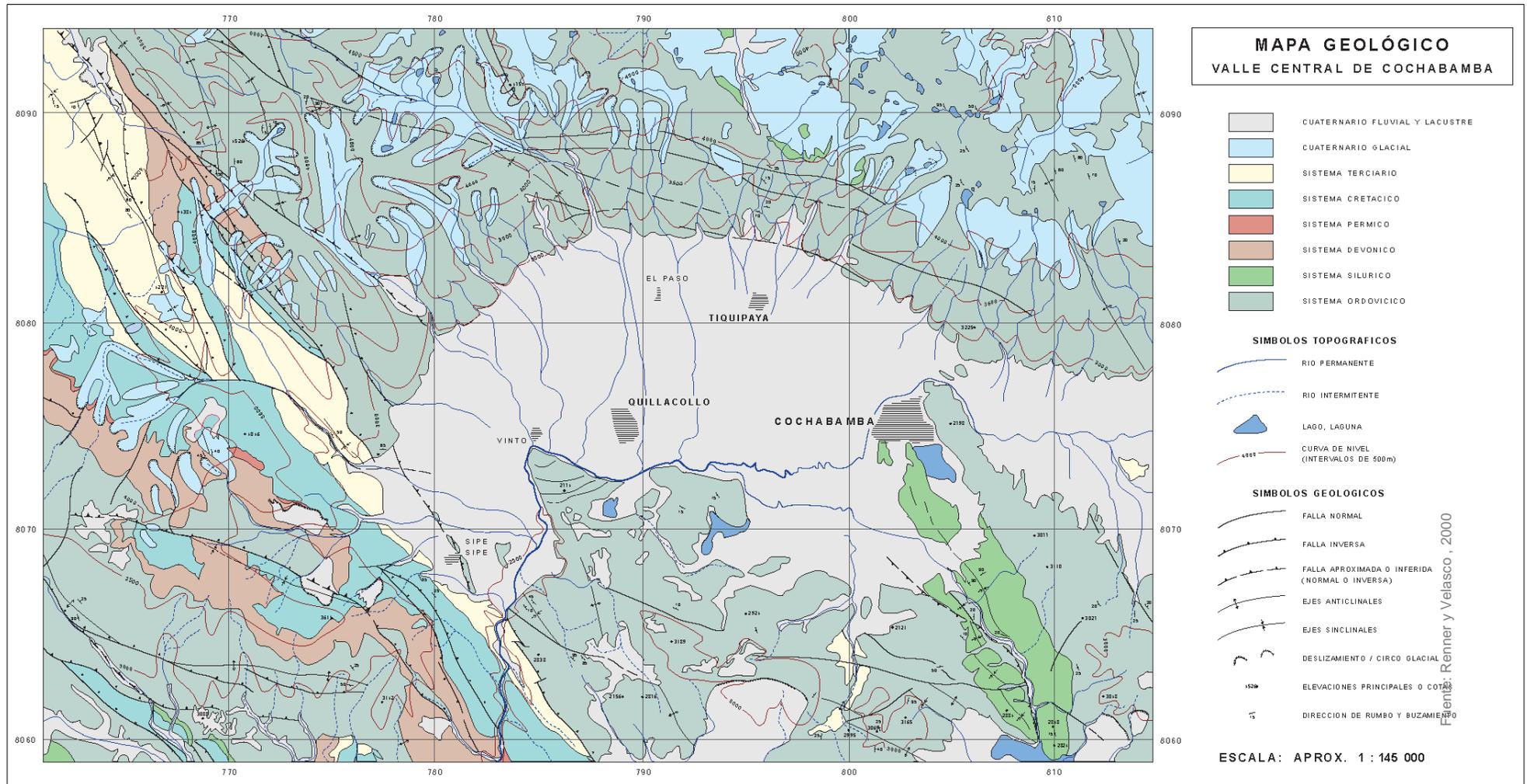


Figura 3.1. Mapa geológico del valle de Cochabamba (Renner y Velasco, 2000).

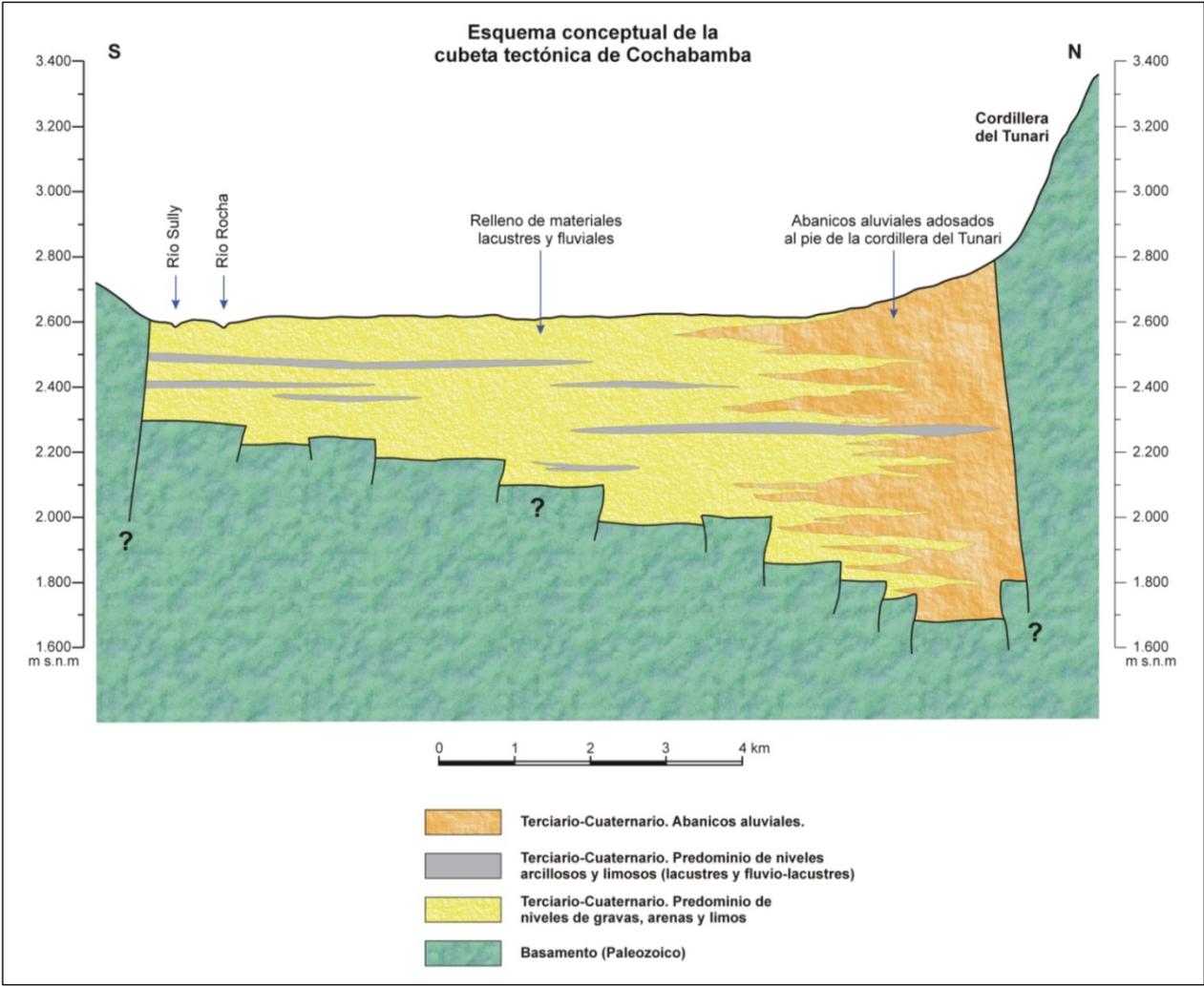


Figura 3.2. Esquema conceptual de la cubeta tectónica de Cochabamba.

Los sedimentos que rellenan la cubeta proceden del dismantelamiento de los relieves que la circundan. Están constituidos por materiales detríticos de granulometría muy variable (arcillas, limos arenas y gravas) depositados fundamentalmente en ambientes fluviales, lacustres y fluviolacustres aunque también hay depósitos de piedemonte, abanicos aluviales y, fuera de la cubeta tectónica, en la cordillera del Tunari, depósitos glaciares. Su distribución es muy heterogénea con abundantes cambios de facies, tanto en sentido vertical como horizontal, originados por variaciones de los niveles del agua, modificación del curso de los ríos y de su capacidad de erosión y transporte, cambios en la pluviometría etc.

Dentro del acuífero de Cochabamba se han realizado, al menos, tres sondeos profundos de reconocimiento (Renner y Velasco, 2000). Dos de ellos alcanzaron una profundidad de algo más de 500 m y el tercero de 300 m. Todos ellos parecen indicar que aunque las intercalaciones de niveles de granulometrías gruesas disminuyen con la profundidad se mantienen, aunque de forma irregular, a lo largo de toda la columna.

El borde más activo de la cubeta parece haber sido el norte. Esto se manifiesta en una gradación de la granulometría de norte a sur (Renner y Velasco 2000) que pasa de forma progresiva de sedimentos más gruesos junto al límite norte (Figura 3.3) a un incremento de la proporción de niveles de granulometrías finas hacia el centro y el sur de la cubeta. Asimismo, los episodios de sedimentación lacustre y lagunar son más abundantes en el inicio de la colmatación de la cubeta haciendo que los niveles de arcillas sean más numerosos y extensos con la profundidad (Renner y Velasco, 2000).

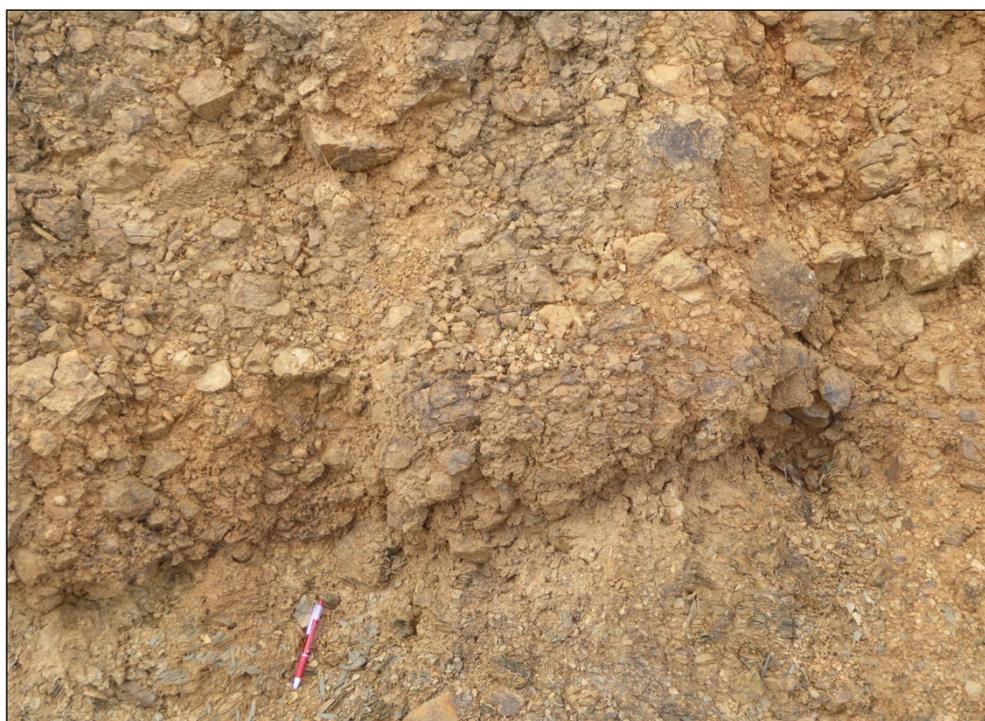


Figura 3.3. Nivel de conglomerados del borde norte de la cubeta de Cochabamba.

En el borde norte, al pie de la cordillera del Tunari, hay adosados una serie de abanicos aluviales (Figura 3.4) que progradan hacia el centro de la cuenca, intercalándose con los sedimentos en el que predominan materiales de granulometría más fina y mejor seleccionados de origen fluvial y lacustre.



Figura 3.4. Abanico aluvial en el borde norte de la cubeta de Cochabamba.

Salvo algunos aprovechamientos de rocas industriales, en el entorno del valle de Cochabamba no hay explotaciones mineras aunque se citan (Geobol et al 1994 a y b) indicios de algunos sulfuros y óxidos metálicos (galena argentífera, casiterita, blenda).

3.2 HIDROGEOLOGÍA

3.2.1 Inventario de puntos de agua

En total se ha visitado en el entorno de Cochabamba 62 puntos de agua. Sus principales características pueden verse en la Tabla 3.1. La mayor parte de ellos corresponden a pozos perforados (un total de 57) utilizados para el abastecimiento domiciliario. El resto corresponden a un manantial, tres cursos de aguas superficiales y a una red de distribución. Su ubicación puede verse en el plano nº 1.

Tabla 3.1. Inventario de puntos de agua visitados.

Código	Denominación	Coordenadas			Naturaleza	Profundid. (m)	Litología ⁽¹⁾	Profundidad filtros ⁽²⁾ (m)			Caudal (l/s)	Observaciones ⁽³⁾
		Latitud sur (°)	Longit. oeste (°)	Cota (m s.n.m.)				Inicial	Final	Longit. total		
C01	Puntita Chico Sur	17,377997	66,103282	2.708	Sondeo	101		38	81,5	8,5	1,8	N.E. ≈ 31 m. N.D. ≈ 40 m.
C02	Puntita Chico Norte	17,376746	66,102996	2.720	Sondeo	94	Arc - Gr	65	87,5	7	1,8	N.E. ≈ 50 m. N.D. ≈ 65 m.
C03	Amancaya Sur	17,381761	66,092167	2.752	Sondeo	120					2	Arrastra limos.
C04	Chacacollo	17,391414	66,084129	2.689	Sondeo	90		80	90		2,5	
C05	Chacacollo (Los Olivos)	17,390842	66,085789	2.687	Sondeo	90					2,5	No se pudo tomar muestra de agua para el análisis en laboratorio
C06	Chaopisullo Norte	17,410352	66,098659	2.689	Sondeo	130					2,1	N.D. ≈ 54 m (en recuperación) (05/11/2018)
C07	Chaopisullo Sur	17,411683	66,097959	2.703	Sondeo	160					1,5	Arrastre de materia en suspensión.
C08	15 de Marzo	17,474009	66,099023	2.770	Sondeo	125		23,6	74,5		1,5	Capta el sustrato del Paleozoico aunque pudiera cortar algún depósito de ladera en la parte superior.
C09	OTB Villa Coña Coña	17,384978	66,206214	2.550	Sondeo						0,9	
C10	OTB Juan XXIII	17,388346	66,203425	2.591	Sondeo	77,4		23,6	74,5	5,62	1,5	N.E. ≈ 8 m (abril de 2004). N.D. ≈ 27 m (abril de 2004).
C11	OTB Óscar Alfaro	17,389798	66,205019	2.577	Sondeo						2	
C12	OTB Óscar Alfaro	17,389816	66,204533	2.587	Sondeo						1,5	N.P. = 20,67 m (6/11/2018).
C13	OTB San José	17,386697	66,197859	2.593	Sondeo	90		18	36		1,5	N.E. = 17 m. N.D. ≈ 24 m.
C14	OTB San José	17,388012	66,979383	2.575	Sondeo	30		28	29	1	2	N.D. ≈ 26 m. Era un pozo surgente.
C15	OTB San Gabriel (Pozo 3)	17,378605	66,202261	2.608	Sondeo	108	Gr - Arc	35	99	15	1,5	

(1) **Litología:** Arc = arcillas; Lm = limos; Arn = arenas; Gr = gravas; Cg = conglomerados.

(2) **Filtros:** se indica la profundidad inicial y final de las zonas filtrantes y el total de metros filtrantes en ese intervalo.

(3) **Observaciones:** N.E. = nivel estático del agua; N.D. = nivel dinámico del agua; N.P. = nivel del agua que se desconoce si es estático y dinámico

Tabla 3.1. Inventario de puntos de agua visitados (continuación).

Código	Denominación	Coordenadas			Naturaleza	Profundid. (m)	Litología ⁽¹⁾	Profundidad filtros ⁽²⁾ (m)			Caudal (l/s)	Observaciones ⁽³⁾
		Latitud sur (°)	Longit. oeste (°)	Cota (m s.n.m.)				Inicial	Final	Longit. total		
C16	OTB San Gabriel (Pozo 2)	17,378372	66,201770	2.591	Sondeo	102	Cg-Gr-Arc	41	90	12,5	1	N.E. ≈ 14,0 m (2017); 7,1 0 m (2011). N.D. ≈ 22,8 m (2017); 17,9 m (2011). Arrastra materia en suspensión.
C17	OTB Sirpita Collo	17,358510	66,211027	2.615	Sondeo	103	Gr - Arc	28	96	8	4	Surgente (Q ≈ 0,33 l/s a ≈ 1 m sobre la superficie del terreno).
C18	OTB Sirpita Collo	17,356209	66,210538	2.627	Sondeo	105	Gr - Arn - Arc	37	99	18	5	Surgente.
C19	OTB San Gabriel	17,375544	66,206791	2.593	Sondeo	77		18	71	6	1,8	N.E. ≈ 7m (tras la perforación). N.D. ≈ 16,50 (Tras la perforación). N.D. > 17 m (7/11/2019).
C20	OTB San Rafael	17,374334	66,201964	2.600	Sondeo	105		19	82	10	2	Pozo reperforado (prof. inicial 90 m). N.E. ≈ 3 m (17/11/2012). N.D. ≈ 12 (17/11/2012). N.D. = 13,07 m (7/11/2019).
C21	OTB Santa Rosa	17,395217	66,216228	2.585	Sondeo	80					1,5	N.D. 30-35 m. Problemas de precipitación de Fe y Mn.
C22	OTB Santa Rosa	17,395896	66,217089	2.590	Sondeo	80					0,9	N.P. = 9,14 m (8/11/2018). Problemas de precipitación de Fe y Mn.
C23	OTB Sergio Almaraz	17,398661	66,210129	2.604	Sondeo	120		89	95		4	N.E. = 16,3 m (8/11/2018). Agua salina en tramos superiores
C24	OTB Santa Rosa	17,397841	66,216385	2.608	Sondeo	75					1	Arraste de limos.
C25	OTB Santa Rosa	17,397658	66,216446	2.589	Sondeo	68		40	68	3,6	1,2	Arraste de limos.
C26	Colpiri Norte	17,354976	66,181649	2.670	Sondeo	120					3	N.D. 15,62 m (8/11/2018).
C27	Comdebama 1	17,359082	66,185073	2.609	Sondeo	83					2,5	N.D. estabilizado a 29,72 m (8/11/2018).
C28	OTB Miraflores	17,475789	66,173325	2.669	Sondeo	120					1,7	Posiblemente capta el sustrato del Paleozoico. Arraste de materiales finos.
C29	Pedregal Sur	17,476972	66,185987	2.710	Sondeo	125					2	Posiblemente capta el sustrato del Paleozoico.

(1) **Litología:** Arc = arcillas; Lm = limos; Arn = arenas; Gr = gravas; Cg = conglomerados.

(2) **Filtros:** se indica la profundidad inicial y final de las zonas filtrantes y el total de metros filtrantes en ese intervalo.

(3) **Observaciones:** N.E. = nivel estático del agua; N.D. = nivel dinámico del agua; N.P. = nivel del agua que se desconoce si es estático y dinámico

Tabla 3.1. Inventario de puntos de agua visitados (continuación).

Código	Denominación	Coordenadas			Naturaleza	Profundid. (m)	Litología ⁽¹⁾	Profundidad filtros ⁽²⁾ (m)			Caudal (l/s)	Observaciones ⁽³⁾
		Latitud sur (°)	Longit. oeste (°)	Cota (m s.n.m.)				Inicial	Final	Longit. total		
C30	Barrio Kami	17,366733	66,236597	2.605	Sondeo							N.E. = 7,04 m (9/11/2018). No se pudo tomar muestra de agua para el análisis en laboratorio.
C31	San Humberto	17,333643	66,238946	2.676	Sondeo	75					4,5	El caudal inicial de explotación era de 7,8 l/s. Hubo que reducirlo para evitar el arrastre de limos. N.D. ≈ 23 m (9/11/2018).
C32	El Paso - I Pz	17,349852	66,255989	2.641	Sondeo	120					10	N.D. = 39,7 m (9/11/2018).
C33	El Paso - I 6	17,349852	66,255989	2.641	Sondeo	120					10	N.D. ≈ 37 m (18/10/2018).
C34	OTB Carme de los Andes	17,381982	66,329074	2.624	Sondeo	100		47	95	12	7	N.E. ≈ 24 m (26/08/2008). N.D. ≈ 33 m (26/08/2008).
C35	Semapa 7	17,398894	66,311229	2.582	Sondeo							N.D. ≈ 11 m (24/05/2018). N.D. ≈ 9,41 m (9/11/2018).
C36	OTB Esquilán Grande	17,403225	66,242842	2.569	Sondeo	100					5	Arrastra bastante arena.
C37	UPB	17,398000	66,218769	2.590	Sondeo	71		30	62,5	9,5	4	N.E. ≈ 15 m (26/08/2008). N.D. ≈ 20 m (26/08/2008).
C38	UPB - Laboratorio	17,398325	66,217862	2.568	Sondeo							N.E. = 14,86 m (10/11/2018).
C39	Taquiña	17,325758	66,184222	2.943	Agua superficial	-						Agua del arroyo de la Taquiña.
C40	Sant Rosa Central				Sondeo							Pozo en perforación Está a 55 m de profundidad y se prevé llegar 66 m.
C41	Nuevo RE	17,390646	66,204299	2.589	Sondeo	69,3	Gr - Arn - Arc	60,8	62	1,2	0,77	N.E. = 21,3 m (20/05/2019). N.D. = 26,54 m (20/05/2019).
C42	OTB Zona Sud	17,391584	66,242494	2.591	Sondeo							Arrastre de materia en suspensión.
C43	OTB Zona Sud	17,391584	66,242494	2.591	Sondeo							Arrastre de materia en suspensión.
C44	OTB Zona Sud	17,391640	66,241608	2.598	Sondeo							
C45	OTB Zona Sud	17,398648	66,240524	2.595	Sondeo							
C46	OTB Esquilán Grande 2	17,402997	66,241527	2.584	Sondeo	90					1,5	N.E. ≈ 2 m (15/12/2012). N.D. ≈ 6 m (15/12/2012).

(1) **Litología:** Arc = arcillas; Lm = limos; Arn = arenas; Gr = gravas; Cg = conglomerados.

(2) **Filtros:** se indica la profundidad inicial y final de las zonas filtrantes y el total de metros filtrantes en ese intervalo.

(3) **Observaciones:** N.E. = nivel estático del agua; N.D. = nivel dinámico del agua; N.P. = nivel del agua que se desconoce si es estático y dinámico

Tabla 3.1. Inventario de puntos de agua visitados (continuación).

Código	Denominación	Coordenadas			Naturaleza	Profundid. (m)	Litología ⁽¹⁾	Profundidad filtros ⁽²⁾ (m)			Caudal (l/s)	Observaciones ⁽³⁾
		Latitud sur (°)	Longit. oeste (°)	Cota (m s.n.m.)				Inicial	Final	Longit. total		
C47	OTB Esquilán Grande 1	17,403674	66,240116	2.581	Sondeo	48					3	Era surgente. Dejó de serlo hacia 1985-87
C48	Apote Central	17,335854	66,238523	2.679	Sondeo	54					8	N.E. ≈ 2 m (junio 1983). N.E. ≈ 17 m (2018).
C49	Apote-Pihusi	17,210779	66,245750	2.729	Sondeo	180						
C50	OTB Juan XXIII	17,389237	66,201747	2.610	Sondeo							Pozo de unos 45 años.
C51	OTB Sergio Almaraz	17,398662	66,210364	2.584	Sondeo							Arrastre de materia en suspensión.
C52	OTB San Gabriel	17,378475	66,202177	2.595	Sondeo	72					1	N.D. ≈ 18 m.
C53	OTB San Vicente	17,376300	66,205005	2.592	Sondeo	87	Gr - Arc	21	79	10	2	N.E. ≈ 9 m (enero 2003). N.D. ≈ 22 m (enero 2003).
C54	Tolavi HR	17,340518	66,224341	2.675	Sondeo	34	Gr - Arn- Lm - Arc	22	31	1	1,5	N.E. ≈ 9 m (1991); 14 m (2018). N.D. ≈ 10 m (1991); 25,5 m (2018).
C55	Antiguo RE	17,390699	66,204229	2.594	Sondeo	48					0,5	
C57	Chaopisuyo Norte	17,410935	66,099912	2.697	Sondeo	130						
C58	Tolavi	17,314824	66,233155	2.854	Vertiente	-						Vertiente de la cordillera.
C59	OTB Satna Rosa Central	17,398139	66,216548	2.582	Sondeo	80						Arrastre de materia en suspensión.
C60	OTB Santa Rosa Central	17,395929	66,217227	2.579	Sondeo	50					0,5	Pozo perforado en 1955 (USAID).
C61	OTB San Gabriel	17,378451	66,201890	2.608	Red de distribución	-						Agua de la red de distribución después de pasar por el depósito
C62	Tolavi	17,314824	66,233155	2.854	Vertiente	-					1	Agua de dos manantiales de la cordillera de Tunari (vertiente).
C63	Liriuni	17,287477	66,291602	3.204	Manantial	-	Pizarras y esquistos					Balnerio de aguas termales. Paleozoico.
C64	Froebel	17,361277	66,146304	2.706	Sondeo	100						Arrastre de materia en suspensión.

(1) **Litología:** Arc = arcillas; Lm = limos; Arn = arenas; Gr = gravas; Cg = conglomerados.

(2) **Filtros:** se indica la profundidad inicial y final de las zonas filtrantes y el total de metros filtrantes en ese intervalo.

(3) **Observaciones:** N.E. = nivel estático del agua; N.D. = nivel dinámico del agua; N.P. = nivel del agua que se desconoce si es estático y dinámico

La información disponible sobre las características de los sondeos fue, en su mayor parte, facilitada por los propietarios o los gestores de los mismos. En general es relativamente escasa. En algunos casos se dispone de los informes finales de las perforaciones o informes de su limpieza y mantenimiento. Por lo general son muy irregulares en cuanto a su contenido. Algunos recogen sus características indicando, además de su profundidad, el tipo de entubación colocado y la posición de los filtros. Pocas veces se refleja la columna litológica atravesada por las perforaciones de forma detallada. En la mayor parte de los casos en que existe se limita a una descripción genérica, sin precisar sus características ni la profundidad exacta de los distintos tramos atravesados.

Aunque se conoce la profundidad de la mayor parte de los sondeos visitados, a veces el dato es dudoso ya que los gestores sólo dieron un valor aproximado (por ejemplo “*tiene una profundidad de unos 100 ó 110 m*”). En estos casos, en la Tabla 3.1 se ha puesto el valor medio del intervalo de profundidades manifestado por el gestor. La profundidad media de los puntos visitados es de ≈ 95 m siendo la máxima de 180 m y la mínima de 30 m. Esto implica que todas las captaciones aprovechan exclusivamente el tramo más superficial del acuífero. La mayor parte de los pozos en los que se dispone de este dato (el 70 %) tiene una profundidad entre 70 y 120 m.

Los sondeos están entubados en acero o PVC con diámetros comprendidos entre 4” y 6”. La información sobre la disposición de los tramos filtrantes es muy escasa. Predominan los sondeos en los que las zona abiertas se han ranurado una vez colocada la tubería en el sondeo. No obstante, hay algunos sondeos con tramos filtrantes de ranura continua (tipo Johnson). No hay información sobre la colocación de los empaques de grava y es muy posible que no todos los pozos lo tengan. De acuerdo con las manifestaciones de los gestores o propietarios de las captaciones, la deficiente entubación de los sondeos queda patente en la turbidez del agua y el arrastre de limos y elementos finos que obliga a la limpieza frecuente de los depósitos de las redes de distribución y a la sustitución, por avería, de las bombas —en algunos casos han manifestado que las tienen que cambiar más de una vez al año—. Asimismo, no son raros los gestores o propietarios de los pozos que indican que para reducir el arrastre de materiales en suspensión se ven obligados a reducir el caudal de bombeo. Por otra parte, el arrastre de elementos finos también se ha detectado en sondeos engravillados y entubados con filtros de tipo Johnson lo que parece apuntar a que puede haber niveles de granulometría muy fina que para su retención requieren una luz de paso de los filtros y una selección granulométrica del empaque de gravas muy cuidadosa.

Por lo general, los tramos abiertos de las entubaciones —ya sean con filtros de fábrica o ranurados a pie de obra— se distribuyen a lo largo de toda su longitud por lo que en el interior de los sondeos se mezcla el agua de distintas profundidades. Únicamente hay registrados dos pozos con información sobre las zonas filtrantes que estén abiertos exclusivamente en uno o dos tramos próximos entre sí: C41 tiene un único tramo abierto (rasgando la tubería ciega una vez colocada en el sondeo) entre 60,8 y 62 m de profundidad y C54 tiene dos tramos abiertos con un total de 1 m entre 22 y 31 de profundidad.

Los datos de caudal (Tabla 3.1) también presentan incertidumbres. No se ha obtenido registros de ensayos de bombeo formales. No obstante hay algunos informes de los bombeos realizados al terminar la perforación de los sondeos o al efectuar la limpieza de los mismos. Suelen reflejar el nivel estático, el dinámico y un valor de caudal sin que, en general, se indique el procedimiento seguido para su obtención, la duración del bombeo o si los niveles dinámicos estaban estabilizados al finalizar la prueba. Por otra parte, los datos de nivel suelen ser números enteros lo que hace pensar que corresponden a valores redondeados y no a medidas exactas. Tampoco se indica en ningún caso el procedimiento para medida de los caudales ni de su posible fluctuación a lo largo del ensayo por lo que no se puede descartar que en algunos casos correspondan al caudal nominal de las bombas empleadas para su realización.

Cuando no hay datos de pruebas de bombeo los valores de caudal de la Tabla 3.1 han sido proporcionados verbalmente por los propietarios o gestores de las captaciones y se refieren a los caudales teóricos de las bombas instaladas. Sin embargo, como ya se ha mencionado, no son infrecuentes las captaciones que han tenido que reducir su caudal para tratar de eliminar el arrastre de materiales en suspensión y procurar prolongar la vida útil de las bombas. Estos datos, por tanto, son indicativos de los caudales característicos de explotación y no de los que se podría llegar a extraer del acuífero. Por otra parte, los diámetros de entubación no permiten la colocación de bombas con caudales de extracción mucho más altos.

Los valores registrados son bastante homogéneos. El caudal medio registrado es de 2,6 l/s con unos valores máximo y mínimo de 10 y 0,5 l/s respectivamente. Sin embargo, el 72% de los pozos en los que se dispone de esta información tienen un caudal inferior al medio. Los caudales de 10 l/s corresponden a dos sondeos del Semapa, C32 y C33, ambos situados en el sector de El Paso (Quillacollo) y de 120 m de profundidad.

Frecuentemente los emboquilles de las captaciones y su entorno más próximo no están adecuadamente protegidos para prevenir la entrada de contaminación superficial al interior de los sondeos y el acuífero. Esto es especialmente grave en zonas periurbanas en las que los pozos muchas veces están muy próximos –incluso a menos de 5 m de distancia– a conducciones de aguas residuales y a fosas sépticas. Sólo excepcionalmente en los informes finales de perforación disponibles se da información sobre la ejecución de los emboquilles. En los casos en que están descritas sus características, los emboquilles se suelen limitar a la cementación de uno o dos metros del espacio anular más superficial.

No son excepcionales las captaciones sin ningún tipo de protección superficial (Figura 3.5); las arquetas inundadas y con riesgo de que el agua entre directamente al interior del sondeo (Figura 3.6); o las que almacenan materiales potencialmente contaminantes (Figura 3.7).



Figura 3.5. Emboquille de pozo sin ningún tipo de protección.



Figura 3.6. Arquetas inundadas.



Figura 3.7. Almacenamiento de materiales potencialmente contaminantes en el interior de las arquetas de los pozos.

3.2.2 Piezometría

Son muy escasas las medidas de niveles piezométricos en el acuífero de Cochabamba. En el estudio de Renner y Velasco (2000) se menciona una red de control piezométrico, con 39 puntos de medida, establecida en 1991 en el marco del proyecto CABAS (Convenio alemán boliviano de aguas subterráneas) y se recoge un mapa de isopiezas del conjunto del valle de Cochabamba, sin fecha y sin los puntos utilizados para su elaboración, ni sus niveles del agua (Figura 3.8). En el mismo estudio se recoge la evolución de la profundidad del agua entre 1992 y 1997 en dos puntos cuya posición exacta no ha sido posible identificar (Figura 3.9). Por la descripción que se hace de ellos uno debe de estar en las proximidades del río Rocha, en zona de descarga, y el otro hacia el límite norte del acuífero, en zona de recarga. Este último muestra un ligero descenso desde 1993 hasta 1996 que se recupera en el primer trimestre de 1997.

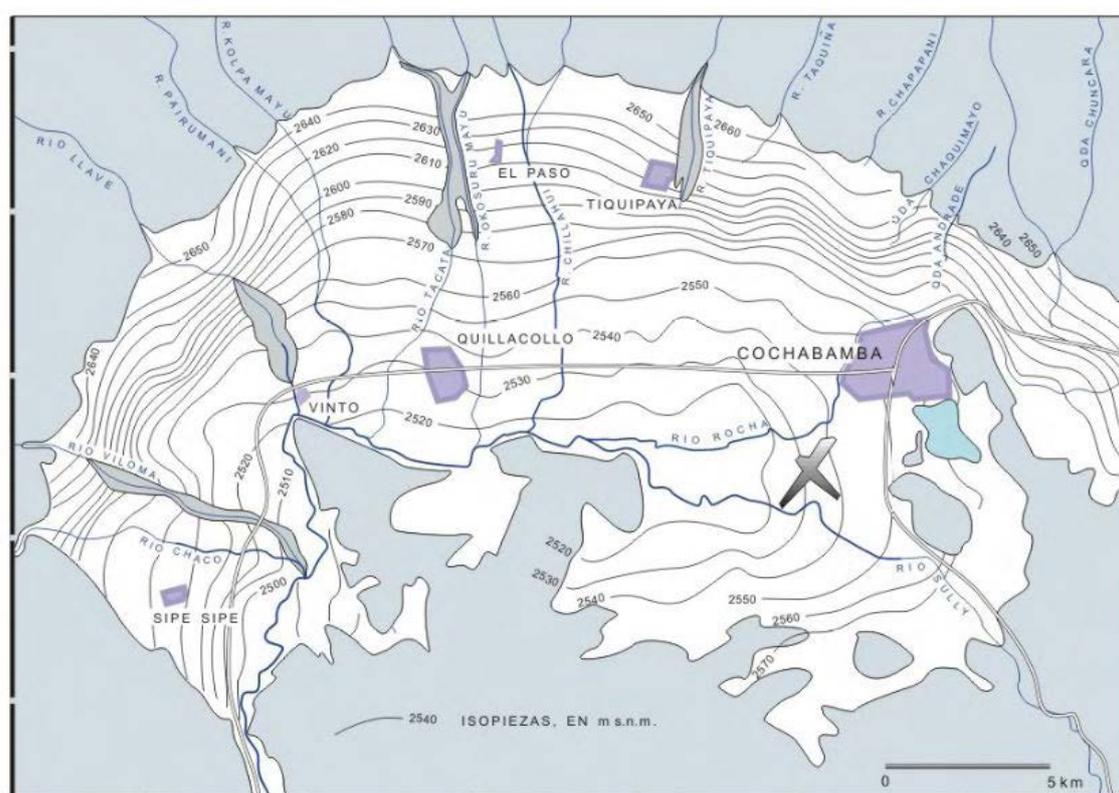


Figura 3.8. Mapa de isopiezas del acuífero del valle de Cochabamba (Renner y Velasco, 2000).

Es posible que dicha red de control piezométrico dejase de medirse hacia 1997, fecha de las últimas medidas de los pozos de la Figura 3.9. En todo caso, en el momento de realizarse los trabajos no había ninguna red de control piezométrico operativa en el valle de Cochabamba. En la visita realizada a las oficinas de Sergeomin en noviembre de 2018, su Director manifestó que eran conscientes de importancia de la medida de los niveles del agua para la comprensión del funcionamiento del acuífero y la

explotación racional de sus recursos y que tenían previsto estudiar la implantación de una red de control.

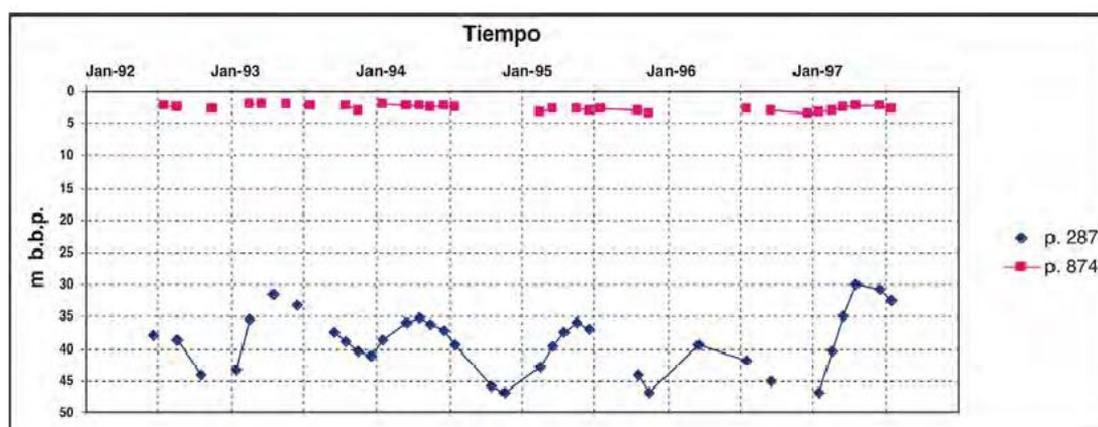


Figura 3.9. Hidrograma de dos pozos del valle de Cochabamba (Renner y Velasco, 2000).

Durante la primera campaña de muestreo se procuró medir los niveles del agua en todos los pozos visitados. Sin embargo, el número de medidas efectuadas fue muy pequeño ya que al ser sondeos de pequeño diámetro (en general entre 4 a 6”), sin tubería piezométrica y con los equipos para el bombeo e impulsión del agua instalados, pocas veces fue posible hacer bajar el hidronivel por el interior de las entubaciones. Entre los pozos visitados dos eran surgentes (C17 y C18); los propietarios de otros dos de los visitados (C14, C47) mencionaron que años atrás los suyos también lo fueron. (ver Tabla 3.1).

Los pocos datos disponibles no permiten conocer las características piezométricas actuales del acuífero. No obstante hay un consenso general entre los usuarios de las captaciones visitadas de que se está produciendo un descenso de los niveles del agua al menos en la zona situada en el sector central del acuífero —Colcapirhua y entorno de la laguna (balsa) de Coña Coña—.

3.2.3 Funcionamiento hidrogeológico y flujo subterráneo

Se considera que la recarga del acuífero del valle de Cochabamba se produce, fundamentalmente, por tres vías:

- Infiltración de la lluvia caída sobre su superficie permeable.
- Infiltración de los arroyos y vertientes que bajan de la cordillera del Tunari.
- Infiltración del río Rocha.

La mayor proporción de la infiltración debe producirse en el tercio norte del acuífero ya que en esta zona predominan los materiales de granulometría más gruesa (los

abanicos aluviales) lo que facilita la infiltración de la lluvia y de los arroyos y vertientes que bajan de la Cordillera del Tunari. Por otra parte, debido al probable descenso de los niveles del agua en los sectores más intensamente explotados del acuífero (Cercado, Colcapirhua) es posible que el río Rocha haya quedado descolgado y esté contribuyendo a su recarga con aguas de calidad deficiente en esta zona. La entrada lateral de aguas subterráneas desde los límites del acuífero, los materiales Paleozoicos, aunque no se puede descartar completamente, de existir sería muy poco significativa respecto a la infiltración de la precipitación y de los arroyos que bajan de la cordillera del Tunari, pues la permeabilidad de estos materiales debe ser muy inferior a la de los rellenos detríticos de la cubeta.

La descarga del acuífero se produce por:

- Drenaje del río Rocha.
- Extracciones por bombeo.
- Evapotranspiración.

El río Rocha constituye el eje fundamental de descarga del acuífero, especialmente hacia su mitad occidental, en los sectores de Sipe Sipe, Vinto y Quillacollo. En condiciones naturales, antes de que comenzase la explotación intensiva de las aguas subterráneas, es probable que también en la zona oriental del acuífero el río Rocha contribuyese a la descarga del acuífero.

Actualmente, una forma importante de descarga la constituyen las extracciones de agua para abastecimiento de los núcleos urbanos y para regadío. Asimismo, los pozos surgentes, son una forma de descarga del acuífero aunque el descenso de los niveles ha hecho disminuir su número. Por último, no se puede descartar que antes del comienzo de la explotación del acuífero una forma significativa de descarga fuese la evapotranspiración en las zonas en las que el nivel del agua estaba muy próximo a la superficie del terreno. Actualmente, de existir probablemente su contribución al drenaje del acuífero no sea muy significativa y se limite al sector suroccidental.

El flujo subterráneo regional predominante (Figura 3.10) va desde el norte hacia el sur y suroeste. Es decir desde el pie de la cordillera del Tunari, el sector preferente de recarga, hacia el río Rocha, el principal eje de descarga. No obstante, es posible que haya flujos de carácter local hacia la parte baja de los arroyos de la cordillera de Tunari, antes de su desembocadura en el Rocha. Asimismo, en el sector suroriental el río Sully podría recibir la descarga de ese sector del acuífero al igual que las pequeñas lagunas que hay al pie de los relieves que limitan el acuífero en la zona suroccidental (ver plano nº 1).

No está claro no qué origina la zona de sondeos surgentes en el sector sur de Tiquipaya. Los dos pozos visitados que actualmente siguen siendo surgentes (C-17 y C18) no son excepcionalmente profundos (Tabla 3.1) y están más próximos al límite norte del acuífero que al río Rocha (plano nº 1).

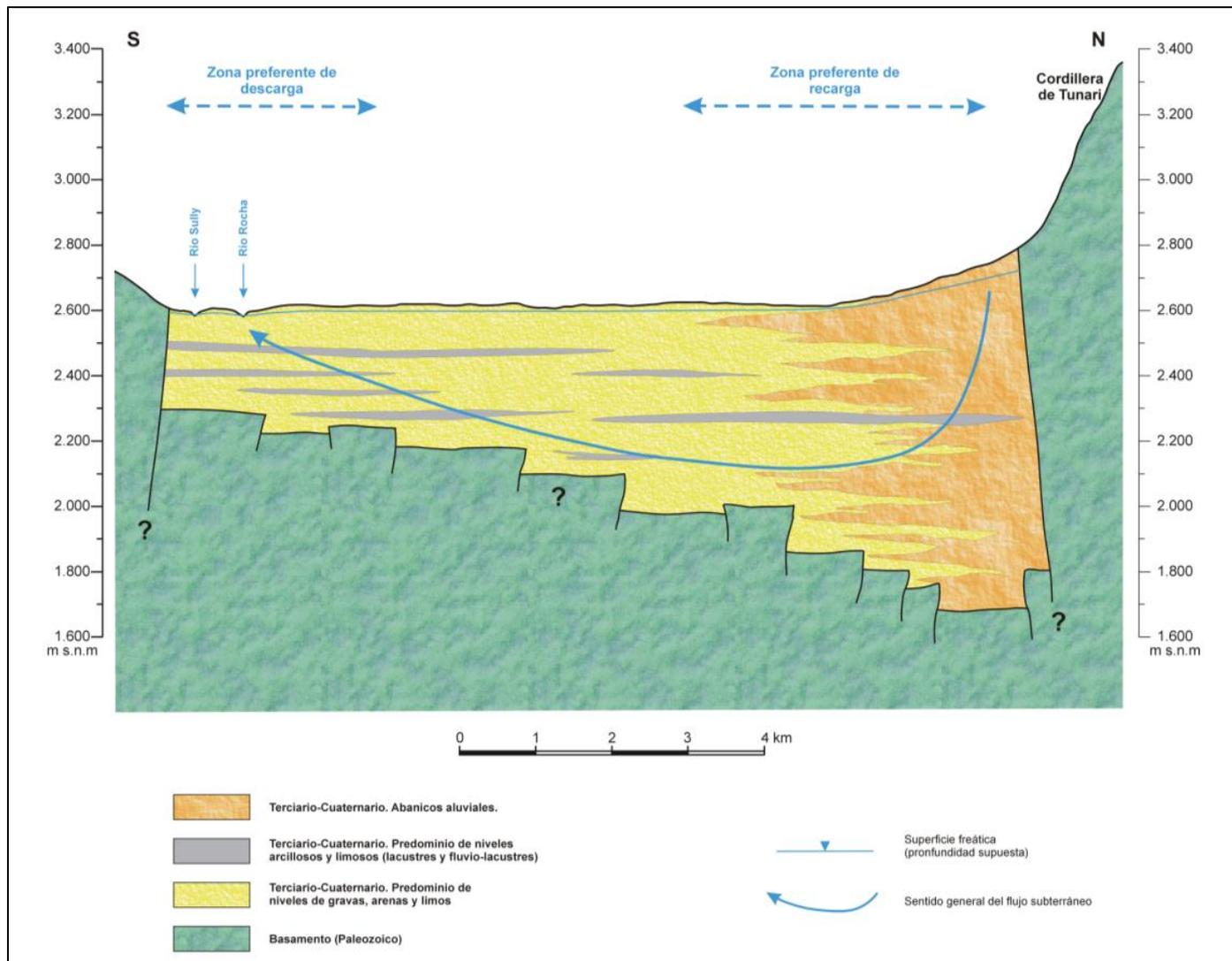


Figura 3.10. Esquema de flujo subterráneo

Es posible que en esas zonas la potencia del acuífero sea menor distorsionando las equipotenciales y dando lugar a gradientes verticales ascendentes. La reducción del espesor del acuífero podría estar ocasionada por una mayor elevación de los bloques compartimentados del zócalo Paleozoico. Sin embargo las campañas de geofísica realizadas no ponen de manifiesto la existencia de ningún umbral de este tipo dentro de la cubeta tectónica de Cochabamba. Otra posibilidad es que la distorsión del flujo subterráneo esté ocasionada por una reducción de la permeabilidad debido al aumento de los materiales de granulometría más fina (incremento de capas predominantemente arcillosas).

3.2.4 Alcance de la contaminación por arsénico

En la Tabla 3.2 se presenta un resumen de los las determinaciones de arsénico realizadas por el Igme en las muestras de agua tomadas por la UPB y la UMSA en las campañas de noviembre de 2018 y mayo de 2019. Además en la misma tabla se adjunta la conductividad eléctrica del agua medida *in situ* y las principales características de los puntos muestreados —una información completa de los mismos puede verse en la Tabla 3.2—. En los planos n^{os} 2 y 3 puede verse la posición de los puntos visitados en cada una de las campañas con indicación de su profundidad, conductividad eléctrica y concentración de As en el agua.

De la primera campaña se dispone de datos de As en 36 puntos de los que 35 corresponden a pozos perforados y el otro (C39) al arroyo de la Taquiña en Tiquipaya. De la segunda campaña hay datos de As en 41 puntos de los que 20 son sondeos que ya se habían muestreado en la primera campaña y de los restantes 14 son sondeos, dos son vertientes de la cordillera del Tunari (C58 y C62), uno es un manantial de aguas termales (C63) y otro corresponde a punto intermedio de la red de distribución de agua de la OTB San Gabriel (C61).

La concentración de As encontrada varía entre un máximo de 113 µg/l y 0,06 µl/l. No se aprecia grandes variaciones de la concentración en los puntos que fueron muestreados en ambas campañas (Figura 3.11) —la primera de ellas realizada en época de lluvias (el noviembre de 2018) y la segunda en época seca (en mayo de 2019)—. Únicamente dos puntos (C31 y C41) tienen un cambio significativo de concentración. Es muy posible que en ambos casos este cambio se deba a problemas de muestreo.

En C31 se pasa de un contenido 66,8 µg/l en la primera campaña a 0,07 µl/l en la segunda, mientras que la conductividad eléctrica se mantiene constante (270,4 y 272,6 µS/cm respectivamente). Es posible que el cambio observado en el As esté ocasionado por las deficientes condiciones de muestreo ya que este punto corresponde a un pozo de 75 m que tiene un sistema automático de bombeo conectado con un hidropulmón para mantener la presión de agua en la red de distribución. La bomba se pone en marcha y se para con bastante frecuencia en función de las necesidades de agua. Al no disponer junto al emboquille del pozo de una llave para la toma de agua se tuvo que tomar las muestras en el punto más próximo tras un corto recorrido por la red de distribución. Estas circunstancias hacen

Tabla 3.2. Contenidos de As y conductividad eléctrica del agua

Código	Prof. sondeo (m)	Prof. de los filtros (m)			Campaña noviembre 2018			Campaña mayo 2019			Observaciones
		Inicial	Final	Media(1)	Fecha	C.E. (µS/cm)	As (µg/L)	Fecha	C.E. (µS/cm)	As (µg/L)	
C01	101	38	81,5	59,75	05/11/2018	344	0,1				
C02	94	65	87,5	76,25	05/11/2018	199,3	0,12				
C03	120				05/11/2018	194,7	0,81				
C04	90	80	90		05/11/2018	496	8,38				
C05	90				05/11/2018	326					
C06	130				05/11/2018	577	2,95	24/05/2019	562	3,07	
C07	160				05/11/2018	474,3	2,78	24/05/2019	467,9	3,3	
C08	125	23,6	74,5	49,05	05/11/2018	999	0,2				
C09					06/11/2018	363	1,27	20/05/2019	375,6	1,28	
C10	77,4	23,6	74,5	49,05	06/11/2018	1.528	0,81				
C11	105				06/11/2018	1.009	1,43	22/05/2019	1.005	1,03	As determinado por UPB
C12					06/11/2018	316	52,1	22/05/2019	323	55,4	
C13	90	18	36		06/11/2018	267,2	44,1	22/05/2019	277,7	51,6	
C14	30	28	29		06/11/2018	356,2	7,53	22/05/2019	384,7	8	
C15	108	35	99	67	07/11/2018	730	22,4	23/05/2019	581	25	
C16	102	41	90	65,5	07/11/2018	1.658	1,72	23/05/2019	1.874	0,91	
C17	103	28	96	62	07/11/2018	186,5	3,16	23/05/2019	180,9	4,1	
C18	105	37	99	68	07/11/2018	170					
C19	87	18	71	44,5	07/11/2018	287,9	1,03	23/05/2019	295,7	0,07	
C20	105	19	82	50,5	07/11/2018	503	7,08	23/05/2019	333,5	11,3	
C21	80				08/11/2018	1.474	2,87				
C22	80				08/11/2022	1.465					
C23	120	89	95	92	08/11/2018	441,9	0,07				
C24	75				08/11/2018	385,5	33,2	22/05/2019	354,5	30,1	
C25	68	40	68	54	08/11/2018	419,4	34,1	22/05/2019	380,4	36,9	
C26	120				08/11/2018	156,5	0,65				
C27	83				08/11/2018	232,6	0,13				
C28	120				08/11/2018	490,4	0,76				
C29	125				08/11/2018	482	0,1				
C31	75				09/11/2018	270,4	66,8	21/05/2019	272,6	0,07	
C32	120				09/11/2018	142,3	0,09				
C33	120				09/11/2018	263,6	0,06				
C34	100	47	95	71	09/11/2018	301,4	0,07				
C35					09/11/2018	184,5	2,12	24/05/2019	190	2,94	
C36	100				09/11/2018	544	11	20/05/2019	508	11,4	
C37	71	30	62,5	46,25	10/11/2018	320,4	18,9	22/05/2019	332,9	19,5	
C38					10/11/2018	384	79,6	22/05/2019	414,6	72,2	
C39	-				16/11/2018	40	0,4				Aguas superficiales
C40	55				05/12/2018	761					Pozo en perforación
C41	69,3	60,8	62	61,4	Nov-2018		41,2	20/05/2019	252	113	
C42								20/05/2019	994	<0,26	As determinado por UPB
C43								21/05/2019	957	<0,26	As determinado por UPB
C44								23/05/2019	206,1	0,94	
C45								23/05/2019	490	5,42	
C46	90			45				20/05/2019	2.330	0,92	
C47	48			24				20/05/2019	361	1,57	
C48	54			27				21/05/2019	372,3	0,06	
C49	180			90				21/05/2019	209,6	0,36	

(1) Indica la profundidad media del intervalo en el que están colocadas las zonas filtrantes. Cuando se desconoce la posición de los filtros se ha indicado la profundidad media de la perforación.

Tabla 3.2. Contenido de As y conductividad eléctrica del agua (continuación)

Código	Prof. sondeo (m)	Prof. de los filtros (m)			Campaña noviembre 2018			Campaña mayo 2019			Observaciones
		Inicial	Final	Media(1)	Fecha	C.E. (µS/cm)	As (µg/L)	Fecha	C.E. (µS/cm)	As (µg/L)	
C50								21/05/2019	285,2	25,3	
C51								24/05/2019	413	79,5	
C52	72							23/05/2019	1.050	0,91	
C53	87	21	79	50				23/05/2019	1.033	0,71	
C54	34	22	31	26,5				21/05/2019	332,1	0,11	
C55	48							24/05/2019	682	6,02	
C57	130			65				24/05/2019	558	6,1	
C58	-							21/05/2019	196	0,13	Vertiente
C59	80			40				22/05/2019	2.527		Pozo recién perforado
C60	50			25				22/05/2019	2.376	0,45	
C61	-							21/05/2019	1.100	9,57	Agua de la red de distribución tras el paso por el depósito.
C62	-							21/05/2019	161	0,1	Vertiente
C63	0							13/06/2019	1.600	0,11	Manantial
C64								14/06/2019	610	0,11	

(1) Indica la profundidad media del intervalo en el que están colocadas las zonas filtrantes. Cuando se desconoce la posición de los filtros se ha indicado la profundidad media de la perforación.

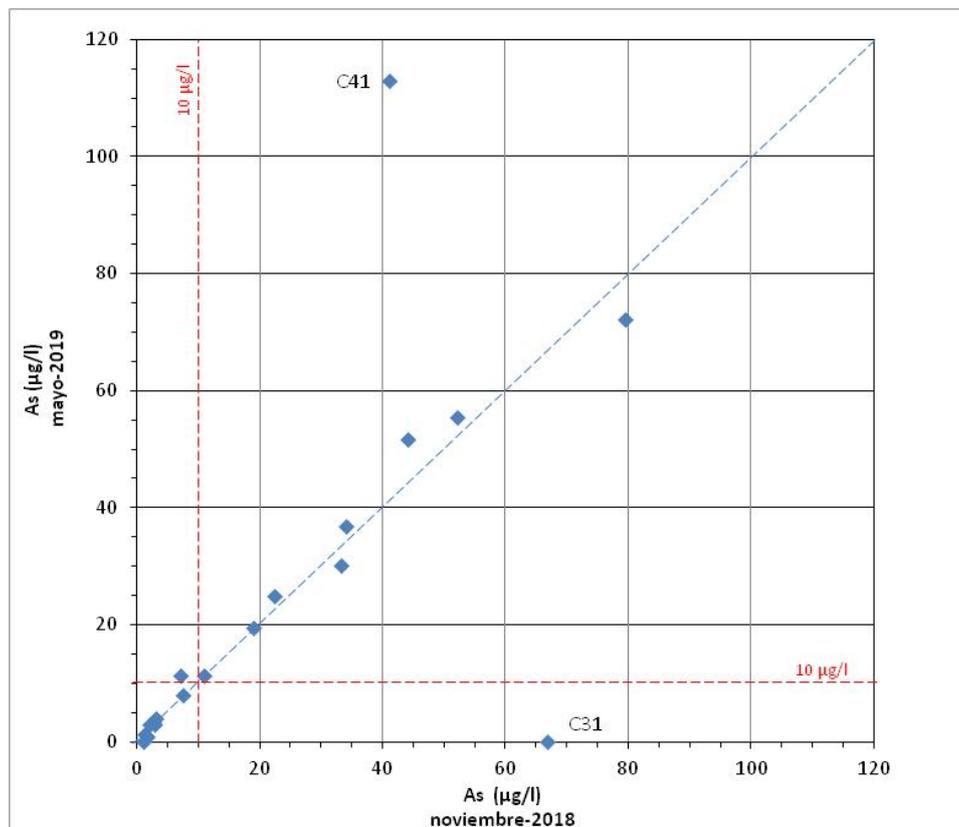


Figura 3.11. Comparación de las concentraciones de As en las campañas de noviembre de 2018 y mayo de 2019

que su representatividad sea dudosa.

El punto C41 corresponde a un pozo que en noviembre de 2018 estaba recién perforado. Tiene un único tramo filtrante de 1 m de longitud entre 61 y 62 m de profundidad. Es muy probable que la muestra, tomada poco después de terminado el sondeo, esté diluida por el agua inyectada para su perforación, limpieza y desarrollo.

Tampoco en la conductividad eléctrica del agua, como indicador del contenido total solutos e, indirectamente, de su calidad, se aprecian cambios significativos entre una campaña y otra (Figura 3.12). Sólo tres sondeos se desvían algo, aunque no de forma importante, y no siempre en el mismo sentido. En cualquier caso no se observa ninguna tendencia al aumento o disminución de la conductividad eléctrica entre una campaña y otra.

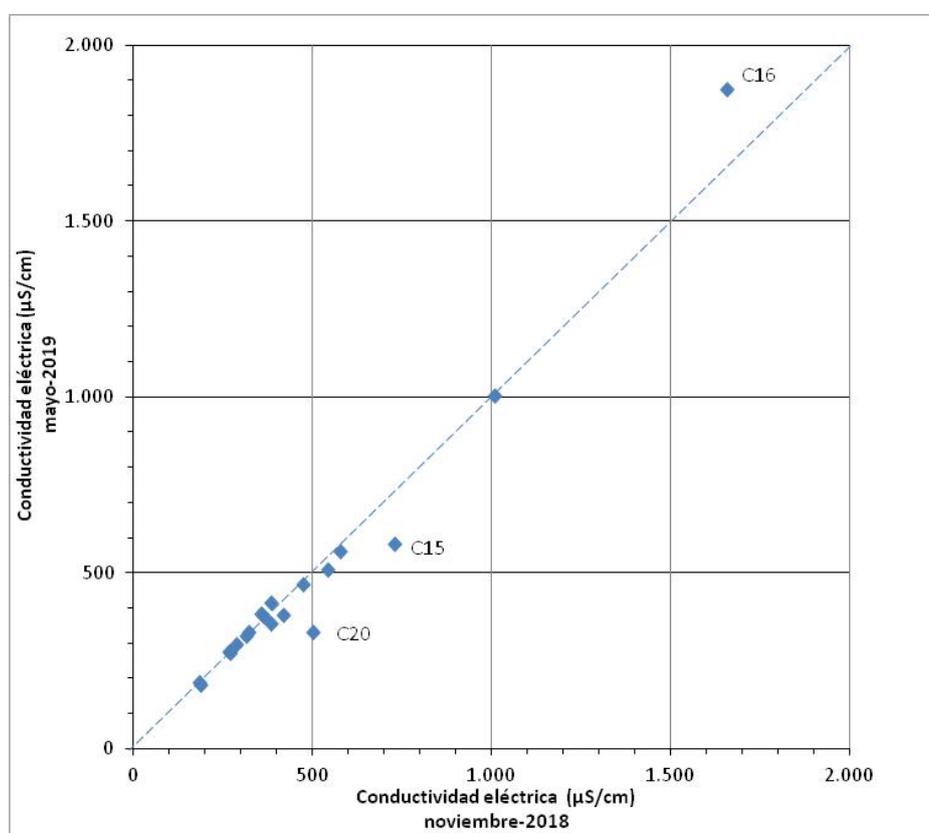


Figura 3.12. Comparación de las conductividades eléctricas del agua en las campañas de noviembre de 2018 y mayo de 2019

Los requisitos de la norma boliviana para el agua de consumo humano (NB512, Iborca, 2010) y las recomendaciones de la OMS establecen una concentración máxima de As de 10 µg/l en el agua para consumo humano. En el total, diez de las muestras analizadas en la primera campaña (28,7% de los puntos analizados) exceden el máximo establecido (Tabla 3.2 y Figura 3.13a). En la segunda campaña, doce de los puntos muestreados (29,3 % del total) sobrepasan los 10 µg/l de As (Tabla 3.2. y Figura 3.13b).

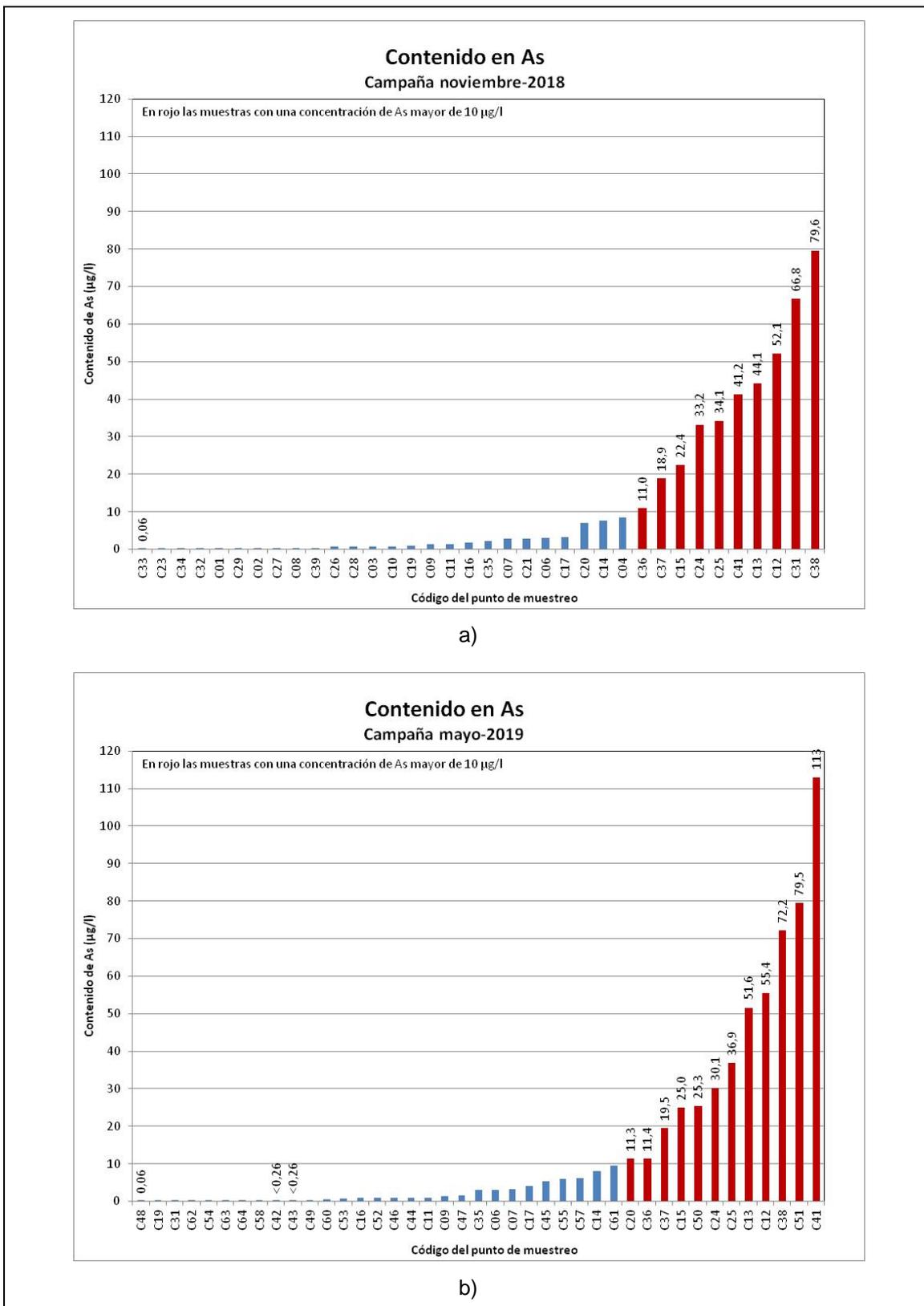


Figura 3.13. Concentración de As en las muestras de las campañas de noviembre de 2018 y mayo de 2019.

En conjunto, del total de 53 puntos de aguas subterráneas (los pozos y el manantial) muestreados entre las dos campañas, 13 han sobrepasado en una o en las dos campañas los 10 µg/l.

Todos los pozos muestreados en cuyas aguas la concentración de As es superior a los 10 µg/l están situados hacia el centro del acuífero, en Colcapirhua o en Cercado (Cochabamba) próximos al límite con Colcapirhua (planos n^{os} 1 y 2). En los sondeos ubicados fuera de este sector, la concentración de As encontrada es mucho más baja, en general, valores inferiores a 2 ó 3 µg/l—. Únicamente en el sector oriental, hacia Sacaba, fuera de los límites estrictos de la cubeta de Cochabamba, hay dos puntos (C04 y C57) con valores relativamente elevados: 8,38 y 6,1 µg/l respectivamente.

Hay que destacar que dentro de la zona en la que se encuentran los valores más elevados también hay sondeos con concentraciones muy bajas de As. Así, hacia el extremo suroeste de Colcapirhua, el sondeo C36, de 100 m de profundidad, una concentración de As de 11,4 µg/l y una C.E. de 544 µS/cm está situado muy próximo a los sondeos C46 y C47 que con 90 y 48 m de profundidad respectivamente tienen una concentración de As de 0,92 y 1,57 µg/l y una C.E. de 2.330 y 361 µS/cm⁶. Se desconoce la posición de las zonas filtrantes de estos tres sondeos.

Algo equivalente se observa en el entorno de los pozos C21 y C60 que con profundidades de 80 y 50 m tienen 2,87 y 0,45 µg/l de As y C.E. relativamente elevadas (1.474 y 2.376 µS/cm). Muy próximos a ellos hay varios sondeos, C24, C25, C37 y C38, con concentraciones de As entre 18,9 y 79,6 µg/l y C.E. comprendidas entre 320 y 419 µS/cm.

Los sondeos C23 y C51, muy próximos entre sí, tienen respectivamente 0,07 y 79,5 µg/l de As —el primero con las zonas filtrantes entre 89 y 92 y del segundo se desconoce su profundidad—. Sus C.E. con similares: 442 y 413 µS/cm.

Lo mismo ocurre en el entorno de la balsa de Coña Coña. C11 con una profundidad de 105 m tiene 1,43 µg/l de As y 1.009 µS/cm de C.E. mientras que C12, del que se desconoce la profundidad, tiene un contenido de As 52,1 y una C.E. de 316 µS/cm.

En el caso de C41, también situado en la zona de Coña Coña, tiene una profundidad de 69 m y está ranurado entre 61 y 62 m. Su contenido de As es 113 µg/l y su C.E. 242 µS/cm mientras que C55, situado muy próximo, tiene una profundidad de 48 m desconociéndose la posición de los filtros, una concentración de As de 6,02 µg/l y una C.E. de 682 µS/cm. La muestra de agua de C41 fue tomada a una profundidad conocida y en un intervalo muy concreto —aunque no se puede descartar que haya una cierta comunicación con niveles superiores a través del anular de la entubación y el empaque de gravas— y, claramente, a mayor profundidad que la muestra tomada en el pozo C55 que, aunque se desconoce la posición de sus zonas filtrantes, tiene que proceder de niveles por encima de los 45 m de profundidad.

⁶ Llama la atención el fuerte contraste de C.E. en sondeos próximos entre sí y de similar profundidad (C36 y C46).

La gran variabilidad del contenido de As y la C.E. entre puntos relativamente próximos se pone de manifiesto también en el perfil vertical de la Figura 3.14 que pasando por el sector de Colcapihrua con dirección NE-SO sigue, a grandes rasgos, una línea de flujo regional. Hay que destacar que todos los pozos muestreados de los que se conoce la profundidad se quedan en la zona más superficial del acuífero.

3.2.5 Origen de la contaminación por arsénico

Las muestras de agua tomadas en las dos campañas efectuadas pueden considerarse planamente representativas del agua utilizada para el abastecimiento de la población en el entorno de Cochabamba. Sin embargo, debido a que se han tomado en captaciones destinadas a la explotación de los recursos hídricos, tienen muchas limitaciones a la hora de su utilización para evaluar las características hidroquímicas del acuífero y el origen y movilización del As. Esto se debe fundamentalmente a que:

- En ocasiones no se conoce la profundidad del pozo muestreado ni la posición de los tramos filtrantes, por lo que se desconoce la profundidad de la que proviene la muestra de agua.
- La mayor parte son de sondeos que están ranurados en tramos situados a distintas profundidades o, incluso, a lo largo de toda la zona saturada por lo que constituyen mezclas de aguas de distintas líneas de flujo.
- Se han tomado con los equipos de bombeo de los propios pozos, con caudales relativamente altos, que dan lugar a descensos significativos de los niveles del agua distorsionando el flujo en el entorno del sondeo, favoreciendo la mezcla de aguas y reduciendo la representatividad de las muestras.

Al problema de la representatividad de las muestras de agua se une la falta de información litológica detallada de las captaciones utilizadas. Esto dificulta determinar si la fuente del As está diseminada por todo el acuífero o por el contrario hay niveles o capas con elevadas concentraciones de minerales de As (arsenopirita, enargita, etc.). No obstante, a continuación se hace una serie de conjeturas, basadas en los datos disponibles, sobre el posible origen del As en el acuífero de Cochabamba y su movilización que podrían servir como base para futuras investigaciones.

Se considera que el As encontrado en las aguas del acuífero es de origen geogénico (natural) y que no procede de una contaminación antrópica ya que en el entorno del valle de Cochabamba no hay explotaciones mineras ni otras actividades industriales que pudieran dar lugar a ella. Tampoco en la documentación geológica (Geobol et al. 1994 a y b) consultada se encuentra ninguna indicación que haga pensar en la existencia de capas o sectores del acuífero en los que pueda haber una mayor concentración de minerales de As. Sin embargo, esta posibilidad no se puede ser descartada completamente y sería conveniente hacer estudios en este sentido.

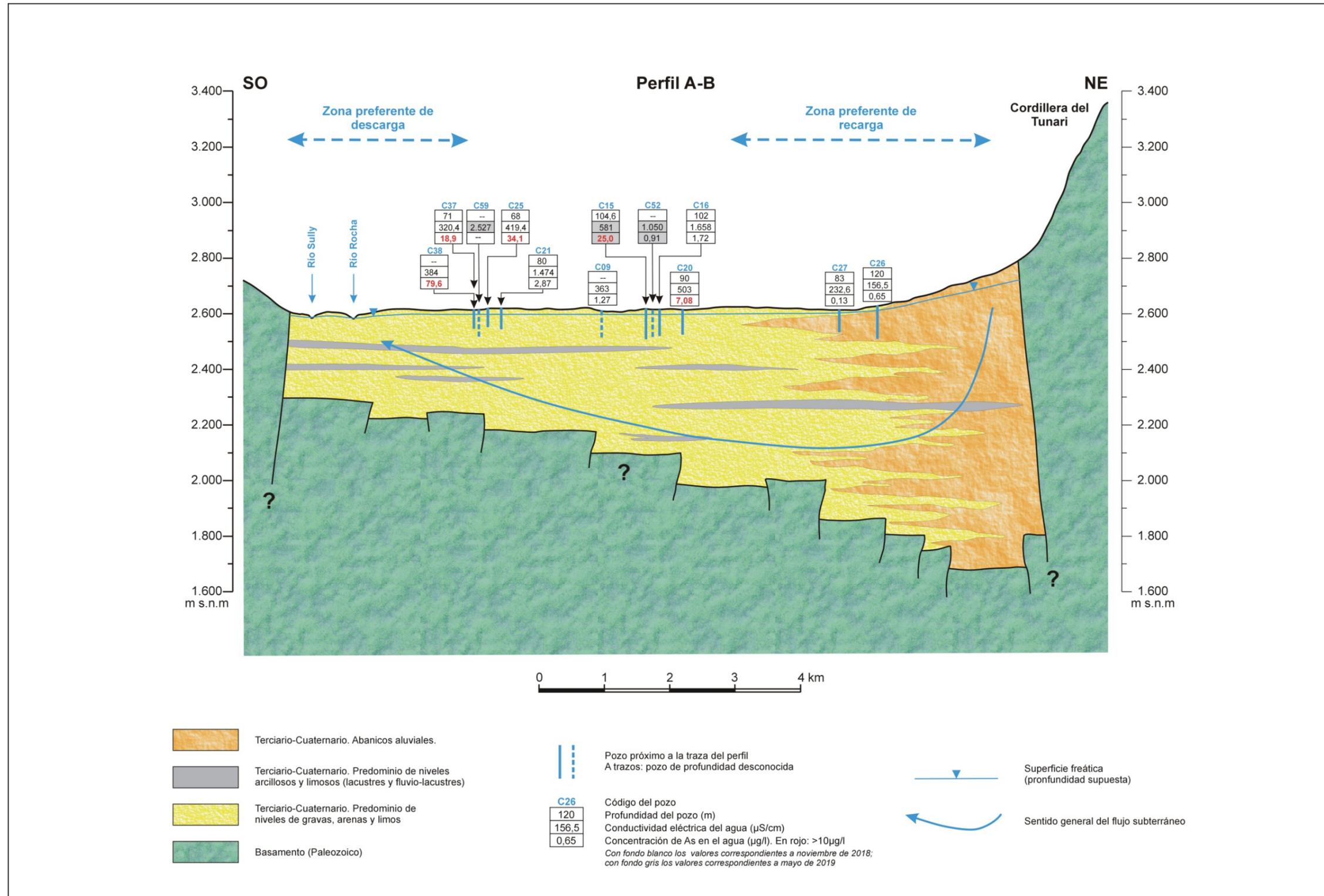


Figura 3.14. Perfil hidroquímico.

Por otra parte, los pozos con elevadas concentraciones de As están situados en un sector del acuífero sometido a una intensa explotación y en el que, probablemente, se está produciendo un progresivo descenso de los niveles del agua. Es posible que la subida y bajada de los niveles del agua por la frecuente puesta en marcha y parada de las bombas de extracción esté dando lugar a modificación de las condiciones redox y el pH en las zonas afectadas. La alteración de las condiciones redox y el pH podría ser el desencadenante de la puesta en solución del As y su movilización con el flujo subterráneo.

Las grandes variaciones en el contenido de As que se observan en algunos sondeos próximos entre sí podrían estar relacionadas con un conjunto de factores como son:

- Una diferente proporción de mezcla de aguas de distintos niveles en sondeos próximos que, teniendo profundidades equivalentes, tienen características constructivas distintas (fundamentalmente una distinta posición de los tramos filtrantes).
- Un régimen de explotación diferente, con una diferente alteración de las condiciones redox en el entorno próximo de los sondeos.

También en la conductividad eléctrica del agua se observan ocasionalmente grandes diferencias entre sondeos próximos que no parece posible explicar exclusivamente por un incremento de la salinidad a lo largo de su tránsito por el acuífero —no se ha encontrado ninguna cita de formaciones evaporíticas en los sedimentos del la cubeta de Cochabamba—. Estos contrastes, que también se registrado en el sector más explotado del acuífero, apuntan a que las extracciones de agua podrían estar provocando una alteración su calidad.

4. CAPACITACIÓN Y DIVULGACIÓN (TAREA R4A1)

Las tareas de capacitación y divulgación se han centrado en la transmisión a los gestores de las captaciones de aguas subterráneas visitadas la importancia que tiene la protección de los pozos en general y de sus emboquilles en particular para prevenir la entrada de contaminación superficial a los acuíferos. Para ello se ha aprovechado las campañas de toma de muestras de agua y se ha realizado presentaciones en jornadas divulgativas y seminarios.

- **Divulgación en las campañas de toma de muestras de agua:**

Durante la primera ronda de muestreo, efectuada en el viaje de noviembre de 2018, se observó una deficiente protección de los emboquilles en buena parte de los pozos visitados lo que —especialmente en zonas urbanas o periurbanas como la de Cochabamba— facilita la entrada de la contaminación superficial al interior de los sondeos y los acuíferos. Por ello, se aprovecho las visitas para informar, a pie de pozo, a sus encargados y gestores sobre la deficiencias de los emboquilles y la forma de arreglarlas para prevenir o minimizar los riesgos de contaminación de las captaciones.

Antes de efectuarse la segunda campaña de muestreo se preparó una hoja divulgativa (anejo nº 1) sobre la protección de las captaciones de aguas subterráneas para evitar la entrada de contaminación superficial. La hoja se centró en resaltar de forma sencilla y fácilmente comprensible los principales factores de riesgo y sus medidas preventivas y correctoras. Durante los muestreos se distribuyó y explicó a los gestores de las captaciones indicándoles las posibles mejoras a realizar en sus sondeos.

- **Jornadas y seminarios**

Se ha realizado tres presentaciones en sendas jornadas divulgativas. La primera de ellas tuvo lugar el 19 de mayo de 2019 en el taller que organizó en Cochabamba la UPB orientado a transmitir información básica sobre las captaciones de aguas subterráneas a los gestores de los pozos de abastecimiento de las OTB y los condominios. Asimismo se invitó a asistir las compañías locales de perforación. Tuvo lugar en el auditorio de la Federación de Empresas Privadas de Cochabamba.

El taller consistió en una primera parte a cargo de Geólogos del Mundo para exponer conceptos básicos de los acuíferos y las captaciones de aguas subterráneas, y una segunda parte, a cargo del Dr. R. Escalera de la UPB, para introducir los problemas relacionados con el contenido en As de las aguas de abastecimiento humano y los posibles sistemas para su reducción o eliminación.

La presentación de Geólogos del Mundo (anejo nº 2) se estructuró en tres apartados con los siguientes contenidos: los conceptos básicos sobre los acuíferos; la influencia de las características constructivas de las perforaciones en su rendimiento; y, la protección de las captaciones frente a la contaminación.

Al final de la jornada se distribuyó a los representantes de las OTB asistentes, en sobres cerrados, los resultados analíticos de la primera ronda de muestreo efectuada en noviembre de 2018.

La segunda presentación tuvo lugar en La Paz el día 22 de julio de 2019 en el seminario sobre recursos hídricos organizado en la Facultad de Ciencias Geológicas por el Instituto de Investigaciones Químicas de la UMSA. El seminario estaba orientado a alumnos y profesores de las carreras de Ciencias Químicas y Ciencias Geológicas de la UMSA. Asimismo se invitó a asistir a personal de Sergeomin⁷, Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia (MMAyA) y a representantes de compañías de perforación. La presentación de Geólogos del Mundo (anejo nº 3) se centró en el rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas y la prevención de su contaminación.

La última presentación se hizo en la “1ª Jornada Técnica de calidad y tratamiento de aguas residuales y subterráneas” organizada conjuntamente con las organizaciones SuSanA⁸ y Aguatuya⁹. Tuvo lugar en Cochabamba el día 27 de febrero de 2020 en la sede de la UPB. La mañana, a cargo de SuSanA y Aguatuya, estuvo dedicada a las aguas residuales y la tarde a la presentación de los resultados preliminares del proyecto As-Bolivia por los distintos socios participantes en el mismo.

La convocatoria de la Jornada, que estuvo a cargo de la UPB, se realizó entre los organismos públicos de Cochabamba relacionados con el abastecimiento y saneamiento del agua en Cochabamba, Sergeomin, las empresas privadas relacionadas con estos campos —incluidas las empresas de perforación—, los presidentes y gestores de los abastecimientos de las OTB y los profesores y alumnos de la UPB. El número de inscritos superó los 100.

La comunicación de Geólogos del Mundo (anejo nº 4) tuvo como objeto la presentación de los resultados preliminares de los contenidos de As en las aguas subterráneas del acuífero de Cochabamba y su posible origen.

⁷ Sergeomin: Servicio geológico de Bolivia.

⁸ SuSanA: Sustainable Sanitation Alliance Latinoamérica.

⁹ Aguatuya: Organización boliviana relacionada con el ciclo urbano del agua (potabilización y saneamiento del agua y gestión de residuos).

5. REFERENCIAS

Geobol y Swedish Geological AB (1994 a): “*Carta geológica de Bolivia a escala 1/100.000. Hoja nº 6341 (Cochabamba)*”. Publicación SGB Serie I-CGB-28

Geobol y Swedish Geological AB (1994 b): “*Carta geológica de Bolivia a escala 1/100.000. Hoja nº 6342 (Cordillera del Tunari)*”. Publicación SGB Serie I-CGB-22

IBNORCA (2010). “*Norma boliviana NB 512: Agua potable – requisitos*”. Iborca, La Paz.

Renner, S. y Velasco, C. (2000). “*Geología e Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba*”. Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería nº 34, 113 pp.

ANEJO Nº 1
Hoja divulgativa

Vías de contaminación

Antes de iniciar una perforación conviene tener en cuenta que debe estar alejada de potenciales fuentes de contaminación. Igualmente se debe evitar almacenar sustancias contaminantes en las proximidades de los pozos, procediendo al sellado del espacio anular (unos 5-15m) con bentonita y cemento.

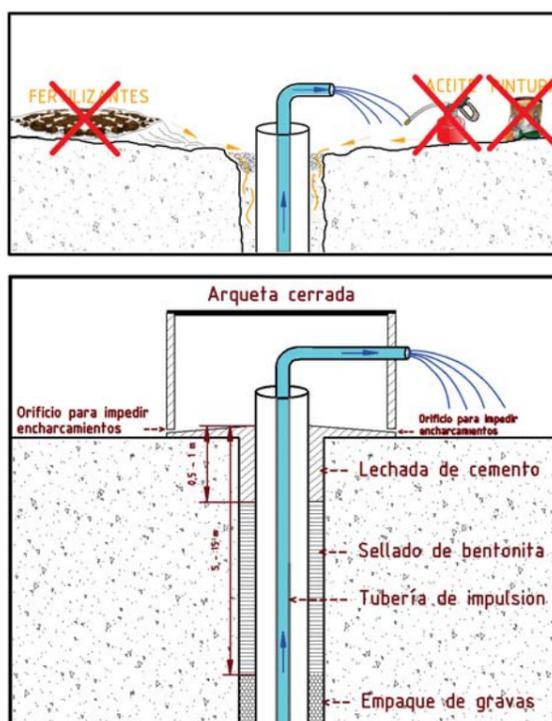


Figura 3: Ejemplo de protección de la cabeza del pozo

En el caso de perforaciones situadas bajo la superficie del terreno es importante que el borde de la entubación se prolongue a una altura superior para evitar la entrada de agua al interior del pozo.



Figura 4: Pozo situado bajo la superficie del terreno.

Tipos de filtros

Existen diversos tipos de tuberías filtrantes para pozos de captación, siendo los filtros Johnson y los de tipo puentecillo dos de los más comunes:

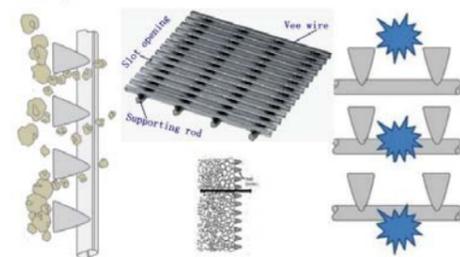


Figura 5: Modelo de funcionamiento de filtro de tipo Johnson

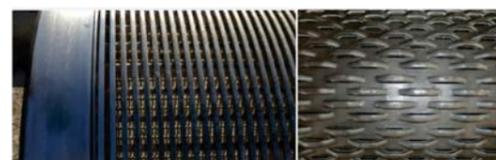


Figura 6: Filtro Johnson (izquierda); filtro puentecillo (derecha)

Resumen

Las medidas a tomar para la protección de captaciones se resumen de la siguiente manera:

- 1 Perforación alejada de focos de contaminación.
- 2 Instalar tuberías filtrantes de fábrica.
- 3 Empaque de gravas silíceas homogéneas.
- 4 Sellado del espacio anular con bentonita.
- 5 Arqueta de protección con orificios de evacuación.
- 6 Sellado del espacio anular con bentonita.

Información adicional

Para más información contactar con las instituciones.

Datos de contacto

- Web: <http://as-bolivia.upb.edu/>
- Email: jesus.suso@hidrogeo.es
- Email: fernandopmz@zoho.com
- Tlf: +591 65 765 076 (Ramiro Escalera, PhD)



Antecedentes

En el marco del proyecto “**Detección y remoción de arsénico natural en áreas desfavorecidas con abastecimientos de aguas subterráneas (Bolivia).**” 2017-2019, se han llevado a cabo trabajos de toma de muestra, inventarios de puntos de agua y recopilación de información hidrogeológica en distintos municipios del departamento de Cochabamba. En este contexto, y desde un punto de vista socioambiental y sanitario se hace necesaria la comunicación y divulgación de aspectos sobre recursos hídricos subterráneos, agua y saneamiento. La presente actividad tiene por objeto la difusión de información sobre recomendaciones constructivas y de mantenimiento de los pozos de bombeo, y con ello contribuir a la *prevención de la contaminación de las aguas subterráneas* y sus captaciones.

Instituciones participantes

El presente proyecto de cooperación es desarrollado por las siguientes instituciones:

- Instituto Geológico y Minero de España
- Universidad Privada Boliviana
- Universidad Mayor de San Andrés
- Geólogos del Mundo

Proyecto financiado por AECID
Agencia Española de Cooperación
Internacional para el Desarrollo

Protección de las Captaciones de Aguas Subterráneas

Instituciones participantes:

Instituto Geológico y Minero de España
Universidad Privada Boliviana
Universidad Mayor de San Andrés
Geólogos del Mundo

Financiado por AECID



Objetivos

Facilitar información práctica para **prevenir la contaminación** de las aguas subterráneas en la gestión de los pozos de extracción y optimizar su funcionamiento. Estos elementos constituyen una potencial vía de entrada de contaminantes, siendo necesario tomar medidas encaminadas a:

- Mejora de la construcción de nuevos pozos
- Mantenimiento óptimo del entorno del pozo
- Impedir la entrada de contaminantes

Rendimiento

El rendimiento de los pozos perforados está fuertemente condicionado por los materiales utilizados en su construcción. El uso de tuberías filtrantes de fábrica se hacen recomendables frente a otro tipo de elementos como las tuberías ciegas ranuradas "in situ". Del mismo modo es conveniente cubrir el perímetro de la entubación con un empaque de gravas silíceas homogéneas en tamaño y forma. Estas medidas contribuyen a mejorar la permeabilidad evitando el arrastre de limos al interior del pozo.

Protección

Los pozos y, especialmente el espacio anular, son vías preferentes para la entrada de contaminantes a los acuíferos. Es por esto que resulta conveniente realizar los sondeos alejados de los potenciales focos de contaminación y proteger el espacio anular para impedir el paso de contaminantes al acuífero y al pozo. Para ello es indispensable el sellado del perímetro del pozo y diseñar de forma adecuada una arqueta de protección sobre la superficie del terreno.

Recomendaciones

Con carácter general, para prevenir la contaminación se considera conveniente tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Realizar los sondeos alejados de focos de contaminación.
- Utilizar tuberías filtrantes de fábrica.
- Empaque de gravas silíceas homogéneas.
- Sellado del perímetro del pozo con bentonita.
- Colocar una arqueta de protección.

Menos adecuado

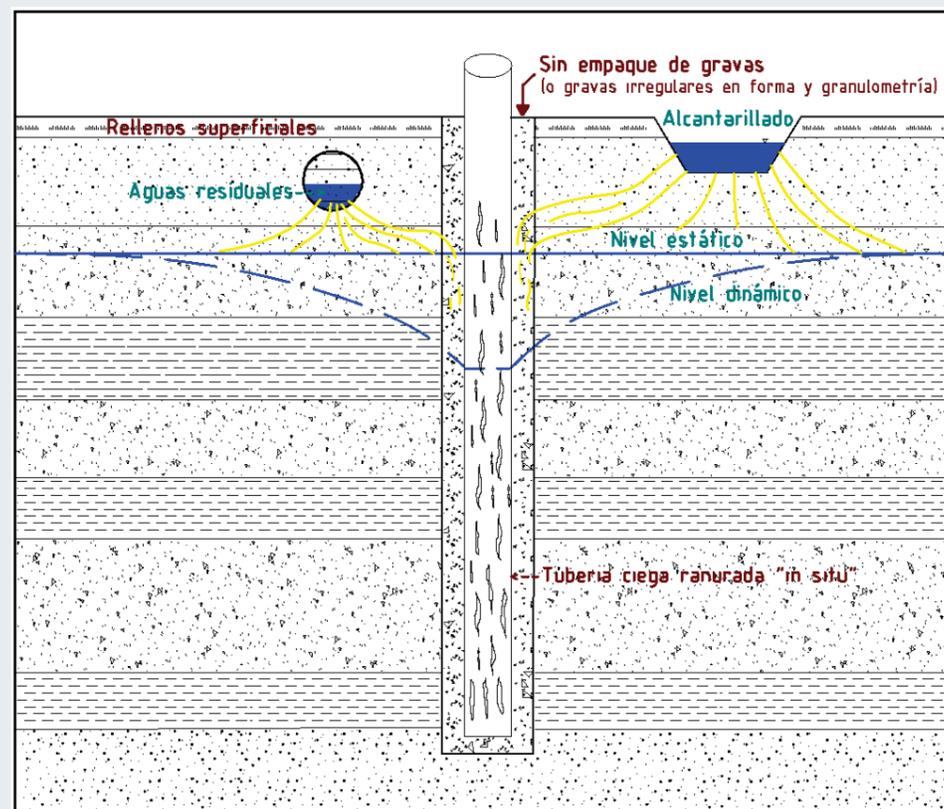


Figura 1: En el esquema se representa una perforación cuya tubería ciega ha sido ranurada "in situ" a lo largo de toda la columna. Además el empaque de gravas presenta una granulometría heterogénea en forma y tamaño. Este tipo de pozos presenta una menor superficie abierta al paso del agua y por tanto una **menor permeabilidad** de la sección filtrante, lo que da lugar a mayores pérdidas de carga con el correspondiente aumento de los costes de extracción.

Mas adecuado

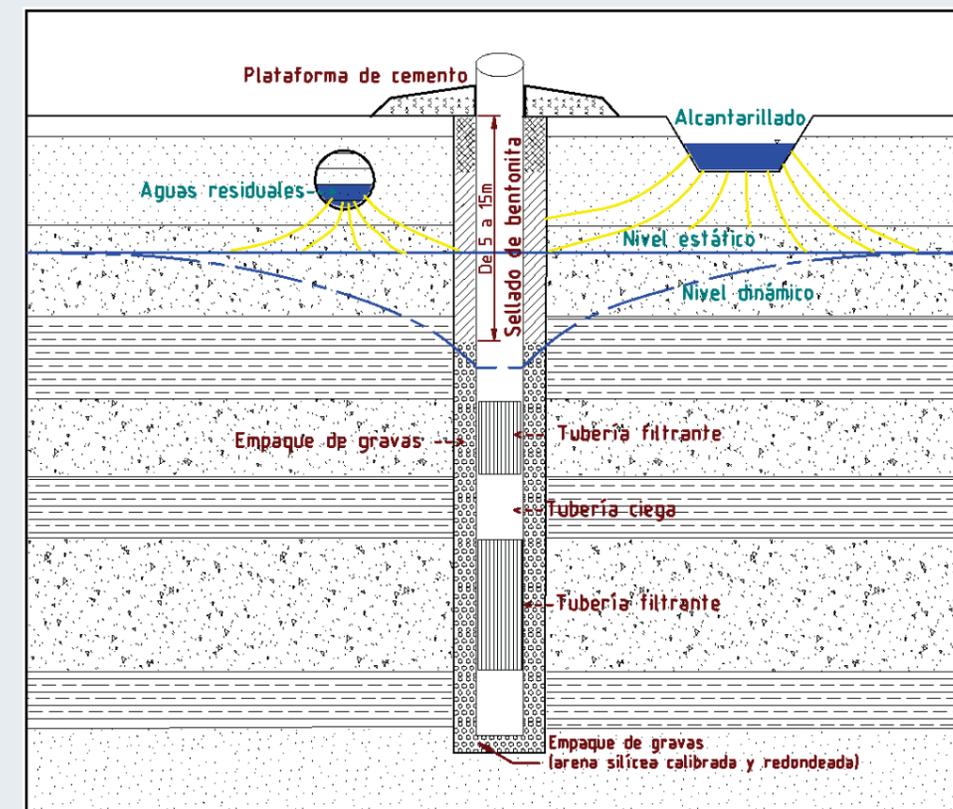


Figura 2: Este esquema representa un pozo perforado con una instalación de *tubería filtrante de fábrica*, que presenta perforaciones regulares y de tamaño constante, y con *empaque de gravas silíceas* de granulometría homogénea. Este tipo de instalación implica una mayor superficie abierta al paso del agua, lo que permite una **mayor permeabilidad**, y menores pérdidas de carga. Además de optimizar el rendimiento evita el arrastre de limos al interior del pozo.

ANEJO Nº 2

Presentación efectuada en Cochabamba el 19 de mayo de 2019

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

Temas

1. **Acuíferos**
2. **Rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas**
3. **Protección de los pozos frente a la contaminación**

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

1. Acuíferos

“Formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir agua en cantidades económicamente significativas”



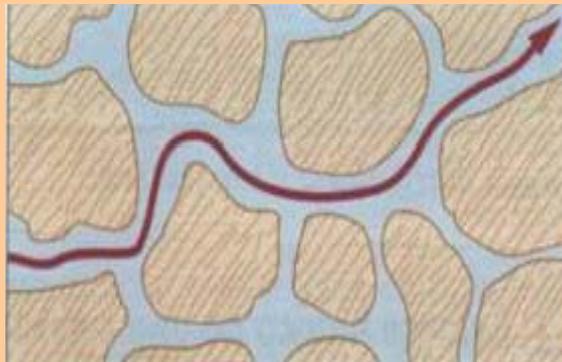
No son
ríos subterráneos



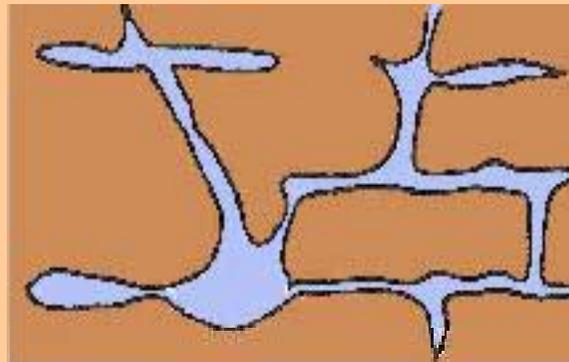
No son
lagos subterráneos



No son
“bolsas de agua”



Porosidad intergranular



Porosidad por disolución

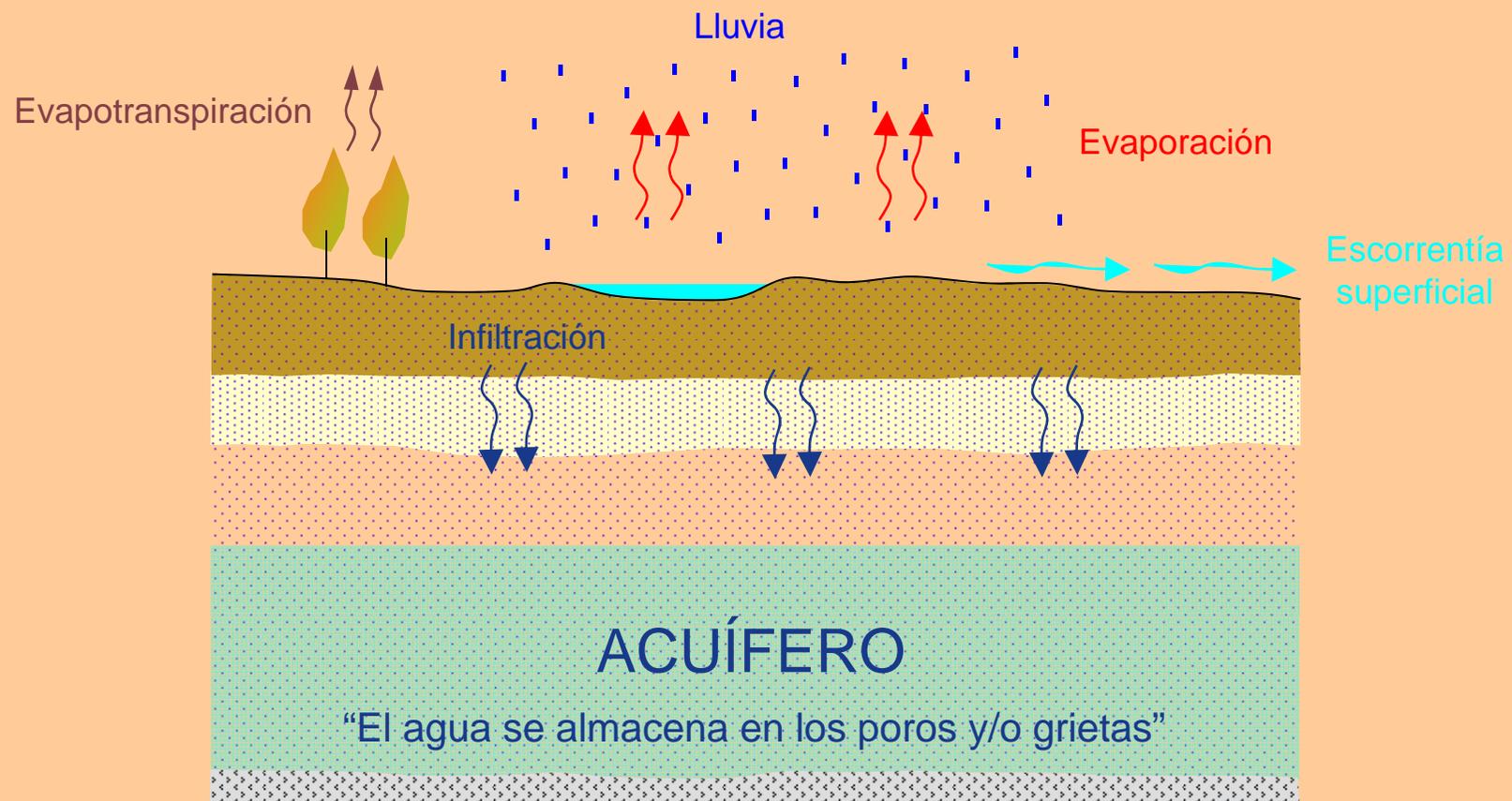


Fracturación

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

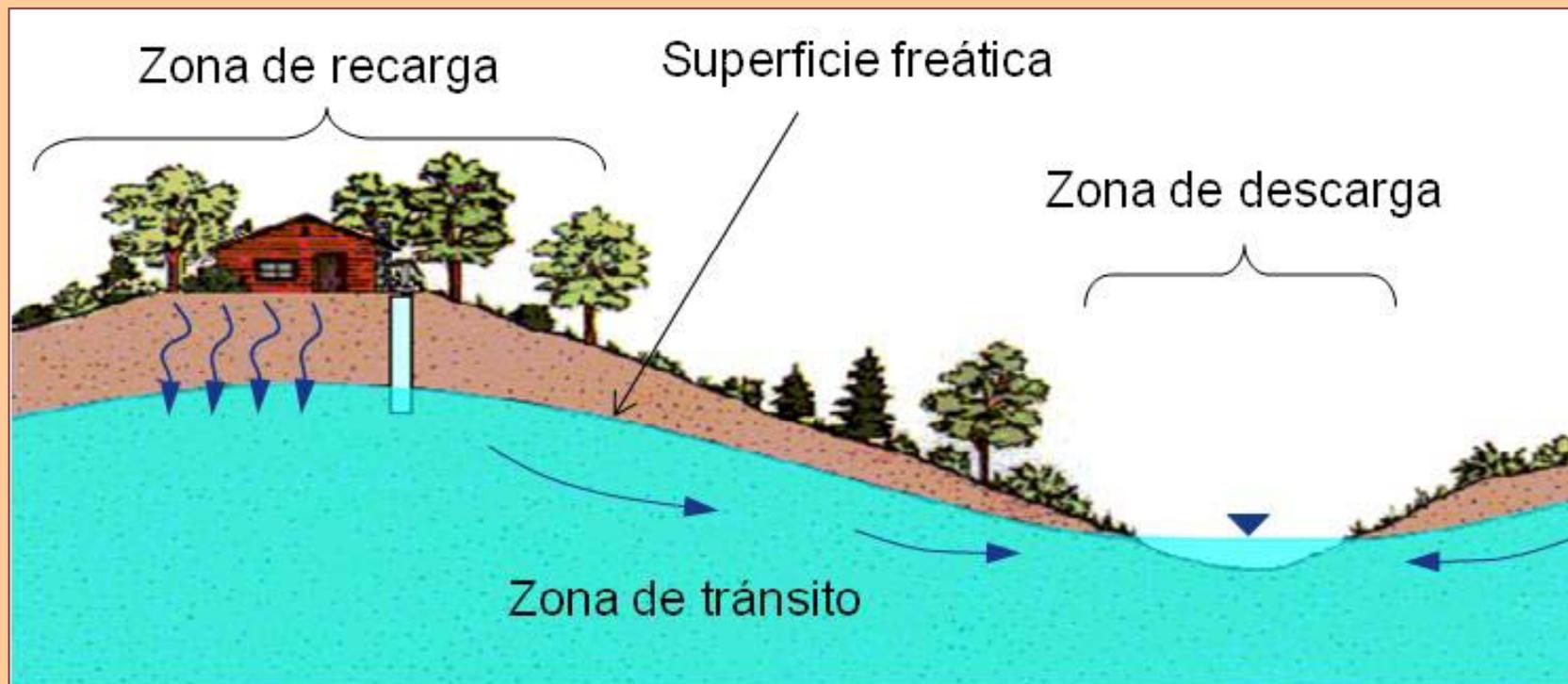
Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

1. Acuíferos



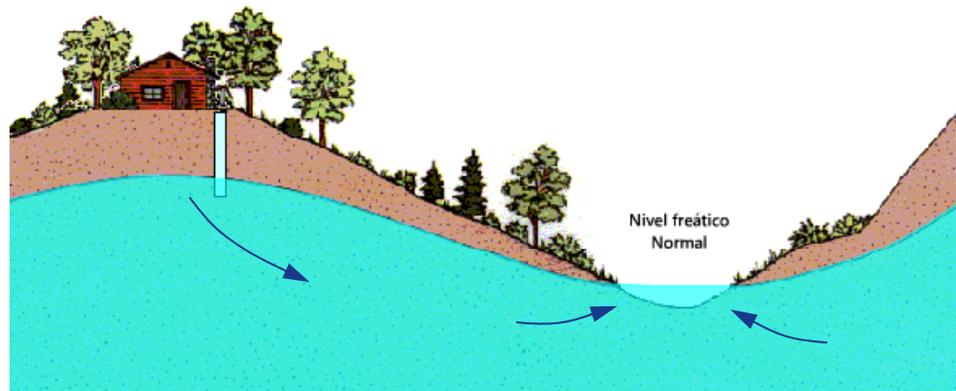
PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

1. Acuíferos

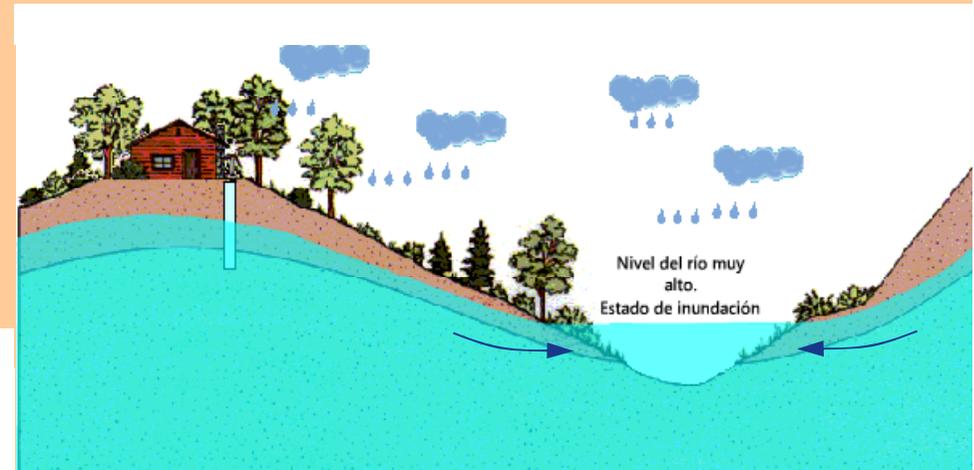


PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

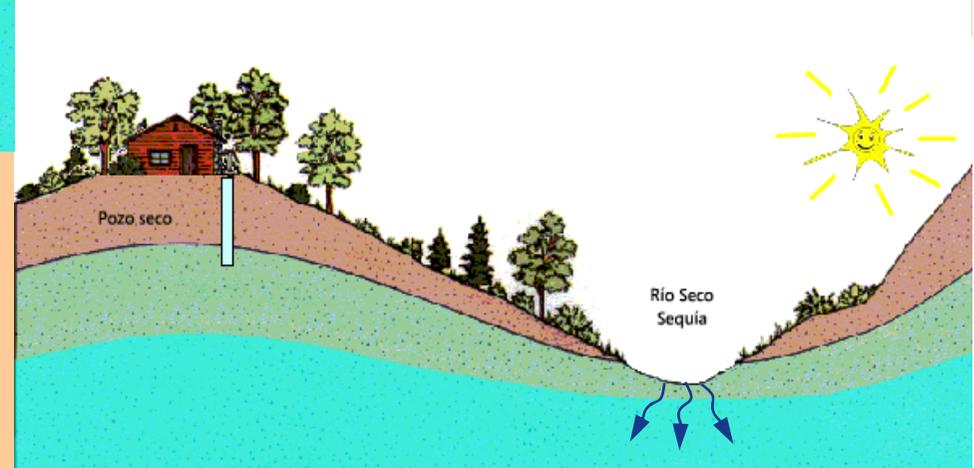
1. Acuíferos



Periodo de equilibrio



Periodo de lluvias



Periodo de sequía

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

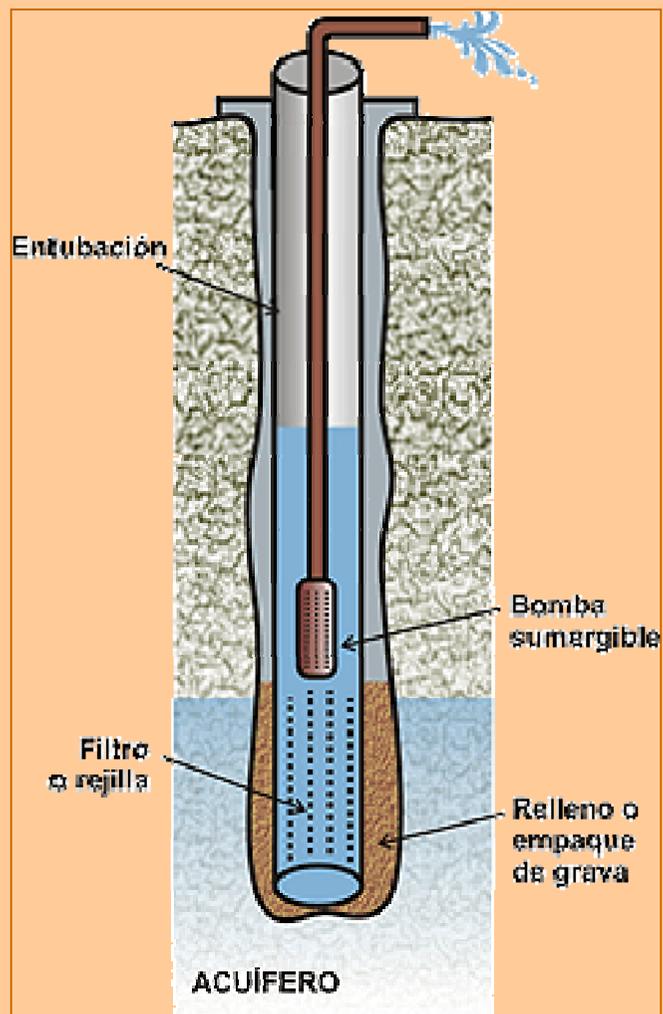
2. Rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas



¡¡No Depende Del Diámetro Del Sondeo!!

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

2. Rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas



FACTORES FUNDAMENTALES



Entubación (tuberías filtrantes)

Empaque de gravas o engravillado

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

2. Rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas

- Tuberías filtrantes

Ranuras homogéneas y regulares

Máxima superficie abierta sin pérdida de resistencia al colapso



Mayor permeabilidad

Menores pérdidas de carga



Menor coste de bombeo



PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

2. Rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas

- **Empaque de gravas (engravillado)**

Gravas silíceas redondeadas y calibradas (3-8 mm)

Mayor permeabilidad

Mayor capacidad de retención (filtrado)

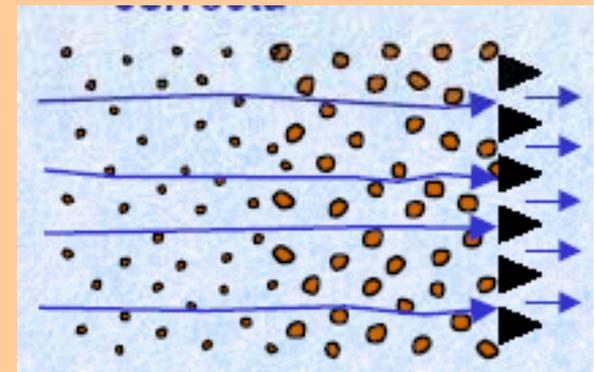
Menor posibilidad de obturación de los filtros



Menores pérdidas de carga

Menor coste de bombeo

Ausencia de turbidez en el agua



PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

2. Rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas

Un diseño y construcción adecuados de los pozos son fundamentales para asegurar su buen rendimiento, reducir los costes de bombeo y mantener su vida útil



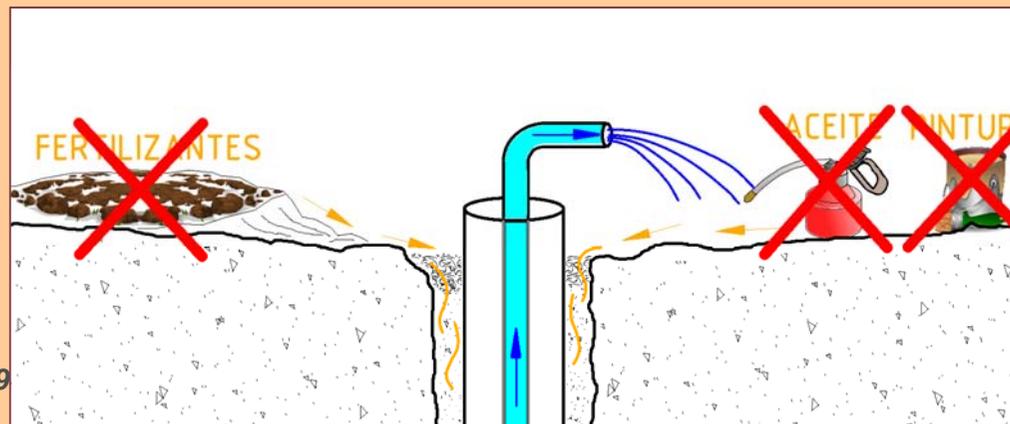
PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

3. Protección de los pozos frente a la contaminación

Los pozos y sondeos son vías preferentes para la entrada directa de la contaminación superficial a los acuíferos

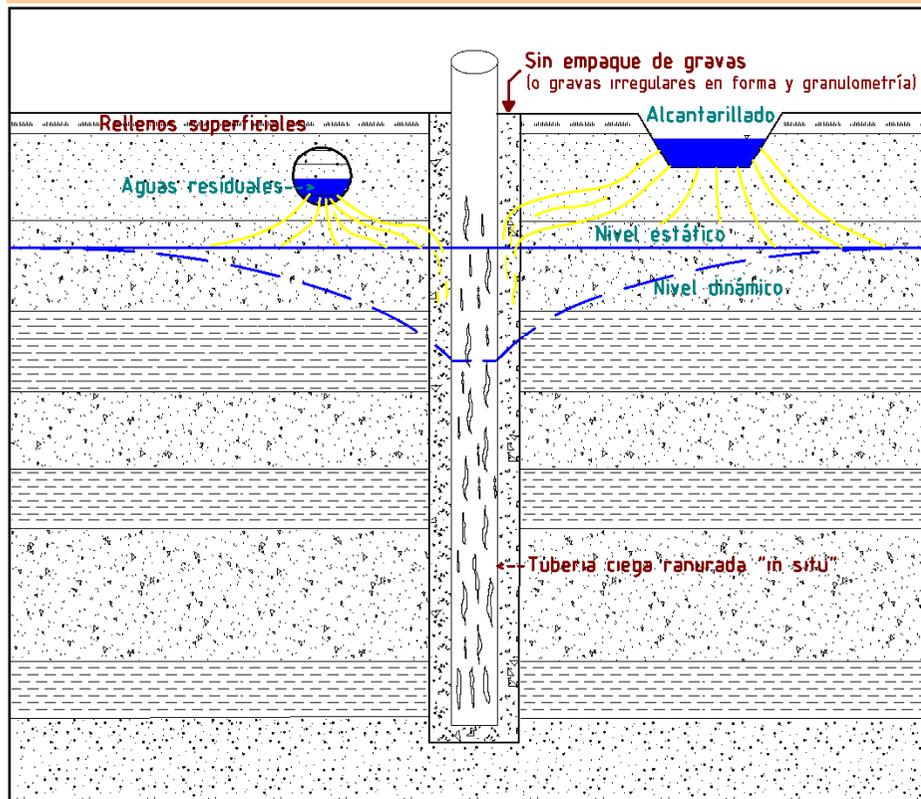
MEDIDAS PREVENTIVAS GENERALES

- Colocar las captaciones alejadas de focos de contaminación.
- Evitar actividades potencialmente contaminantes en sus proximidades.
- No almacenar ningún tipo de sustancia junto a los sondeos
- No permitir el acceso de animales domésticos

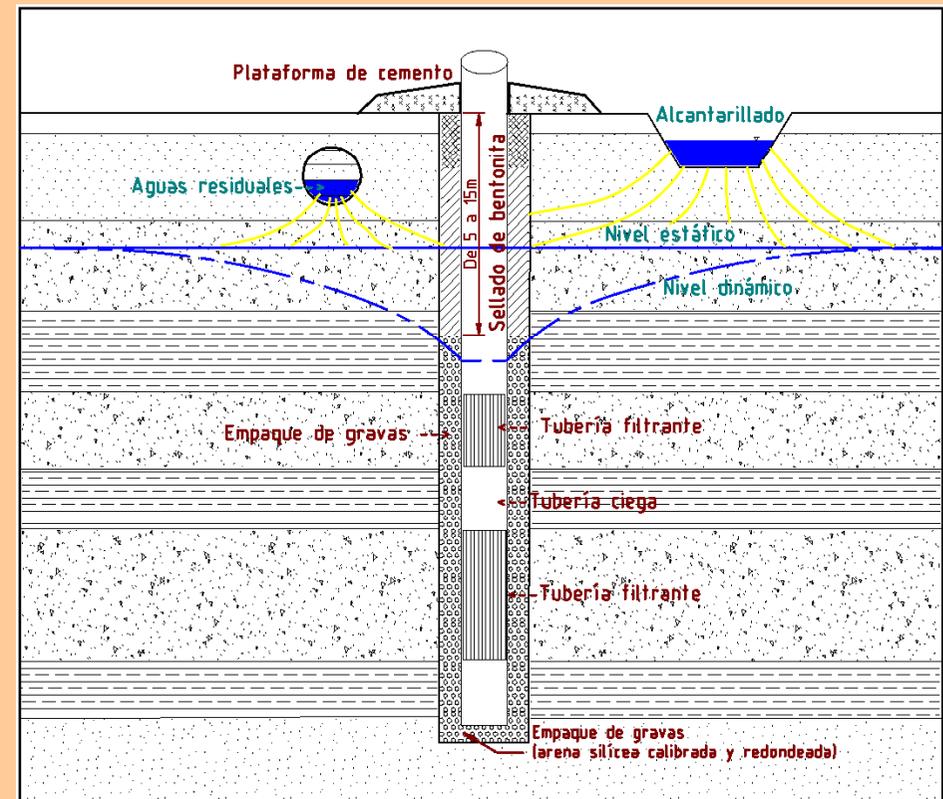


PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

3. Protección de los pozos frente a la contaminación



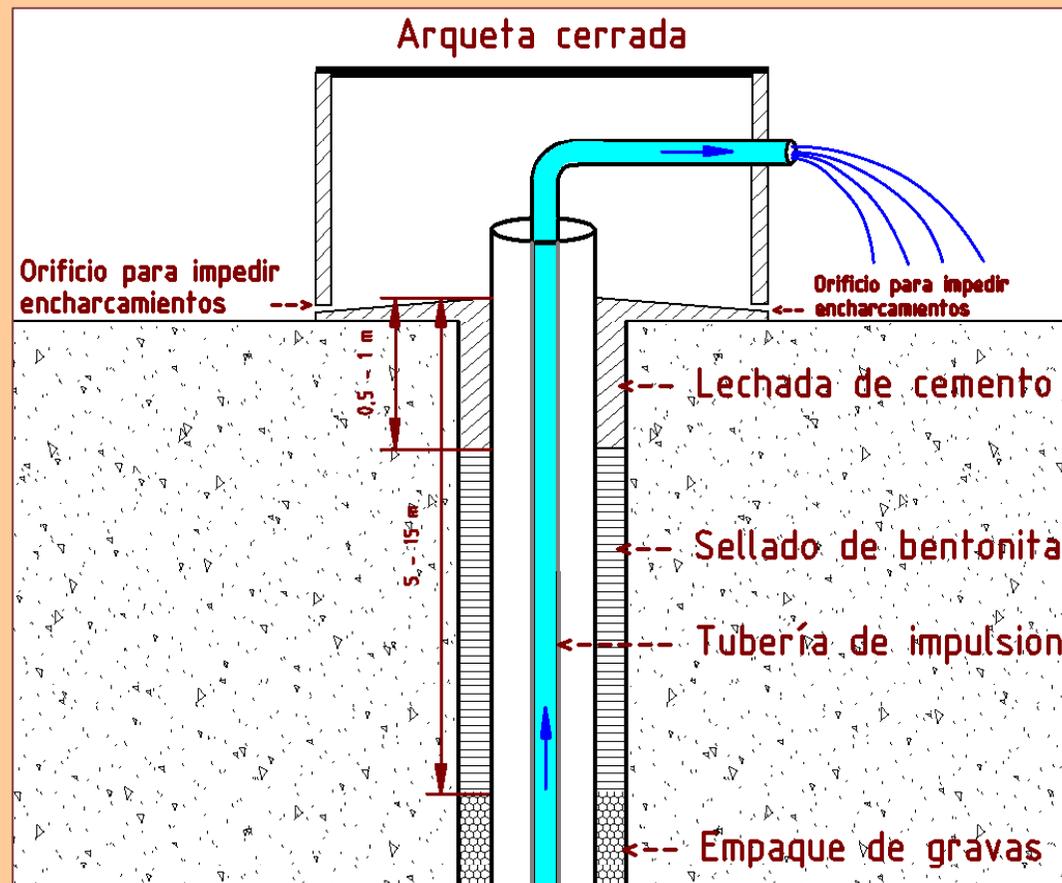
Cabeza de pozo sin sellar, con tubería ciega ranurada a pie de sondeo, empaque de gravas irregular o sin empaque de gravas



Cabeza de pozo sellada, con tubería filtrante, empaque de gravas silíceas y calibradas

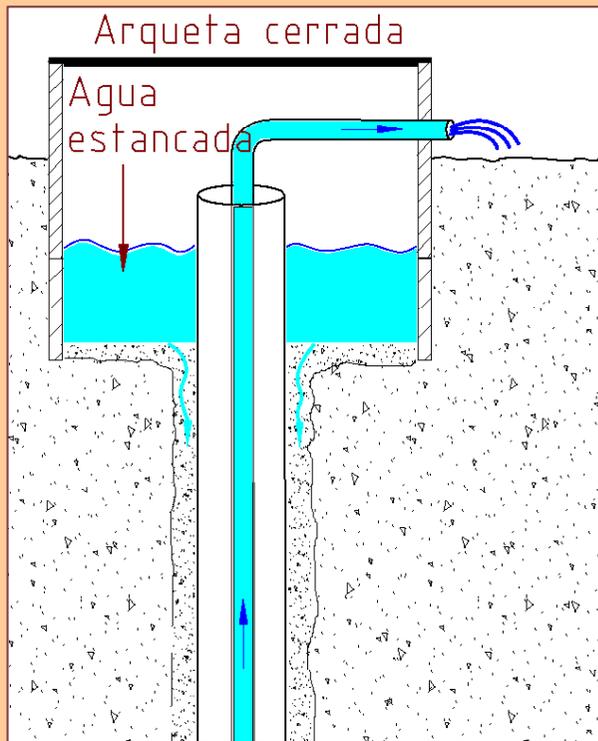
PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

3. Protección de los pozos frente a la contaminación

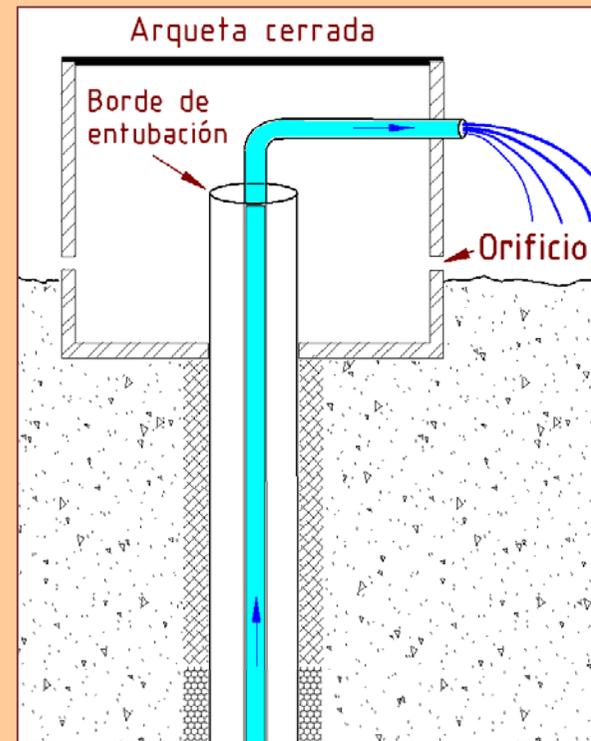


PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

3. Protección de los pozos frente a la contaminación



Riesgo de encharcamiento y
contaminación



Sin riesgo de encharcamiento y
contaminación

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN

As - BOLIVIA



Financiado por  **Cooperación Española**

ANEJO Nº 3

Presentación efectuada en La Paz el 22 de julio de 2019

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACION

Jesús M^a Suso Llamas
Hidrogeólogo



PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

Geólogos del Mundo es una ONGd fundada en España en 1999 a iniciativa de la Federación Europea de Geólogos y el Ilustre Colegio Oficial de Geólogos

OBJETIVOS

- **Gestión ambiental relacionada con los recursos hídricos**
- **Ampliación y mejora de la cobertura y el acceso al agua potable y al saneamiento básico**
- **Prevención y gestión del riesgo de desastres naturales (terremotos, volcanes, deslizamientos, inundaciones, sequías, etc.**

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

Temas

1. Rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas
2. Protección de los pozos frente a la contaminación

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

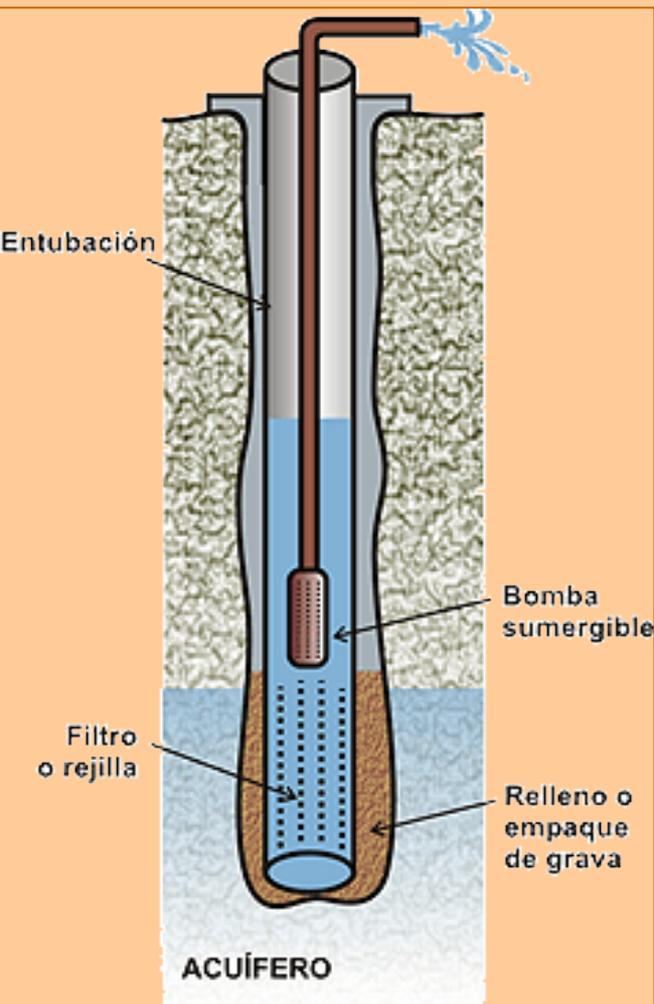
1. Rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas



¡¡No Depende Del Diámetro Del Sondeo!!

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

1. Rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas



FACTORES FUNDAMENTALES



Entubación (tuberías filtrantes)

Empaque de gravas o engravillado

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

1. Rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas

- Tuberías filtrantes

Ranuras homogéneas y regulares

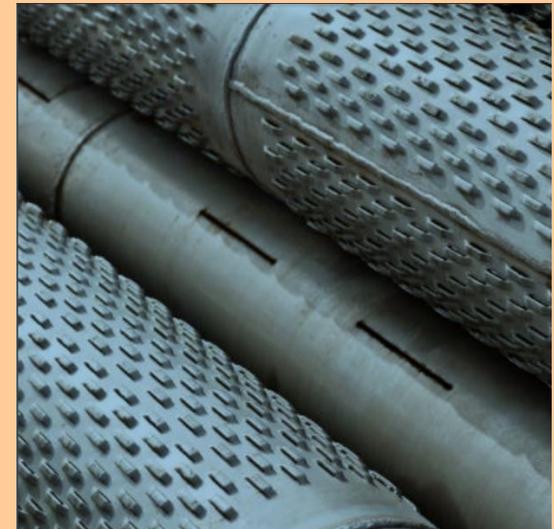
Máxima superficie abierta sin pérdida de resistencia al colapso



Mayor permeabilidad
Menores pérdidas de carga



Menor coste de bombeo



PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

1. Rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas

- **Empaque de gravas (engravillado)**

Gravas silíceas redondeadas y calibradas (3-8 mm)

Mayor permeabilidad

Mayor capacidad de retención (filtrado)

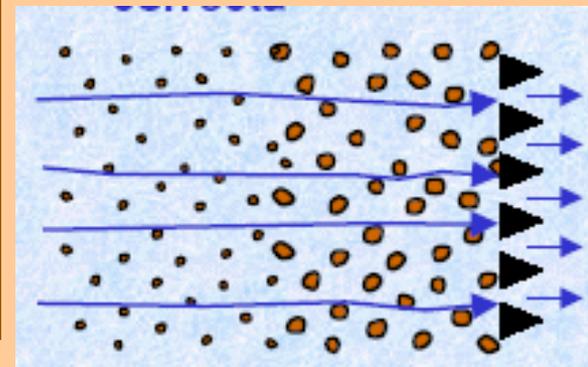
Menor posibilidad de obturación de los filtros



Menores pérdidas de carga

Menor coste de bombeo

Ausencia de turbidez en el agua



PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

1. Rendimiento de las captaciones de aguas subterráneas

Un diseño y construcción adecuados de los pozos son fundamentales para asegurar su buen rendimiento, reducir los costes de bombeo y mantenimiento y alargar su vida útil



PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

2. Protección de los pozos frente a la contaminación

Los pozos y sondeos son vías preferentes para la entrada directa de la contaminación superficial a los acuíferos

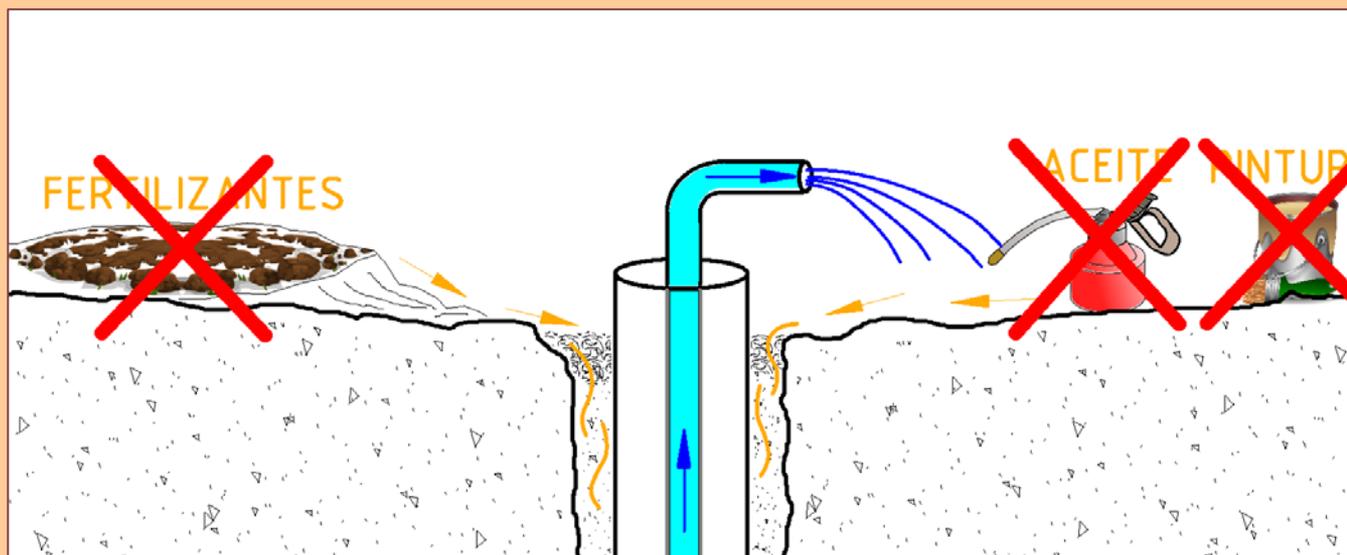


PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

2. Protección de los pozos frente a la contaminación

MEDIDAS PREVENTIVAS GENERALES

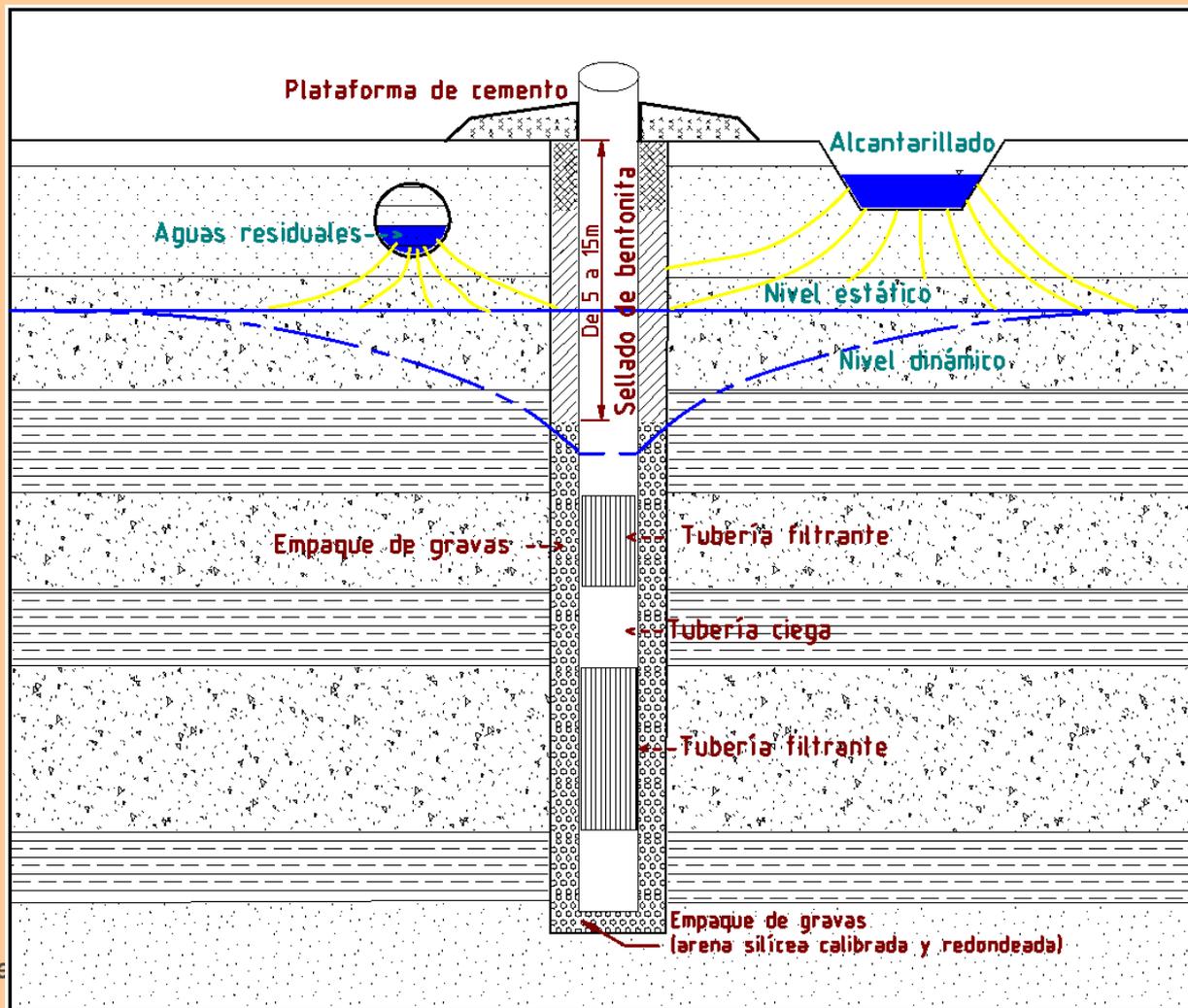
- Colocar las captaciones alejadas de focos de contaminación.
- Evitar actividades potencialmente contaminantes en sus proximidades.
- No almacenar ningún tipo de sustancia junto a los sondeos
- No permitir el acceso de animales domésticos



PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

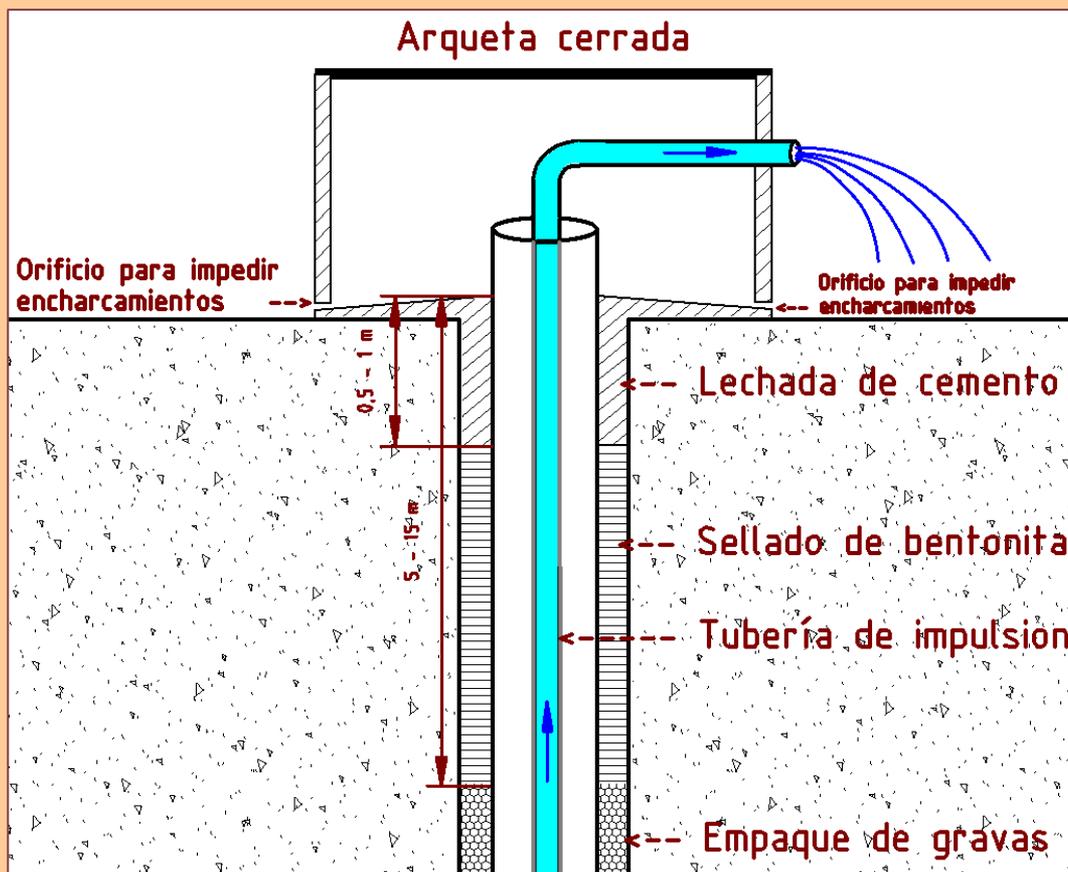
2. Protección de los pozos frente a la contaminación



PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

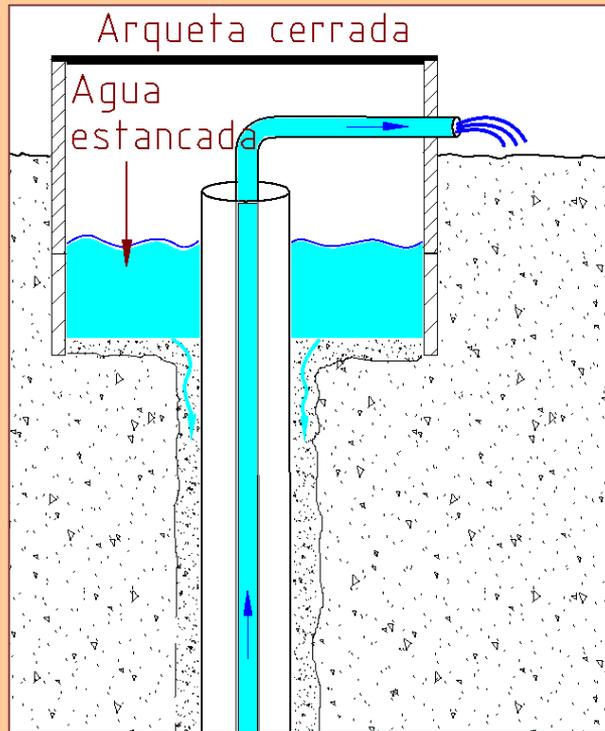
2. Protección de los pozos frente a la contaminación



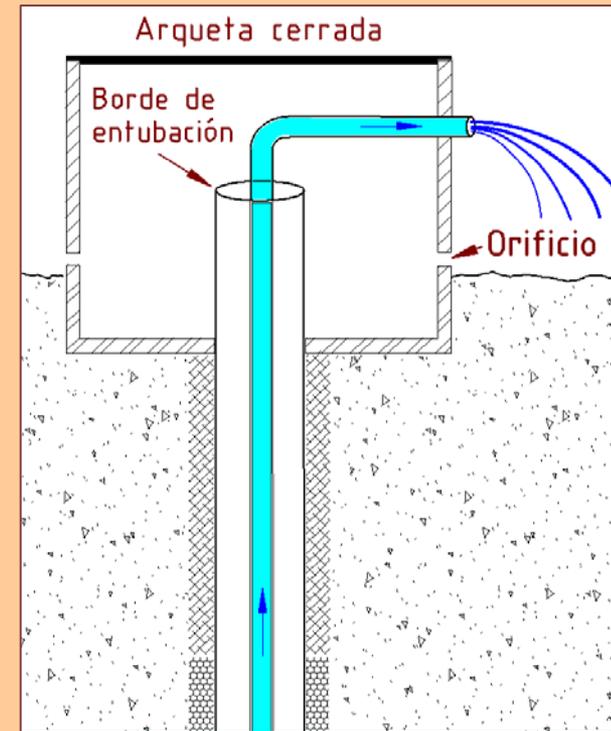
Cabeza de pozo sobre la superficie del terreno

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

2. Protección de los pozos frente a la contaminación



Riesgo de encharcamiento y
contaminación



Sin riesgo de encharcamiento y
contaminación

PROTECCIÓN DE LAS CAPTACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LOS ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN

MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN

As - BOLIVIA



Financiado por  **Cooperación Española**

ANEJO Nº 4
Presentación efectuada en Cochabamba el 27 de febrero de
2020

INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

Proyecto
As – BOLIVIA

Jesús M^a Suso Llamas
Hidrogeólogo



INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

Temas

- 1. Características generales del acuífero de Cochabamba**
- 2. Contenido de As**
- 3. Origen del As**

Evaluación preliminar sobre el alcance de la presencia de As en el acuífero de Cochabamba

INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

1. Características generales del acuífero

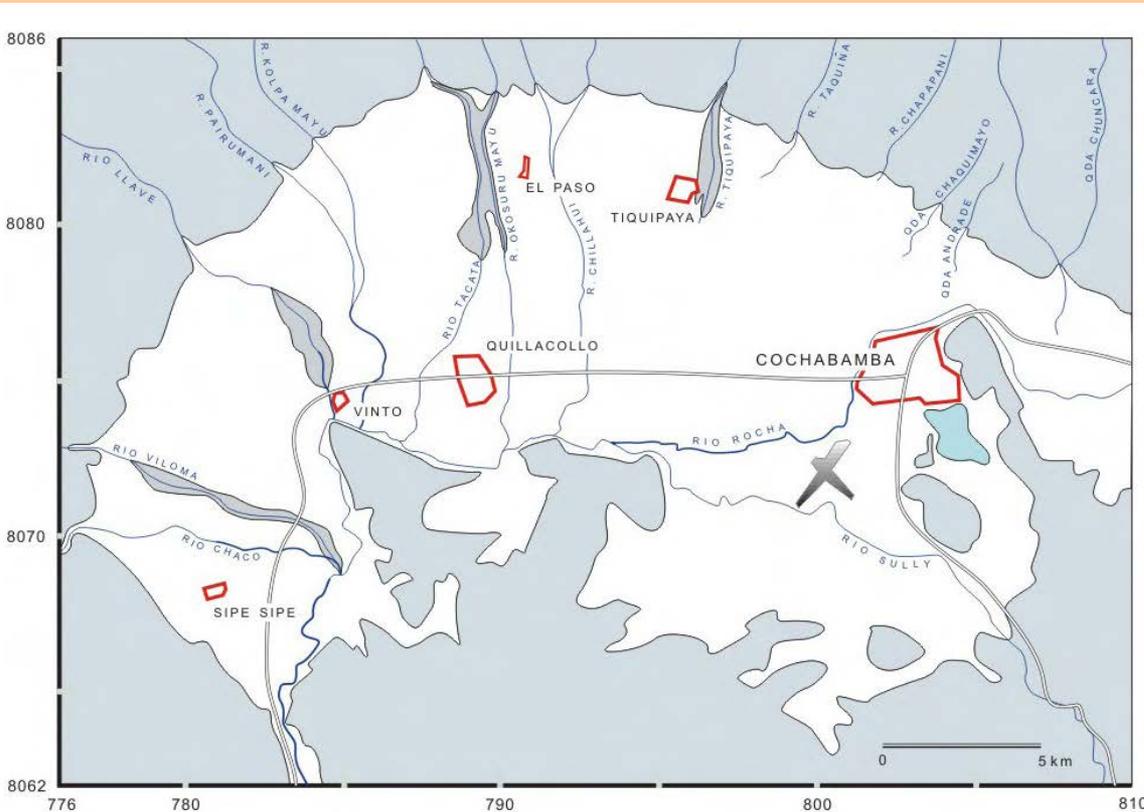
Documentación empleada:

- Renner, S. y Velasco, C. (2000). “Geología e hidrogeología del Valle Central de Cochabamba”. Bol. n° 34 Serv. Nac. de Geología y Minería.
- Geobol, (1994). Carta geológica de Bolivia. Hojas 1/100.000 n° 6341 (Cochabamba) y n° 6342 (Sierra del Tunari). Geobol, 1994.
- Columnas litológicas de sondeos (Sergeomin y propietarios de los pozos)

INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

1. Características generales del acuífero

Cubeta tectónica rellena de materiales fundamentalmente detríticos (fluvio-lacustres, abanicos aluviales)



Litología dominante

- Gravas, arenas, limos y Arcillas
- Procedentes de la erosión de las sierras circundantes

Potencia (espesor)

- Zona norte: $\approx 800 - 1.000$ m
- Zona sur: ≈ 200 m

INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

1. Características generales del acuífero



Abanico aluvial



Detalle (bolos y gravas)

Acuífero heterogéneo y anisótropo

INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

1. Características generales del acuífero

FLUJO SUBTERRÁNEO

Recarga

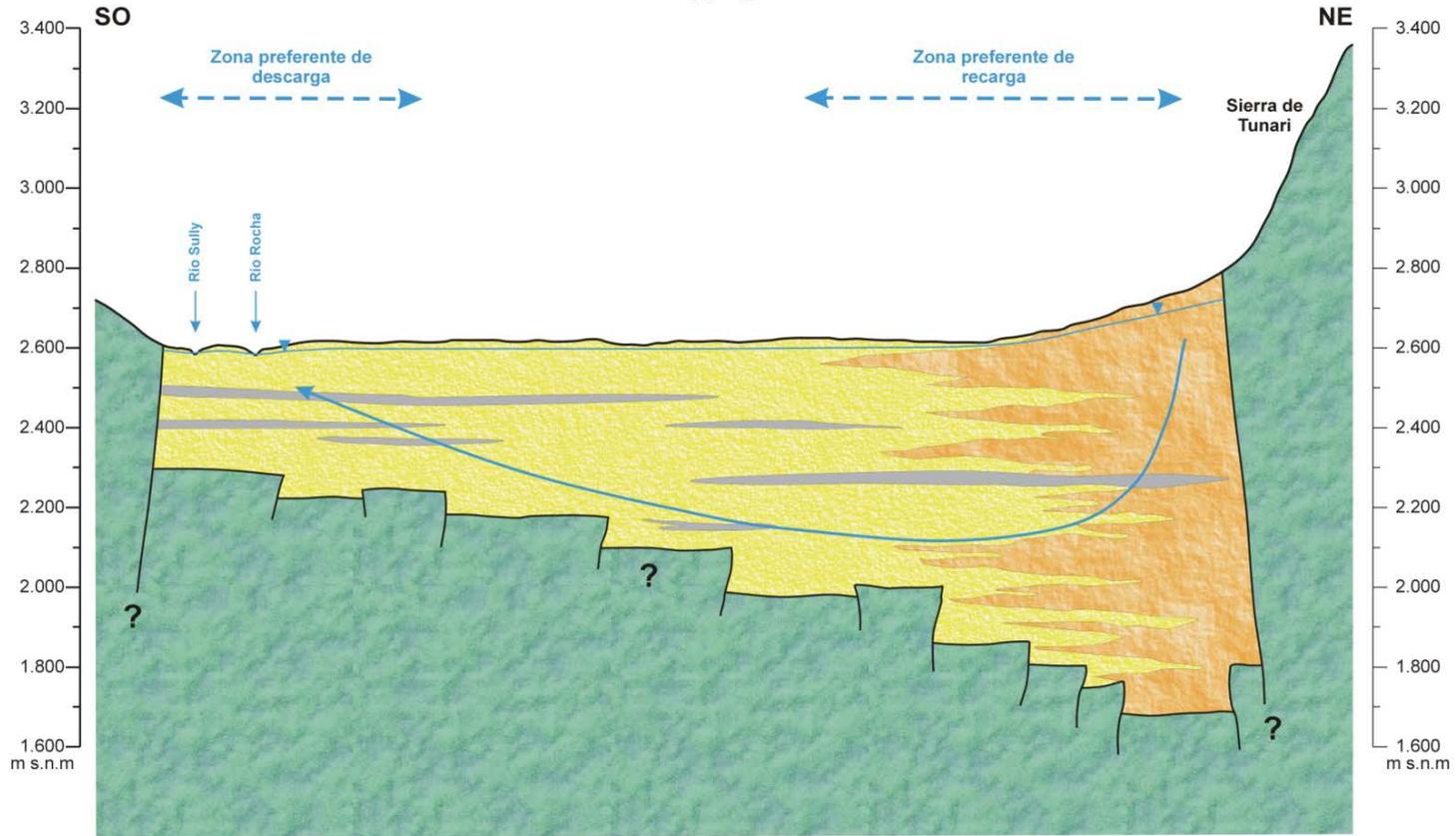
- ✓ Infiltración de las precipitaciones
- ✓ Infiltración de arroyos procedentes de la Sierra del Tunari
- ✓ (Infiltración del río Rocha)

Descarga

- ✓ Hacia el río Rocha
- ✓ Extracción de agua por bombeo (sondeos surgentes abiertos)
- ✓ ¿Evapotranspiración?

INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

Perfil hidrogeológico conceptual
A - B



-  Terciario-Cuaternario. Abanicos aluviales.
-  Terciario-Cuaternario. Predominio de niveles arcillosos y limosos (lacustres y fluvio-lacustres)
-  Terciario-Cuaternario. Predominio de niveles de gravas, arenas y limos
-  Basamento (Paleozoico)

-  Superficie freática (profundidad supuesta)
-  Sentido general del flujo subterráneo

INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

2. Contenido de As

TOMA DE MUESTRAS DE AGUA

Determinaciones

- ✓ Medidas *in situ* (C.E., pH, oxígeno disuelto, potencial redox)
- ✓ Elementos mayoritarios (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, HCO_3^-)
- ✓ NO_3^- , NO_2^- , PO_4
- ✓ Elementos traza: 22 + **As**
- ✓ Análisis microbiológico: Coliformes totales y termotolerantes (2ª campaña)

Determinaciones analíticas

- ✓ UMSA, UPB, IGME (C.I.Q.)

INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

2. Contenido de As

TOMA DE MUESTRAS DE AGUA

Primera campaña:

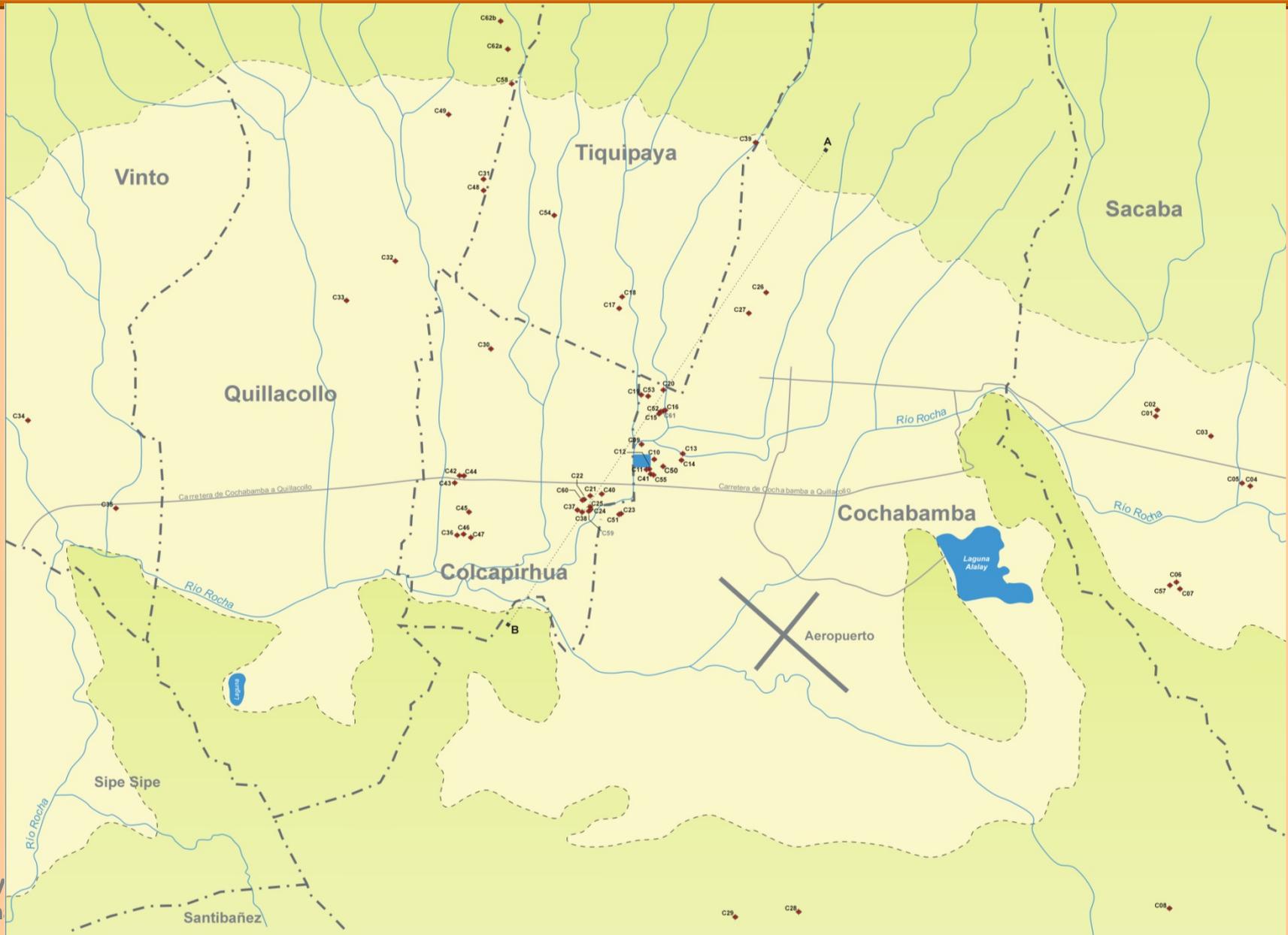
- ✓ Noviembre de 2018: 38 muestras (37 en pozos, 1 en aguas superficiales)

Segunda campaña:

- ✓ Mayo de 2019: 40 muestras (38 en pozos, 2 en aguas superficiales)

Total de puntos muestreados en Cochabamba: 56

INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA



INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

2. Contenido de As

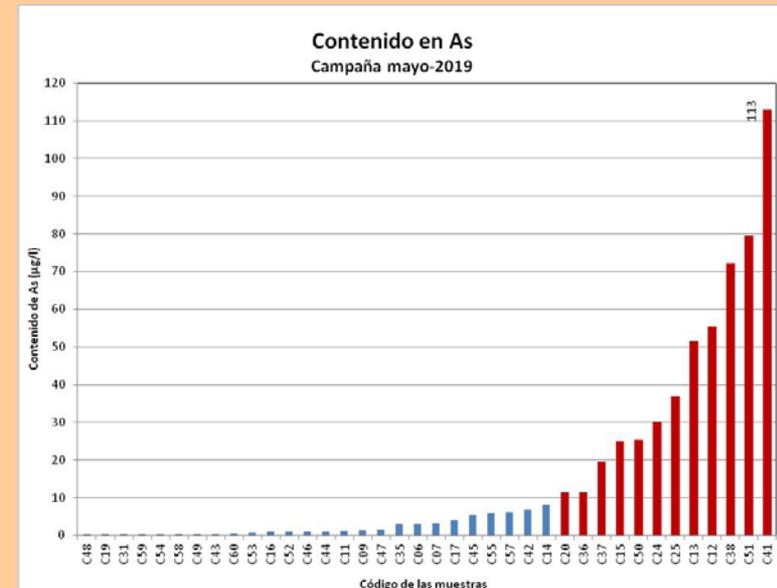
≈ 25%

DE LOS PUNTOS MUESTREADOS
SUPERAN LOS 10 µg/l

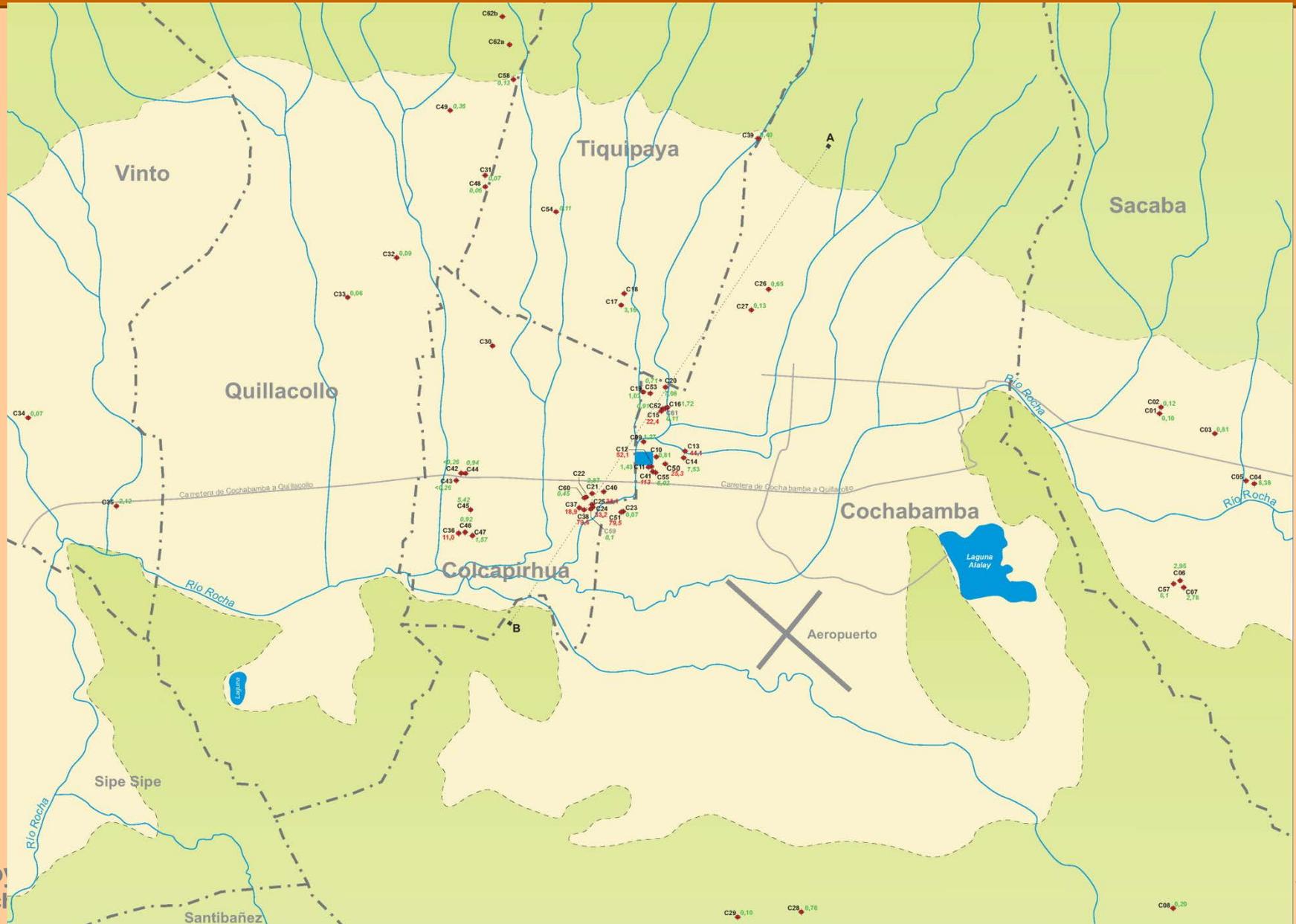
Concentración máxima encontrada
113 µg/l

DISTRIBUCIÓN

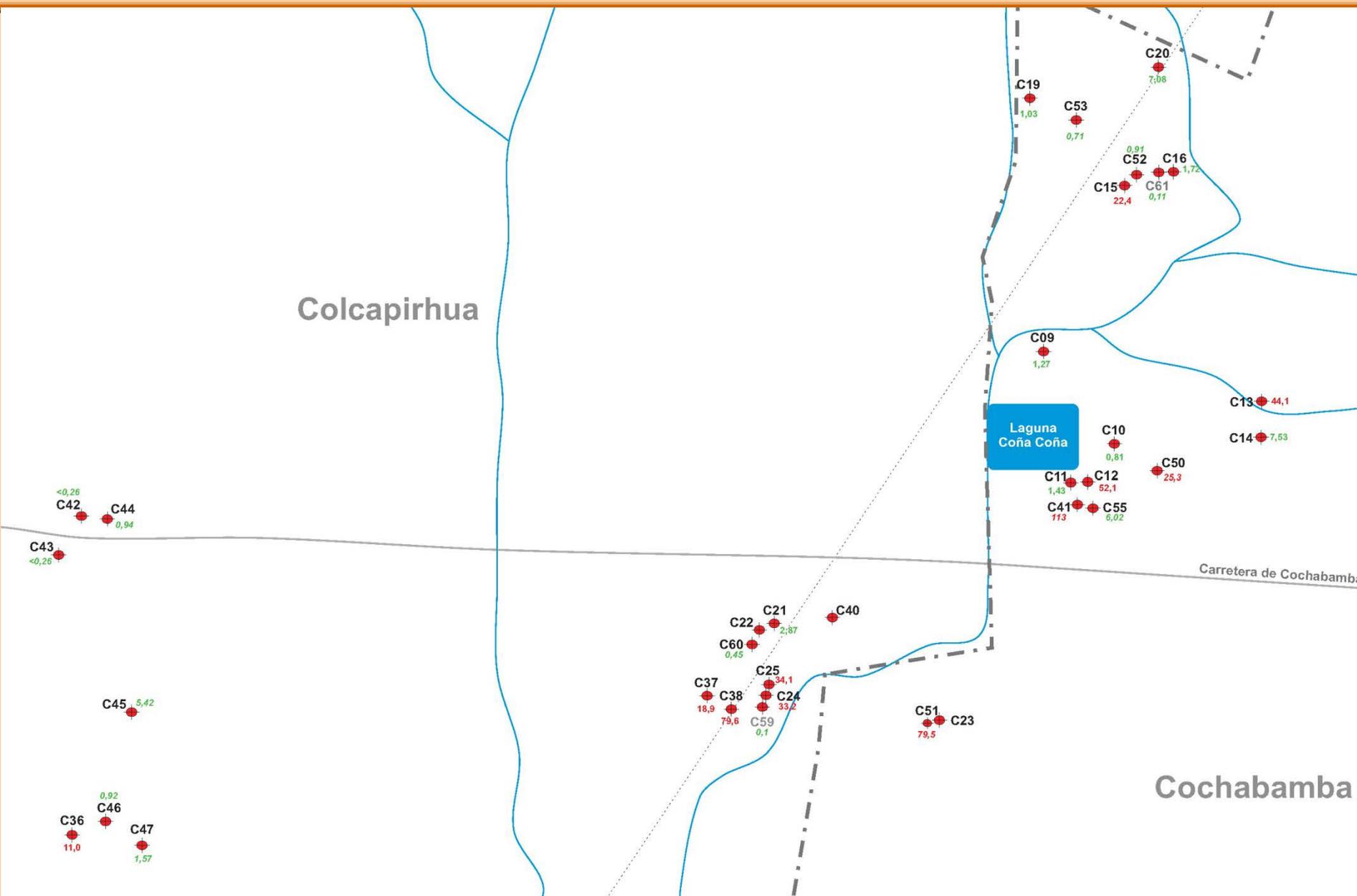
- ✓ Área central del acuífero
- ✓ Pozos con elevado contenido de As junto a otros con muy bajo contenido
- ✓ No se aprecia relación con la profundidad
- ✓ No se aprecia relación con el sentido del flujo subterráneo
- ✓ No se aprecia relación con el contenido total de solutos (C.E.)



INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

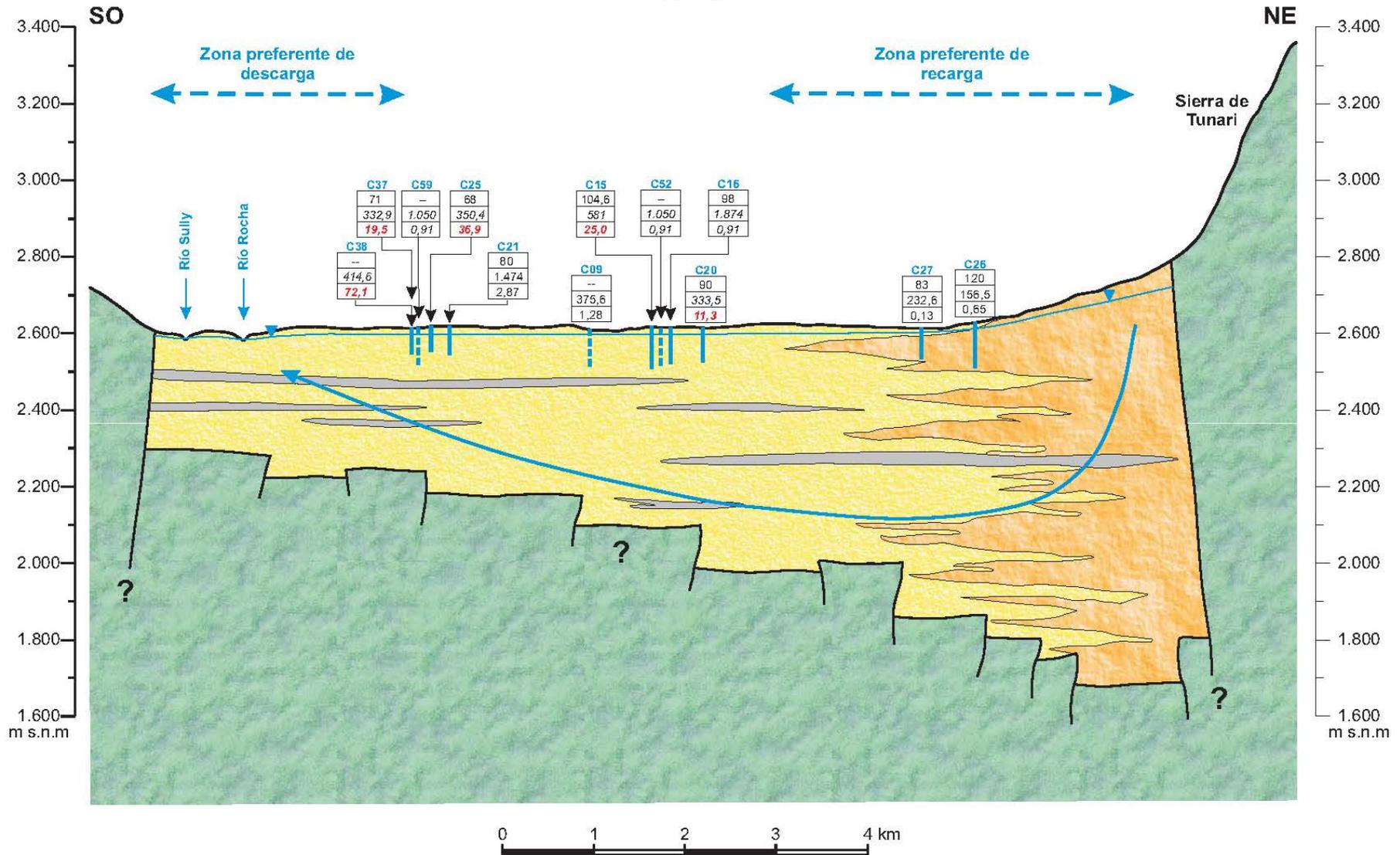


INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA



INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

Perfil hidrogeológico conceptual
A - B



INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

3. Origen del As

Presente de forma natural en el acuífero

- ✓ ¿Disperso en todo el acuífero?
- ✓ ¿Capas o niveles con concentración de minerales de As?

Movilización

- ✓ ¿Puesta en solución por las condiciones redox naturales del acuífero?
- ✓ **¿Modificaciones de las condiciones redox por la explotación intensiva del acuífero?**

Dificultades

- ✓ Escasa información de la litología detallada de los pozos
- ✓ Mezcla de aguas de distintos niveles en el interior de los pozos

INTERPRETACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA PRESENCIA DE As EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE COCHABAMBA

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

As - BOLIVIA



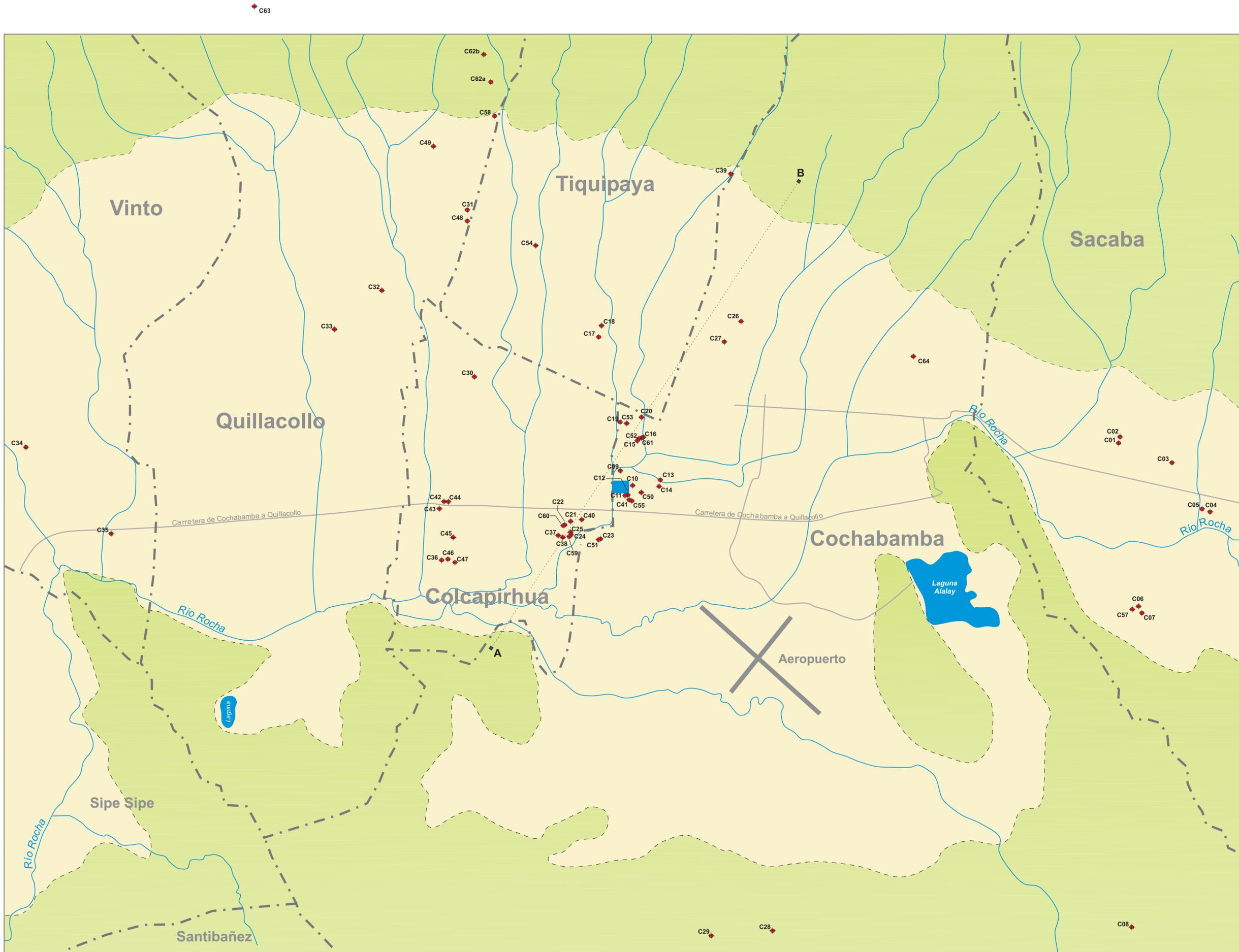
Financiado por  Cooperación Española

PLANOS

Plano nº 1: Inventario de puntos de agua.

Plano nº 2: Primera campaña de muestreo (noviembre de 2018)

Plano nº 3: Segunda campaña de muestreo (mayo de 2019)

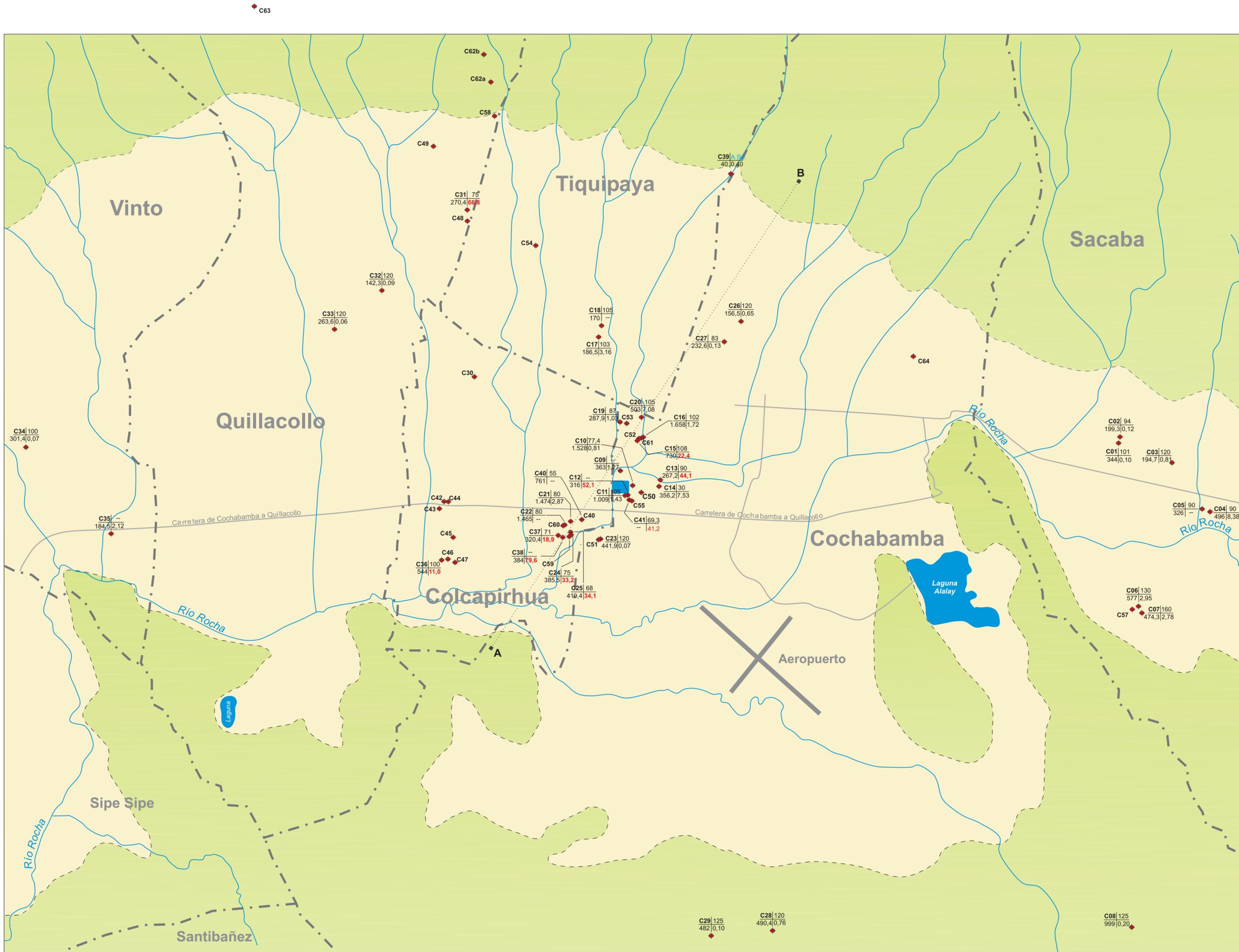


- ◆ C08
Punto de agua y código de identificación
- A ■ B
Traza de perfil vertical

- Geología**
- Rellenos detríticos de la cubeta de Cochabamba (Terciario y Cuaternario)
 - Materiales del Paleozoico

0 1 2 3 4 km

PLANO N° 1
Inventario de puntos de agua



Puntos de agua

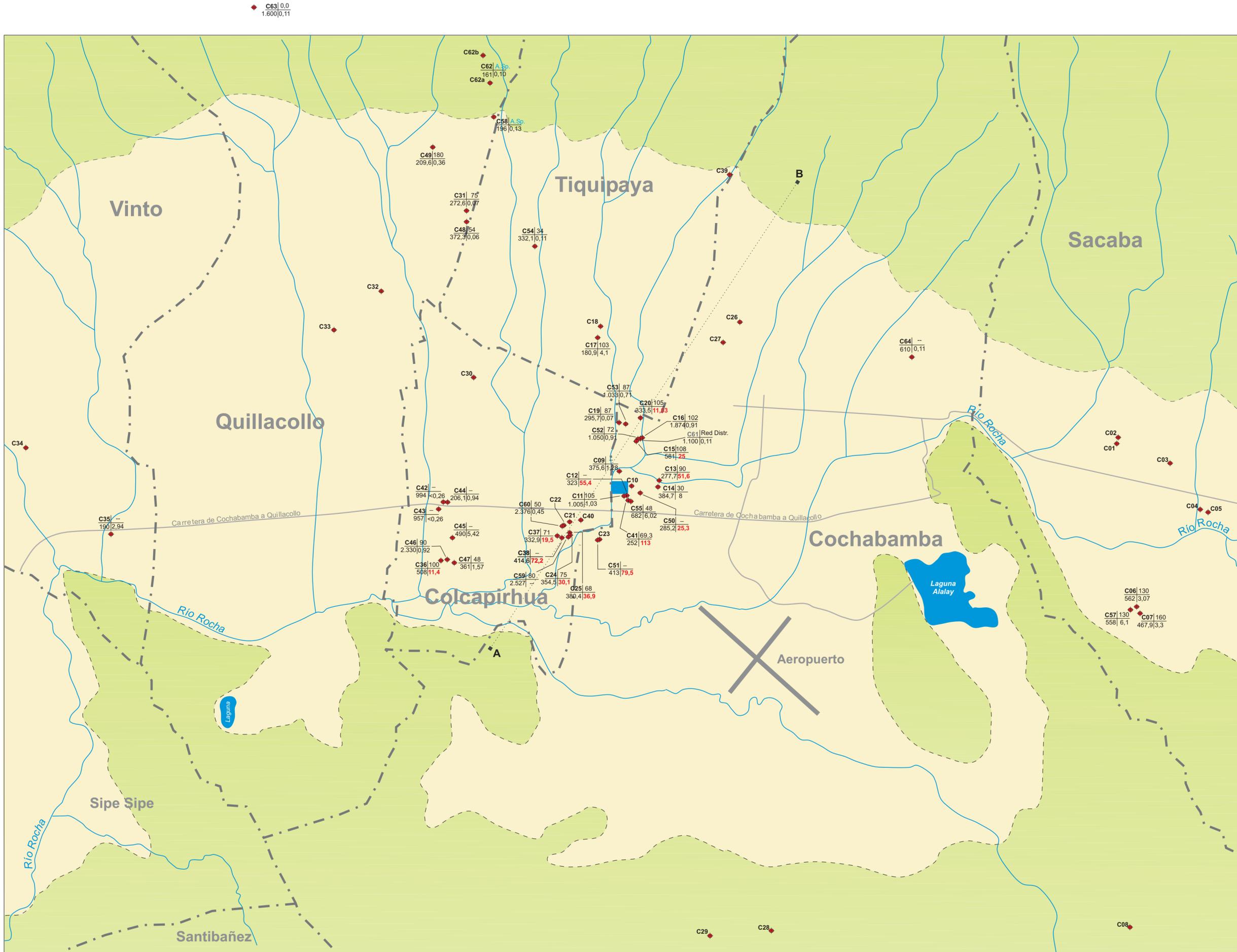
- | | |
|---|---|
| 1 | 2 |
| 3 | 4 |
- Código del punto
 - Profundidad (m) / A.Sp.: aguas superficiales
 - Conductividad eléctrica (µS/cm)
 - As (µg/l). En rojo: valor > 10 µg/l.

Geología

- Rellenos detríticos de la cubeta de Cochabamba (Terciario y Cuaternario)
- Materiales del Paleozoico



PLANO Nº 2
 Campaña de muestreo de noviembre de 2018



Puntos de agua

- | | |
|---|---|
| 1 | 2 |
| 3 | 4 |
- Código del punto
 - Profundidad (m) / A.Sp: aguas superficiales
 - Conductividad eléctrica (µS/cm)
 - As (µg/l). En rojo: valor > 10 µg/l.

Geología

- Rellenos detríticos de la cubeta de Cochabamba (Terciario y Cuaternario)
- Materiales del Paleozoico



PLANO Nº 3
 Campaña de muestreo de mayo de 2019