Diagnóstico sobre el nivel de contaminación de acuíferos en el distrito 9 del municipio de Cercado en la ciudad de Cochabamba y propuesta para su protección y control

Giacomo Ghielmi[1], Gonzalo Mondaca[1], Marcos Luján[2]

[1]Agua Sustentable

Av. Hernán Siles Esq. Calle 9 (zona Alto Temporal) Cochabamba-Bolivia

[2]Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana
Av. General Galindo s/n, Cochabamba, Bolivia

e-mail: lujan@ucbcba.edu.bo

Resumen

El presente trabajo presenta un estudio sobre las características hidrogeológicas y la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de la zona sur del valle central de Cochabamba que es utilizado por la población de esta zona como fuente de agua potable. Se realizaron estudios en 25 pozos de la zona que permitieron una caracterización hidrogeológica del acuífero. Se determinó que el flujo de las aguas va de sur a norte, más o menos paralelo al curso del río Tamborada. A partir de la caracterización del acuífero se aplicó la metodología GOD para elaborar un mapa de vulnerabilidad del mismo; este mapa muestra que las zonas más vulnerables son las zonas de recarga del acuífero en los abanicos aluviales situados al sur y el curso del río Tamborada. La zona en que se asienta el botadero de K'ara K'ara resulta ser una zona de alta vulnerabilidad a la contaminación. La región septentrional tiene una vulnerabilidad baja a despreciable gracias a las capas de arcilla que se encuentran en el subsuelo. Como principales fuentes de contaminación se identificaron a: los sistemas de saneamiento in situ, las lagunas de tratamiento de aguas servidas de Alba Rancho, la actividad agropecuaria en la zona y el Botadero de K'ara K'ara. Análisis químicos de la calidad del agua de 17 pozos de la zona permitieron evidenciar que el principal problema de contaminación de agua es el elevado nivel de salinidad y la presencia de nitrógeno amoniacal. La salinidad observada puede ser a causa de una contaminación natural de las aguas. Los elevados niveles de nitrógeno amoniacal pueden deberse a alguna fuente de contaminación orgánica (saneamiento in situ, lagunas de tratamiento de aguas servidas o actividad agrícola). A partir del análisis de estos resultados se elaboró una propuesta para el control y la protección de la calidad del acuífero basado en la instalación de sistemas de alcantarillado en las urbanizaciones existentes, el control de la expansión de la mancha urbana y la reducción de las emisiones contaminantes. Para el monitoreo de la calidad de agua del acuífero se propone la

selección de un cierto número de pozos en los cuales se harán análisis de la calidad del agua y del comportamiento el acuífero.

Palabras clave: vulnerabilidad acuífero, método GOD, calidad de agua, sistemas comunitarios, protección y monitoreo de acuíferos.

1 Antecedentes

La zona sur de la ciudad de Cochabamba, Bolivia, comprende los distritos 5, 7, 8, 9 y 14. En esta zona de la ciudad se asienta de preferencia la población rural que migra a esta ciudad en busca de un mejor nivel de vida. Es una zona con un fuerte crecimiento de la construcción de viviendas; muchas urbanizaciones se construyen en esta zona, en su mayoría destinadas a familias de bajos ingresos.

La rapidez con que ha crecido esta zona y la falta de atención de las autoridades municipales y departamentales a sus necesidades ha redundado en una flagrante carencia de servicios básicos, sobre todo de agua potable y alcantarillado. Esta carencia ha sido suplida en gran parte mediante la creación de Sistemas comunitarios, Cooperativas y Comités de Aguas Autogestionarios que, mediante la perforación de pozos, han logrado proveer de agua potable a gran parte de la población de la zona. Estos sistemas comunitarios utilizan pozos que se perforan en la misma zona para obtener agua que se distribuye luego a la población mediante sistemas de distribución local. Este tipo de respuesta ha crecido rápidamente en los últimos años de modo que estos sistemas vieron la necesidad de crear una Asociación de Sistemas Comunitarios de Agua Potable (ASICA Sur) que agrupa a 2/3 de estos sistemas comunitarios.

El distrito 9 del municipio del Cercado, en el Departamento de Cochabamba, hace parte de los distritos del sur de la ciudad, se encuentra en una zona que está clasificada como rural. La población de este distrito se dedica, en su gran mayoría, a la producción agrícola y pecuaria. Existen varias granjas de cría de ganado lechero y porcino, y terrenos dedicados a la producción de hortalizas y forrajes. Estos productos se comercializan en la ciudad de Cochabamba.

Si bien la mayoría de la población tiene acceso a energía eléctrica, prácticamente no existen servicios de agua potable y alcantarillado. En este distrito existen varios sistemas comunitarios de provisión de agua potable que, por lo general, apenas cubren un servicio básico de agua potable. Lamentablemente estos sistemas no están acompañados por la implementación de un sistema de alcantarillado por lo que la gestión de las aguas servidas se hace de manera precaria y es en general responsabilidad de cada uno de los vecinos. En la mayoría de los casos las aguas servidas son vertidas a la calle o al interior de las casas. Las aguas de los inodoros, en caso de que existan, se tratan por lo general en fosas sépticas o pozos ciegos.

Además de las aguas servidas domésticas, existen en la zona actividades industriales, actividades agrícolas, una planta de tratamiento de aguas servidas domésticas (planta de

Alba Rancho) y cursos de agua que están fuertemente contaminados, como el río Tamborada y el río Rocha. Estas actividades provocan emisiones de agua contaminada hacia el subsuelo con un serio riesgo de contaminación para las aguas del acuífero. Algunos vecinos ya han reportado una contaminación perceptible de las aguas de sus pozos por la presencia de malos olores y sabor extraño en el agua. Por otra parte, algunos análisis realizados por instituciones como Agua Sustentable y otras, muestran también resultados que indican que el agua no es apta para consumo humano, debido esencialmente a una contaminación microbiológica y por materia orgánica. Eventualmente existen otros contaminantes, como metales pesados, pero no se tienen estudios detallados sobre esto.

Debido a que este acuífero será la fuente de provisión de agua potable para la población de esta región, por mucho tiempo más, pues no existen proyectos que permitan brindar este servicio en el corto plazo, es esencial que se establezca cuál es la situación actual del mismo, en cuanto a contaminación del agua y vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, y las medidas de protección que garanticen la calidad del agua y el aprovechamiento sostenible de este acuífero. Es por ello que el presente estudio se planteó como objetivo realizar un diagnóstico del nivel de contaminación del acuífero del distrito 9 del Municipio del Cercado, determinar el origen más probable de la contaminación eventual y elaborar una propuesta para la protección y control de la calidad del mismo.

2 Metodología

La caracterización del acuífero se realizó utilizando información y estudios previos sobre el mismo. También se utilizaron los registros de perforación de los pozos que detallan las características del suelo a diferentes profundidades; para esto se contó con la colaboración de los asociados de ASICA Sur. Para completar la información de estudios previos, se realizaron estudios en 24 pozos, 22 perforados y 2 excavados, y 2 vertientes, donde se midió el nivel piezométrico para determinar dirección de flujo y líneas equipotenciales.

La vulnerabilidad del acuífero en diferentes regiones se estimó utilizando la información recolectada de la literatura y la información recopilada en los pozos mediante el índice de vulnerabilidad integrado del método GOD [1] que considera: grado de confinamiento hidráulico, ocurrencia del sustrato suprayacente y distancia al nivel del agua subterránea. Las clases de vulnerabilidad y su definición cualitativa según el método GOD se detallan y describen en la Tabla 1.

Para el análisis de fuentes y cargas contaminantes, se utilizó información disponible sobre las posibles fuentes en la zona relacionadas con actividades de desarrollo urbano, actividades industriales y actividades agrícolas. Se utilizaron todos los recursos e información previa disponible para identificar las principales fuentes y, luego, clasificarlas por tipo de fuente y por carga e intensidad contaminante.

Tabla 1. Tabla 1: Definición cualitativa de las clases de vulnerabilidad a la contaminación y su relación con el índice del método GOD. Fuente [1].

Clase de Vulnerabilidad	Definición cualitativa	Índice GOD
Extrema	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación	0,7 – 1,0
Alta	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación	0,5 - 0,7
Moderada	Vulnerable a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados	0,3 – 0,5
Baja	Sólo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos períodos de tiempo	0,1 – 0,3
Despreciable	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.	0,0 – 0,1

Para el diagnóstico sobre la calidad del agua se seleccionaron una serie de pozos en la zona del acuífero y se tomaron muestras en las que se analizaron los siguientes parámetros: temperatura, pH, turbidez, conductividad, cloruros, DQO, dureza total, hierro total, manganeso, nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, sulfatos, sulfuros y apariencia. En un cierto número de pozos con sospechas de contaminación por metales pesados o pesticidas se analizó Cd, Ni, Cr y Pb, como metales pesados, lamentablemente no se pudo analizar malation como posible contaminante de pesticidas por falta de algunos reactivos en el laboratorio. Se priorizaron los parámetros de calidad establecidos por la OMS para la calidad fisicoquímica del agua.

Las medidas de protección se propusieron en función del tipo de fuente, la vulnerabilidad del acuífero y los objetivos de calidad que se desean lograr en la calidad del agua. Para ello se analizaron otras experiencias sobre la temática de protección de acuíferos [4].

El programa de monitoreo de la calidad del agua se basa en el análisis periódico de la calidad del agua de algunos pozos de agua situados estratégicamente, aguas abajo de las principales fuentes de contaminación. El programa de monitoreo establece la periodicidad de los análisis y estudios y los resultados serán consignados en una base de datos con registros que perduren en el tiempo.

3 Resultados y Discusión

3.1 Características geomorfológicas del valle central

El valle central de Cochabamba es una fosa tectónica formada por fases pliocénicas de evolución andina, delimitada al Norte y al Sur por fallas normales, con fallas inversas y pliegues al Oeste. La fosa se ha llenado progresivamente de depósitos aluviales de diferente energía. Se distinguen tres áreas de acuerdo a la morfología del valle [5].

Un área montañosa que rodea todo el valle central: al Norte y Noroeste se tiene la cordillera del Tunari, que es la más elevada; al Sur y al Este, cadenas montañosas de menor altura.

Un área intermedia entre las cadenas montañosas y la llanura central del valle (área de talud), caracterizada por la presencia de abanicos aluviales, compuestos de gravas y cantos depuestos por fenómenos aluviales y tal vez glaciales o masivos (derrumbes). Son más abundantes en el lado Norte del valle formando un área continua con una pendiente más suave.

El área de llanura en la parte central el valle está constituida por la deposición en el graben tectónico de sedimentos finos fluviales y lacustres, producidos por la erosión de las serranías circundantes. La ubicación del río Rocha, al Sur de la llanura, evidencia la importancia de los fenómenos erosivos y deposicionales producidos por la cordillera del Tunari.

En términos geológicos, las áreas que bordean el valle central están constituidas por rocas de edades entre el Paleozoico hasta el Cenozoico. Toda la serie estratigráfica está constituida por rocas sedimentarias clásticas (terrígenas), en su mayoría por areniscas y limolitas. Las serranías del Parque Tunari y las del Sur del Valle Central están constituidas por rocas del Sistema Ordovícico, con la presencia de rocas Silúricas. Las formaciones estratigráficas pertenecientes a los más recientes depósitos se hallan al Oeste del Valle Central.

Los sedimentos que llenan el Valle Central, son sedimentos cuaternarios, con la excepción de los sedimentos glaciales ubicados en la Cordillera del Tunari. De acuerdo a estudios geofísicos, el relleno plio-pleistoceno de estas cuencas varía de menos de 100 m, al Suroeste del Valle Central, a más de 1.450 m al Norte de la cuenca, cerca de la población de El Paso (Brgm et al. 1994, citado por Huaranca et al. [5]). El espesor del relleno en la zona del Distrito 9 es también relativamente delgado llegando a unos 100 m. En el desfogue del río Rocha, desde el Valle Central, el espesor de los sedimentos disminuye hasta constituir un pequeño espesor de origen fluvial al cauce del río Rocha.

La composición del relleno del Valle Central es muy variable. Sobre el zócalo paleozoico se sitúan sedimentos aluviales, gravitativos (derrumbes), lacustres y fluvio-lacustres de gran espesor. Los sedimentos de mayor granulometría se encuentran al norte del valle, relacionados con los ríos que bajan desde la Cordillera del Tunari. El espesor de estas formaciones aluviales acuíferas es muy variable; al sudeste de la cuenca (zona del Distrito 9) los acuíferos se encuentran a profundidades menores a 20 m, en la

zona Noroeste, éstos pueden alcanzar hasta 600 m. Estos sedimentos son interdigitados con sedimentos medio-finos de origen fluvial, y finos de origen lacustre, que se ubican al centro y al Sur del Valle. La granulometría de los sedimentos de abanicos disminuye con la distancia desde el punto de desfogue del río en el Valle.

Los sedimentos fluviales, depositados por el río Rocha, se hallan en la porción central y meridional del Valle. Están constituidos por sedimentos de baja energía, esencialmente arenas limosas y arenas arcillosas. Al sur del valle se tiene sedimentos de limo y arcilla principalmente, de origen lacustre, con elevado contenido de materia orgánica. En el espesor de los sedimentos lacustres se pueden encontrar lentes de arena variablemente limosa que forman pequeños acuíferos de baja productividad.

3.2 Características hidrogeológicas del valle central

Las características litológicas del relleno sedimentario del valle central de Cochabamba presentan una gran heterogeneidad tanto vertical como horizontal. Sin embargo, de manera general se puede distinguir la zona septentrional con acuíferos constituidos por materiales gruesos, bloques y grava, con matriz arenosa o areno arcillosa. La zona central se caracteriza por depósitos aluviales y fluvio-lacustres de arenas y gravas con intercalaciones de horizontes arcillosos. Estos horizontes arcillosos se presentan en forma de discos aislados y no de capas continuas, la estructura de los mismos parece ser compleja. Finalmente, la zona meridional y en particular la región Sureste, el sistema acuífero está constituido por sedimento de baja energía: gravas, arenas limosas y arenas arcillosas, de origen fluvial y lacustre [5] [6].

Los abanicos aluviales al norte y al sur del valle central, se constituyen en las principales áreas de recarga de los acuíferos. Al Norte, esta zona de recarga se extiende en todo el límite de la cuenca y tiene un ancho variable de 2,5 a 5,5 km y es el área de recarga más importante del acuífero. La permeabilidad superficial de los abanicos aluviales es muy alta, lo que permite que entre el 20 al 25% de la precipitación pluvial se infiltre [5]. La ondulaciones de la isopiezas indican que existe mayor recarga cerca de los desfogues de los ríos. De esta manera el flujo general de la capa de acuíferos está orientada hacia el centro de la cuenca, perpendicularmente a los límites septentrional y meridional de la cuenca. La morfología de las isopiezas indica que el río Rocha actúa como drenaje de los acuíferos de la región septentrional de la cuenca y el río Tamborada actúa como drenaje des los acuíferos en la zona meridional, hasta el punto en que los dos ríos se unen. Al sur, la recarga del acuífero se produce en pequeños abanicos aluviales bien identificados, es posible que el río Tamborada, en la zona del valle de la Angostura, sirva también como recarga del acuífero.

El acuífero puede ser considerado libre (freático) al Norte, siguiendo el movimiento de las aguas hacia el Sur, el acuífero se vuelve semiconfinado y luego confinado y surgente. Este cambio se produce por la presencia de capas arcillosas superficiales de espesor variable (entre 10 y 30 m). Esta evolución a acuífero confinado se demuestra por la presencia de varios pozos surgentes y vertientes en la zona central de la cuenca. Sin embargo, por la sobre-explotación combinada, eventualmente, a la menor recarga de

los acuíferos, por la urbanización de la zona norte, cada vez existen menos pozos surgentes y vertientes. Durante el año hidrológico, los niveles piezométricos varían en 20 m en la zona septentrional (de recarga) y en 1 m en la zona meridional (de descarga) del acuífero. De manera general se registra un descenso del nivel piezométrico, síntoma de una sobre-explotación del acuífero y una disminución de la tasa de recarga.

La transmisividad del acuífero es muy variable en función de las características de los sedimentos. Los mayores valores de transmisividad se tienen en la zona de abanicos aluviales de gran profundidad; en estas regiones se tienen valores mayores a 430 m^2/d hasta valores extremos de 6.000 m^2/d. A medida que la granulometría de los sedimentos es más fina y de naturaleza arcillosa, la transmisividad disminuye a valores de 40 y 400 m^2/d en la zona central del Valle. Los valores más bajos se registran en la región meridional, al Sur de los ríos Rocha y Tamborada; en esta zona los valores están entre 4 y 40 m^2/d. Estos valores condicionan como más vulnerable el acuífero en la zona norte que es también la zona de recarga más importante. Por la baja transmisividad, el acuífero en la región meridional sería menos vulnerable a la contaminación.

Los coeficientes de almacenamiento en las zonas de acuíferos libres tienen valores que fluctúan alrededor de 0,04 y el los acuíferos confinados y semiconfinados el coeficiente de almacenamiento fluctúa alrededor de 0,001 [5].

De acuerdo a un estudio realizado por Mercado Consultants (1996), citado por Huaranca et al. [5], el caudal de ingreso total a los acuíferos de la cuenca sería de unos 66,5 millones de m^3/año, distribuidos principalmente en: infiltración de agua superficial (66%), reabsorción de aguas de irrigación (18%), pérdidas de la red de agua potable y de alcantarillado (16%).

La descarga del acuífero se produce por diferentes vías. De acuerdo al estudio de Mercado Consultants, citado por Huaranca et al. [5], la descarga se produciría por pozos de SEMAPA (21%), pozos privados y vertientes (52%), salidas por los ríos Rocha y Tamborada (10%) y evaporación de los pantanos (17%).

En cuanto a la calidad de las aguas, diversos estudios muestran que se puede distinguir tres grupos en relación a la facies hidro-química. En la región que se extiende desde el río Rocha hacia el límite septentrional de la cuenca se tienen aguas jóvenes, por estar más cerca a la principal zona de recarga. Estas aguas son ricas en iones bicarbonato, magnesio y calcio. La conductividad eléctrica varía entre 113 y 394 μS/cm, lo que indica un bajo contenido de sales disueltas [5][6]. En algunos pozos profundos se detectó presencia de hierro y manganeso indicando características reductoras de las aguas profundas.

En la zona meridional, al Sureste del río Rocha, las aguas tienen características sódicas-carbonatadas. La conductividad varía entre 480 y 580 μS/cm, en algunos casos extremos la conductividad supera los 2.000 μS/cm, mostrando un elevado contenido de sales disueltas. La baja permeabilidad en estos acuíferos lleva a un mayor tiempo de residencia y por ende a un mayor intercambio iónico entre el agua y los sedimentos. Se han detectado condiciones reductoras, debido a la presencia de materia orgánica en los

sedimentos lacustres, que provocan el aumento de las concentraciones de hierro, manganeso y eventualmente arsénico; además provocan la reducción de sulfatos en sulfuros [5].

En la región Suroeste de la cuenca, que corresponde al municipio de Sipe Sipe, las aguas subterráneas se caracterizan por una elevada concentración de sulfatos, provocado por la presencia de rocas calcáreas y arcillas con elevado contenido de yeso. Estas aguas se clasifican como cálcicas magnésicas sulfatadas. La conductividad eléctrica varía entre 250 y 2.100 μS/cm [5] [6].

3.3 Estudio de las características del acuífero del Distrito 9

Con el propósito de estudiar con mayor detalle las características del acuífero ubicado al sur del río Tamborada hasta el límite meridional de la cuenca, zona en que se ubica también el Distrito 9, se realizaron mediciones y análisis de muestras de agua en 25 pozos repartidos en toda esta región. En estos pozos se midieron: la altura (mediante un GPS), la profundidad, el nivel estático (NE), el nivel dinámico (ND) y el caudal. A partir de estos valores se estimaron, el caudal específico y la transmisividad del medio. Los resultados de estas mediciones se detallan en la Tabla 2. A partir de los datos medidos, se elaboró un mapa de líneas isopiezométricas junto con las características hidrogeológicas del acuífero del Distrito 9. Las figuras 1 y 2 muestran este mapa y algunos cortes que muestran las características hidrogeológicas del acuífero. Lamentablemente, no se contó con información suficiente para detallar las líneas isopiezométricas en toda la zona del acuífero, algunas líneas fueron tomadas de estudios previos o simplemente extrapoladas según lo que más razonablemente se puede esperar.

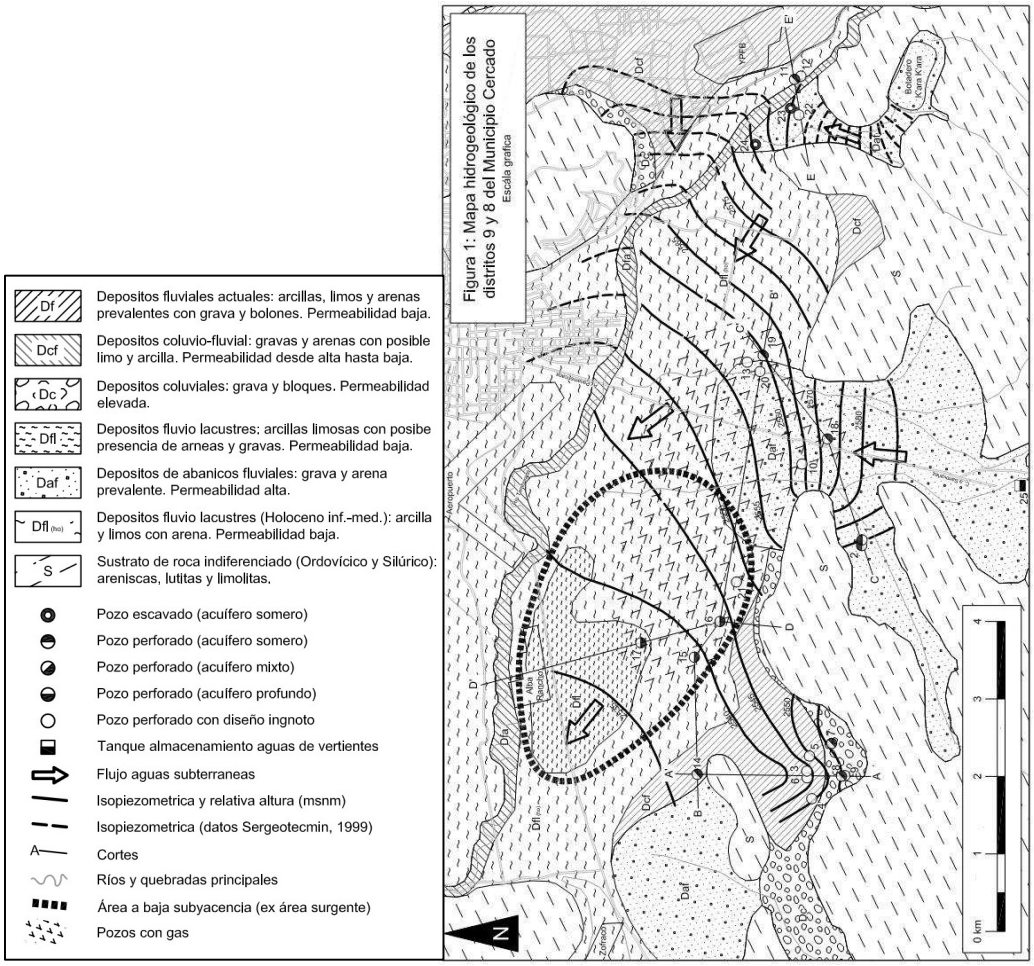

Figura 1: a) Leyenda Mapa hidrogeológico, b) Mapa hidrogeológico de los Distritos 8 y 9 del Municipio del Cercado, Cochabamba.

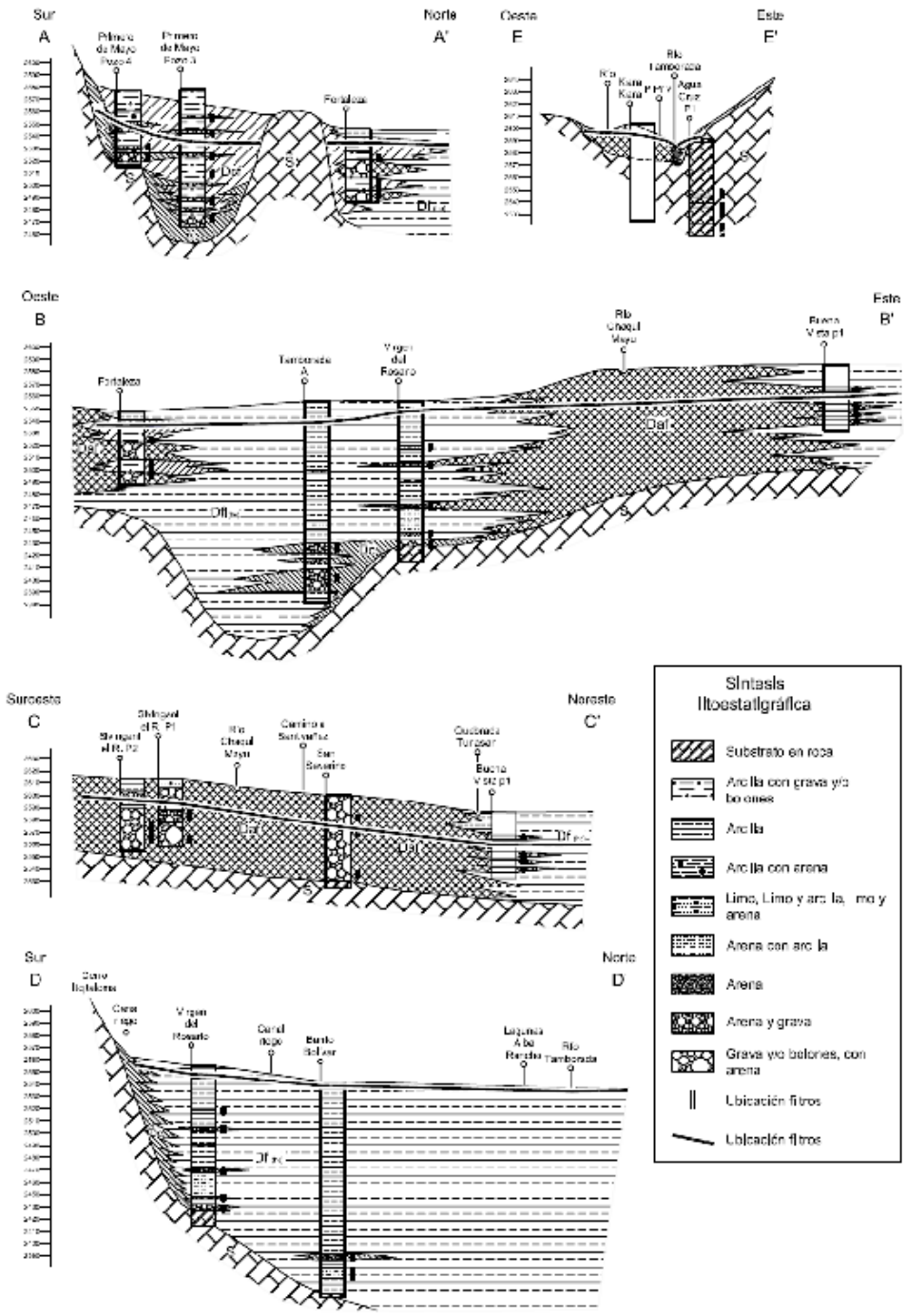

Figura 2: Cortes hidrogeológicos relacionados al mapa hidrogeológico presentado en la Figura 1.

3.3.1 Unidades Hidrogeológicas del acuífero del Distrito 9

Se han distinguido las siguientes unidades hidrogeológicas (entre paréntesis se indica la sigla reportada en el mapa (ver Figura 1)

Sustrato rocoso (S): Abarca todas las formaciones rocosas de edad Ordoviciana y Siluriana. Están constituidas prevalentemente por areniscas, lutitas y limolitas, caracterizadas por permeabilidad primaria muy baja. Es posible la presencia de circulación hídrica subterránea a lo largo de las fracturas (Ej.: Pozo Comité Agua Cruz). Para el fin del presente trabajo, no se considera la circulación hídrica en el sustrato, que viene considerado como impermeable.

Unidad de los Depósitos Fluvio Lacustres Holocénicos (Dflho): Están constituidos por arcillas y limos con posibles capas de arenas y arenas limosas. Se hallan en la porción central del área de estudio, son los lugares con altura inferior. Son sedimentos que se han depositado en ambiente de baja energía (lago). El espesor alcanza a los 160 metros (pozo Comité Barrio Bolívar). Los perfiles estratigráficos disponibles indican que la deposición en el ambiente lacustre ha sido intercalada por raros eventos fluviales testimoniados por capas de arenas de espesor de pocos metros, y que constituyen pequeños acuíferos confinados de productividad muy limitada. En el área de los pozos Tamborada A y Barrio Bolívar ha sido reportada la presencia de varios niveles de arcillas gris-negras enriquecidas con materia orgánica, índice de deposición en lagunas anaerobias.

A esta unidad se añaden los sedimentos fluvio lacustres más recientes, aunque en el mapa han sido distinguidos. Las características geológicas e hidrogeológicas son las mismas. Se hallan al sur de las lagunas de Alba Rancho, en el área altimétricamente más deprimida.

La permeabilidad de esta unidad es muy baja; sin embargo es posible la explotación de los niveles permeables de arena, aunque con caudales bajos.

Unidad de los Depósitos de Abanicos Fluviales (Daf): Se trata de gravas y arenas prevalentes depositadas por ríos con elevada energía. Se encuentran al desfogue de las quebradas mayores en el valle, o sea de los ríos Chaqui Mayu e Higueranimayu y de las quebradas de K'ara K'ara. La granulometría de los sedimentos que los componen disminuye alejándose del desfogue de las quebradas. Hacia el valle se interdigitan con los sedimentos fluvio-lacustres y coluvio-fluviales.

La permeabilidad de esta unidad es, en promedio, alta. Por la ausencia de suelos muy desarrollados, los dos abanicos encontrados pueden constituir el área de recarga más importante de los acuíferos.

Unidad de los Depósitos Coluviales (Dc): Se hallan en las áreas más cercanas a las serranías y son constituidas por el acumulo de bloques y grava. Son espesores variables de sedimentos depositados en ambiente sub-aéreo, con permeabilidad hidráulica elevada.

Unidad de los Depósitos Coluvio-fluviales (Dcf): Son sedimentos que han sido depositados a los pies de las serranías bajo una sedimentación mixta gravitativa y fluvial. Son constituidos por gravas y arenas con limo y arcilla. La permeabilidad es variable en función de la abundancia de matriz fino-limoso-arcillosa, desde alta hasta baja.

Unidad de los Depósitos Fluviales Actuales (Df): Se hallan en los cauces del los ríos Rocha (al oeste del aeropuerto) y Tamborada. Son arenas prevalentes con limo, gravas y bloques. La permeabilidad es variable, en promedio baja. La permeabilidad de estos depósitos, juntamente a la altura del agua de los ríos y al nivel freático de los acuíferos, regula los trasvases de agua entre río y acuífero.

3.3.2 Hidroestratigrafía

Los datos presentados no evidencian una clara separación vertical de acuíferos. La presencia, en muchos lugares, de pozos someros excavados, con profundidad hasta 7-8 m, indica la presencia de pequeños niveles permeables en los primeros metros del subsuelo. Esto sucede inclusive en los lugares donde se hallan los depósitos lacustres, aunque los perfiles estratigráficos no permitan su clara distinción. Sin embargo se trata de niveles de baja productividad que a menudo presentan elevados contenidos de sal. En todos los casos son pozos explotados manualmente o con pequeñas bombas y para uso familiar; no se conocen casos de explotación comunitaria de pozos excavados (o perforados) en los niveles someros.

En las áreas periféricas (áreas de abanico fluvial y de acumulo coluvial) se halla un solo acuífero de tipo libre (freático) caracterizado por la ausencia de capas superficiales impermeables (pozos Sivingani el Rincón, San Severino) o por la presencia de niveles poco espesos de materiales de permeabilidad baja de origen posiblemente fluvio-coluvial (Primero de Mayo, pozo 1).

En las áreas de distribución de los sedimentos fluvio-lacustres, los pozos profundos explotan niveles permeables de espesor muy limitado, constituidos por niveles fluviales o de abanico posiblemente comunicantes con las áreas periféricas de recarga (áreas de abanico y de coluvio). Esta conexión permite la recarga de los niveles explotados, aunque la depresión de los niveles estáticos que manifestaron los pozos desde hace algunos años evidencia una general sobreexplotación.

En síntesis se reconocen las siguientes áreas, distinguidas por la diferente hidroestratigrafía (la distinción ha sido efectuada analizando los perfiles de los pozos, aunque para una correcta y exhaustiva definición sería aconsejable efectuar pruebas de bombeo de larga duración):

• Áreas de abanico y de coluvio: acuífero de tipo libre (San Severino) o tal vez confinado no en presión (ex: Sivingani el Rincón y Primero de Mayo pozo 4). Los sedimentos permeables, de elevada granulometría, apoyan directamente sobre el sustrato. Son las áreas de mayor productividad.

• Áreas de distribución de los depósitos fluvio lacustres: en esta área se hallan los pozos más profundos que explotan lentes y capas de espesor limitado de origen fluvial o

de abanico. Los informes de perforación de Tamborada A y Barrio Bolívar indican que los pozos antes eran surgentes, que indica que explotaban acuíferos en presión. Actualmente, en todos los pozos visitados, los niveles estáticos han bajado tanto que no son más surgentes (Barrio Bolívar: subyacencia de 3 metros).

• Áreas de transición: son las áreas donde los sedimentos de abanico y coluviales están interdigitados a los de origen fluvio-lacustre (Fortaleza, Primero de Mayo pozo 1, Buena Vista pozo 1). Las condiciones hidroestratigraficas son intermedias y se observa una presencia de niveles permeables más abundantes. Los niveles estáticos presentan una subyacencia mayor. La productividad es generalmente mayor debido al mayor espesor de los niveles permeables y a la mayor cercanía de las áreas de posible recarga. Los acuíferos pueden considerarse semiconfinados, no en presión.

3.3.3 Piezometría – campaña medición niveles estáticos

Con el fin de producir un mapa piezométrico más detallado de los disponibles en bibliografía, se ha planteado una campaña de medición de niveles estáticos en los pozos.

Los niveles han sido medidos con un freatímetro eléctrico en los pozos después de haber apagado la bomba por un tiempo siempre superior a la media hora. No ha sido posible apagar las bombas por tiempos superiores, así que en algunos casos es posible que los niveles que han sido medidos se encontraran en ligera recuperación.

Los niveles medidos, con referencia a la altura de la cabecera del pozo y a la altura del agua en metros sobre en nivel del mar, se detallan en la Tabla 2.

Los datos piezométricos, esquematizados en mapa de la Figura 1 indican lo siguiente:

• El sentido general del flujo hídrico subterráneo es desde sur y sur-este hacia el norte-oeste, con un gradiente piezométrico varía entre el 3‰ (área Tamborada) y el 22‰ (área de abanico, San Severino);

• El río Tamborada tiene función drenante, aunque es probable que la baja permeabilidad de los sedimentos fluvio-lacustres y de cauce limiten la posibilidad del trasvaso; con referencia al área de estudio, el río Tamborada constituye la descarga natural del sistema;

• Las áreas de recarga principal están constituidas por los abanicos fluviales, en particular la del río Chaqui Mayu, aunque son ríos temporales que se activan solo en temporada de lluvia;

• Los niveles medidos en los pozos que están aguas abajo de K'ara K'ara indican la presencia de un flujo subterráneo hacia el río Tamborada; los niveles medidos indican un sentido del flujo subterráneo que concuerda con lo que determinó el estudio de SERGEOTECMIN [9];

• En el área de Primero de Mayo y El Palmar, la abundante presencia de pozos es posiblemente la causa del cono de sobre-explotación que se observa en el mapa; las características del fenómeno de sobre-explotación puede ser parcialmente exagerado por

la medición de niveles en recuperación, o por la presencia de fenómenos de interferencia entre los pozos;

• En las áreas donde se hallaban los pozos surgentes (Barrio Bolívar), la subyacencia medida está sobre los 3 metros desde la cota del terreno; no se da más la presencia de pozos surgentes, que indica una general disminución de la presión de los niveles confinados (ver parágrafo 2.5).

• Entre K'ara K'ara y Buena Vista el mapa piezométrico elaborado no tiene puntos de control y por tanto no es fiable, aunque los datos publicados por SERGEOTECMIN [9] concuerdan en la geometría de las curvas isopiezométricas y, consecuentemente, en la dirección del flujo subterráneo.

Con referencia a los pozos Tamborada A, Barrio Bolívar y 14 de Septiembre, hay informaciones que indican que, en los primeros meses después de la perforación, estos pozos eran surgentes. Actualmente, en los tres casos, los niveles estáticos están más bajos que la cabeza del pozo, la disminución del nivel estático que presentan estos pozos es de >17,6 m, >3,5 m y >17,3 m, respectivamente. Actualmente, ya no existes pozos surgentes en la zona.

A pesar de las limitaciones en cuanto a información, el mapa elaborado muestra claramente que la aguas del acuífero fluyen en dirección Noroeste, siguiendo líneas de flujo casi paralelas al curso del Rio Tamborada. En el límite meridional del acuífero se distinguen zonas con depósitos coluviales (Dc) de grava y bloque de permeabilidad alta y depósitos de abanicos fluviales de grava y arena, ambos de permeabilidad alta. Estas regiones se constituyen sin duda en las principales regiones de recarga del acuífero. Por analogía con lo que sucede en la zona del acuífero del Valle Central, en esta región tendríamos acuíferos semiconfinados. Más hacia el Norte se tienen depósitos fluvio-lacustres de arcillas y limos con arena, de menor permeabilidad. En esta región el acuífero está confinado con una capa de arcilla que varía en espesor de unos metros a varias decenas de metros.

3.3.4 Parámetros hidro-dinámicos

Para una caracterización preliminar de la transmisividad hidráulica de los acuíferos se calculó el caudal específico (Qe) de algunos pozos distribuidos en el área de estudio. El valor del caudal específico depende de la transmisividad hidráulica del acuífero y de la eficiencia hidráulica del pozo mismo. Debido a que todos los pozos son de pequeño diámetro (4-6"), y con una longitud total de los filtros modesta, es probable que los pozos tengan una eficiencia muy baja; por lo tanto los parámetros calculados constituyen una indicación sólo relativa de las variaciones de transmisividad. Los datos calculados han sido reportados en la Tabla 2.

En general los caudales específicos observados son muy bajos, siendo el valor medio de 0,84 l s^{-1} m^{-1} (8.4E-4 m^2 s^{-1}). El valor mínimo es relativo al pozo del Comité San José de la Banda Plan B Alambrado (0,11 l s^{-1} m^{-1}), el máximo al pozo del Comité Fortaleza (7,46 l s^{-1} m^{-1}). Tomando en cuenta que en general todos los pozos necesitan

operaciones de limpieza con frecuencia anual (comunicación personal de los dirigentes de los sistemas comunitarios), se puede concluir que el nivel de obstrucciones de los filtros puede influir grandemente en el cálculo del caudal específico, aunque es observable una zonificación que indica que las áreas de abanico fluvial corresponden a las áreas más permeables y con transmisividad hidráulica más elevada.

3.3.5 Balance hídrico

Se elaboró un balance hídrico preliminar con la información disponible. Según este balance la recarga del acuífero estaría entre 2,25 y 7,64 millones de m^3/año, repartidos entre al aporte de infiltración directa del agua de lluvia (21 a 49%), infiltración del agua de riego (3 a 5%) y a la infiltración a partir de los ríos que llegan de las serranías del sur (46 a 76%). La descarga del acuífero sería de unos 9,75 a 17,8 millones de m^3/año, distribuidos en: consumo de agua de pozo (10 a 17%), evapotranspiración (16 a 29%) y drenaje a través del río Tamborada (54 a 74%). La mayor incertidumbre se refiere a las estimaciones de infiltración a partir de los ríos y el drenaje del acuífero a través del río Tamborada. Sería necesario hacer mediciones de caudal para reducir esta incertidumbre.

Los escasos datos históricos acerca de los niveles (parágrafo 3.3.3) indican que en los últimos años la altura piezométrica ha disminuido de manera marcada (hasta más de 17 metros en los pozos 14 Septiembre y Tamborada A), confirmando la estimación del balance hídrico que indica la presencia de un déficit hídrico.

Tabla 2. Parámetros hidráulicos de los pozos estudiados en la zona del acuífero del Distrito 9.

Nº	Pozo	Coordenadas UTM		Profundidad [m]	Altura [msnm]	NE [m]	Nivel Piezométrico [msnm]	ND [m]	Depr [m]	Caudal [L s^{-1}]	Caudal Específico [L s^{-1}m^{-1}]
		x gps	y gps								
1	Sivingani el Rincón, pozo 1	799597	8066177	52	2.613	20,1	2.592,9	23,3	3,2	1,35	0,42
2	Sivingani el Rincón, pozo 2	799523	8066182	52	2.614	21,2	2.592,8	24,4	3,2	0,93	0,29
3	El Palmar, pozo 1	796602	8066992	120	2.563	29,2	2.533,8	37,8	8,6	1,13	0,13
4	El Palmar, pozo 2	796246	8066927	120	2.564	11,6	2.552,4	16,2	4,6	1,59	0,35
5	1° Mayo, pozo 1	796797	8066957	80	2.564	13,8	2.550,2				
6	1° Mayo, pozo 2	796515	8066987	80	2.564						
7	1° Mayo, pozo 3	796960	8066671	110	2.578						
8	1° Mayo, pozo 4	796537	8066530	62	2.577	25,0	2.552,0				
9	1° Mayo, pozo 5	796540	8066517	75	2.577						
10	Mejillones	800412	8066941	90	2.591	32,2	2.558,8	41,4	9,2	3,45	0,37
11	Agua Cruz, pozo 1	80553	8066944		2.590						
12	Agua Cruz, pozo 2	805579	8066863		2.590	31,8	2.558,2				
13	San Jose de la Banda, Plan B, Alambr.	801699	8067652		2.582	28,4	2.553,6	35,4	7,0	0,74	0,11
14	Fortaleza	796572	8068304	60	2.546	11,6	2.534,4	12,0	0,4	2,99	7,46
15	Tamborada A	797985	8068340	164	2.555	17,6	2.537,4	30,4	12,8	1,46	0,11
16	Virgen del Rosario	798416	8067981	121	2.555	7,6	2.547,4	9,6	2,0	1,00	0,50
17	Barrio Bolívar	798256	8068995	170	2.548	3,5	2.544,5	14,0	10,5	1,37	0,13
18	San Severino	800711	8066587	70	2.600	25,2	2.574,8	41,8	16,6	1,89	0,11
19	Buena Vista, pozo 1	801784	8067446	54	2.586	27,2	2.558,8	31	3,8		
20	Buena Vista, pozo 2	801579	8067488	106	2.588	29,0	2.559,0	31,2	2,2	1,69	0,77
21	14 Septiembre	798927	8067778	140	2.563	17,3	2.545,7	31,7	14,4	1,56	0,11
22	Comité K'ara K'ara	805089	8066949	80	2.609	9,2	2.599,8				
23	Pozo privado Doña Francisca	804698	8067552		2.590	4,0	2.586,0				
24	Pozo privado Doña Guadalupe	805175	8067057	4	2.602	3,0	2.599,0				
25	Chaqui Mayu (vertientes)	800296	8064138		2.692						

3.4 Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero del distrito 9

Con toda la información recolectada en el estudio de los pozos del Distrito 9, se evaluó la vulnerabilidad del acuífero utilizando el método GOD. En este análisis se pudo evidenciar que los factores determinantes en la vulnerabilidad del acuífero del Distrito 9 son: el nivel de confinamiento del acuífero y el sustrato suprayacente del acuífero, en menor grado influye la profundidad del agua subterránea ya que en casi todos los casos la profundidad es mayor a los 5 m. La Figura 3 muestra el mapa de vulnerabilidades según el método GOD.

Los parámetros utilizados para el cálculo del índice de vulnerabilidad están en la tabla siguiente:

Tabla 3. Parámetros utilizados para el cálculo el índice de vulnerabilidad del acuífero del Distrito 9.

Descripción	Valor parámetro	Área de distribución
		G – Grado de confinamiento hidráulico
Confinado	0,2	Depósitos fluvio-lacustres adyacentes al río Tamborada; hacia el Sur se extienden hasta los cuerpos sedimentarios de origen fluvial (abanicos) y fluvio-coluvial.
Semiconfinado	0,4	Área intermedia de interdigitación entre sedimentos de abanico y coluviales con los fluvio-lacustres. Le presencia de las capas confinantes es discontinua.
No confinado (entre libre e cubierto)	0,8	Área de distribución de los depósitos de abanico y coluviales, sin presencia de capas someras impermeables susceptibles de reducir la vulnerabilidad del acuífero subyacente.
		O – Calidad del sustrato suprayacente
Arcillas lacustres	0,3	Área altimétricamente más deprimida donde se hallan los depósitos fluvio-lacustres, caracterizados por un elevado contenido de arcilla.
Limos aluviales	0,5	Son las áreas de distribución de los depósitos fluvio-coluviales, caracterizados por un elevado contenido de matriz fina, limosa, que baja la permeabilidad.
Arenas finas	0,6	Porciones distales de los abanicos, caracterizadas por un contenido mayor de matriz fina e intercalaciones de sedimentos fluvio- lacustres.
Arenas aluviales con grava	0,7	Abanicos fluviales constituidos por arenas y gravas prevalentes y bajo contenido de matriz fina.
Gravas coluviales	0,8	Áreas cercanas a las serranías constituidas por el acumulo por gravedad de grava y bloques, sin matriz fina.
		D – Distancia entre la cota del terreno y el nivel del agua subterránea (acuíferos no confinados) o el techo de los acuíferos confinados
>50 m	0,6	Áreas de acuíferos **confinados** más cercanas al río Tamborada: los niveles acuíferos explotados alcanzan la profundidades entre 100 y 140 metros (Tamborada A y Barrio Bolívar)
20-50 m	0,7	Áreas de acuíferos **confinados** más hacia el sur, caracterizados por la presencia de intercalaciones de sedimentos de abanico y de sedimentos coluvio-fluviales más abundantes y superficiales. Áreas de acuíferos **no confinados** con elevada subyacencia del nivel freático (abanico Chaqui Mayu)

5-20 m	0,8	Áreas de acuíferos **no confinados** con reducida subyacencia del nivel freático (Primero de Mayo, Valle Hermoso)
<5 m	0,9	Áreas con acuífero libre a baja subyacencia (abanico de K'ara K'ara, Valle Hermoso)

El índice de vulnerabilidad calculado con el método GOD, desde los parámetros indicados en la tabla arriba, abarca valores entre 0,036 (despreciable) y 0,52 (alta).

Las zonas más vulnerables, con una vulnerabilidad alta (entre 0,5 y 0,7) se encuentran en los abanicos aluviales situados en la parte sur del valle. Lamentablemente, la zona en que se encuentra situado el relleno sanitario de K'ara K'ara está justo en una zona de vulnerabilidad alta, con un índice GOD de 0,504; esto corrobora la necesidad de cerrar este botadero y realizar un cierre técnico que permita reducir la contaminación que genera. El valor más elevado del índice GOD es de 0,52 y se lo obtuvo en la región de Acidumarca, al Suroeste de la cuenca. Las zonas de vulnerabilidad alta representan un 7% de la zona correspondiente al acuífero de la zona sur. Será importante hacer un inventario de las fuentes de emisión de contaminantes en esta área. De acuerdo a información preliminar, la principal fuente de contaminación serían los sistemas sanitarios in situ (pozos ciegos y otros) que utilizan las poblaciones asentadas en estas zonas. Se trata de pequeñas urbanizaciones que se han desarrollado sobre el camino a Santiváñez y hacia el Suroeste de la cuenca.

Por las características del suelo, las regiones con vulnerabilidad media (entre 0,3 y 0,5) se encuentran en la región meridional de acuífero, asociadas con depósitos aluviales y fluviales relativamente gruesos. Representa una proporción de un 15% en superficie de la región del acuífero. En estas zonas se tienen también poblaciones asentadas y actividad agrícola.

La región del acuífero situada en la región central y hacia el norte del Distrito 9 tiene una vulnerabilidad baja a despreciable, esto debido al confinamiento del acuífero con una capa de arcilla de varios metros de espesor. En esta región se tiene una importante actividad agrícola y varias urbanizaciones.

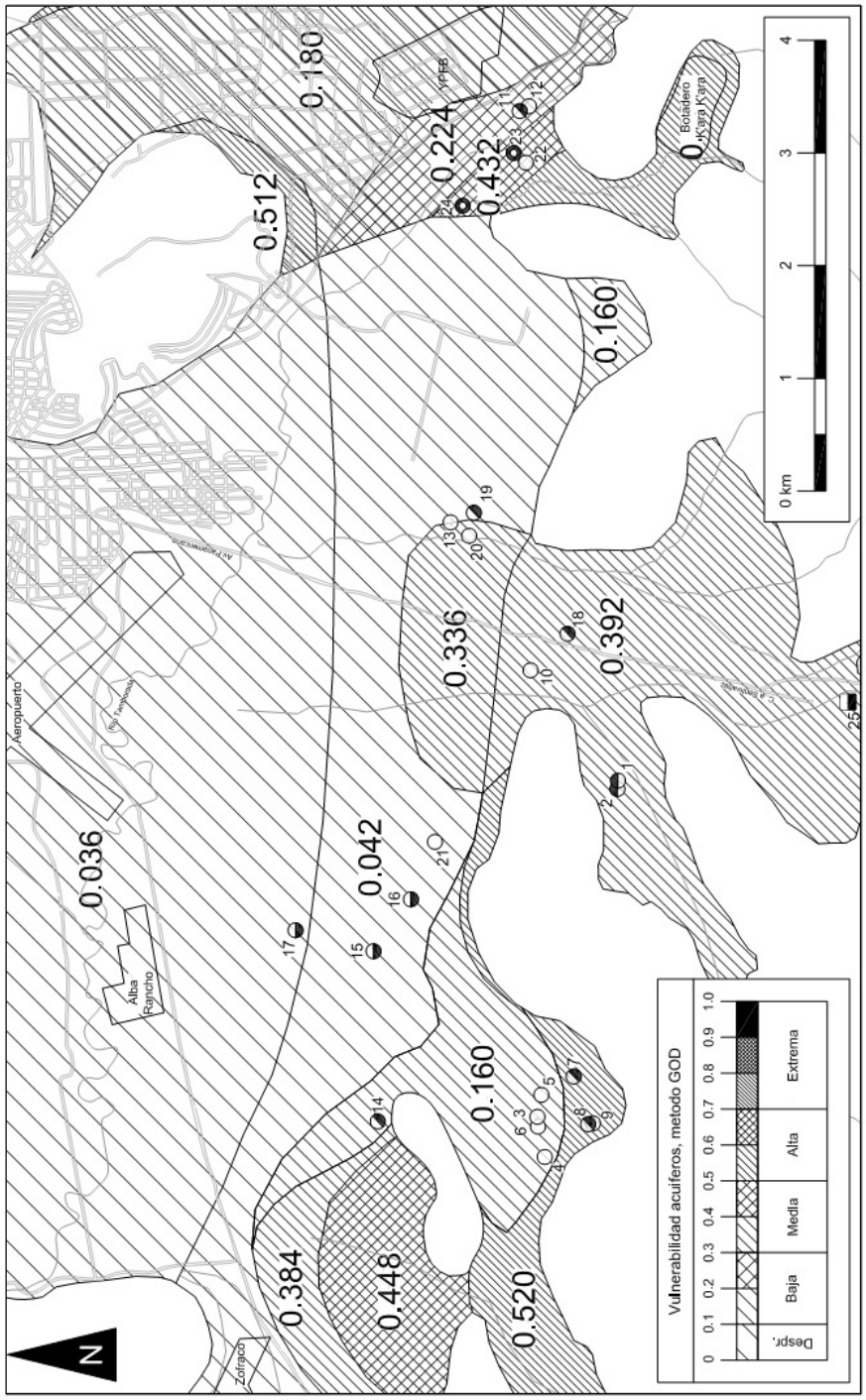

Figura 3: Mapa de vulnerabilidad según el método GOD para el acuífero del Distrito 9.

3.5 Análisis de fuentes y cargas contaminantes

Las principales fuentes de contaminación que se han podido detectar en las zonas son las siguientes:

Saneamiento in situ: la mayor parte de la población que habita el Distrito 9 no cuenta con sistemas de alcantarillado, todos los sistemas que existen son construidos por la misma población y no recogen las aguas hacia el sistema de alcantarillado de SEMAPA. La población utiliza letrinas, pozos sépticos o pozos ciegos para disponer sus aguas servidas. Estas aguas representan una fuente persistente de contaminantes que puede llegar a contaminar el acuífero, sobre todo en las zonas más vulnerables. Los principales contaminantes emitidos por estas fuentes son: nitratos, microorganismos fecales, amonio y trazas de hidrocarburos sintéticos.

La población del distrito 9 es de unos 46.268 habitantes con una densidad poblacional de 32,12 hab ha^{-1} [1]. En parte, esta población se concentra en algunos centros poblados y el resto está dispersa por toda la zona del acuífero, sobre todo aquellas familias que se dedican a la agricultura. Algunas urbanizaciones se han ubicado justamente en las zonas más vulnerables del acuífero, en estos casos el potencial de contaminación de esta fuente es elevado. Considerando la población y la producción promedio de aguas servidas de 30 L/(hab d), podemos estimar que el aporte de estos efluentes a la recarga del acuífero sería de unos 0,51 10^3 m^3/año, esta es una proporción muy pequeña en relación a los flujos de recarga del acuífero. Por ello, esta fuente de emisiones contaminantes será importante solamente en las zonas de alta vulnerabilidad del acuífero y donde la densidad poblacional sea elevada.

Terrenos de cultivo bajo riego y ganadería: en la zona existen entre 1.300 y 1.500 ha de terrenos de cultivo bajo riego y actividades de cría de ganado lechero principalmente y algunas granjas de cría de ganado porcino. Estas actividades pueden provocar la contaminación de las aguas con nutrientes (nitratos fosfatos, potasio), materia orgánica, patógenos fecales y otros microorganismos y, pesticidas. Sin embargo el riesgo de contaminación por estas fuentes puede ser menor por el hecho de que estas actividades se encuentran, en su mayor parte, en las zonas con una vulnerabilidad baja a despreciable del acuífero.

Lagunas de oxidación de aguas residuales: en la zona norte del acuífero, en el borde sur del río Tamborada se encuentran las lagunas de oxidación de Alba Rancho, que recoge las aguas servidas de la ciudad de Cochabamba. Estas lagunas cubren un superficie de 27,4 ha aproximadamente. Se estima que la tasa de infiltración en estas lagunas es equivalente a unos 10 a 20 mm/día. Considerando de estos valores podemos estimar que la infiltración a partir de las lagunas sería de unos 1 a 2 millones de m^3/año. Existe el peligro de que estas lagunas generen contaminación similar al saneamiento in situ para la zona de acuífero que se encuentra bajo la influencia de estas lagunas. Sin embargo, se encuentran en la zona donde los niveles piezométricos son más bajos y la vulnerabilidad del acuífero es despreciable según el índice GOD. Existe la posibilidad que la mayor parte del agua que infiltra de las lagunas termine siendo drenada al río

Tamborada que se encuentra justo en el límite norte de las lagunas. Algunos estudios realizados en pozos de la zona descartan este tipo de contaminación [6].

Infiltración a partir de cuerpos de agua contaminados: El río Tamborada recibe una serie de descargas contaminantes que incluyen el vertedero de K'ara K'ara, efluentes industriales y sistemas de alcantarillas que no reciben tratamiento. Estas descargan hacen que este río esté fuertemente contaminado, por ello existe el peligro de que la infiltración de sus aguas contaminen el acuífero. El río Rocha que pasa más al norte es también un cuerpo de agua fuertemente contaminado por las descargas de aguas servidas domésticas y aguas industriales, a su paso por la ciudad de Cochabamba [10]. A la altura del empalme con el río Tamborada sus aguas tienen una fuerte carga de contaminantes en materia orgánica, sulfuros, y sales disueltas. Debido a la contaminación de estos ríos, existe el peligro de que sean fuente de contaminación del acuífero. Sin embargo, al actuar estos ríos como drenaje del acuífero, el riesgo se reduce y podría ser significativo sólo para los acuíferos someros.

Los ríos que nacen de la cordillera Sur son recargas importantes del acuífero por lo que toda contaminación presente en ellos podría terminar contaminando el acuífero. También existen varias acequias en la zona que podrían ser fuente de contaminación.

Fuentes industriales: existen algunas empresas industriales con importantes emisiones de residuos líquidos en la zona. Las más significativas se detallan en la Tabla 4. Entre las industrias presentes en la zona tenemos varias dedicadas al procesamiento de carnes y mataderos, plantas procesadoras de alimentos (lácteos y bebidas), una curtiembre, dos fábricas de plásticos y una metal mecánica. Este tipo de industrias generan residuos líquidos contaminados con materia orgánica, sales disueltas, sustancias orgánicas sintéticas, nutrientes y patógenos fecales. Lamentablemente, no se tiene mucha información sobre las concentraciones de los contaminantes y las cantidades de sus efluentes.

Como se observa en esta tabla, existen varias empresas que vierten sus residuos líquidos en los ríos Tamborada y Rocha; al ser estos ríos drenajes del acuífero, la posibilidad de que esta contaminación llegue al acuífero es pequeña, salvo un cambio en las características hidrogeológicas del acuífero. Por otra parte, algunas empresas vierten sus aguas al rio Chaqui Mayu que sí es una recarga para el acuífero, la contaminación vertida en este río podría llegar a contaminar el acuífero.

Tabla 4. Detalles de actividades industriales que generan residuos líquidos en la zona del acuífero del distrito 9.

Nombre	Tipo de actividad	Dirección	Comentarios
EMBECA	Matadero de Municipal	A dos cuadras del puente al final de la Av. Panamericana, entrar 2 cuadras al Oeste.	Vierte aguas al río Chaqui Mayu que desemboca en el río Tamborada.
IMBA	Planta faeneadora de pollos.	Sobre la vía férrea a la altura del km 5 de la Av. Blanco Galindo.	No realiza ningún tratamiento y vierte al río Rocha luego de pasar por los predios de la Fabrica de plásticos RABI
RABI	Fábrica de plásticos	Sobre la vía férrea a la altura del km 5 de la Av. Blanco Galindo.	
PLASBURG	Fábrica de plásticos	Al lado del Politécnico Militar. km 4,5 Av. Petrolera Oeste.	
Curtiembre Valenzuela	Curtiembre	Camino a La Maica Norte. Al lado del Aeropuerto.	
PROLAN	Planta productora de leche saborizada	Asidumarca.	
sin dato del nombre	Fábrica de gaseosas	Zona Pucara. Molle Molle. Cerca al río Chaqui Mayu.	
San Jorge	Fábrica de chorizos	A dos cuadras del puente al final de la Av. Panamericana, entrar 3 cuadras al Oeste.	Cerca de EMBECA.
sin dato del nombre	Fábrica de chorizos	2 cuadras al Oeste del camino a Santivañez, parada del Taxi-trufi 103.	Los mismos propietarios de la fábrica SAN JORGE.
sin dato del nombre	Peladora de cereales	A 500 m al Este del puente de Molle Molle sobre el río Tamborada.	Vierte agua residual directamente al río Tamborada.
OTB Magisterio	Tanque de decantación de aguas de alcantarillado doméstico	Vierte agua residual al río Tamborada.	El tanque colapsa y vierte al río Tamborada.
CIFEMA	Metal mecánica	A tres cuadras al Oeste de la Av. Petrolera km 4,5.	

3.6 Diagnóstico de la calidad de agua del acuífero y análisis de los procesos de contaminación del acuífero

Los análisis de las características hidro-químicas de las aguas subterráneas se han desarrollado en dos fases. La primera fase consistió en la medición de parámetros básicos (CE, pH, T) y la evaluación de las características organolépticas. La segunda fase consistió en el muestreo de aguas para análisis físico-químicos, que han sido efectuadas por el Laboratorio C.A.S.A. de la Universidad Mayor de San Simón (Cochabamba).

3.6.1 Características de las obras de captación

La mayoría de los puntos de muestreo y/o medida de los niveles están constituidos por pozos perforados, de pequeño diámetro (4", solo un pozo de 6"). La profundidad de los pozos está entre 50 y 170 m. La camisa de los pozos es de acero galvanizado y solo en un caso se encuentra camisa en PVC (de 6"). Los sistemas de bombeo están constituidos por bombas de pequeño caudal de 3", con tubería de desfogue de 1 ½" – 2" de diámetro. El caudal extraído varía entre 0,93 y 3,45 L s^{-1} con un promedio de 1,63 L s^{-1}, en los pozos estudiados. Ninguno de los pozos estudiados cuenta con macromedidor instalado, así que la medición del caudal de uso no es muy confiable. La medición de los niveles en los pozos no siempre es factible sin retirar la bomba, por el uso de tapas de cabecera de pozo no equipadas con aberturas. Solo algunos pozos tienen un grifo para la toma de muestras. Casi todos los pozos tienen su propio cuarto de protección, cerrados con candados. En dos casos los pozos estaban al aire sin protección. La presencia de sello sanitario no es uniforme.

Los dos pozos escavados visitados (OTB Agrario de K'ara K'ara) están conformados por huecos de 0,5-1,0 m de diámetro y profundidad sobre los 4 m. Uno de ellos tiene camisa en ladrillos perforados, el otro tiene paredes en tierra. En los dos casos no hay forma de protección contra a la infiltración. Uno de los pozos está siendo explotado con balde, el otro con una pequeña bomba centrifuga de eje horizontal.

Las únicas dos vertientes explotadas que han sido visitadas son las del Comité Chaqui Mayu. En este caso solo se han medido los parámetros hidroquímicos básicos en el tanque de almacenamiento. En el mapa se ubica el tanque de almacenamiento, donde se han medido los parámetros. No se indica la ubicación de las vertientes, que se hallan en las serranías al Sur del tanque.

3.6.2 Parámetros hidroquímicos básicos y características organolépticas

Durante la primera ronda de visitas a los pozos, donde fue técnicamente posible, se midieron los parámetros hidroquímicos básicos: pH, Conductividad eléctrica específica, Temperatura. El pH ha sido medido con un comparador óptico de campo que abarca valores entre 6.8 y 8.2; la conductividad y temperatura con un equipo medidor portátil. La Tabla 5 detalla los valores medidos. Los valores de TDS (Total Dissolved Solids) han sido estimados con un factor de conversión medio igual a 0,67 ppm por µS/cm. Las celdas sin valores indican los casos en que no ha sido posible la medición. Los parámetros en negrilla son lo que exceden los límites de la norma NB512/04 para aguas potables.

Tabla 5. Datos hidro-químicos básicos y organolépticos medidos a las cabeceras de los pozos.

id	Pozo	Profundidad [m]	Nivel estático [m]	pH	CE [µS/cm]	TDS [ppm]	Temp [°C]	Color	Olor
1	Sivingani el Rincón, pozo 1	52	20,1	6,8	463	310	21,2	No	No
2	Sivingani el Rincón, pozo 2	52	21,2	**<6,8**	262	176	21,1	**amarillo**	No
3	El Palmar, pozo 1	120	29,2	7,7	647	433	22,2	No	No
4	El Palmar, pozo 2	120	11,6	7,2	1.111	744	22,2	No	No
5	1° Mayo, pozo 1	80	13,8	7,0	895	600	23,8	**amarillo suave**	No
6	1° Mayo, pozo 2	80	-	6,8	760	509	22	No	No
7	1° Mayo, pozo 3	110	-	-	-	-	-	-	-
8	1° Mayo, pozo 4	62	25,0	-	-	-	-	-	-
9	1° Mayo, pozo 5	75	-	-	-	-	-	-	-
10	Mejillones	90	32,2	7,0	487	326	22,5	No	No
11	Agua Cruz, pozo 1	80	-	7,4	**1.883**	**1.262**	24,1	**amarillo intenso**	**hierro**
12	Agua Cruz, pozo 2	-	31,8	-	-	-	-	-	-
13	San José de la Banda, Plan B, Alambr.	-	28,4	8,0	883	592	22,9	No	**azufre**
14	Fortaleza	60	11,6	7,8	694	465	24,2	No	No
15	Tamborada A	164	17,6	7,7	762	511	28,2	**GAS**	**azufre**
16	Virgen del Rosario	121	7,6	7,3	1.216	815	24,9	No	**azufre**
17	Barrio Bolívar	170	3,5	7,0	890	596	30,2	**GAS**	**azufre (suave)**
18	San Severino	70	25,2	6,7	548	367	23,4	**GAS**	No
19	Buena Vista, pozo 1	54	27,2	7,5	895	600	23,3	No	No
20	Buena Vista, pozo 2	106	29,0	7,2	1.096	734	22,4	No	No
21	14 Septiembre	140	17,3	7,8	649	435	25,8	No	**azufre (intenso)**
22	Comité K'ara K'ara	80	9,2	-	-		-	-	-
23	Pozo privado Doña Francisca	excavado	4,0	**<6,8**	**2.990**	**2.003**	20,6	No	No
24	Pozo privado Doña Guadalupe	4	3,0	7,2	**4.670**	**3.129**	19,5	No	No
25	Chaqui Mayu (vertientes)	-	-	7,5	239	160	21,7	No	No

En cuanto a la conductividad eléctrica específica, el valor mínimo ha sido registrado en el tanque que almacena las aguas de las vertientes del Comité Chaqui Mayu. Aguas abajo, los valores más bajos corresponden a los pozos Sivingani el Rincón (1 y 2) San Severino y Mejillones. En el contexto de llanura, los valores medidos son en general altos, hacia el límite de la norma boliviana (Virgen de Rosario, 1.216 µS/cm). En el área de K'ara K'ara y Agua Cruz se hallan los valores máximos, todos arriba del límite de la norma NB 512/04 (1.500 µS/cm). Los pozos en izquierda hidrográfica, que representan el flujo de las aguas que bajan en los sedimentos de abanico de K'ara K'ara, son los que alcanzan niveles mayores (4.670 µS/cm, pozo Doña Guadalupe).

Los pozos excavados que explotan niveles someros con agua salada están difundidos en varios lugares del área de estudio. Los fenómenos más intensos se hallan alrededor del Comité Fortaleza y en el área de K'ara K'ara y Agua Cruz, aunque refieren problemas de salinidad también en Itocta, San Severino y El Palmar.

En el caso de Fortaleza, como indican también Renner y Velasco [8], la salinización de las primeras capas de suelo es probablemente debido a fenómenos de subida capilar de agua contenida en niveles acuíferos someros.

En el caso de K'ara K'ara, el fenómeno de salinización no se presenta solamente en los pozos excavados (que por lo tanto explotan acuíferos que pueden sufrir una concentración de sales por efecto de subida capilar) sino también pozos profundos (ej. Pozo Comité Agua Cruz). En este caso es posible que el origen de la presencia de sales (indicada aún por los valores de conductividad eléctrica/TDS) sea diferente (posible contaminación antrópica).

Se ha encontrado coloración amarilla del agua en tres casos: Agua Cruz pozo 1, Sivingani el Rincón pozo 2 y Primero de Mayo pozo 1; presumiblemente por presencia de hierro. Solo en el primero caso (Agua Cruz pozo 1) la intensidad del color ha aumentado luego de unos minutos de oxidación de la muestra. En los otros casos, hasta una hora después de la toma de las muestras, el color se mantuvo con la misma intensidad.

Se detectó presencia de olores a azufre en pozos distribuidos por el área de Tamborada, zona de Molle Molle (solamente el pozo del sistema San José de la Banda Plan B Alambrado) y Santa Vera Cruz. El olor más intenso se ha encontrado en los pozos de los sistemas de 14 Septiembre y Agua Cruz.

La presencia de gas (en forma de burbujas) ha sido encontrada en tres casos, y solo en dos asociada con la presencia de olor de azufre (Tamborada A y Barrio Bolívar). En el caso del pozo de San Severino, el gas, presente con abundancia, no tiene olor. Es posible que estos gases se deban a carbonatos disueltos.

3.6.3 Análisis químico de muestras de agua

Para una evaluación directa de la calidad del agua del acuífero se tomaron 17 muestras de agua representativas de 20 pozos (Sivingani el Rincón: 1 muestra para 2 pozos; Primero de Mayo: 2 muestras, una de estas representativa de 3 pozos, la otra de 1 pozo) y se analizaron varios parámetros físico-químicos relevantes. Los resultados de estos análisis se muestran en la Tabla 6. De las 17 muestras analizadas, 11 no cumplen con todos los valores límite establecidos por la NB-512/04 para los parámetros fisicoquímicos del agua potable.

Los análisis químicos de aguas han permitido evaluar la calidad de las fuentes explotadas. En síntesis se puede clasificar los pozos estudiados en cuatro áreas con características similares en cuanto a la calidad fisicoquímica de sus aguas (ver Figura 4).

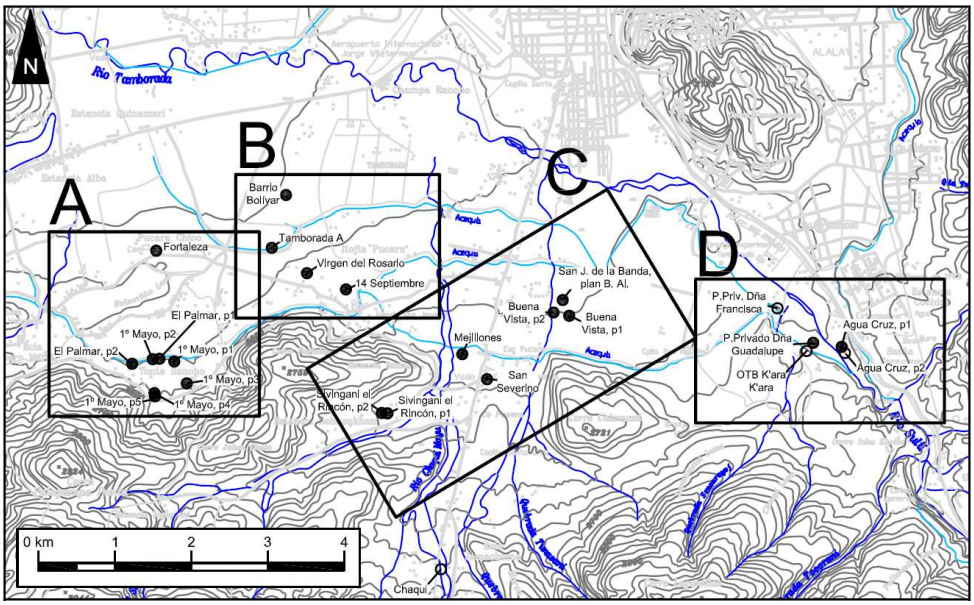

Figura 4: Ubicación de los pozos en los que se realizaron análisis de parámetros fisicoquímicos. En la figura se distinguen cuatro áreas en las que se ubican pozos cuyas aguas tienen características fisicoquímicas similares.

Área A (Primero de Mayo – El Palmar – Fortaleza)

En el área se han analizados 5 muestras de agua. La calidad es por lo general buena, aunque 1 pozo (Fortaleza) no cumple con los límites de la Norma Boliviana de Aguas Potables (NB512/04). Entre Primero de Mayo y El Palmar, todos los pozos cumplen con los requisitos de calidad. Está presente Nitrógeno Amoniacal en concentración limitada, que indica una posible presencia de contaminación producida por la ausencia de sistemas de alcantarillado. El pozo El Palmar Nº 2 presenta un contenido mayor de cloruros no encontrado en los pozos cercanos, que indica una posible presencia de una contaminación puntual debida posiblemente a una incorrecta construcción del sello sanitario.

Se recomienda priorizar la construcción de sistemas de alcantarillado o de obras análogas, para reducir el riesgo de contaminación de las aguas, considerando también el gran número de usuarios. Para el pozo El Palmar 2 es aconsejable monitorear las variaciones de calidad de aguas y, en caso de empeoramiento, evaluar la posibilidad de intervenir para desviar las aguas superficiales potencialmente contaminantes.

La variación de los niveles piezométricos indican también una evidente sobre-explotación del acuífero. Es fuertemente aconsejable pensar a la instalación de macromedidores a la salida de los pozos para monitorear los volúmenes explotados, en relación a las variaciones de los niveles, que deberían ser medidos con frecuencia mensual o bi-mensual.

El pozo de Fortaleza no cumple con los límites de la norma, por la presencia de Nitrógeno Amoniacal en concentración elevada. Es posible que la presencia de Nitrógeno Amoniacal sea debida a la presencia del cementerio cercano, aunque no se excluye que se deba a procesos de contaminación por ausencia de alcantarillado. Es aconsejable monitorear el contenido de Nitrógeno Amoniacal, juntamente a los otros parámetros que generalmente están conectados a contaminación por cementerios, o sea Sulfatos, Sulfitos, Nitritos y Nitratos, aunque el análisis efectuado no ha indicado la presencia de estas sustancias. Finalmente, para reducir el contenido de Nitrógeno Amoniacal, es aconsejable airear el agua antes que consumirla.

Área B – Itocta (14 de Septiembre – Virgen del Rosario – Tamborada A – Barrio Bolívar)

Ninguno los pozos analizados en esta área cumple con la Norma Boliviana de aguas potables, debido a la presencia de Nitrógeno Amoniacal en concentración elevada. Los pozos de Virgen del Rosario y de 14 de Septiembre presentan un contenido de Nitrógeno Amoniacal entre 2 y 3 veces lo recomendado; sin embargo los pozos Tamborada A y Barrio Bolívar superan los valores de la NB512/04 en hasta 30 veces.

La presencia de Nitrógeno Amoniacal es probablemente debido a las condiciones químicas de los niveles acuíferos explotados, que son muy profundos y se hallan en condiciones anóxicas. La presencia de metales como Hierro y Manganeso, aunque no detectados por los análisis efectuados, ha sido comprobada en análisis previos, confirmando la característica hidro-química de los acuíferos. La contaminación es, por lo tanto, de origen natural, aunque no se excluye la posible contaminación por aguas servidas, como indican análisis previos que hallaban elevados contenidos de bacterias coliformes.

Para comprobar el origen natural de la contaminación, se aconseja seguir monitoreando la calidad de las aguas explotadas, juntamente al contenido de Hierro, Manganeso, Arsénico y Sulfuros. Comprobar el origen natural de la contaminación puede permitir decir que la perforación de nuevos pozos en el mismo lugar puede contar con el mismo problema y, por lo tanto, no ser una medida correcta para mejorar la calidad de las aguas distribuidas.

Finalmente, para reducir el contenido de Nitrógeno Amoniacal, es aconsejable airear el agua antes de consumirla. Para reducir el contenido de metales, si el monitoreo sigue detectando la presencia, se deben aplicar tratamientos específicos, según la naturaleza de los metales y su concentración.

En relación a la disminución de los niveles piezométricos, se recomienda monitorear con frecuencia mensual o bimensual los niveles de los pozos, junto con los volúmenes explotados.

Área C (Sivingani el Rincón – San Severino – Mejillones – Buena Vista – San José de la Banda Plan B Alambrado)

En el área en examen, 5 de los 7 pozos analizados cumplen con la norma de aguas potables. En el caso de Sivingani el Rincón, la muestra es representativa de una mezcla de de agua de los dos pozos, por lo tanto no se puede diferenciar la calidad de los dos pozos, aunque es probable que los valores anómalos sean producidos en medida mayor por el pozo 2, donde los parámetros básicos y organolépticos indicaban alteraciones.

Los dos pozos que cumplen con la norma son los de Buena Vista, donde se halla la presencia de Nitrógeno Amoniacal, Sulfatos y Hierro (los últimos dos parámetros solo en el pozo 1) aunque en concentraciones aptas al consumo humano. La calidad es, por lo general, buena. El Nitrógeno Amoniacal, junto a la presencia de trazas de Nitratos, indica la probable presencia de infiltraciones de aguas servidas, debidas a la ausencia de sistemas de alcantarillado. Es aconsejable seguir los parámetros mencionados y airear el agua antes que consumirla.

El pozo del Comité San José de la Banda Plan B Alambrado presenta características químicas parecidas a las de los pozos del área de Itocta. No se tienen registros del perfil estratigráfico del pozo y es posible que explote capas confinadas con aguas reducidas. Los parámetros analizados indican un exceso de Nitrógeno Amoniacal (fuera de norma), Hierro y Manganeso dentro los límites de la norma. La presencia de los dos metales, de olor de azufre (sulfuro de hidrogeno) y la ausencia de nitritos y nitratos, indican que la contaminación por Amonio no es debida a infiltración de aguas servidas sino es la manifestación natural de las condiciones hidroquímicas del acuífero. Se recomienda monitorear el contenido de nitrógeno amoniacal, de hierro y manganeso. Se aconseja airear el agua antes que consumirla.

Mejillones: el pozo no cumple con la norma debido a un elevado contenido de Hierro en las aguas (2,5 veces el valor de norma) y Manganeso en trazas. El origen de la contaminación es de difícil interpretación, por la característica misma de pozo y el contexto hidrogeológico. Es aconsejable seguir monitoreando el contenido de los dos metales, aunque la toxicidad de los mismos no es importante. Los datos no indican la presencia de contaminación por aguas servidas, aunque el lugar es considerado vulnerable.

San Severino: las aguas del pozo no cumplen con la norma por la presencia de Nitrógeno Amoniacal en cantidad elevada. Todos los otros parámetros indican una buena calidad y la presencia de trazas de nitratos confirman el posible origen antrópico de la contaminación (aguas servidas). Por la elevada vulnerabilidad del lugar, se aconseja priorizar la construcción de sistemas de sistemas de alcantarillado o de obras análogas. Es aconsejable airear las aguas antes que consumirlas para reducir el contenido de Amonio.

Sivingani el Rincón: las aguas no cumplen la norma por un exceso de nitrógeno amoniacal y manganeso. Se detectó presencia de hierro aunque en el límite de la norma. La baja dureza del agua y la presencia de trazas de nitratos pueden indicar una condición

puntual no debida a característica hidroquímicas difundidas (acuífero profundo, aguas reducidas y viejas). Los parámetros organolépticos del pozo 2, ver tabla 5, indican una posible alteración debidas, en mayor medida, por posible contaminación orgánica. Es aconsejable seguir monitoreando directamente los pozos, separadamente. Es aconsejable airear las aguas antes que consumirlas para reducir el contenido de Amonio.

Área D (K'ara K'ara – Agua Cruz)

Los dos pozos analizados no cumplen con la norma por la presencia de, entre los parámetros analizados, Sulfatos, Nitrógeno Amoniacal, Manganeso (solo Agua Cruz, en K'ara K'ara en trazas) y Cloruros. Las aguas son fuertemente salinas. Cadmio, Plomo y Cromo, que tienen un origen normalmente antrópico, no se han encontrado; el Níquel ha sido encontrado en trazas. Las características hidroquímicas generales sugieren la presencia de una alteración hidroquímica importante, aunque no ha sido probada.

Para comprobar el origen de la alteración hidroquímica, es necesario seguir monitoreando todos los parámetros analizados, juntamente a los metales principales (Pb, Cr, Cd, As, Ni y Mn). Es aconsejable seguir monitoreando pozos profundos (no excavados) que son más fiables para muestrear las aguas subterráneas, en cuanto permiten excluir fenómenos de alteración hidroquímica característicos de los pozos someros de grande diámetro (aeración y posible precipitación de los metales oxidables). Una posible opción sería el pozo de la OTB K'ara K'ara que, actualmente no es explotado, esta dotado de una bomba y de acceso para la medición de los niveles, aunque para la activación seria necesario utilizar un generador de electricidad.

En la Tabla 7 se muestra una evaluación cualitativa de la calidad del agua de los pozos estudiados. Cinco de los pozos analizados poseen aguas que no son aceptables para el consumo humano: en estos casos es necesario analizar si es posible un tratamiento para potabilizar el agua. En la situación actual, el agua de estos pozos no debería ser utilizada para consumo humano. En tres pozos se tiene agua de buena calidad, aceptable para el consumos, todos ellos situados en el límite meridional de la cuenca en la zona de Primero de Mayo, zona de recarga del acuífero. En 4 pozos la calidad del agua es aceptable, siendo el principal problema la salinidad elevada de esta agua y la presencia de nitrógeno amoniacal, signo de una posible contaminación por materia orgánica. En los demás pozos, la calidad del agua no es aceptable para el consumo humano; es necesario realizar un tratamiento previo del agua, en caso de que sea posible, para utilizarlos como fuente de agua potable.

Tabla 6. Resultados de análisis de parámetros fisicoquímicos de muestras de agua de pozos perforados en el acuífero del distrito 9.

id	Pozo / Pozos	Lugar muestreo	pH	Turbidez	DQO	Conductividad	Dureza Total	Cloruros	Nitrógeno Amoniacal	Nitritos	Nitratos	Sulfatos	Sulfuros	Cadmio	Cromo total	Plomo	Níquel	Hierro total	Manganeso	Malatión
				NTU	mgO_2/l	µS/cm	mg $CaCO_3$/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l
1+2	Sivingani el Rincón 1+2	pileta	6,81	4,4	0	307	84,50	13,47	**0,65**	<0,01	0,14	34,77	0,29					0,07	**0,25**	
3	El Palmar pozo 1	pileta	7,42	0,2	0	565	107,31	30,71	0,07	<0,01	<0,01	35,51	1,55					0,08	0,08	
4	El Palmar pozo 2	pozo	7,7	0,3	0	1.315	439,35	161,65	0,15	<0,01	0,02	161,98	0,42					0,02	<0,02	
5	1° de Mayo pozo 1	entrada tanque	7,36	0,2	2	808	244,93	60,82	0,33	<0,01	0,14	50,70	0,29					0,25	0,05	
6+7+8	1° de Mayo pozo 2+3+4	entrada tanque	7,47	0,3	0	719,5	214,63	48,5	0,12	<0,01	0,08	57,28	0,54					0,03	<0,02	
10	Mejillones	pozo	7,98	0,2	0	459,5	121,2	11,32	0,06	<0,01	0,05	44,00	0,67					**0,76**	0,02	
11	Agua Cruz	pozo	7,09	1,3	4	**2.549**	**873,65**	242,48	**0,93**	<0,01	<0,01	**1.153,54**	1,17	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	0,21	**0,58**	
13	San José de la Banda	pileta	7,74	2,2	0	860	237,35	38,8	**1,6**	<0,01	<0,01	113,33	1,3					0,29	0,09	
14	Fortaleza	pozo	8,08	0,85	4	684	85,85	22,63	**2,52**	<0,01	<0,01	29,72	0,79					0,09	<0,02	
15	Tamborada A	pileta	7,54	1,5	12	947	112,36	37,18	**16,62**	<0,01	<0,01	13,48	0,79	<0,02	<0,02	<0,02	1,29	0,02	0,03	<0,001
16	Virgen del Rosario	pileta	7,35	2,5	0	1084	308,05	93,76	**1,07**	<0,01	<0,01	98,38	0,92	<0,02	<0,02	<0,02	6,70	0,18	<0,02	<0,001
17	Barrio Bolívar	pileta	7,51	3,4	4	854	97,21	26,94	**12,28**	<0,01	<0,01	53,37	1,05	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	0,02	<0,001
18	San Severino	pileta	7,05	0,15	2	528	160,34	26,94	**1,28**	<0,01	0,18	71,56	0,92					<0,02	<0,02	
19	Buena Vista pozo 1	pileta	7,55	0,2	2	861	237,35	37,72	0,38	0,02	0,08	108,62	0,54					0,11	<0,02	
20	Buena Vista pozo 2	pileta	7,44	0,3	0	**1.039,5**	318,15	80,83	0,41	<0,01	0,02	88,14	1,17					<0,02	<0,02	
21	14 deSeptiembre	pileta	7,82	2,7	2	661	117,41	19,4	**1,84**	<0,01	<0,01	48,99	2,17	<0,02	<0,02	<0,02	2,51	0,02	<0,02	
24	Pozo Privado Sr. Guadalupe	balde	7,54	1,4	22	**4.910**	**1121,10**	**835,2**	0,15	0,05	0,38	**843,61**	0,92	<0,02	<0,02	<0,02	0,02	<0,02	0,03	
		Norma NB 512	**6,5 - 9,0**	**5**		**1.500**	**500**	**250**	**0,5**	**0,1**	**45**	**400**		**5**	**50**	**10**	**50**	**0,3**	**0,1**	

Tabla 7. Evaluación cualitativa de la calidad fisicoquímica de los pozos analizados

Pozo	¿Cumple valores límite?	Comentarios	Recomendación
Sivingani el Rincón	No	Agua poco salina con exceso de manganeso y nitrógeno amoniacal por posible contaminación de aguas servidas	No recomendable para consumo humano
El Palmar pozo 1	Sí	Agua relativamente salina con trazas de hierro y manganeso	Adecuada para el consumo humano
El Palmar pozo 2	Sí	Agua salina y relativamente dura, puede presentar una contaminación local	Aceptable para el consumo
1° de Mayo pozo 1	Sí	Agua relativamente salina con trazas de hierro y manganeso	Adecuada para el consumo como agua potable
1° de Mayo pozo 2+3+4	Sí	Agua relativamente salina	Adecuada para el consumo humano
Mejillones	No	Concentraciones elevadas de hierro y relativamente salina	Sería recomendable tratar el agua para eliminar el hierro
Agua Cruz	No	Agua con fuerte presencia de sulfatos, salina y dura, posible contaminación por materia orgánica de aguas servidas	No aceptable para consumo humano
San José de la Banda	No	Agua relativamente salina con presencia de hierro, manganeso y sulfatos, posible contaminación por materia orgánica	No recomendable para consumo humano
Fortaleza	No	Agua algo salina con posible contaminación por materia orgánica	No recomendable para consumo humano
Tamborada A	No	Agua con fuerte contenido de nitrógeno amoniacal y algo salina, posible contaminación por materia orgánica de aguas servidas	No aceptable para consumo humano
Virgen del Rosario	No	Agua salina y dura con posible contaminación por materia orgánica	No aceptable para consumo humano
Barrio Bolívar	No	Agua salina con fuerte contenido de nitrógeno amoniacal, probable contaminación por materia orgánica	No aceptable para consumo humano
San Severino	No	Agua algo salina con posible contaminación por materia orgánica	No recomendable para consumo humano
Buena Vista pozo 1	Sí	Agua algo salina con presencia de nitrógeno amoniacal y sulfatos	Aceptable para el consumo
Buena Vista pozo 2	Sí	Agua salina y dura con presencia de nitrógeno amoniacal, posible contaminación por aguas servidas	Aceptable para el consumo
14 de Septiembre	No	Agua algo salina con presencia de nitrógeno amoniacal, posible contaminación por aguas servidas	No recomendable para consumo humano
Pozo Privado Sr. Guadalupe	No	Agua muy salina, posible contaminación por lixiviados	No aceptable para consumo humano

4 Propuesta para el control y protección de la calidad del acuífero

En los puntos anteriores se ha podido establecer claramente que el acuífero del distrito 9 tiene una vulnerabilidad media a alta en las principales zonas de recarga del acuífero, en la región de abanicos coluviales de la región meridional. Es en estas zonas que se tiene que establecer áreas de protección e implementar acciones que permitan controlar las emisiones contaminantes que pudieran existir. En las demás regiones, la vulnerabilidad del acuífero es entre despreciable y baja, lo que facilita la protección del mismo y evitar tener que implementar zonas de restricción muy extensas para su protección.

Considerando la vulnerabilidad del acuífero y la ubicación de las diferentes fuentes de emisión de contaminantes, las que presentan más riesgo, por orden de prioridad, serían:

1. Los sistemas de saneamiento in situ (fosas sépticas, pozos ciegos y otros) de las poblaciones asentadas en las regiones más vulnerables del acuífero. Esta es una fuente persistente aunque de baja intensidad por el bajo flujo de infiltración.
2. Los residuos líquidos de la cría de ganado lechero y porcino, sobre todo de las granjas que estén ubicadas en las zonas de vulnerabilidad media y alta.
3. Los lixiviados generados en el botadero de K'ara K'ara.
4. Los residuos líquidos de industrias que descargan en el río Chaqui Mayu que actúa como recarga del acuífero.
5. Las infiltraciones de aguas servidas a partir de las lagunas de oxidación de Alba Rancho.
6. Las posibles infiltraciones de las aguas contaminadas del río Rocha y Tamborada.

Para la protección del acuífero contra estos riesgos de contaminación se proponen las siguientes acciones:

- Implementar sistemas de alcantarillado, principalmente para las poblaciones que se encuentran en las regiones de alta vulnerabilidad del acuífero y limitar la actividad agrícola y ganadera en estas zonas.
- Controlar la construcción de casas y urbanizaciones en las zonas de recarga del acuífero. En caso de no poder evitar la urbanización de estas zonas, exigir la instalación de sistemas de alcantarillado y asegurarse de contar con sistemas de tratamiento para esta agua.

- Seleccionar pozos que tengan menor riesgo de contaminación para que sean utilizados en la provisión de agua potable. Establecer zonas de protección para estos pozos.
- Clausurar los pozos que no son explotados para evitar que se conviertan en focos de contaminación. Algunos de ellos se podrían acondicionar para fines de monitoreo.
- Buscar otras fuentes de agua para los sistemas que utilizan agua de pozos que presenten contaminación o estén en zonas de alta vulnerabilidad del acuífero. Sobre todo los pozos en el área de influencia de contaminación por los lixiviados del botadero de K'ara K'ara
- Controlar la emisión de contaminantes a los cursos de agua que sirven de recarga del acuífero (ríos y quebradas que provienen del límite sur de la cuenca).
- Exigir a las empresas instaladas en la zona a cumplir con las normas y reglamentos en la descarga de sus residuos líquidos.
- Promover la instalación de sistemas recolección de agua de lluvia para uso doméstico. Esto permitirá reducir en alguna medida la explotación del acuífero.
- Establecer volúmenes máximos de explotación del acuífero en función del balance hídrico. Esto con el propósito de evitar la disminución del nivel freático que podría provocar la infiltración de aguas contaminadas desde los ríos Tamborada y Rocha.
- Evitar o suprimir el uso de agua de los pozos para usos intensivos como el riego. Buscar otras fuentes de agua para estos propósitos.

Para el control del acuífero se propone:

- Elaborar un Inventario de pozos existentes en la zona.
- Instalar medidores en todos los pozos perforados en la zona, sobre todo aquellos que son más explotados o de los que se extrae un cierto volumen al año.
- Elaborar un inventario de cargas contaminantes que puedan afectar al acuífero, sobre todo en las zonas de mayor vulnerabilidad del mismo.

5 Programa de monitoreo del la calidad de agua del acuífero

Para el monitoreo de la calidad del agua y la gestión del acuífero se recomienda:

- Registrar los volúmenes de agua que se extraen de los pozos mensualmente.
- Registrar el nivel estático y dinámico de los pozos cada dos meses.
- Seleccionar un grupo de pozos en los que se harían los siguientes análisis:
  - pH, pE, conductividad, coliformes fecales y coliformes totales, cada dos meses.
  - Hierro, manganeso, nitritos, nitratos, amonio y arsénico, cada seis meses

El primer año de monitoreo se podría monitorear todos los parámetros mencionados en los pozos seleccionados. En algunos pozos con riesgo de contaminación por metales pesados, por ejemplo, los que están cerca del Botadero de K'ara K'ara, se debería medir algunos metales pesados como Cr, Cd y Ni, pues existen algunos antecedentes de contaminación por estos metales.

Para la ubicación de los pozos de monitoreo, se recomienda seleccionar 3 pozos en cada una de las áreas de características similares descritas esquemáticamente en la Figura 4. En la zona A son buenas opciones los pozos: 1º de Mayo (pozo 4), El palmar (pozo 2) y Fortaleza; en la zona B se recomienda: Virgen del Rosario, Tamborada A y 14 de Septiembre; en la zona C: San Severino, Mejillones y Sivingani el Rincón (pozo 2) y, finalmente, en la zona D los pozos: OTB K'ara K'ara (pozo 1) y Comité Agua Cruz (pozo 1)

Luego de un monitoreo de un año, se pueden reducir los parámetros monitoreados y la periodicidad de los mismos; también se podría eliminar algunos pozos que tengan características similares. Esto con el propósito de reducir los costos del monitoreo de la calidad del agua.

6 Conclusiones y recomendaciones

El presente estudio permitió caracterizar la hidrogeología del acuífero de los distritos 9 y 8, analizar su vulnerabilidad a la contaminación y la calidad de las aguas subterráneas explotadas.

En el área de estudio se cuenta con un acuífero complejo, en parte libre, semiconfinado y confinado, que se recarga gracias a las precipitaciones que caen en las áreas permeables (abanicos fluviales y depósitos coluviales) que se hallan al extremo sur, a los pies de las serranías. Las fuentes principales de recarga del sistema acuífero están constituidas por lo tanto por los cursos de agua que nacen en las serranías situadas al sur.

El flujo subterráneo de las aguas es desde sur hacia norte. Las aguas, que infiltran en las áreas de recarga fluyen en los sedimentos permeables de abanicos, que hacia el

Norte están interdigitados con los de origen lacustre y fluvio-lacustre. Las aguas, en su recorrido, se empobrecen en oxígeno por presencia de materia orgánica, y se cargan de minerales. La permeabilidad de los sedimentos es variable, aunque es posible decir que en promedio disminuye desde el sur hacia el norte.

La descarga del acuífero se realiza a través de los ríos Tamborada y Rocha que actúan como drenantes; la extracción de los pozos y vertientes y la evaporación. De acuerdo al balance hídrico estimado, existe un déficit de entre 2,1 y 15,5 millones de m^3/año. Esto provoca que los niveles piezométricos disminuyan de manera sostenida con el tiempo.

Por lo anterior, en algunos pozos evaluados se verificó disminuciones de niveles y de caudales en relación a los primeros datos de operación de los mismos. Este caso se verifica especialmente en la zona de Primero de Mayo - El Palmar y en la zona de Itocta. Sin embargo esta situación es un comportamiento general que justifica la necesidad de un monitoreo de los niveles y caudales explotados.

La vulnerabilidad de los acuíferos, que indica la predisposición de las aguas subterráneas a sufrir contaminación por la actividad antrópica y natural que se desarrolla en superficie, es baja en la mayor parte de la superficie del distrito 9 por la presencia de arcillas de origen lacustre que limitan fuertemente la posibilidad de infiltración de aguas superficiales; sin embargo, en las áreas de recarga (principalmente Primero de Mayo – El Palmar, abanico del Chaqui Mayu y abanico de K'ara K'ara) la vulnerabilidad alcanza niveles de medio a altos, que implican que actividades potencialmente contaminantes y la misma presencia de viviendas sin sistemas de tratamiento de las aguas servidas (ej. alcantarillado, baños ecológicos secos etc.) pueden afectar la calidad de las aguas subterráneas. Los datos cualitativos adquiridos indican que procesos de contaminación de aguas subterráneas, debido a la vulnerabilidad del acuífero, están ocurriendo.

Con referencia la calidad de las aguas, se pudo evidenciar que la mayoría de los pozos analizados no cumple con las normativas de calidad de parámetros fisicoquímicos para agua potable. Los parámetros que con mayor frecuencia se encuentran por encima del límite permitido son el nitrógeno amoniacal y la salinidad, en algunos casos la dureza del agua es también un problema de calidad. No se pudo identificar de manera conclusiva las fuentes de contaminación que provocan los altos niveles de nitrógeno amoniacal, pero las más probables son los sistemas de saneamiento in situ, la actividad agrícola o la presencia natural de materia orgánica en los depósitos lacustres. Los problemas de salinidad se dan esencialmente en los pozos cercanos al relleno de K'ara K'ara, que podría ser una fuente de contaminación con sales. No se pudo evidenciar contaminación por metales pesados como Cr, Ni o Pb.

Las crecientes necesidades de agua potable en el distrito 9, debido a su acelerado crecimiento en población, hacen necesarias acciones urgentes para la protección del acuífero y una gestión adecuada del mismo. Para ello, es necesario proteger las zonas más vulnerables de las fuentes de contaminación más probables y establecer un sistema de monitoreo de la calidad del agua que permita actuar de manera oportuna.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen la colaboración de las autoridades de ASICASUR por el acceso brindado a los pozos y por la información sobre los pozos perforados. También agradecemos los fondos aportados por Agua Sustentable que sirvieron para cubrir los costos de este estudio.

Referencias

[1] Centro de Documentación e Información Bolivia (CEDIB). 2007. Datos de la zona sur de Cochabamba. Tomo I. Cochabamba, Bolivia

[2] Di Molfetta, A. 1992. Determinazione délia trasmissività degli acquiferi mediante correlazione con la portata specifica (Aquifer transmissivity determination by correlation with specific pumping rate) (en italiano). Ingeneria e Geologia degli Acquiferi I, 81-86

[3] Foster S.; Hirata R.; Gomes D.; D'Elia M.; Paris M. 2006. Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guía para Empresas de Agua, Autoridades Municipales y Agencias Ambientales. Banco Mundial, Washington D.C.

[4] Groundwater quality protection practices. Fraser River Action Plan. Environment Canadá. En: http://www.rem.sfu.ca/FRAP/gqpp.pdf. (Acceso marzo 2009)

[5] Huaranca R.; Neuman-Redlin C. 1998. Mapas Temáticos de Recursos Minerales de Bolivia. Hoja Cochabamba. Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería, Nº 16

[6] Muñoz G. Comunicación personal. 2009

[7] Neumann-Redlin C; Renner S.; Tórrez J. Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba. En: http://www.bgr.bund.de/. (Acceso marzo de 2009)

[8] Renner S.; Velasco C. 2000. Geología e Hidrogeología del Valle Central de Cochabamba. Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería, Nº 34

[9] SERGEOTECMIN y EMSA. 1999. Diagnóstico de la situación del relleno sanitario K'ara K'ara. Informe Técnico. Noviembre

[10] Toledo Medrano R. 2005. Evaluación de la calidad de las aguas de río Rocha en la jurisdicción de SEMAP en la Provincia Cercado de Cochabamba, Bolivia. Tesis de Ingeniería Ambiental. Universidad Católica Boliviana San Pablo, Cochabamba.