

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL VALLE BAJO DE COCHABAMBA, BOLIVIA

HIDROGEOCHEMICAL CHARACTERIZATION AND GROUNDWATER QUALITY INDEX IN THE LOWER VALLEY OF COCHABAMBA, BOLIVIA

Ivette Echeverría^{1,2,*}, Omar Mamani¹ y Oliver Saavedra¹

¹Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)
Universidad Privada Boliviana (UPB), Cochabamba, Bolivia

²Fundación Aguatuya, Cochabamba, Bolivia

echeverria.ivette@upb.edu

(Recibido el 15 de junio 2025, aceptado para publicación el 30 de julio 2025)

RESUMEN

En este estudio se realizó una caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del Valle Bajo de Cochabamba mediante análisis físico-químicos, interpretación de diagramas de Piper, estimación del Índice de Calidad del Agua (ICA) y evaluación de niveles estáticos. Los resultados muestran que la mayoría de los pozos presentan un balance iónico coherente. Según el índice ICA, la calidad del agua es mayormente muy buena o excelente; sin embargo, algunos pozos presentan turbiedad, sodio, sulfatos y cloruros que superan los valores máximos permisibles establecidos por la Norma Boliviana NB-512. Asimismo, se identificaron niveles de hierro entre 0,34 y 6,58 mg/L y de manganeso entre 0 y 0,50 mg/L, excediendo en todos los casos el límite normativo para hierro y en algunos casos el de manganeso. Considerando la hidroquímica, el 47 % de las muestras se clasifican como aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, típicas de zonas de recarga, mientras que el 35 % corresponde a aguas bicarbonatadas sódicas, asociadas a procesos de intercambio iónico. También se identificaron facies cloruradas y/o sulfatadas sódicas en pozos de zonas más bajas, reflejando una mayor evolución geoquímica o influencia antrópica. El análisis de niveles estáticos evidenció una dirección de flujo subterráneo predominante de norte a sur, lo que explica la acumulación de sales y metales en pozos terminales. Dadas las concentraciones elevadas de hierro y manganeso, se recomienda implementar procesos de tratamiento específicos y complementar este diagnóstico con estudios microbiológicos para evaluar la posible presencia de fuentes de contaminación antrópica. En resumen, los hallazgos resaltan la necesidad de una gestión integral y sostenible del recurso hídrico subterráneo en el Valle Bajo de Cochabamba.

Palabras Clave: Calidad del agua subterránea, Hidrogeoquímica, Diagrama de Piper, Índice de Calidad del Agua

ABSTRACT

This study conducted a hydrogeochemical characterization of groundwater in the Lower Valley of Cochabamba through physicochemical analysis, Piper diagram interpretation, estimation of the Water Quality Index (WQI), and evaluation of static water levels. The results show that most wells exhibit a coherent ionic balance. According to the WQI, water quality is generally rated as good or excellent; however, certain wells exceeded the maximum permissible values established by the Bolivian Standard NB-512 for drinking water, particularly in terms of turbidity, sodium, sulfates, and chlorides. Iron concentrations ranged from 0.34 to 6.58 mg/L and manganese from 0 to 0.50 mg/L, with all samples exceeding the regulatory limit for iron and some for manganese. From a hydrochemical perspective, 47% of the samples were classified as calcium and/or magnesium bicarbonate waters, typical of recharge zones with low geochemical evolution, while 35% corresponded to sodium bicarbonate waters, associated with cation exchange processes. Chloride and/or sulfate sodium-type facies were also identified in wells located in lower areas, reflecting more evolved geochemical conditions or anthropogenic influence. The analysis of static water levels revealed a predominant north-to-south groundwater flow direction, explaining the accumulation of salts and metals in terminal wells. Due to the elevated concentrations of iron and manganese, specific water treatment processes are recommended, along with complementary microbiological studies to assess potential sources of anthropogenic contamination. Overall, the findings highlight the need for integrated and sustainable groundwater resource management in the Lower Valley of Cochabamba.

Keywords: Groundwater quality, Hydrochemistry, Piper diagram, Water Quality Index

1. INTRODUCCIÓN

El agua es por excelencia el recurso natural básico y esencial para la vida, indispensable en todas las etapas de la vida en sociedad, para la agricultura, industria, generación eléctrica y salud pública, entre otros [1]. En Bolivia, en los últimos años, la disponibilidad del agua ha disminuido debido a factores como el cambio climático, la agricultura extensiva, la industria y la urbanización generando situaciones de escasez. Esta situación ha incrementado la demanda y extracción de agua subterránea generando una fuerte presión sobre los recursos hídricos en el país [2].

En todo el país varios departamentos recurren a las aguas subterráneas para abastecer sus demandas. En Cochabamba especialmente, el 65% del agua para consumo humano en la zona metropolitana proviene de las aguas subterráneas extraídas principalmente el lado oeste del Valle Central [3]. De hecho, en 2016 cuando el departamento atravesaba por una sequía severa se perforaron 11 pozos en los distritos 8 y 9 [4]. Además, otros usos están contemplados para las aguas provenientes de los pozos, por ejemplo, el riego. En la Cuenca del Río Rocha el 23% del agua para el riego proviene de pozos [5].

En Bolivia no existe una política efectiva de gestión y protección del agua subterránea, aunque algunos municipios como Sacaba y Arbieta están trabajando en la elaboración de leyes municipales que regulen el funcionamiento de los pozos, los caudales extraídos y la calidad del agua [5]. La sobreexplotación de los acuíferos confinados a menudo se produce en ausencia de un conocimiento detallado y una comprensión adecuada de la dinámica del agua subterránea y los procesos hidrogeológicos asociados [6]. La extracción de agua subterránea sin considerar la sostenibilidad está ocasionando disminución de la calidad del agua, especialmente por intrusión salina y concentración de contaminantes naturales como el arsénico y el flúor [7].

La disminución de los niveles freáticos puede ocasionar la intrusión de agua contaminada de la superficie. El descenso de los niveles de agua subterránea ocasiona el descenso de los caudales de las fuentes de agua superficiales cuya recarga depende del acuífero. Por otro lado, esta disminución de los niveles freáticos puede reducir la disponibilidad de agua para las freatófitas teniendo un impacto ecológico. Además, el bombeo excesivo del agua subterránea está ocasionando la necesidad de perforar los pozos a mayores profundidades. La perforación de pozos profundos no solo tiene impactos económicos, sino que el agua que se encuentra a mayor profundidad suele ser de menor calidad [8].

El crecimiento de la mancha urbana hacia zonas de recarga acuífera constituye un riesgo para la sostenibilidad de los acuíferos. A la fecha, varios estudios se han conducido buscando comprender la hidrogeología del Valle Central, Valle Alto y Valle Bajo de Cochabamba [3]. En el estudio de [9], por ejemplo, reportan descensos considerables del nivel freático en algunos pozos evidenciando sobreexplotación de los pozos del Valle Central.

En los últimos años varios estudios han reportado una calidad deteriorada de las aguas subterráneas en Bolivia.

Un estudio realizado por [10], por ejemplo, reporta la presencia de metales contaminantes y elementos traza en el 56% de 18 pozos evaluados en los municipios de Cercado y Colcapirhua. Por otro lado, un estudio realizado por [11] en el municipio de Vinto-Cochabamba, donde se tomaron 30 muestras de agua provenientes de 10 OTB's (Organizaciones Territoriales de Base) en el primer grifo de las viviendas. Estas presentaron contaminación microbiológica por coliformes totales en el 63% de las muestras y contaminación por coliformes termo-tolerantes en alrededor del 17% de las muestras. Aunque el agua proviene de pozos perforados, el estudio concluye que estadísticamente que la variabilidad en la calidad del agua no está asociada a un sistema de distribución por zona sino más probablemente a condiciones individuales de cada vivienda atribuyéndose la contaminación a las tuberías domiciliarias, tanques de almacenamiento o prácticas de uso inadecuadas.

El Plan director de la Cuenca del Río Rocha espera alcanzar para el 2040 un aprovechamiento sostenible de todos los acuíferos de la cuenca, es decir, que la explotación se realice dentro de los límites de su recarga artificial [5]. En este contexto, es fundamental evaluar la calidad del agua subterránea en distintos puntos de la red de distribución, pero especialmente en boca de pozo para determinar su aptitud para diversos usos, como el consumo humano, el riego, entre otros. Aunque el agua subterránea, en general, es menos susceptible a la contaminación bacteriana en comparación con el agua superficial, contiene varios elementos químicos como: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , $(\text{HCO}_3)^-$, Cl^- y $(\text{SO}_4)^{2-}$, que desempeñan un papel clave en su clasificación y en la evaluación de su calidad [12]. Estos, junto con otros componentes, pueden también proporcionar indicios sobre posibles fuentes de contaminación, ya sean de origen antrópico o natural.

Generar conocimiento acerca de la calidad del agua subterránea e integrar esta comprensión con la dinámica de flujo dentro los acuíferos es esencial para gestionar planes y políticas de gestión sostenible y protección del agua subterránea.

El objetivo de este estudio es evaluar la calidad del agua subterránea en los pozos del Valle Bajo de Cochabamba en conjunto con los niveles estáticos para comprender de manera integral la relación entre la calidad del recurso y el comportamiento del acuífero.

2. MATERIAL Y METODOLOGÍA

2.1. Descripción del área de estudio

El Valle Bajo de Cochabamba se sitúa al oeste del Valle Central de Cochabamba, a una altitud aproximada entre 2.400-2.600 m.s.n.m. Está comprendido por los municipios de Vinto, Quillacollo, Sipe Sipe, Colcapirhua y Tiquipaya. Esta región constituye una de las zonas más representativas del departamento en términos agrícolas, sociales y ecológicos abarcando una extensa llanura interandina atravesada por múltiples cursos de agua superficial e importantes sistemas

de aguas subterráneas. Su clima es templado-seco, con precipitaciones concentradas en el periodo estival, lo que condiciona una marcada estacionalidad en la disponibilidad hídrica.

Esta región está conformada por acuíferos poco profundos conformado por intercalaciones de material fluvio-lacustre donde la recarga sucede en los abanicos aluviales y lechos de ríos de alta permeabilidad [13]. Un mapa de ubicación del área de estudio se presenta en la Figura 1.

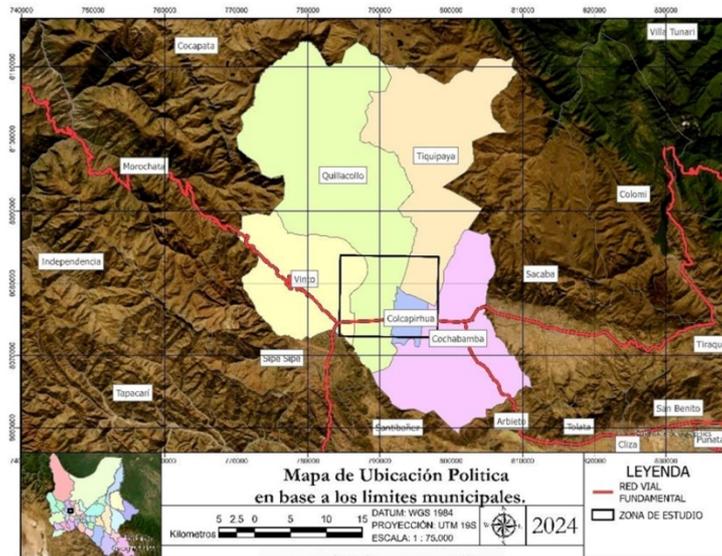


Figura 1: Ubicación del área de estudio [14].

El Valle Bajo de Cochabamba está conformado por 5 municipios que integran a 62 OTBs que cuentan con al menos 2 pozos perforados cada una [14]. Para este estudio se tomaron en cuenta 17 pozos distribuidos por toda la región los cuales se muestran en la Figura 2.

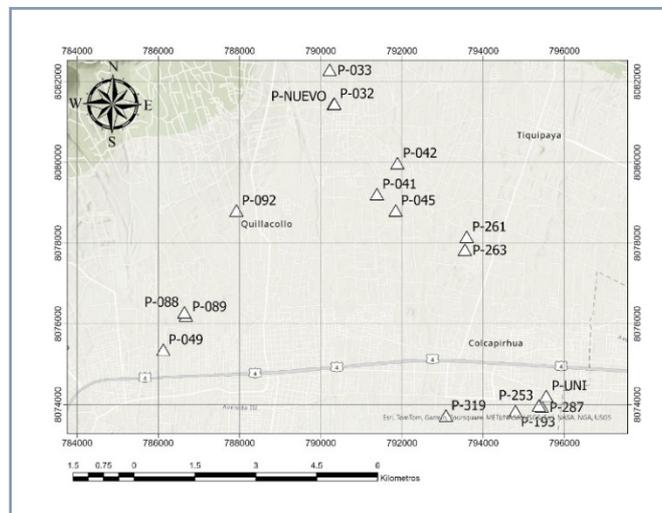


Figura 2: Localización de los pozos evaluados en el Valle Bajo de Cochabamba.

2.2 Muestreo y análisis del agua

En este estudio, el muestreo se enfocó especialmente en pozos y nacientes representativos de las unidades hidrogeológicas de la región. Se llevaron a cabo un total de 2 campañas de monitoreo entre septiembre y octubre de 2024 donde se colectaron un total de 17 muestras de boca de pozo. Los parámetros medidos in situ incluyeron pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y sólidos disueltos totales (TDS). Adicionalmente se tomaron muestras para su análisis en laboratorio donde se determinaron aniones y cationes mayoritarios como cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), nitratos (NO_3^-), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+). Las

muestras fueron analizadas en laboratorios de la universidad Privada Boliviana (UPB) siguiendo métodos normalizados del Standard Methods for Examination of Water and Wastewater [15].

Los métodos analíticos utilizados para este propósito comprendieron: titulación volumétrica, espectrofotometría de absorción atómica (AAS) a la llama de aire-acetileno y AAS a la llama de óxido nitroso-aire-acetileno en función del analito.

2.3 Balance iónico

Una vez procesadas las muestras se procedió a realizar un balance iónico para verificar la consistencia y fiabilidad de los datos analíticos. Un balance iónico evalúa si la suma de las concentraciones de cationes es aproximadamente igual a la suma de aniones, como se esperaría en una solución eléctricamente neutra. El porcentaje de error respecto al balance iónico se expresa según la ecuación (1):

$$\% \text{ Error Analítico} = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \times 100 \quad (1)$$

Donde las concentraciones de los cationes y aniones deben expresarse en meq/l (miliequivalentes por litro). Un valor aceptable del error en el balance iónico es típicamente $\leq 5-10\%$ según estándares internacionales [15]

2.4 Interpretación de la calidad del agua subterránea

En primera instancia los resultados se compararon con los valores máximos aceptables para el consumo humano establecidos en la normativa boliviana NB-512 Agua Potable-Requisitos [16].

Además, se construyeron diagramas de Piper y se estimó el índice de calidad del agua (ICA) para los distintos pozos evaluados.

2.4.1 Diagrama de Piper

La composición iónica de las muestras de agua subterránea proveniente de los pozos del área de estudio se representó en un diagrama trilineal también conocido como diagrama de Piper. Este diagrama proporciona un método práctico para comparar tipos de agua con base a la composición iónica de las distintas muestras. Las concentraciones de cationes y aniones de cada muestra se convierten a miliequivalentes por litro (meq/l) y se grafican como porcentajes del total correspondiente a dos triángulos. Las proporciones relativas de cationes y aniones en cada triángulo se proyectan luego a un polígono central que describe el tipo de agua o facies hidroquímicas. Esta herramienta además facilita la identificación de los procesos geoquímicos dominantes [17].

Para la construcción de este diagrama se empleó el software Grapher V 5.0 de la empresa GoldenSoftware.

2.4.2 Índice de calidad del agua

El Índice de Calidad del Agua (ICA) es una herramienta metodológica clave para sintetizar en una sola puntuación cuantitativa o cualitativa la información derivada de múltiples parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua. Su uso facilita la interpretación de datos complejos y permite clasificar la calidad del recurso hídrico en categorías como excelente, buena, aceptable, deficiente o muy mala, según la metodología adoptada.

Existen diversos modelos de ICA, entre los cuales destacan el NSF-WQI (de la sigla en inglés National Sanitation Foundation Water Quality Index) y sus adaptaciones nacionales, como el ICA-IDEAM en Colombia [18] o el ICA-CETESB en Brasil [19]. Estos índices integran parámetros como el pH, oxígeno disuelto, nitratos, turbidez, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, entre otros. A pesar de los esfuerzos, aún no existe un índice universal que pueda ser aplicado globalmente por agencias, usuarios y administradores de agua de diferentes países [20].

Para el cálculo del ICA se utilizó el enfoque del índice aritmético ponderado que se calcula a partir de la ecuación (2):

$$ICA = \sum_{i=1}^n q_i W_i \quad (2)$$

Donde:

q_i = subíndice del parámetro i

w_i = peso asignado al parámetro i

En primer lugar, se asignó un peso específico (w_i) a cada parámetro analizado (pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, calcio, bicarbonato, sodio, potasio, magnesio, cloruros, sulfatos y nitratos), en función de su impacto relativo sobre la calidad del agua potable, según normativas nacionales o internacionales. Posteriormente, se calculó el peso relativo (W_i) normalizando cada peso individual respecto al total de pesos asignados, lo que permitió estandarizar la contribución de cada parámetro dentro del índice global. En tercer lugar, se determinó una calificación de calidad (q_i) para cada parámetro, calculada como el porcentaje entre la concentración observada en la muestra (C_i) y el valor guía o estándar (S_i), multiplicado por 100. Luego, se calculó el subíndice individual (S_{li}) de cada parámetro como el producto entre su peso relativo y su calificación de calidad. Finalmente, el ICA total se obtuvo sumando los subíndices de todos los parámetros analizados en cada muestra. Este valor compuesto permitió clasificar el estado del recurso hídrico en una escala de calidad general, facilitando su interpretación ambiental y sanitaria.

La referencia para clasificar los valores del ICA resultantes se presenta en la Tabla 1.

TABLA 1 - CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SEGÚN EL ICA

Rango	Tipo	Tipo de agua
< 50	I	Agua excelente
50,1 - 100	II	Agua buena
100,1 - 200	III	Agua pobre
200,1 - 300	IV	Agua muy pobre
>300,1	V	No apta para consumo

2.5 Generación de mapas temáticos

Se utilizaron herramientas como el software SURFER y el SIG ArcGIS Pro para la generación de mapas continuos de las variables medidas, como la conductividad eléctrica, el pH, los sólidos disueltos y las concentraciones específicas de iones. El programa SURFER emplea técnicas de interpolación como Kriging, IDW (de Inverse Distance Weighting), Radial Basis Function y mínimo curvado para generar mapas continuos a partir de datos puntuales lo cual es de gran utilidad en estudios de calidad de agua [21].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las concentraciones de los aniones y cationes mayoritarios (expresados en meq/l) de los pozos evaluados junto con el balance iónico se presentan en la Tabla 2.

TABLA 2 - RESULTADOS DEL BALANCE IÓNICO

ID	HCO ₃ ⁻ meq/L	Cl ⁻ meq/L	SO ₄ ²⁻ meq/L	NO ₃ ⁻ meq/L	Ca ²⁺ meq/L	Mg ₂ ⁺ meq/L	Na ⁺ meq/L	K ⁺ meq/L	Aniones	Cationes	% error
P-261	5,84	0,40	0,66	0,07	2,68	1,20	2,48	0,09	6,97	6,46	-3,82
P-263	6,41	0,18	0,17	0,06	2,64	0,76	2,24	0,01	6,82	5,66	-9,35
P-287	15,08	4,35	4,19	0,07	8,17	0,72	56,46	0,05	23,68	65,40	46,82
P-NUEVO	4,25	0,40	1,23	0,10	2,56	1,68	2,99	0,03	5,98	7,26	9,67
P-319	4,44	1,38	1,10	0,10	3,84	0,60	4,77	0,03	7,02	9,25	13,72
P-089	3,88	0,25	0,93	0,07	2,24	0,72	2,97	0,02	5,14	5,95	7,30
P-088	4,81	0,40	1,55	0,00	2,92	1,24	3,70	0,03	6,75	7,90	7,81
P-253	11,64	9,57	13,71	0,05	15,29	7,38	22,43	0,07	34,97	45,18	12,74
P-049	4,25	0,20	0,25	0,07	1,88	1,24	3,40	0,04	4,78	6,56	15,77
P-033	4,62	0,40	0,48	0,08	3,00	1,36	3,59	0,04	5,58	7,99	17,75
P-193	4,99	0,20	0,15	0,04	2,00	0,92	2,85	0,04	5,38	5,81	3,87
P-092	3,70	0,23	0,35	0,07	2,80	0,12	2,96	0,04	4,34	5,91	15,41
P-032	3,70	0,37	0,94	0,10	4,20	0,44	3,12	0,03	5,11	7,79	20,81
P-045	3,33	0,34	0,21	0,10	1,32	0,96	2,21	0,12	3,97	4,61	7,50
P-042	3,14	0,31	0,44	0,10	1,40	0,76	2,15	0,09	3,99	4,40	4,84
P-041	2,96	0,34	0,49	0,17	1,44	1,64	2,34	0,07	3,95	5,49	16,30
P-UNI	6,28	6,24	1,91	0,09	4,84	1,56	9,09	0,12	14,52	15,61	3,62

De los resultados de la evaluación en relación al balance iónico se puede mencionar que una mayoría de los pozos evaluados tiene una buena coherencia entre las concentraciones de aniones y cationes caracterizados (P-193, P-261, P-UNI, P-042, P-NUEVO, P-089, P-088, P-045, P-041) presentando errores <10%. En el caso específico de los pozos P-263, P-049, P-033, P-092, P-032 y P-319) el valor del error del balance iónico se sitúa entre el 10-20%. Este desbalance podría estar relacionado con algunas especies no medidas. Es, de hecho, muy común en los estudios de geoquímica acuosa asumir que los análisis químicos reportan concentraciones con un margen de error del $\pm 10\%$ respecto a la concentración real de cualquier constituyente [22]. En el caso específico de P-287 se presentó un desequilibrio alto (46,8%), que supone un valor atípico con varias causas posibles. Una de ellas podría ser que exista contaminación por intrusión de aguas residuales en cuyo caso los valores elevados de sodio (56,5 meq/l o 1298 mg/l) podrían respaldar el supuesto. La conductividad de esta fuente es igualmente elevada lo que puede significar que un análisis de rutina podría no estar considerando otros aniones presentes en el agua como boratos, fosfatos o algunos aniones de tipo orgánico que podrían estar presentes de forma natural o por contaminación antrópica [23].

La información completa de estos pozos —incluyendo coordenadas UTM, nivel estático, pH, conductividad, sólidos disueltos totales (SDT) y concentraciones de aniones y cationes expresadas en mg/L— se encuentra detallada en la Tabla 3.

TABLA 3: RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE POZO DEL VALLE BAJO DE COCHABAMBA

ID	UBICACION (UTM 19K)		NIVEL	T	pH	CE	SDT	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	(HCO ₃) ⁻	Cl ⁻	(SO ₄) ²⁻	(NO ₃) ⁻	Fe ²⁺	Mn ²⁺
	UTME	UTMS															
POZO				(°C)		(μS/cm)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
P-261	793592	8078178	0,83	19,73	6,57	240,10	160,00	53,75	14,59	3,65	57,00	356,57	14,01	31,90	4,10	0,48	0,01
P-263	793547	8077856	0,00	19,37	7,00	181,10	110,00	52,95	9,24	0,56	51,46	391,08	6,50	8,18	3,70	0,34	0,00
P-287	795441	8073974	10,70	22,47	6,95	897,00	580,00	163,67	8,76	1,81	1298,1	920,18	154,1	201,2	4,30	1,73	0,14
P-NUV	790318	8081472	50,74	21,90	6,63	287,00	180,00	51,35	20,43	1,11	68,64	259,39	14,01	59,23	6,10	0,67	0,00
P-319	793083	8073748	3,70	24,40	7,68	352,00	230,00	77,02	7,30	1,30	109,64	270,67	49,02	52,83	6,00	0,78	0,01
P-089	786678	8076226	6,20	15,70	7,00	193,00	130,00	44,93	8,76	0,69	68,20	236,84	9,00	44,70	4,40	0,38	0,04
P-088	786641	8076308	0,88	16,00	6,67	292,00	190,00	58,57	15,08	1,20	85,15	293,23	14,01	74,56	0,00	3,40	0,48
P-253	795370	8073999	3,80	23,40	6,80	760,00	381,00	306,48	89,74	2,56	515,74	710,51	339,14	658,33	3,20	0,37	0,16
P-049	786121	8075379	7,20	20,40	7,00	201,10	150,00	37,71	15,08	1,46	78,28	259,39	7,00	12,18	4,60	6,58	0,50
P-033	790217	8082314	76,15	20,20	6,97	309,00	180,00	60,17	16,54	1,48	82,49	281,95	14,01	23,11	5,20	0,89	0,01
P-193	794792	8073858	10,43	26,30	7,73	217,00	150,00	40,11	11,19	1,41	65,54	304,51	7,00	7,11	2,50	0,91	0,06
P-092	787922	8078829	26,40	16,70	7,05	191,00	130,00	56,16	1,46	1,37	67,97	225,56	8,00	16,58	4,20	0,45	0,00
P-032	790335	8081477	3,11	23,20	7,29	257,80	210,00	84,24	5,35	1,03	71,74	225,56	13,01	45,23	6,30	0,38	0,00
P-045	791844	8078830	10,96	20,63	7,11	142,40	280,00	26,48	11,67	4,61	50,91	203,00	12,00	10,04	5,90	0,88	0,02
P-042	791886	8080003	58,50	20,26	7,37	142,00	130,00	28,08	9,24	3,54	49,36	191,73	11,00	21,24	6,10	0,61	0,00
P-041	791382	8079236	13,71	21,27	7,16	160,60	260,00	28,88	19,94	2,66	53,79	180,45	12,00	23,51	10,30	0,51	0,00
P-UNI	795551	8074236	22,70	18,30	7,41	645,00	322,00	97,08	18,97	4,64	208,93	383,45	221,07	91,89	5,50	1,25	0,20

En la Tabla 4 se presenta un resumen de la calidad fisicoquímica de las aguas subterráneas de la zona del Valle Bajo de Cochabamba en relación a los valores máximos admisibles para consumo especificados en la NB-512.

TABLA 4 - RESUMEN CALIDAD FISICOQUÍMICA DE AGUA EN EL VALLE BAJO DE COCHABAMBA

Parámetro	Unidad	Max.	Min.	Media	Valor máximo aceptable NB 512
Temperatura	(°C)	26,30	15,70	20,60	-
pH		7,73	6,57	7,00	6,5 – 9,0
Conductividad eléctrica CE	(μ S/cm)	897,00	142,00	267,04	1500
SDT	(mg/l)	381,00	110,00	353,53	1000
Turbiedad	UNT	80,00	1,94	9,61	5,00
Calcio Ca ²⁺	(mg/l)	306,48	26,48	74,57	200
Magnesio Mg ²⁺	(mg/l)	89,74	1,46	16,67	150
Potasio K ⁺	(mg/l)	4,64	0,56	2,06	-
Sodio Na ⁺	(mg/l)	1298,09	49,36	175,47	200
Bicarbonato (HCO ₃) ⁻	(mg/l)	920,18	180,45	334,95	370
Cloruro Cl ⁻	(mg/l)	339,14	6,50	53,23	250
Sulfato (SO ₄) ⁻²	(mg/l)	658,33	7,11	81,28	400
Nitrato (NO ₃) ⁻	(mg/l)	50,06	10,30	4,85	45
Hierro Fe ²⁺	(mg/l)	6,58	0,34	1,21	0,30
Manganeso Mn ²⁺	(mg/l)	0,50	0,00	0,10	0,10

La Figura 3 presenta un diagrama de cajas que resume la dispersión de los parámetros fisicoquímicos medidos en los pozos monitoreados. En general, la mayoría de los datos se concentra dentro del rango intercuartílico; sin embargo, en varios de los parámetros evaluados se identifican entre dos y tres pozos cuyos valores se desvían del rango en el que se agrupa la mayoría de las observaciones. Estas desviaciones reflejan variaciones en la calidad del agua subterránea que podrían estar asociadas a diferencias en la profundidad de captación, a características litológicas o a condiciones particulares de recarga dentro del área de estudio.

Asimismo, estas diferencias podrían constituir indicios de posibles procesos de contaminación en algunas fuentes. Si bien los promedios generales se mantienen por debajo de los límites máximos admisibles establecidos por la normativa para consumo humano, algunas fuentes puntuales superan considerablemente los valores recomendados. Tal es el caso de la turbiedad, en la que hasta seis observaciones exceden el límite máximo permitido. La dispersión de este parámetro es tal que incluso su valor promedio se encuentra fuera del rango normativo.

De manera particular, el pozo P-253 presenta concentraciones elevadas de sodio, sulfatos, cloruros, bicarbonatos y hierro, todas por encima de los niveles establecidos por la normativa vigente.

Por otro lado, las concentraciones de hierro y manganeso en una proporción importante de los pozos evaluados exceden los valores máximos admisibles establecidos por la Norma Boliviana NB-512. Se observaron pozos con concentraciones de hierro hasta 22 veces por encima del límite permitido, y en el caso del manganeso, algunos pozos presentan niveles hasta 5 veces superiores a lo establecido.

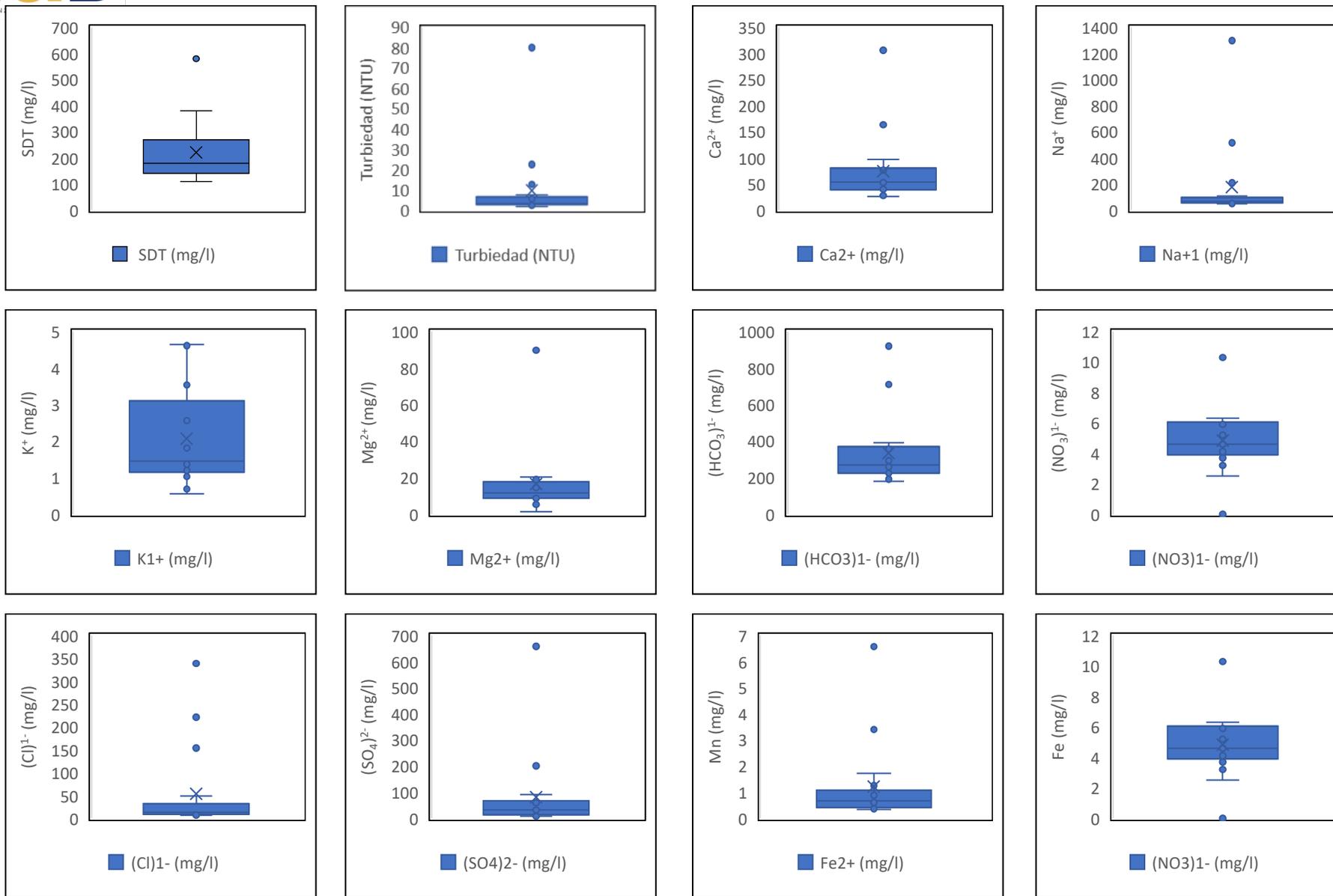


Figura 3: Diagrama de cajas de parámetros evaluados en pozos del Valle Bajo de Cochabamba.

En la Figura 4 se presenta el diagrama de Piper para las aguas subterráneas evaluadas.

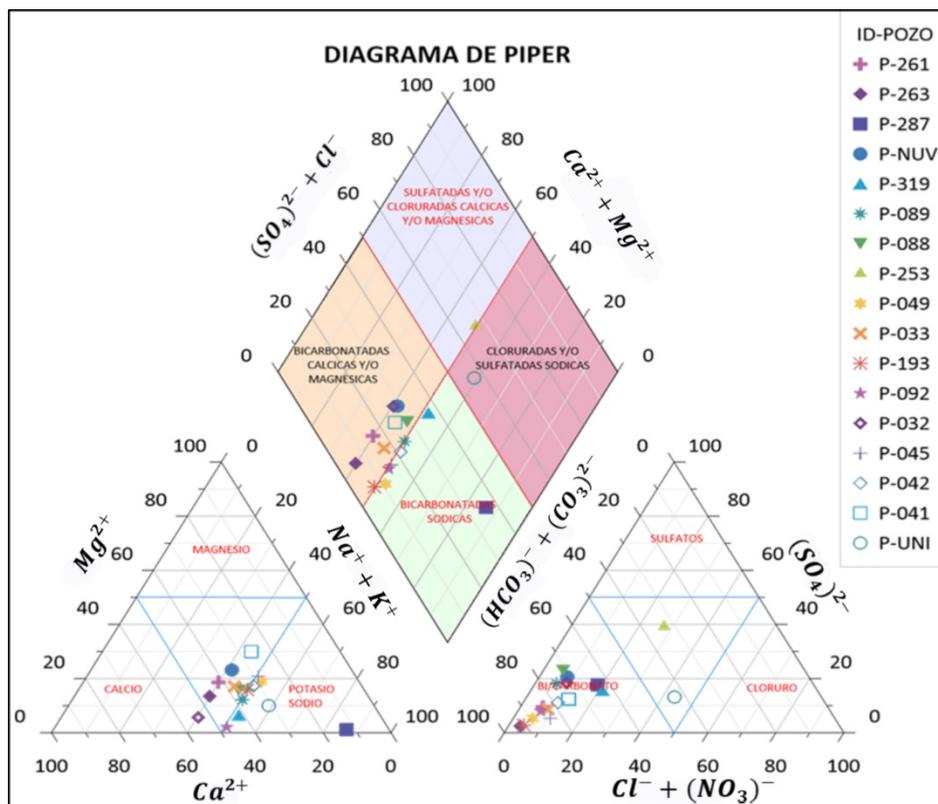


Figura 4: Diagrama de Piper de los pozos de Valle Bajo de Cochabamba.

En este diagrama se identifican distintas facies hidroquímicas. La mayoría de los pozos evaluados, en cuanto a los iones muestra una predominancia de calcio y magnesio sobre sodio y potasio. En relación a los aniones, se observa una predominancia de bicarbonatos con presencia de sulfatos en algunos pozos. La predominancia de los tipos de agua en porcentaje se presenta en la Tabla 5.

TABLA 5 - DISTRIBUCIÓN DE TIPOS DE AGUA

Nº	Tipo de agua	Número de pozos	Porcentaje
1	Ca ²⁺ -Mg ²⁺ -HCO ₃ ⁻	8	47%
2	Na ⁺ - HCO ₃ ⁻ -Cl ⁻	6	35%
3	Na ⁺ - HCO ₃ ⁻	1	6%
4	Na ⁺ - Cl ⁻	1	6%
5	Ca ²⁺ -Mg ²⁺ - Cl ⁻	1	6%

El 47% de los pozos evaluados presentan características correspondientes a aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, típicas de zonas de recarga y de aguas subterráneas poco evolucionadas. Por otro lado, un 35% de los pozos exhiben una composición bicarbonatada sódica, lo que podría indicar procesos de intercambio catiónico calcio-sodio. Este fenómeno es común en medios arcillosos, donde el calcio es retenido por las partículas del acuífero y el sodio es liberado al agua.

En algunos pozos se identifican facies cloruradas y/o sulfatadas sódicas, que corresponden a aguas más evolucionadas, con mayor grado de mineralización. Estas composiciones pueden estar asociadas a procesos de evaporación, ascenso de aguas profundas o posibles fuentes de contaminación antrópica. Finalmente, los pozos P-319 y P-049 presentan una tipología sulfatada y/o clorurada cálcica y/o magnésica, lo que sugiere una interacción con materiales evaporíticos,

como yesos o anhidritas, que podrían estar presentes en la litología del acuífero. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas realizadas en el Valle Central por [10] donde un 44% de los pozos evaluados presentaron características sodio/cálcico bicarbonatadas.

Con las estimaciones del ICA y mediante métodos de interpolación de Kriging se construyó un mapa espacial con las variaciones de calidad del agua en la zona de estudio que se presenta en la Figura 5.

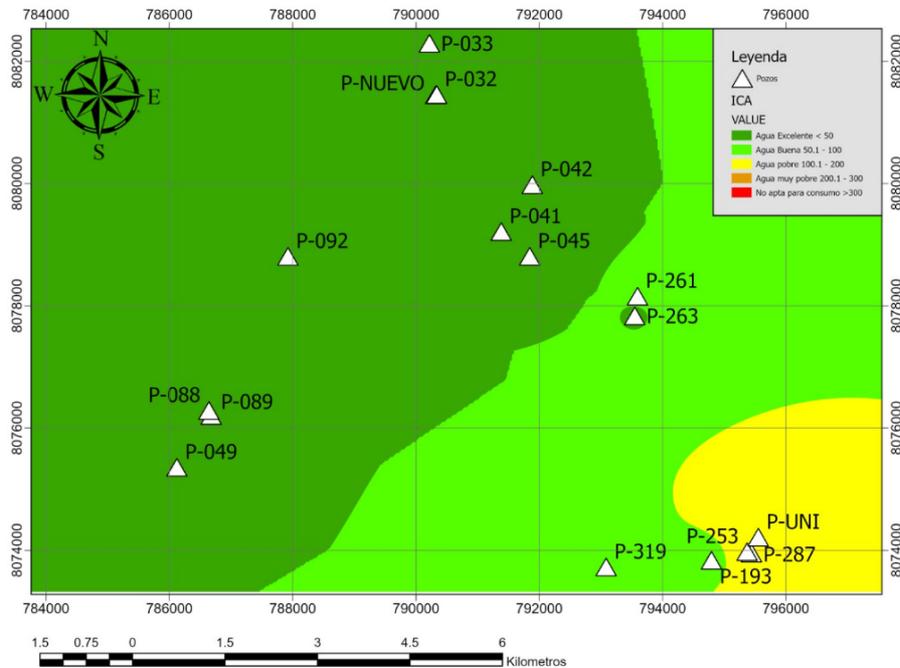


Figura 5: Clasificación de la calidad del agua según el ICA.

Según el rango de clasificación del ICA descrito con anterioridad se puede apreciar que una mayoría de las fuentes están calificadas como agua de calidad excelente. Estas fuentes están en su mayoría ubicadas en la zona noroeste del área de estudio. Del total de pozos evaluados, un 24% son aguas de buena calidad y el 18% son aguas de calidad pobre.

La dirección del flujo subterráneo fue determinada a partir de la interpolación de los niveles piezométricos, calculados con base en los niveles estáticos medidos en los pozos y las altitudes del terreno. Esta información permitió representar gráficamente las líneas equipotenciales y las flechas de dirección del flujo, que se muestran en la Figura 6.

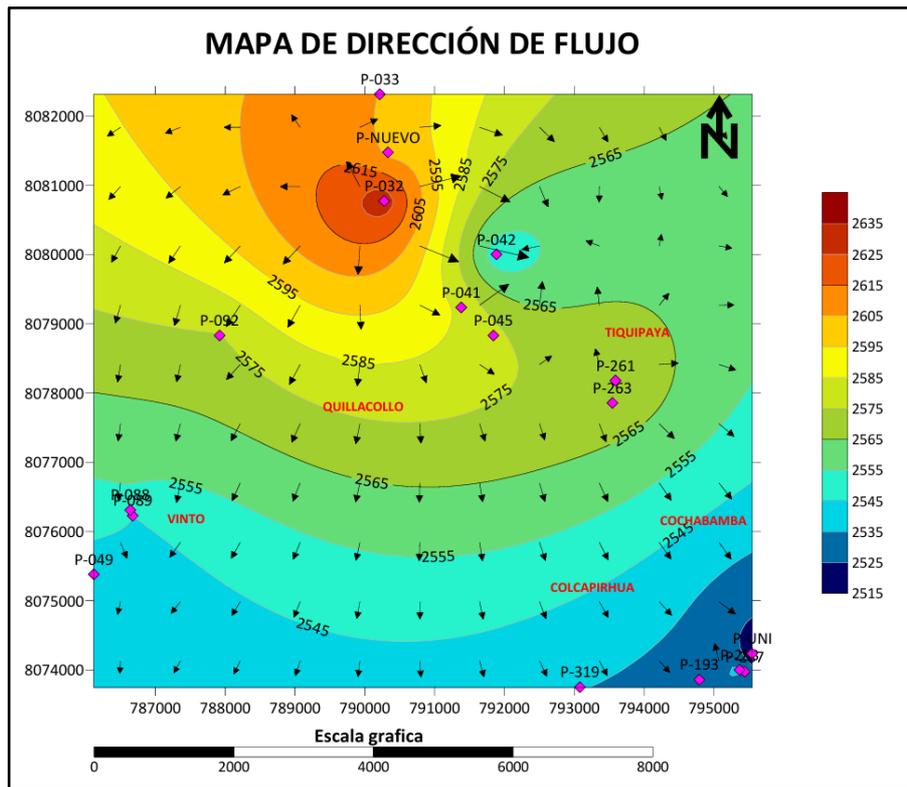


Figura 6: Mapa de dirección de flujo.

A partir de la Figura 6 se observa que la dirección del flujo subterráneo es predominantemente de norte a sur, lo que sugiere que la zona de recarga se localiza en el sector norte del mapa. En esta zona, el agua se infiltra desde áreas topográficamente más elevadas y fluye hacia regiones de menor altitud. Durante este trayecto, el agua subterránea entra en contacto con distintos estratos geológicos, lo que favorece procesos de disolución y/o intercambio iónico. Esta dinámica hidrogeológica influye directamente en la composición química del agua, permitiendo explicar la calidad observada en algunas fuentes. Por ejemplo, los pozos P-253, P-UNI, y P-287 situados en sectores más bajos del sistema, presentan los niveles más elevados de conductividad, lo que podría asociarse a un mayor grado de evolución geoquímica del agua a lo largo de su flujo.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se realizó una caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del Valle Bajo de Cochabamba mediante análisis físico-químicos, interpretación de diagramas de Piper, estimación del índice de calidad del agua (ICA) y evaluación de niveles estáticos. Los resultados muestran que la mayoría de los pozos presenta una coherencia adecuada en el balance iónico, respaldando la validez de los datos analíticos. En algunos pozos se identificaron ciertos desbalances superiores al margen aceptable atribuibles a la presencia de especies no medidas o a procesos de contaminación.

En cuanto a la calidad del agua, si bien la mayoría de las fuentes se clasifican como de calidad excelente o buena según el ICA, varios parámetros físico-químicos superan los valores máximos permisibles establecidos por la Norma Boliviana NB-512 para consumo humano. En particular, se detectaron algunos parámetros con valores puntuales que exceden la norma. Es el caso de la turbiedad, que presenta valores de al menos 6 pozos con valores por encima de lo permitido. Una mayoría de los pozos evaluados presenta a su vez niveles elevados de hierro y manganeso que van de 0,34-6,58 mg-Fe/l y de 0-0,50 mg-Mn/l. En el caso del hierro todas las fuentes superan los valores máximos admisibles indicados en la normativa y en el caso del manganeso solamente un par de pozos excede este valor.

De la evaluación hidroquímica, el 47% de las muestras se clasifican como aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, típicas de zonas de recarga y con bajo grado de evolución geoquímica. Un 35% adicional corresponde a aguas bicarbonatadas sódicas, indicativas de procesos de intercambio iónico, posiblemente en acuíferos con presencia de arcillas. Asimismo, algunos pozos ubicados en zonas más bajas presentan facies cloruradas y/o sulfatadas sódicas, características de aguas más evolucionadas, con mayor carga salina, posiblemente influenciadas por evaporación, interacción con materiales evaporíticos o contaminación antrópica.

Finalmente, el análisis de los niveles estáticos permitió determinar una dirección de flujo subterráneo predominante de norte a sur, lo que indica que el agua se infiltra desde las zonas altas del acuífero y fluye hacia áreas más bajas. Esta dinámica influye en la evolución hidroquímica y en la acumulación de sales y metales en pozos de zonas terminales, como P-253, P-UNI y P-287 que presentan los valores más elevados de conductividad.

Dadas las características de las aguas evaluadas, especialmente en relación al hierro y manganeso se sugiere que estas fuentes deben seguir un proceso de tratamiento para poder ser consideradas aptas para consumo humano. Además, se debe indagar sobre las posibles fuentes de intrusión de salinidad en algunas fuentes de agua. Para ello es recomendable complementar este estudio con un estudio microbiológico que pueda permitir interpretar posibles fuentes de contaminación antrópica.

En breve, se ha identificado la necesidad de una gestión integral del recurso hídrico subterráneo, con énfasis en el monitoreo periódico, el control de calidad y la protección de las zonas de recarga para garantizar un uso sostenible y seguro del agua en el Valle Bajo de Cochabamba.

REFERENCIAS

- [1] E. A. M. Orantes, J. I. V. Cañas, T. G. Roffe³, and E. académico P. D. C. A. Z. Gonzalez, “El agua como recurso esencial para la vida y el cual hay que garantizar su sostenibilidad ante la adversidad del cambio climático,” *Rev. Iberoam. Bioeconomía Cambio Climático*, vol. 1, no. 2, pp. 140–155, 2015.
- [2] A. Gonzales Amaya, J. Ortiz, A. Durán, and M. Villazon, “Hydrogeophysical methods and hydrogeological models: basis for groundwater sustainable management in Valle Alto (Bolivia),” *Sustain. Water Resour. Manag.*, vol. 5, no. 3, pp. 1179–1188, Sep. 2019, doi: 10.1007/s40899-018-0293-x.
- [3] J. T. Saavedra, L. A. Rosales, and O. C. Saavedra, “Modelación de aguas subterráneas del Valle de Cochabamba utilizando Modflow,” *Investig. Amp Desarro.*, vol. 20, no. 1, pp. 81–88, 2020.
- [4] “Sólo 2 de 11 pozos perforados hace más de un año funcionan en el sur | Los Tiempos.” Accessed: Jun. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.lostiempos.com/actualidad/cochabamba/20171114/solo-2-11-pozos-perforados-hace-mas-ano-funcionan-sur>
- [5] Stockholm Environment Institute US Center, “Formulación y Actualización del Plan Director de la Cuenca del Río Rocha, Bajo un Enfoque de Adaptación al Cambio Climático: Resumen Ejecutivo (Contrato de Servicio de Consultoría - 01/2018). Presentado a Proyecto Piloto de Resiliencia Climática-PPCR.” Aug. 2019.
- [6] A. Durán, “Aguas subterráneas: Investigación aplicada en el abanico aluvial de la cuenca del río Sichez (Groundwater: Applied research in the alluvial fan of the Sichez River watershed).” *Talleres Gráficos Kipus, Cochabamba*, 2018.
- [7] J. S. Famiglietti, “The global groundwater crisis,” *Nat. Clim. Change*, vol. 4, no. 11, pp. 945–948, Nov. 2014, doi: 10.1038/nclimate2425.
- [8] L. F. Konikow and E. Kendy, “Groundwater depletion: A global problem,” *Hydrogeol. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 317–320, Mar. 2005, doi: 10.1007/s10040-004-0411-8.
- [9] B. López, L. Rosales, O. Saavedra, B. López, L. Rosales, and O. Saavedra, “Modelación hidrogeológica en el Valle Central de Cochabamba-Bolivia,” *Investig. Amp Desarro.*, vol. 23, no. 1, pp. 23–39, 2023, doi: 10.23881/idupbo.023.1-2i.
- [10] R. Escalera Vásquez and M. Ormachea Muñoz, “Hidroquímica de la presencia natural de arsénico en aguas subterráneas de áreas suburbanas de Cochabamba-Bolivia y evaluación de la viabilidad técnica de proces de remoción,” *Investig. Amp Desarro.*, vol. 1, no. 17, pp. 27–41, 2017.
- [11] A. Adiazola Muriel et al., “Evaluación de la calidad del agua de consumo humano en el municipio de Vinto-Cochabamba-Bolivia,” *Rev. Digit. Novasineria*, vol. 7, no. 2, pp. 6–17, Dec. 2024, doi: 10.37135/ns.01.14.01.
- [12] M. Rathinasamy, S. Chandramouli, K. B. V. N. Phanindra, and U. Mahesh, Eds., *Water Resources and Environmental Engineering II: Climate and Environment*. Singapore: Springer Singapore, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-2038-5.
- [13] Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento Básico, “Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en áreas periurbanas de Cochabamba,” AAPS, Cochabamba, Bolivia, 2020.
- [14] P. J. C. Choque, “Modelación Hidrogeológica en el Valle Bajo de Cochabamba, Bolivia,” *Universidad Privada Boliviana, Cochabamba, Bolivia*, 2024.
- [15] APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 22nd ed. Washington: American Public Health Association, 2012.
- [16] Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) and Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico (VAPSB), *Compendio Normativo sobre Calidad de Agua para Consumo Humano NB 512 - Reglamento NB 512 - NB 495 - NB 496*, La Paz-Bolivia., 2018.
- [17] A. M. Piper, “A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses,” *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 25, no. 6, pp. 914–928, Jun. 1944, doi: 10.1029/TR025i006p00914.

- [18] A. D. Sutadian, N. Muttill, A. G. Yilmaz, and B. J. C. Perera, “Development of river water quality indices-a review,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 188, no. 1, p. 58, Jan. 2016, doi: 10.1007/s10661-015-5050-0.
- [19] CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, “Qualidade das águas interiores no estado de Sao Paulo,” São Paulo, 2020.
- [20] I. Paun, L. Cruceru, F. L. Chiriac, M. Niculescu, G. Vasile, and N. Marin, “Water Quality Indices - Methods for evaluating the quality of drinking water,” pp. 395–402, Oct. 2016, doi: 10.21698/simi.2016.0055.
- [21] J.C. Davis, *Statistics and Data Analysis in Geology*, Third edition. Wiley, 2002.
- [22] M. J. Reed and R. H. Marine, “Quality control of chemical and isotopic analyses of geothermal water samples,” presented at the Sixteenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Standfor University, Standford, California, 1991.
- [23] J. D. Hem, “Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water,” U.S. Geological Survey, 2254, 1985. doi: 10.3133/wsp2254.