



## **SISTEMATIZACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE CALIDAD DE AGUA DE LAS UNIDADES HIDROGRÁFICAS DEL ÁMBITO BOLIVIANO DEL SISTEMA HÍDRICO TDPS.**

**GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL SISTEMA TITICACA – DESAGUADERO-POOPÓ-  
SALAR DE COIPASA (GIRH-TDPS)**

**PRODUCTO 3: INFORME TÉCNICO SOBRE EL ESTADO DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DEL  
SISTEMA TDPS – LADO BOLIVIA 2010 – 2021**

**Servicio de Consultoría por Producto**

**Elaborado por:** *Lizangela Huallpara Lliully  
Franz Candia*

Julio - 2022



## ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS UTILIZADOS

MMAyA	Ministerio de Medio Ambiente y Agua
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
VRHR	Viceministerio Recursos Hídricos y Riego
TDPS	Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salares
SINCA	Sistema de Información Nacional de Calidad de Agua
ALT	Autoridad Binacional del Lago Titicaca
RMCH	Reglamento en Materia y Contaminación Hídrica
SIG	Sistema de Información Geográfica
SIMOVH	Sistema de Monitoreo y Vigilancia Hídrica
LD	Límite de Detección
BI	Balance Iónico
ET	Elementos Traza
CE	Conductividad Eléctrica
SSed	Sólidos Sedimentables
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SDT	Sólidos Disueltos Totales
UNT	Unidades Nefelométricas de Turbiedad
UTM	Universal Transversal Mercator
ORP	Potencial óxido reducción
DBO5	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DAM	Drenaje Ácido de Mina
SHP	Shapefile



## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	OBJETIVOS .....	3
1.1.1.	OBJETIVO GENERAL .....	3
1.1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
1.1.3.	ENFOQUE .....	3
1.1.4.	ALCANCE.....	4
1.1.4.1.	ESPACIAL.....	4
1.1.4.2.	TEMPORAL .....	5
2.	ESTADO DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DEL SISTEMA TDPS .....	6
2.1.	CUENCA SÚCHEZ .....	7
2.1.1.	CUENCA SÚCHEZ – AVENIDA .....	8
2.1.2.	CUENCA SÚCHEZ – ESTIAJE .....	18
2.2.	CUENCA MAURI.....	28
2.2.1.	CUENCA MAURI – AVENIDA.....	29
2.2.1.	CUENCA MAURI – ESTIAJE .....	33
2.3.	CUENCA POOPÓ .....	40
2.3.1.	CUENCA POOPÓ – AVENIDA.....	41
2.3.2.	CUENCA POOPÓ – ESTIAJE.....	51
2.4.	CUENCA ALTO DESAGUADERO.....	61
2.4.1.	CUENCA ALTO DESAGUADERO – ESTIAJE.....	62
2.5.	CUENCA MEDIO DESAGUADERO .....	69
2.5.1.	CUENCA MEDIO DESAGUADERO – ESTIAJE.....	70
2.6.	CUENCA KATARI .....	77
2.6.1.	CUENCA KATARI – AVENIDA.....	78
2.6.2.	CUENCA KATARI – ESTIAJE.....	87
2.7.	LAGO TITICACA .....	95
2.7.1.	LAGO TITICACA – AVENIDA.....	96
2.7.2.	LAGO TITICACA – ESTIAJE.....	103
2.8.	CUENCA COIPASA.....	110
2.8.1.	CUENCA COIPASA – ESTIAJE .....	111

3.	ANEXOS.....	118
3.1.	PARÁMETROS CLAVE DE EVALUACIÓN.....	119
3.1.1.	ÉPOCA.....	119
3.1.2.	PARÁMETROS DE CAMPO.....	119
3.1.3.	IONES MAYORITARIOS.....	120
3.1.4.	ELEMENTOS TRAZA (ET).....	120
4.	PROTOCOLO PARA LA IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE DATOS ANORMALES, ANÓMALOS Y ATÍPICOS.....	123
4.1.	CLASIFICACIÓN DE VARIABLES EN EXCEL.....	123
4.2.	CATEGORIZACIÓN DE LAS VARIABLES CUANTITATIVAS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE CUERPOS DE AGUA.....	123
4.3.	GRÁFICOS DE TENDENCIA Y GRÁFICOS DE CORRELACIÓN.....	124
4.3.1.	GRÁFICOS DE TENDENCIA.....	124
4.3.2.	GRÁFICOS DE CORRELACIÓN.....	124
5.	MAPAS TEMÁTICOS.....	125
2.1.	CUENCA SÚCHEZ.....	126
5.2.	CUENCA MAURI.....	130
5.3.	CUENCA POOPÓ.....	134
5.4.	CUENCA ALTO DESAGUADERO.....	140
5.5.	CUENCA MEDIO DESAGUADERO.....	142
5.6.	CUENCA KATAR.....	144
5.7.	LAGO TITICACA.....	150
5.8.	CUENCA COIPASA.....	154
6.	REFERENCIAS.....	157

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema hídrico Lago Titicaca – Río Desaguadero – Lago Poopó - Salar de Coipasa (TDPS), ubicado en el altiplano andino, planicie extensa y desértica con una altura aproximada de 3750 m.s.n.m; se encuentra entre dos cordilleras: Cordillera Occidental y Cordillera Oriental con cumbres que alcanzan los 6452 m.s.n.m (nevado Sajama). El sistema hídrico TDPS, (Figura 1) abarca una superficie de 143 900 km<sup>2</sup> y está integrado por catorce unidades hidrográficas entre Perú, Bolivia y Chile (PRODOC, 2016).

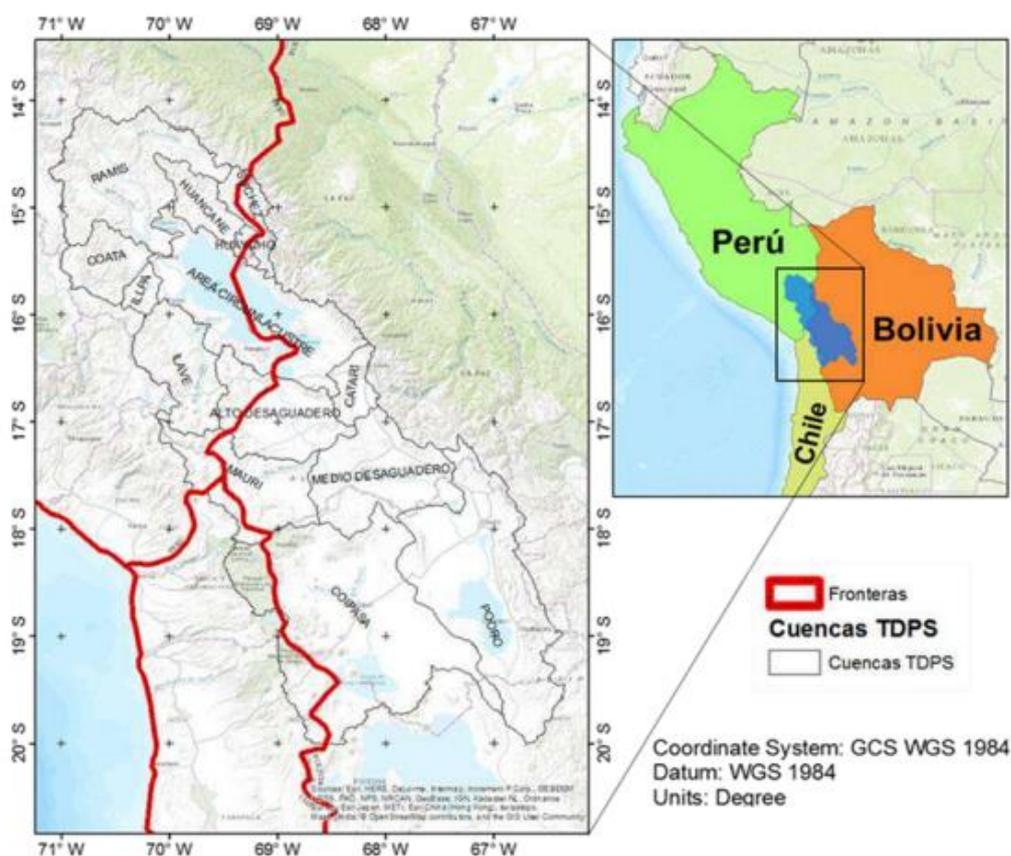


Figura 1. Ámbito del estudio de consultoría (Fuente: MMAyA-Bolivia).

El sistema hídrico TDPS se caracteriza por mostrar una planicie que se ve interrumpida por serranías inter altiplánicas donde afloran rocas de diferente composición química que con la interacción de agua/roca y el ciclo hidrológico hacen que los cuerpos de agua adquieran características fisicoquímicas particulares. Los diferentes estudios de los cuerpos de agua del sistema hacen evidentes concentraciones de diferentes especies químicas de fondo elevadas que se ven incrementadas con las actividades antrópicas.

Las condiciones naturales del sistema hídrico TDPS son extremas, generalmente se tiene baja concentración de oxígeno, elevada radiación solar, aridez extrema, cambios drásticos de temperaturas durante el día, cuerpos de agua y suelos con elevada concentración de sales y minerales (Gobierno de Perú & Gobierno de Bolivia, 1996).

Los recursos hídricos del TDPS son de alto valor para Bolivia y Perú, que desde la década de 1950 han avanzado en desarrollar mecanismos de gestión conjunta. En 1992, ambos países acordaron la creación de la Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó, Salar de Coipasa.

Los países establecieron varias instancias de cooperación, como las comisiones técnicas binacionales para los ríos Maure-Mauri y Súcchez y la Comisión Binacional de Alto Nivel para el Lago Titicaca. La ALT es responsable de implementar el Plan Director Global Binacional del Sistema Hídrico TDPS. El Sistema TDPS presenta claros indicadores de deterioro ambiental a pesar de existir mecanismos binacionales de cooperación y de múltiples esfuerzos realizados por Perú y Bolivia.

La solución de la problemática requiere una intervención conjunta y sinérgica de actores públicos y privados que aprovechan los recursos del TDPS. El marcado incremento en la población y por ende un incremento en los asentamientos urbanos, así como el desarrollo de diferentes actividades antropogénicas, han causado un serio deterioro ambiental dentro del sistema TDPS. Desde hace muchos años atrás se tienen quejas de los pobladores acerca de la contaminación de los lagos y los ríos tributarios sobre todo por la generación de residuos sólidos y aguas residuales provenientes de los centros urbanos, pero aún más importante, es la presencia de ingentes cantidades de desmontes y colas causado por diferentes actividades mineras, que además generan los tan conocidos drenajes ácidos de mina (DAM) que son los principales causantes de la degradación de los recursos hídricos con cargas elevadas de sedimentos, metales pesados y pH ácido.

Por otro lado, el incremento de la actividad agrícola ha degradado los sistemas ecológicos con una seria pérdida de biodiversidad y hábitats naturales. La presente propuesta pretende establecer complementaciones en la base de datos del SINCA que incluya información actualizada desde el 2010 al 2021, así como realizar el análisis de la evolución histórica de la calidad de agua en diferentes periodos y épocas del TDPS lado Bolivia, tomando en cuenta en las unidades hidrográficas a nivel 3 y 4.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. OBJETIVO GENERAL**

Consolidar la información sobre el Estado de la Calidad de los Recursos Hídricos del Sistema hídrico TDPS – Lado Bolivia del periodo 2010 – 2021 con base en los datos recopilados en el estudio complementario 8 “Sistematización y análisis de información de calidad de agua del sistema hídrico TDPS” e información facilitada por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua.

### **1.1.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS**

- Revisar, evaluar y complementar información de Calidad de Agua del Sistema hídrico TDPS – lado Bolivia del periodo 2010 – 2021 con información facilitada por el VRHR/MMAyA.
- Integrar información de calidad de agua del sistema hídrico TDPS-Lado Bolivia en el Sistema de Información Nacional de Calidad de Agua (SINCA) del Ministerio de Medio Ambiente y Agua.
- Elaborar el informe técnico del estado de la calidad de los recursos hídricos del Sistema del TDPS – lado Bolivia 2010 - 2021.

### **1.1.3. ENFOQUE**

Resulta de mucho interés el realizar una sistematización y análisis de información de calidad de los cuerpos de agua del sistema hídrico TDPS ya que existe información dispersa que debe ser concentrada, sistematizada y validada para la toma de decisiones.

Realizar el análisis de la evolución histórica de la calidad de agua en diferentes periodos y épocas del TDPS es importante ya que es una región de gran relevancia tanto para Bolivia como para el Perú, puesto que concentra a una población de más de 3,6 millones de personas, 2,2 millones en Bolivia y 1,4 millones en Perú, así mismo, alberga las regiones más fértiles y productivas de toda la región altiplánica y sus mayores reservas de agua y guarda la milenaria historia de las culturas que habitaron sus tierras y navegaron sus aguas.

En los últimos años, se han incrementado las actividades socio económicas de la región, sin embargo, algunas de ellas como la minería, la agricultura y otras, han hecho que haya un aumento de la contaminación tanto de aguas superficiales y subterráneas.

La base para la identificación de fuentes contaminantes se sustentará con la identificación de fuentes de información confiables, en particular de información institucional oficial; trabajos científicos (artículos en revista científica, tesis, etc.); informes de consultorías y fuentes secundarias trazables, para lograr identificar vacíos de información así como valores anómalos para su discriminación previo análisis de correspondencia de datos con herramientas estadísticas, a partir de la cual se realizará un análisis espacial y temporal desde el año 2010 al 2021 que se visualizaran en mapas temáticos. Este trabajo permitirá completar y ajustar la base de datos del SINCA con la información señalada, realizar el análisis correspondiente y elaborar un reporte sobre el estado de la calidad de agua del TDPS de la parte de Bolivia.

#### **1.1.4. ALCANCE**

##### **1.1.4.1. ESPACIAL**

Los servicios de consultoría tienen como ámbito espacial del estudio del ajuste y complementación de la base de datos de calidad de agua contemplando las cuencas a nivel 3 y 4 de: Alto Desaguadero, Medio Desaguadero, Mauri, Salar de Coipasa y Poopó de Bolivia del ámbito del Sistema Hídrico Titicaca – Desaguadero - Poopó y Salar de Coipasa (TDPS).

Para realizar el análisis espacial se presenta mapas temáticos por cuenca, época y principales características de los cuerpos de agua empleando la base de datos consolidada y los parámetros medidos en campo y laboratorio.

#### **1.1.4.2. TEMPORAL**

El ámbito temporal de la propuesta de la consultoría es complementaciones en la base de datos del SINCA que incluya información actualizada de la calidad de los cuerpos de agua desde el 2010 al 2021, así como realizar el análisis de la evolución histórica a través mapas temáticos de la calidad de agua en diferentes periodos y épocas del TDPS lado Bolivia.

Para realizar el análisis temporal se presenta gráficas de tendencias y un análisis estadístico de los parámetros medidos en campo y laboratorio. Se utiliza la estadística descriptiva como un conjunto de herramientas que ayudan a resumir los datos (Villarroel Peñaranda, 2002).

El análisis estadístico resulta de suma importancia para el análisis de datos ya que podemos resumir características principales de los cuerpos de agua de una gran cantidad de datos medidos en diferentes años. En este sentido se presenta tablas con el resumen estadístico con valores mínimos, máximos y mediana por parámetro. Los valores mínimos y máximos son evaluados por época y comparados con los valores críticos del RMCH. La mediana es un valor muy importante para las variables cuantitativas y se define como el valor de la variable que deja el mismo número de datos antes y después de él, una vez ordenados estos, lo que nos ayudó a evaluar rápidamente si el 50% de los datos de los parámetros medidos están por debajo de la mediana, y el 50% por encima. Cada una de las tablas se encuentra relacionada con el gráfico estadístico de composición principal de los cuerpos agua por cuenca hidrográfica.

## 2. ESTADO DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DEL SISTEMA TDPS

A continuación, se muestra la delimitación geográfica de las cuencas: SÚchez, Alto Desaguadero, Medio Desaguadero, Katari, Mauri, Salar de Coipasa y Poopó, a nivel 3 y 4 del **territorio boliviano**, del Sistema Hídrico TDPS.

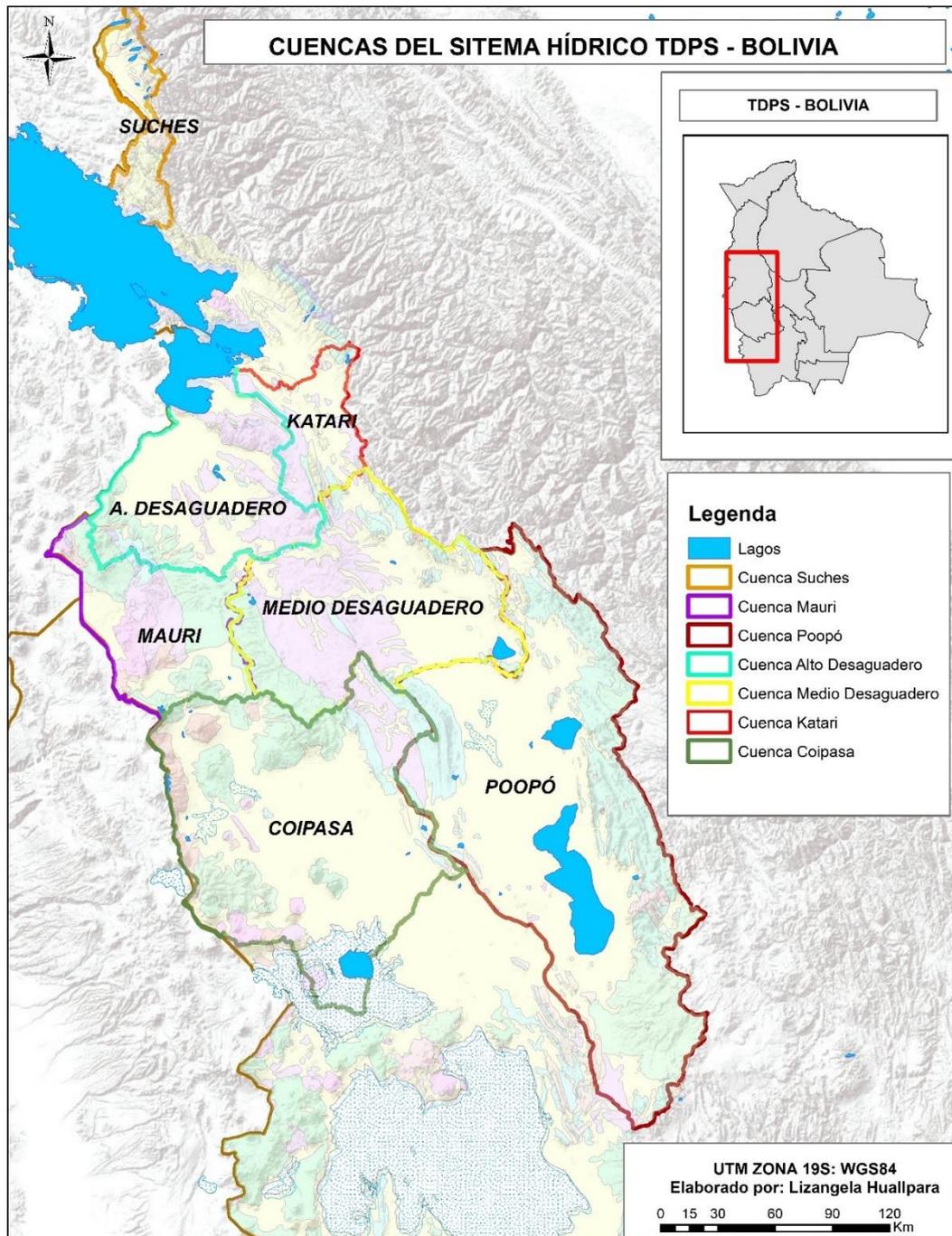


Figura 2. Cuencas del Sistema Hídrico TDPS – Bolivia.

## 2.1. CUENCA SÚCHEZ

La Cuenca del río SÚchez es un importante afluente de agua que desemboca en el Lago Titicaca, la misma que se encuentra compartida por Bolivia y Perú. En la figura 3 se puede observar la **delimitación geográfica de la Cuenca SÚchez a nivel 3 UH 017 dentro del territorio boliviano**, así como también la red de puntos de Monitoreo de calidad de agua dentro la cuenca.



Figura 3 . Cuenca SÚchez – Puntos de Muestreo – Bolivia.

### 2.1.1. CUENCA SÚCHEZ – AVENIDA

Se consideró 13 estaciones de monitoreo, 11 sobre el cauce principal del río SÚchez, 1 lago y un canal (Tabla 1).

Tabla 1. Estaciones de monitoreo - Cuenca SÚchez (Bolivia)

Código	Punto de muestreo	Cuerpo de agua	X	Y
SUCH01	Cabecera Lago SÚchez	Río	477252	8369553
SUCH02	Salida de Lago SÚchez	Lago	463436	8364251
SUCH03	Río SÚchez Taypistancia	Río	466376	8337072
SUCH4.5	Puente Patamanta	Río	483558	8319457
SUCH05	Río SÚchez en Chullupini	Río	487922	8312704
SUCH06	Río SÚchez Pte Ococoya	Río	494276	8302941
SUCH07	Río SÚchez - Pacobamba	Río	490475	8298826
SUCH08	Río SÚchez Pte Humanata	Río	486560	8289207
SUCH09	Río SÚchez Pte Taypichiñaya	Río	488467	8283634
SUCH10	Río SÚchez en Escoma	Río	485671	8268758
SUCH11	Río SÚchez Ollaychape	Río	484627	8265732
RJAP01	Puente Paria - Japo Kollo	Río	460159	8349893
CTH1	Canaleta chute T. Hermosa	Canal	463268	8363105

Se registró en una base de datos la información de 2 campañas de monitoreo en avenida:

- o 1° Campaña – marzo 2017
- o 2° Campaña – abril 2019

En la Tabla 2 se presenta un resumen estadístico de la base de datos consolidada de la Cuenca SÚchez en época de avenida, donde se puede evidenciar las principales características fisicoquímicas de 25 muestras de agua que corresponden a los 13 puntos de muestreo colectados en dos campañas, con excepción de un punto de muestreo en Puente Patamanta colectado 5 veces.

Los valores de pH son diferenciados desde ligeramente ácidos hasta alcalinos comprendidos entre 6 y 9 con una mediana de 8. La conductividad eléctrica varió en un rango desde los 43 hasta los 149  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 116  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ninguno de los parámetros mencionados supera los valores críticos según el RMCH.



de agua, los valores se encuentran por debajo del valor crítico de  $1600 \mu\text{S}/\text{cm}$  según el RMCH presentando valores más elevados en la parte sur de la Cuenca SÚchez (figuras 5 y 6).

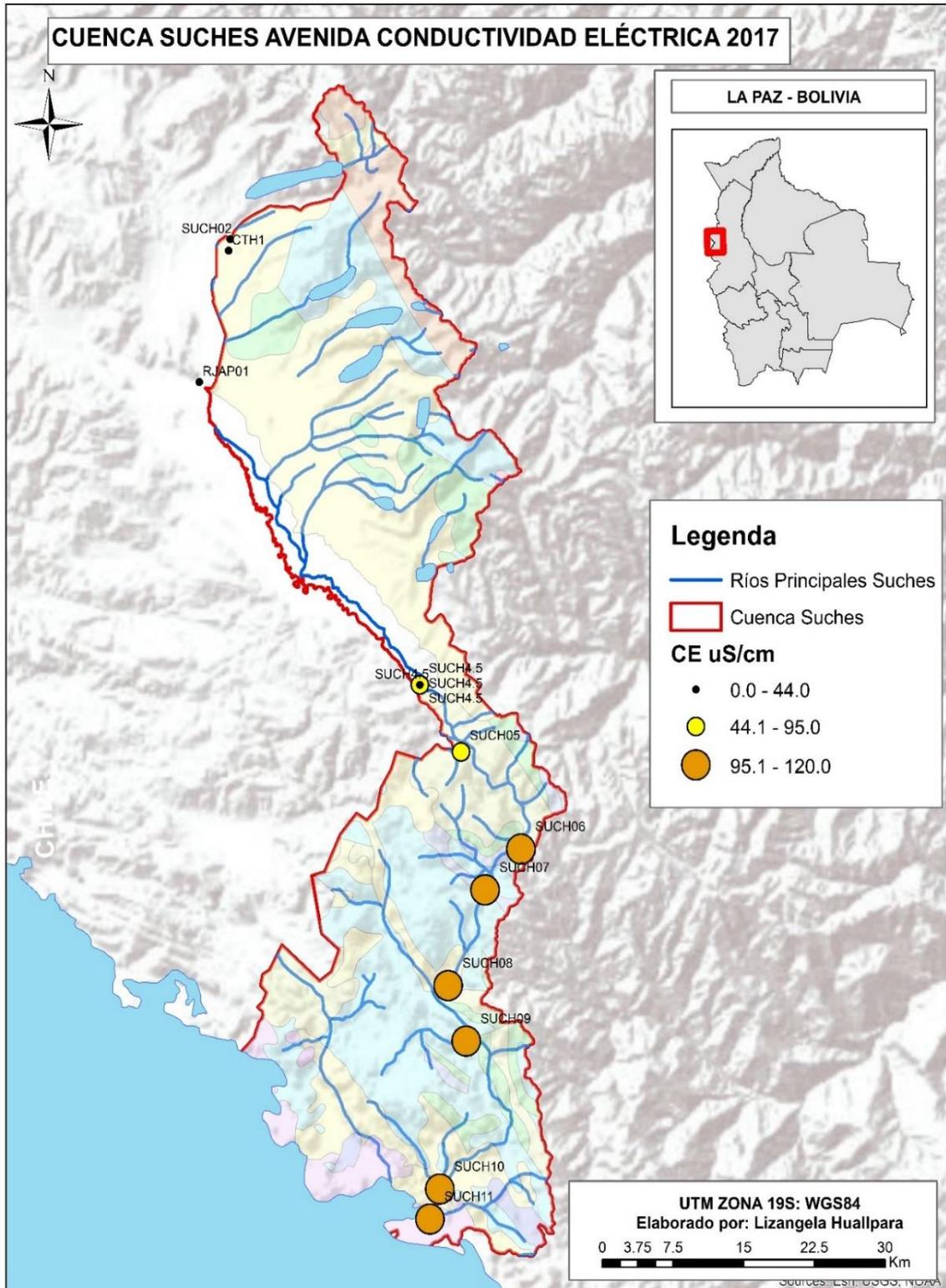


Figura 5. Mapa de la variación de la CE de la Cuenca SÚchez – Avenida 2017.

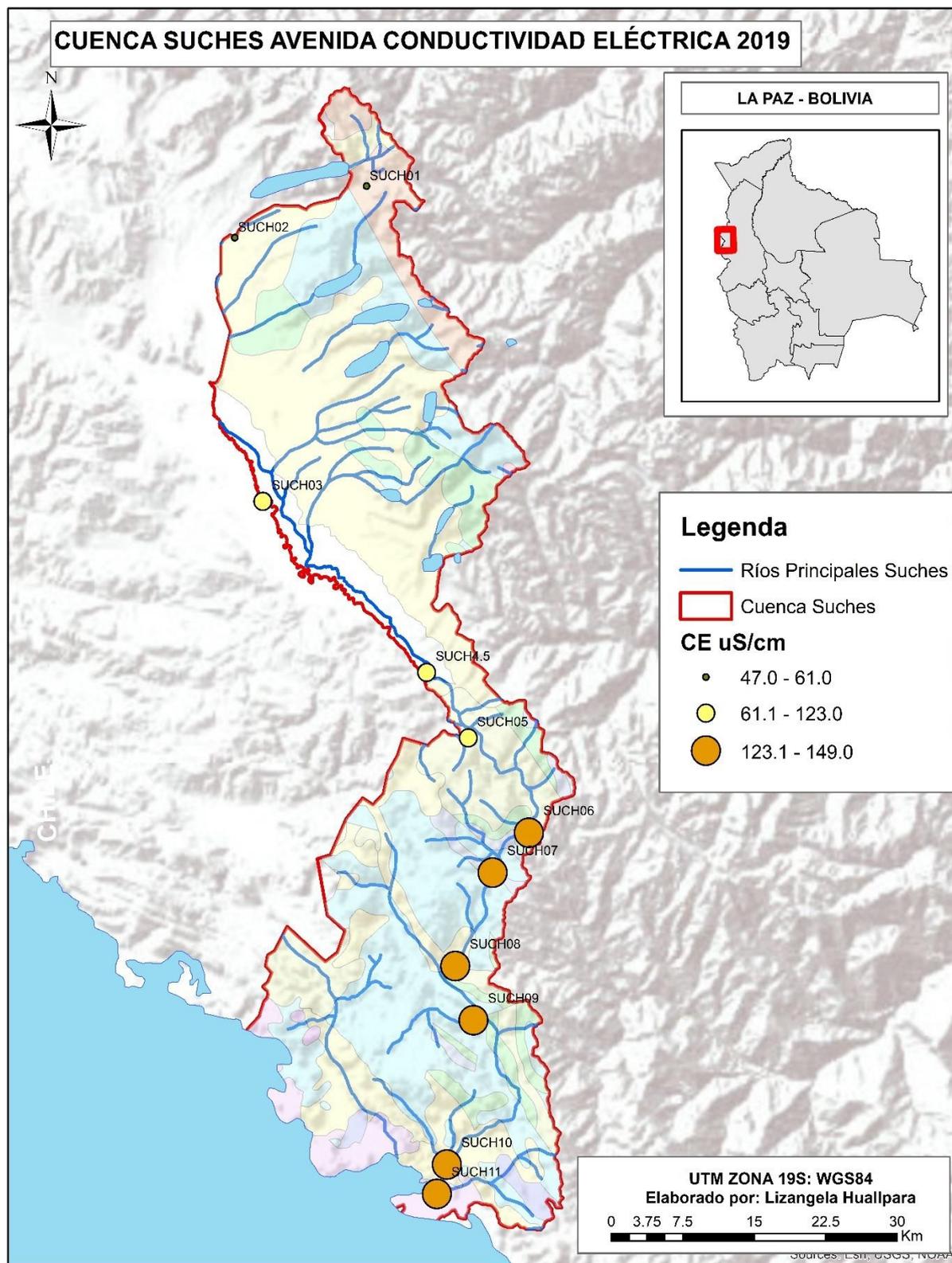


Figura 6. Mapa de la variación de la CE de la Cuenca Súchez – Avenida 2019.

En cuanto a los iones mayoritarios figuras 7 se puede observar que las concentraciones de cloruros, sulfatos, calcio y sodio se encuentran por debajo de los valores críticos según el RMCH con una tendencia mínima a nula a incrementar en concentraciones hasta el año 2019

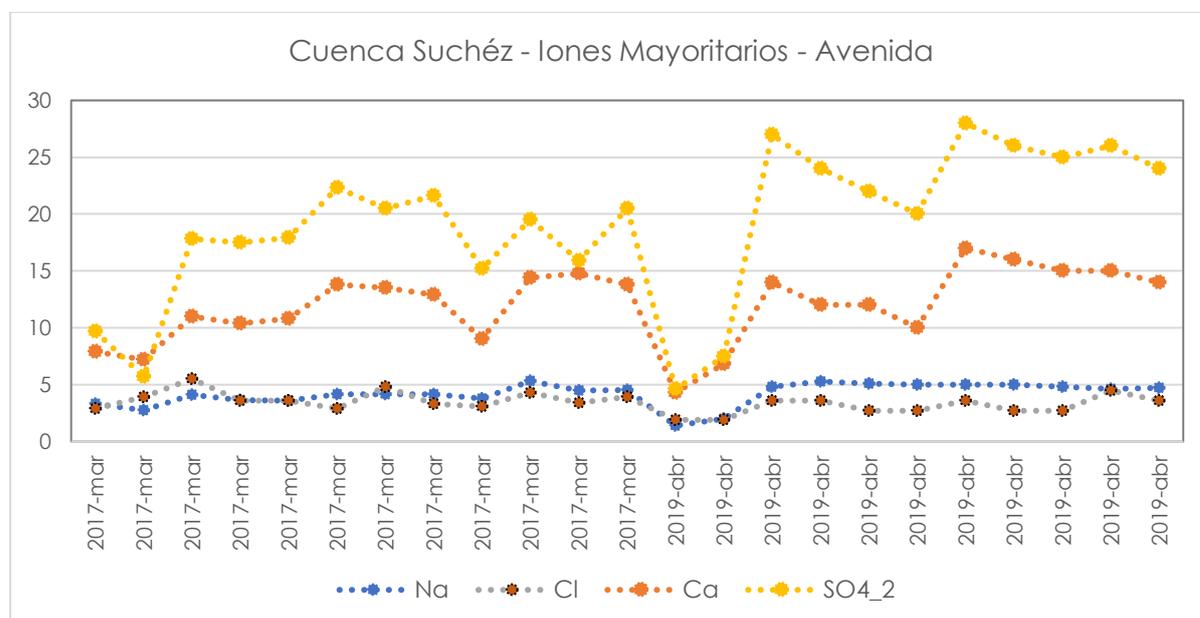


Figura 7. Gráfico de tendencias de Iones Mayoritarios en la Cuenca Súchez – Avenida.

Pese a que las concentraciones de los iones mayoritarios son bajas se hace evidente la presencia predominante de iones sulfato y calcio a comparación de los otros iones, característica que se muestra la cuenca Súchez en época de avenida (figuras 8 y 9). La predominancia de iones sulfato y calcio se debe a la interacción agua roca según las características geológicas del lugar generalmente por la presencia de rocas sedimentarias (lutita).

También se puede evidenciar algunas excepciones en muestras que no cuentan con resultados de iones mayoritarios analizados en laboratorio, por lo que se hace importante homogenizar el análisis de estos parámetros en todas las muestras en las siguientes campañas.

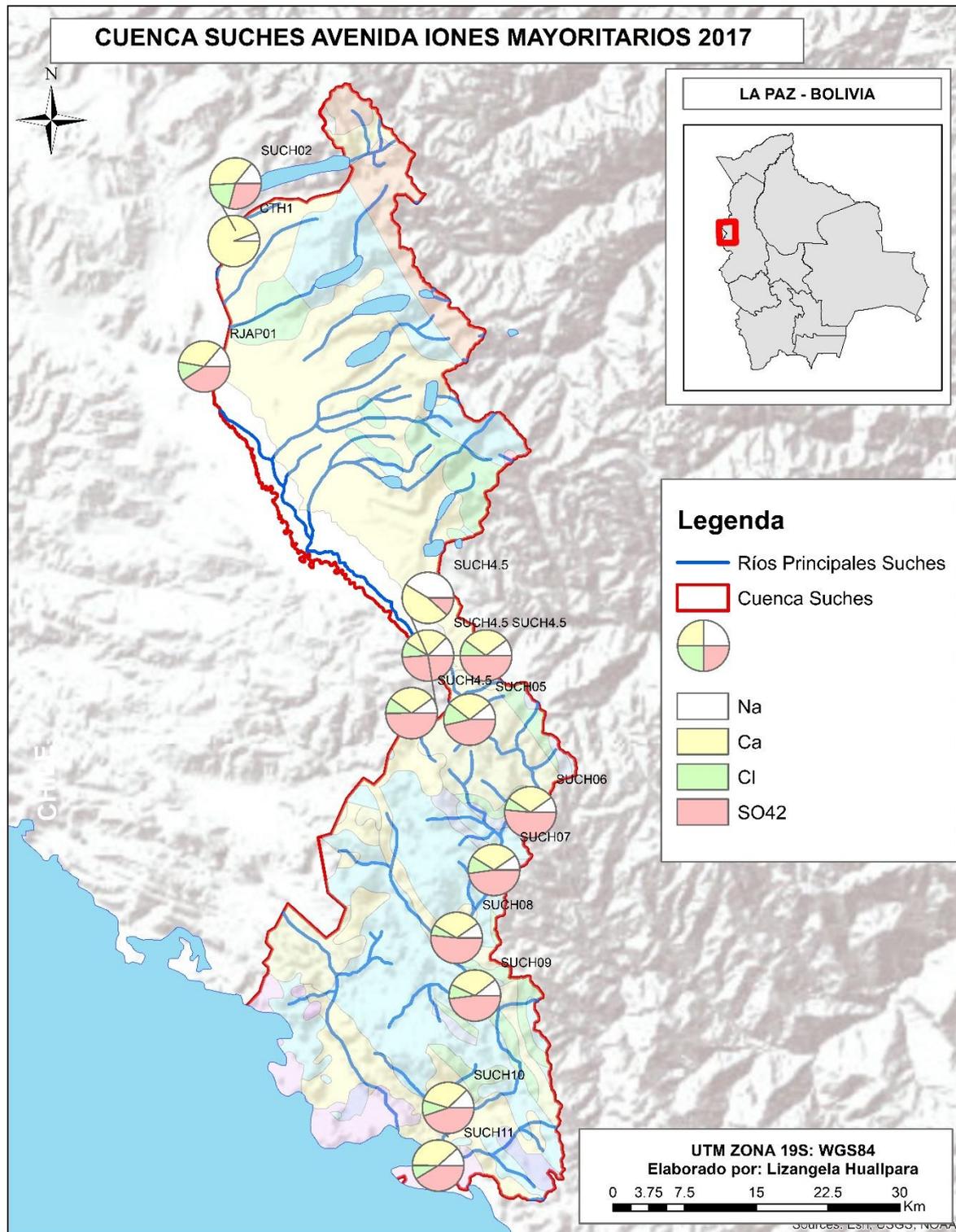


Figura 8. Mapa de variación de los Iones Mayoritarios de la Cuenca Súchez – Avenida 2017.

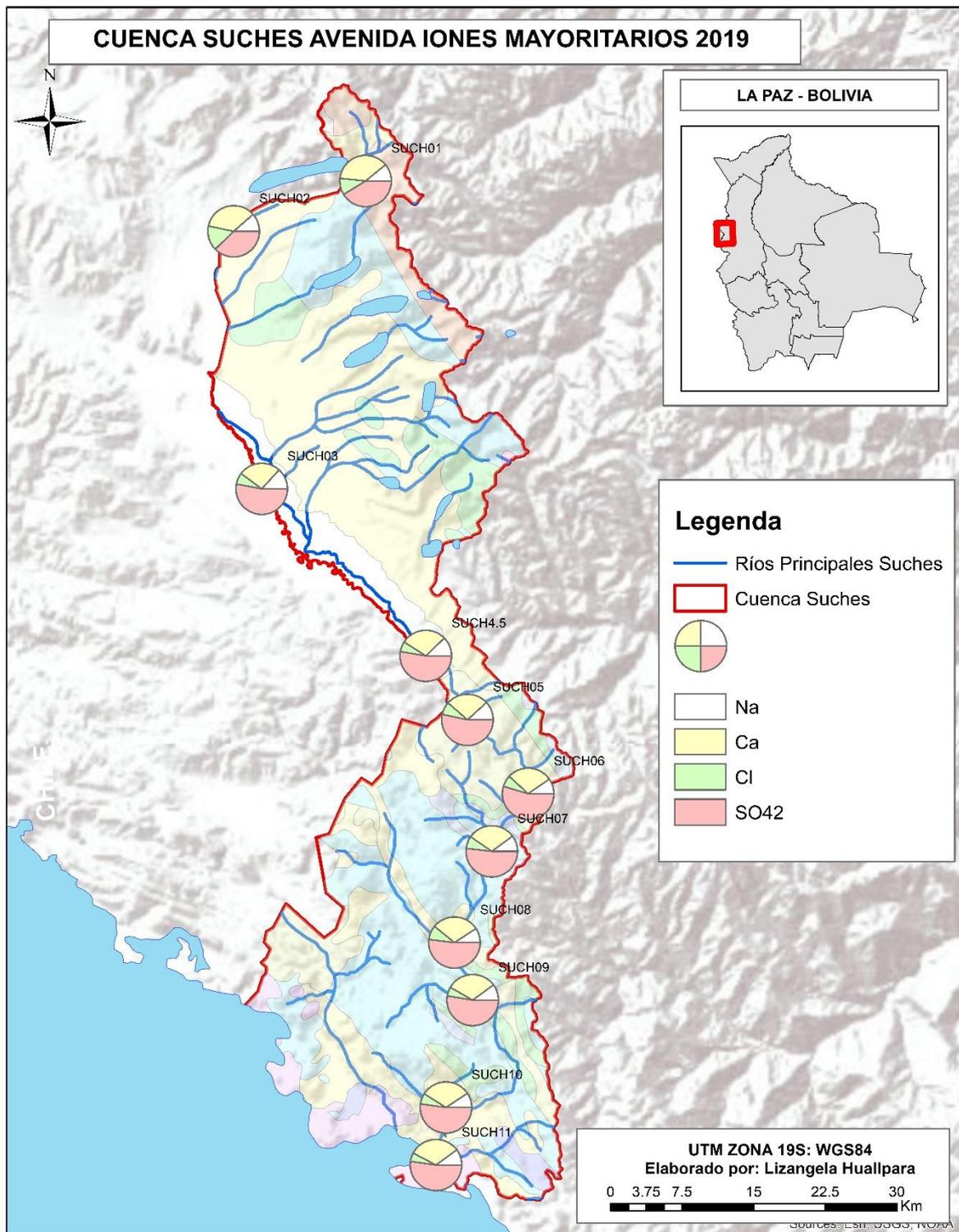


Figura 9. Mapa de variación de los Iones Mayoritarios de la Cuenca Súchez – Avenida 2019.

La variación espacio temporal de los constituyentes metálicos inorgánicos en los cuerpos de agua de la Cuenca Súchez en los años 2017 y 2019 específicamente: Al, Fe, As, Cd y Mn se muestra en las figuras 10, 11 y 12. La concentración de Al el 2017 es mayor a la de los otros elementos, sólo una de

las muestras sobrepasa el valor crítico de 1 mg/L de Al según el RMCH que corresponde a la muestra colectada en Puente Paria - Japo Kollo que reporta un valor de 2.3 mg/L Al el 2017, pero para el año 2019 los valores de aluminio drásticamente.

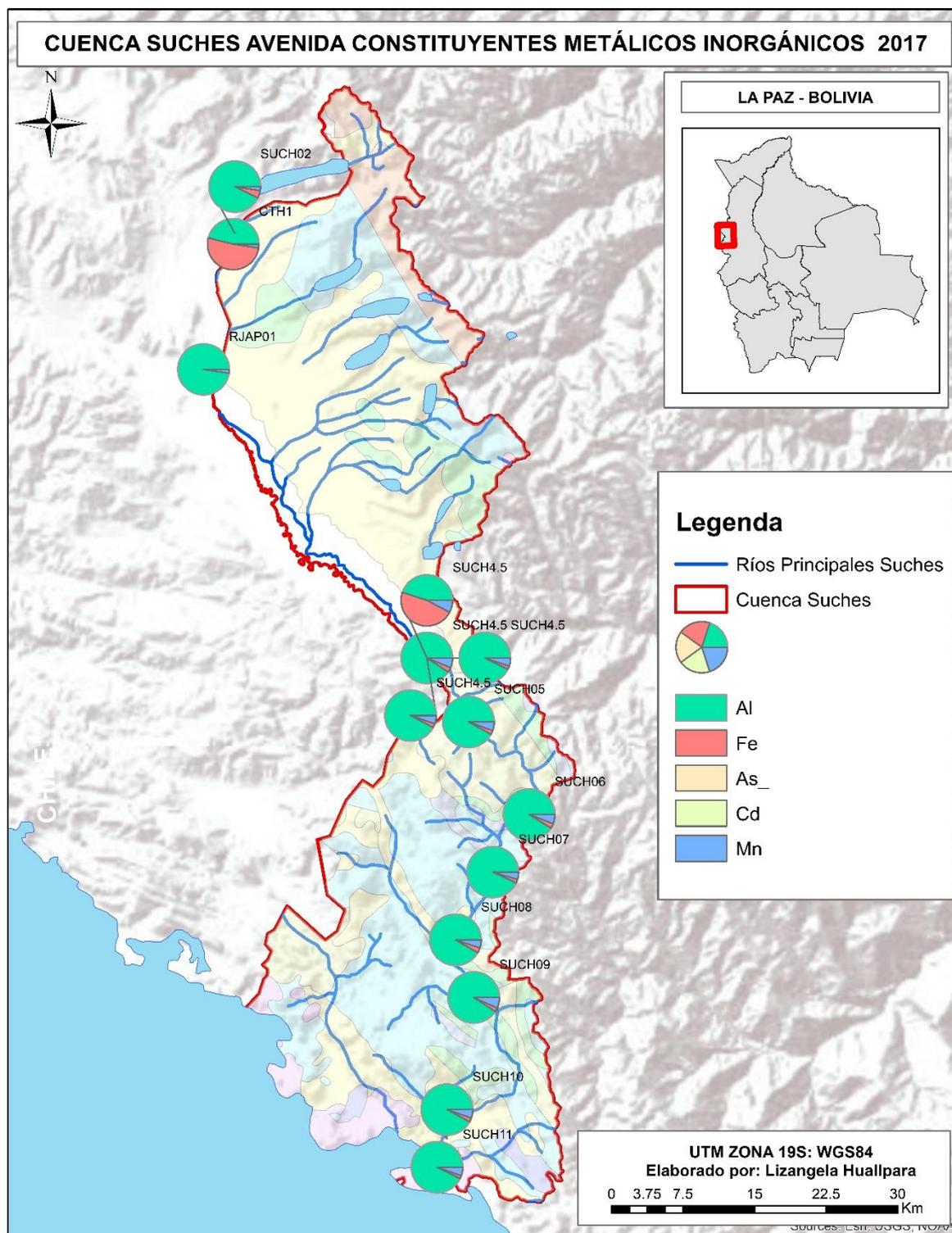


Figura 10. Mapa de variación Constituyentes Metálicos de la Cuenca Súcchez – Avenida 2017.

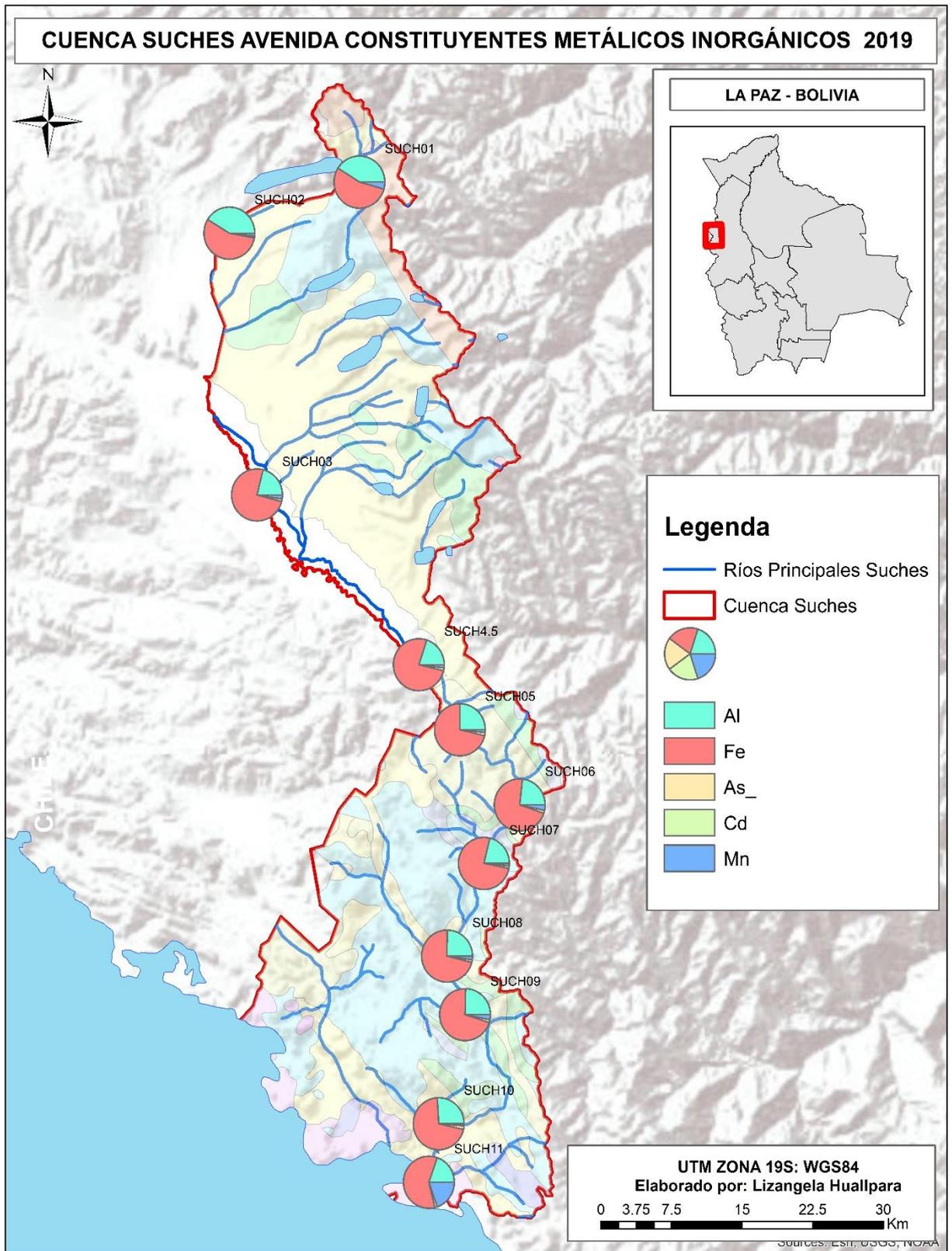


Figura 11. Mapa de variación Constituyentes Metálicos de la Cuenca Súchez – Avenida 2017.

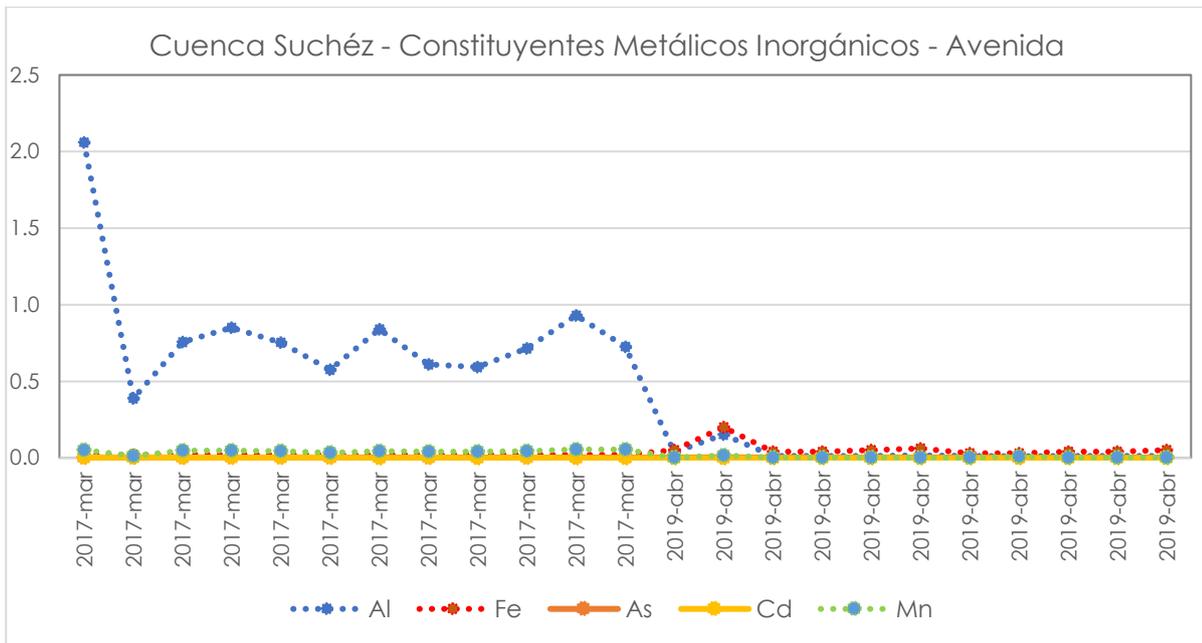


Figura 12. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos en la Cuenca Súchez – Avenida.

En relación con las concentraciones de Fe, As, Cd y Mn de los años 2017 y 2019 se hace evidente la presencia de elevadas concentraciones de estos elementos, superan los valores críticos según el RMCH en la muestra CTH1 colectada en una canaleta en Tierra Hermosa que corresponde a sedimento que se generan al lavar el material donde se recupera el oro, constituyentes poco solubles que son acumulados en el sector.

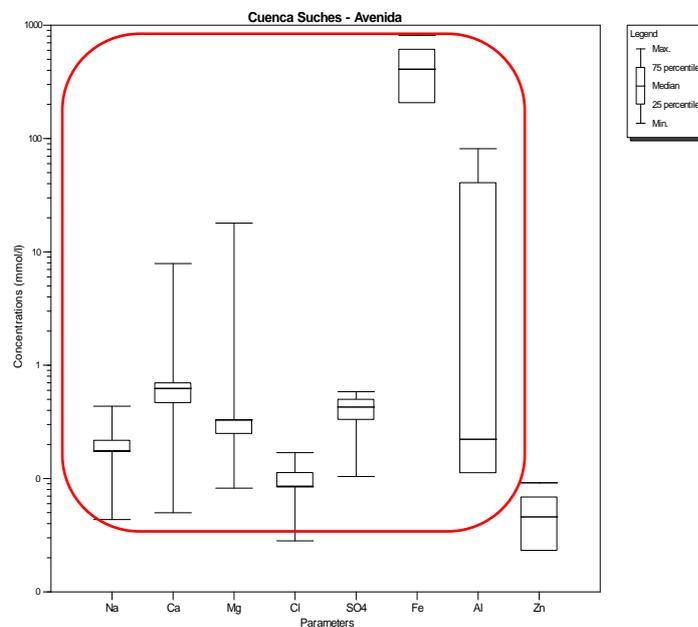


Figura 13. Gráfico estadístico de composición del agua - Cuenca Súchez – época de avenida.

El gráfico estadístico de componentes mayoritarios muestra que el tipo de agua característica de la Cuenca SÚCHEZ en avenida es del tipo **Ca-SO<sub>4</sub>-Al-Fe** ya que son los componentes mayoritarios que caracterizan las muestras colectadas en la Cuenca SÚCHEZ en avenida (figura 13).

### 2.1.2. CUENCA SÚCHEZ – ESTIAJE

Tabla 3. Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos. Cuenca SÚCHEZ - Estiaje.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Mediana	Valor crítico RMCH
pH	9,6	6,0	8,0	< 6 y > 9
Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$	274,0	19,0	131,0	>1600
Cloruros, mg/L	88,0	0,02	3,0	>500
Sulfatos, mg/L	148,0	0,2	26,0	>400
Fosfatos, mg/L	5,0	0,001	0,09	>1,0
Nitratos, mg/L	4,0	0,02	0,3	>50
Calcio, mg/L	77,0	1,0	13,0	>400
Magnesio, mg/L	30,0	0,02	5,0	>150
Sodio, mg/L	28	0,2	5	>200
Aluminio, mg/L	4,26	0,01	0,09	>1,0
Cadmio, mg/L	0,02	0,0	0,0005	>0,005
Hierro, mg/L	5,21	0,01	0,1	Fe (s)>1,0
Mercurio, mg/L	0,04	0,0001	0,0005	>0,001

En la tabla 3 se muestra un resumen estadístico de la base de datos consolidada de la Cuenca SÚCHEZ en época seca, donde se puede constatar las principales características fisicoquímicas de 150 muestras de agua de 13 mencionadas anteriormente en la Tabla 1.

Se registró en una base de datos la información de 12 campañas de monitoreo en estiaje:

- 1° Campaña – mayo 2011
- 2° Campaña – noviembre 2011
- 3° Campaña – julio 2012
- 4° Campaña – noviembre 2012
- 5° Campaña – octubre 2014
- 6° Campaña – mayo 2015
- 7° Campaña – noviembre 2015
- 8° Campaña – mayo 2016

- 9° Campaña – noviembre 2016
- 10° Campaña – noviembre 2017
- 11° Campaña – agosto 2018
- 12° Campaña – octubre 2019

Los valores de pH son variados desde ligeramente ácidos hasta alcalinos comprendidos entre 6 y 9,6 con una mediana de 8. La conductividad eléctrica varió en un rango desde los 19 hasta los 274  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 131  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ninguno de los parámetros mencionados supera los valores críticos según El RMCH.

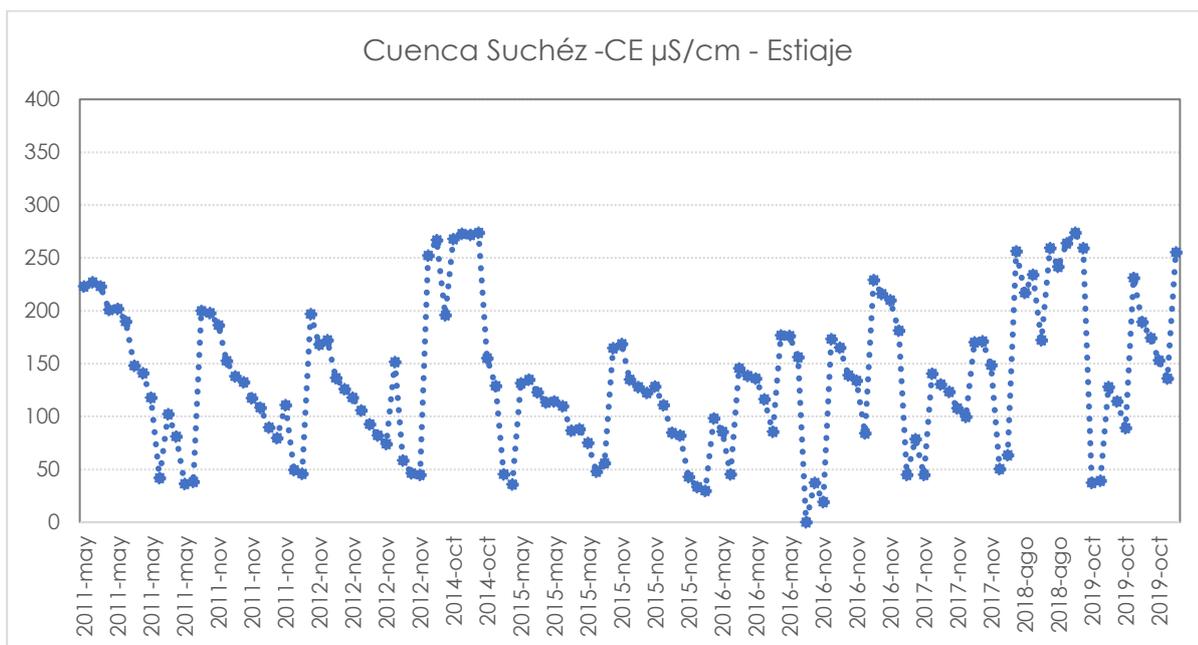


Figura 14. Gráfico de tendencias de la CE en la Cuenca Súcchez – Estiaje.

Las figuras 14, 15 y 16 muestran la variación espacio temporal de la CE de los cuerpos de agua ya descritos medidos en 150 muestras. La CE varió en un rango desde los 19 hasta los 274  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 131  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ninguno de los valores supera el valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  según el RMCH, presentando valores más elevados en la parte sur de la Cuenca Súcchez antes de su desembocadura en el Lago Titicaca con un aporte de alrededor de 227 a 255  $\mu\text{S}/\text{cm}$  desde al año 2011 al 2019 (figuras 15 y 16).

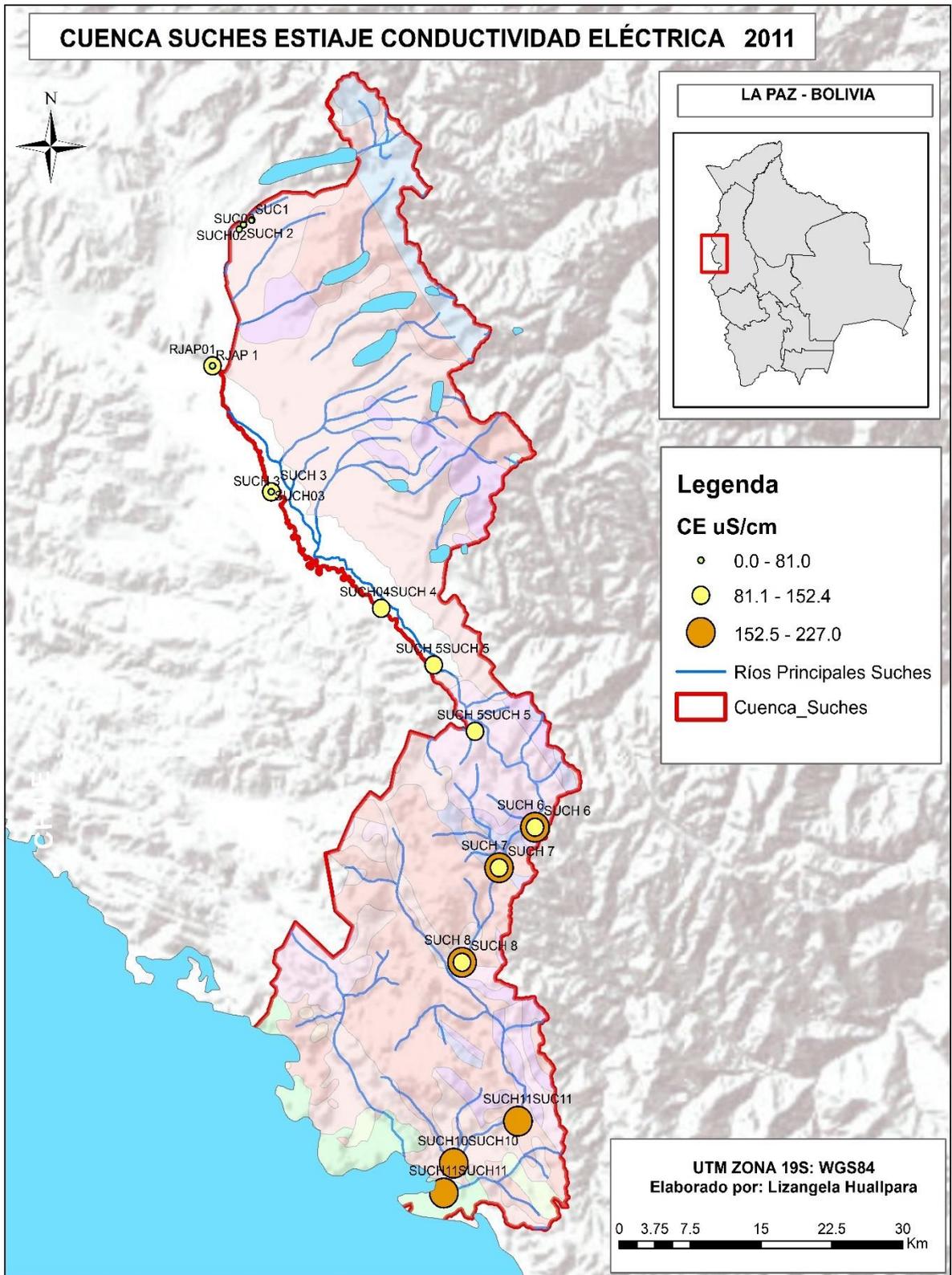


Figura 15. Mapa de variación de la CE de la Cuenca Súcches – Estiaje, 2011.

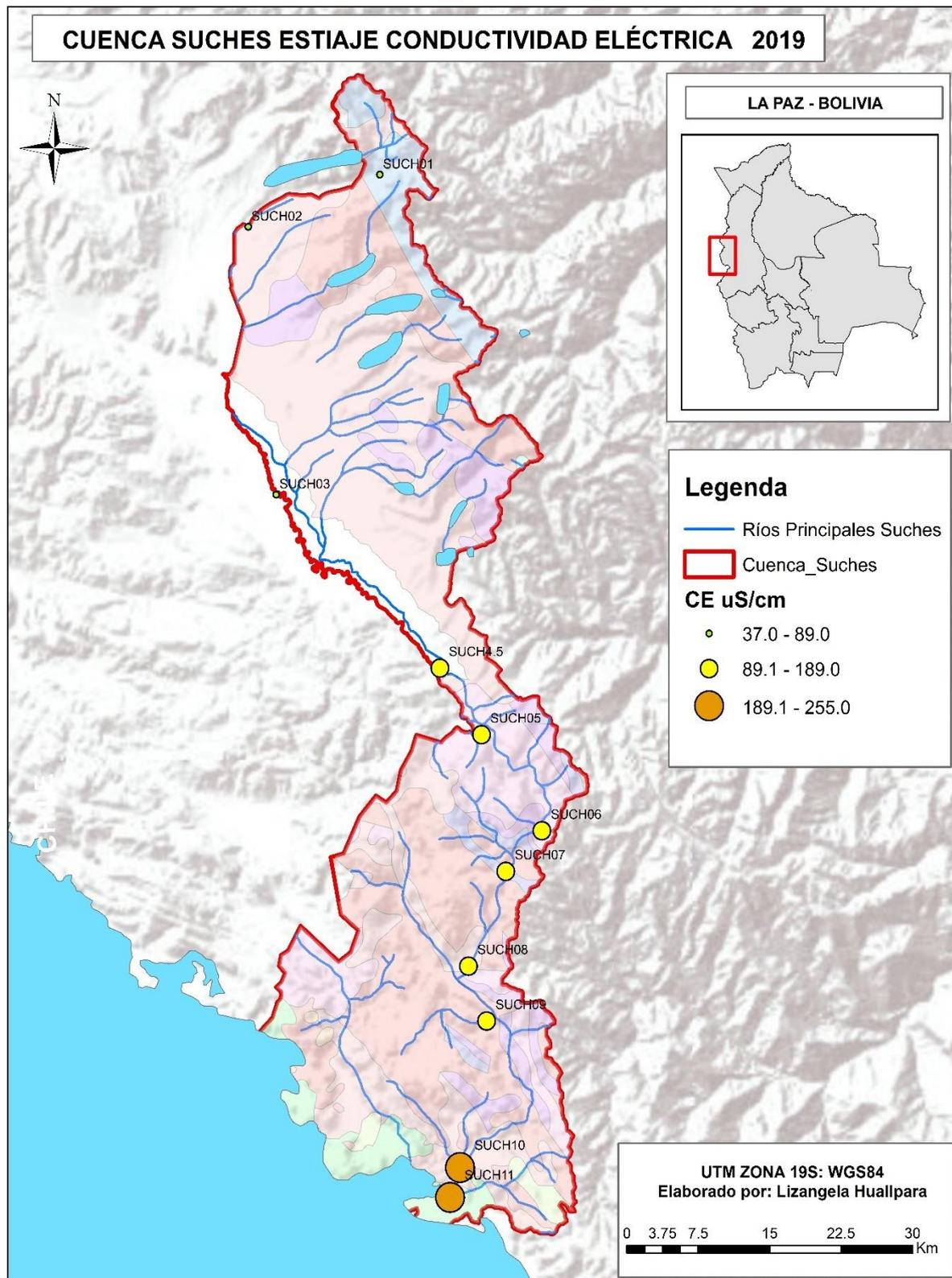


Figura 16. Mapa de variación de la CE de la Cuenca Súchez – Estiaje, 2019.

Con relación a los iones mayoritarios figuras 17,18 y 19, se puede observar que las concentraciones de cloruros, sulfatos, calcio y sodio se encuentran por debajo de los valores críticos según el RMCH, pese a que las concentraciones de los iones son bajas resalta la presencia predominante de iones sulfato y calcio a comparación de los otros iones característica que se muestra en toda la Cuenca Súchez en estiaje, con excepción del año 2014 (figura 19), porque no se determinaron sulfatos en ninguna de las muestras que se colectaron.

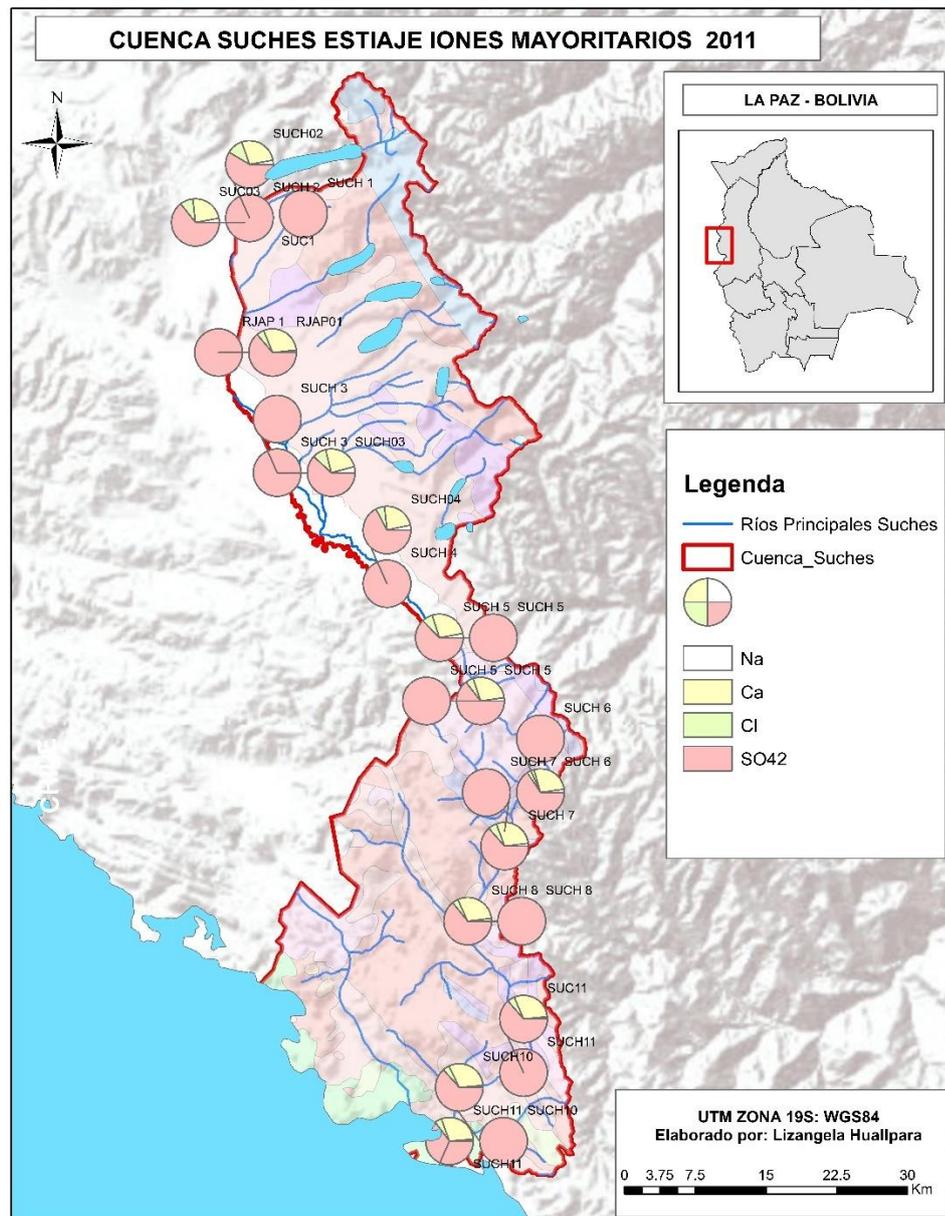


Figura 17. Mapa de variación de los Iones Mayoritarios de la Cuenca Súchez – Estiaje, 2011.

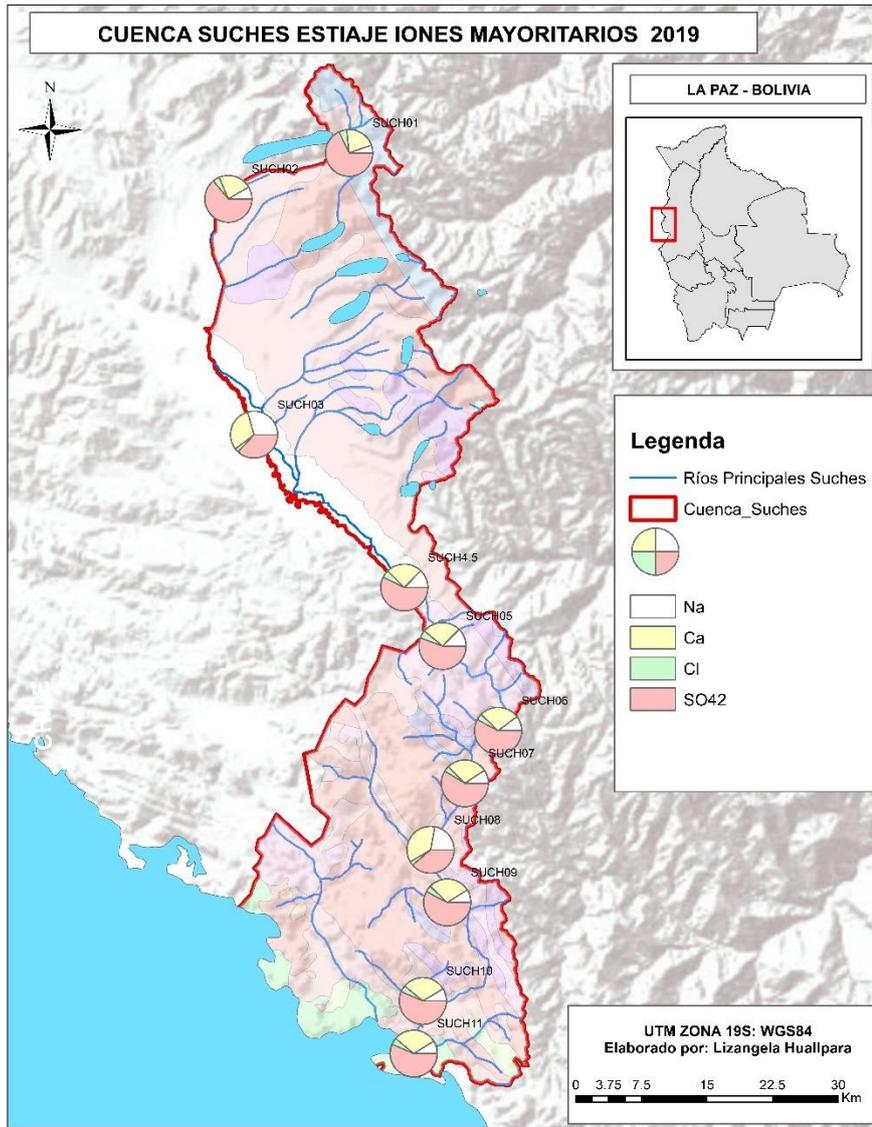


Figura 18. Mapa de variación de los Iones Mayoritarios de la Cuenca Súchez – Estiaje, 2019.

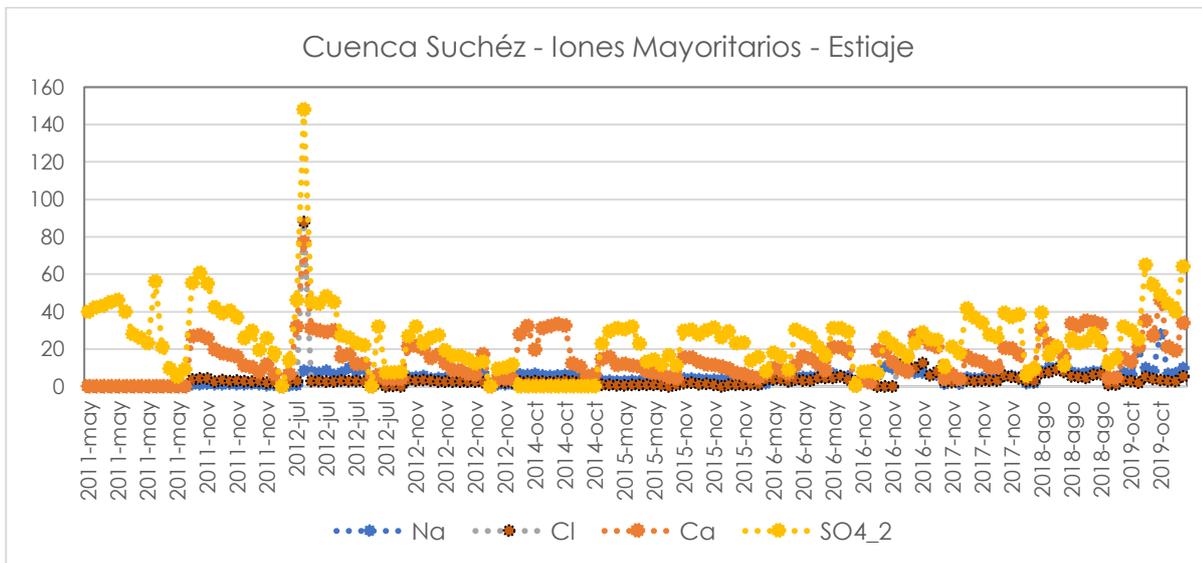


Figura 19. Gráfico de tendencias de Iones Mayoritarios en la Cuenca Súchez – Estiaje.

Las figuras 20, 21 y 22 muestran la variación espacio temporal de los constituyentes metálicos inorgánicos en los cuerpos de agua de la Cuenca SÚchez en los años 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019 específicamente los componentes traza: Al, Fe, As, Cd y Mn, si bien se observa que la concentración de Fe es mayor a la de los otros elementos en los años 2011 y 2012 en relación a los años 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019 que se caracterizan por presentar elevadas de concentraciones de Al, Fe, As, Cd, Mn y Hg concentraciones que superan a los valores críticos según el RMCH, lo que es indicador de contaminación de los cuerpos de agua.

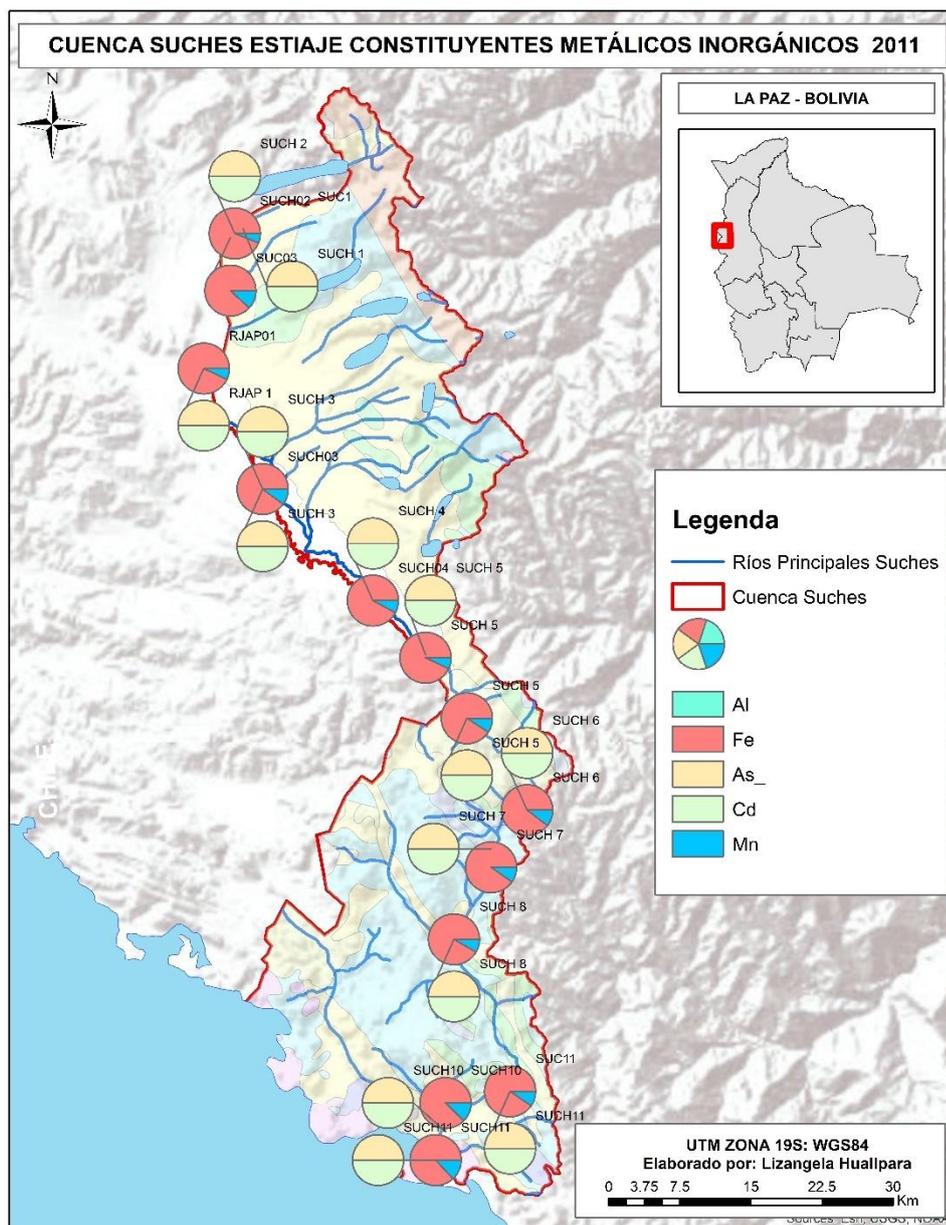


Figura 20. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca SÚchez – Estiaje, 2011.

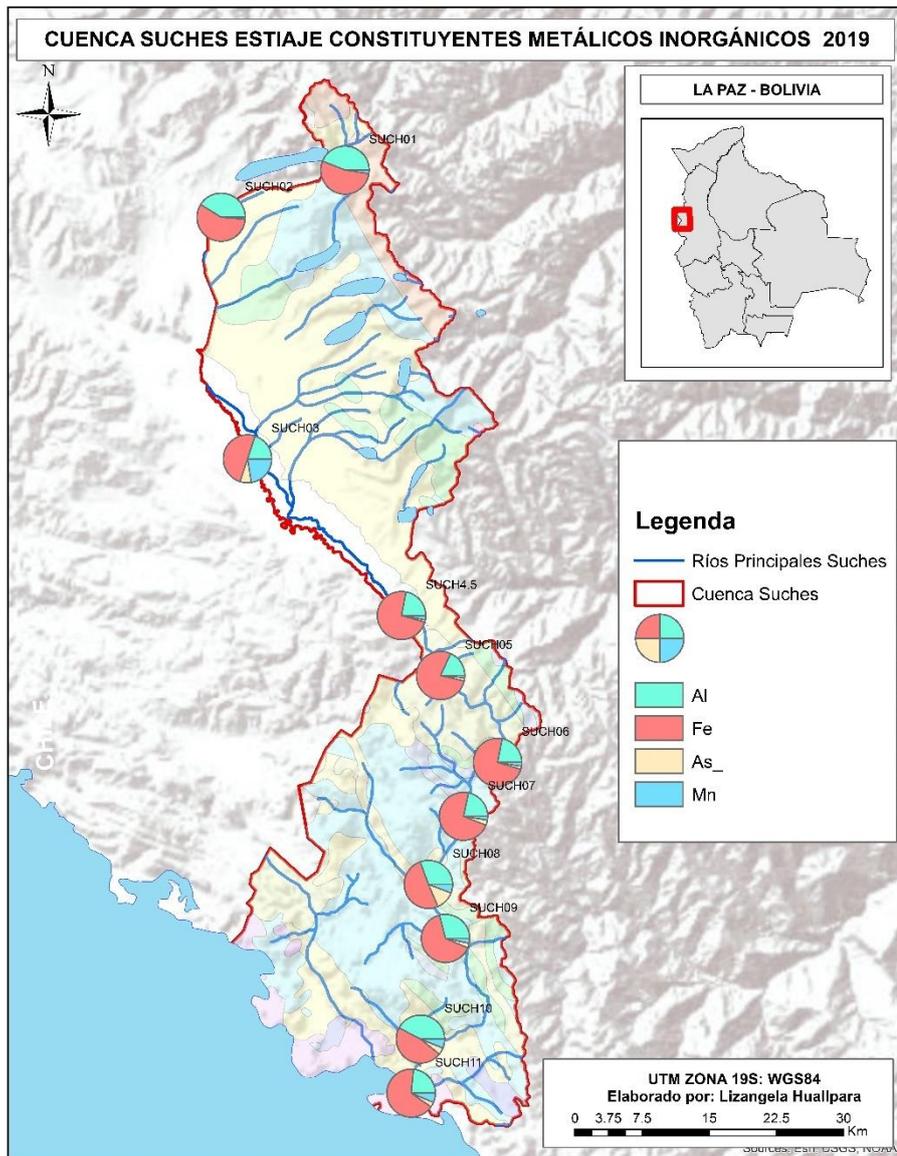


Figura 21. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca Súchez – Estiaje, 2019.

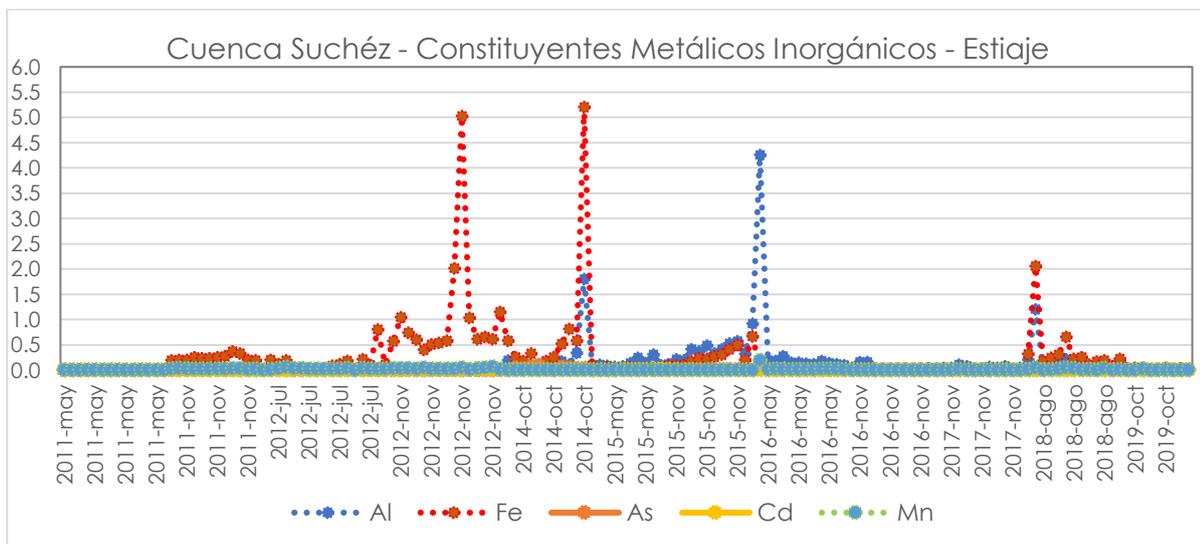


Figura 22. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos - Cuenca Súchez – Estiaje.

El gráfico estadístico de componentes mayoritarios (figura 23) muestra que el tipo de agua característica de la Cuenca Súchez en estiaje es del tipo **Ca-SO<sub>4</sub>-Fe** ya que representan los componentes mayoritarios de las muestras colectadas en esta época.

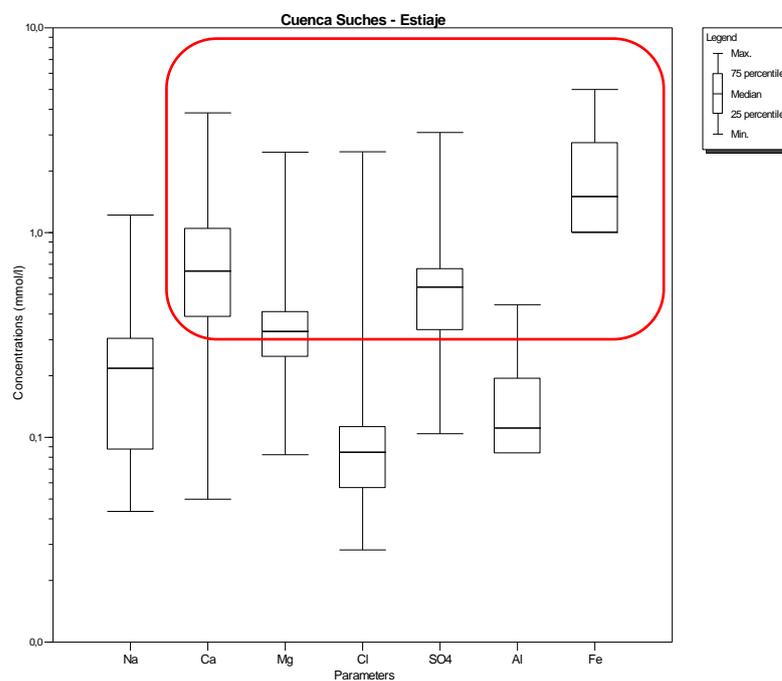


Figura 23. Gráfico estadístico de Composición del agua-Cuenca Súchez – Estiaje.

La concentración de los componentes mayoritarios en la Cuenca Súchez se incrementa en época seca esto debido a que el volumen de agua disminuye y se concentran las especies químicas dentro de la misma, se hace evidente en el gráfico estadístico de ambas épocas. La actividad minera está relacionada con la presencia de levadas concentraciones de hierro y sulfato, diferentes estudios demuestran que los casos de contaminación del río Súchez en Bolivia y Perú se encuentran asociados a las prácticas artesanales de explotación minera (Salas, 2021).

La predominancia de iones sulfato y calcio se debe a la interacción agua roca según las características geológicas del lugar generalmente por la presencia de rocas sedimentarias como lutitas (Sanchez, 2012)



## 2.2. CUENCA MAURI

La Cuenca del río Mauri es un importante afluente del río Desaguadero, la misma que se encuentra compartida por Bolivia y Perú. En la figura 24 se puede observar la **delimitación geográfica de la Cuenca Mauri a nivel 3 UH 014** y la red de puntos de Monitoreo de calidad del agua dentro la cuenca.

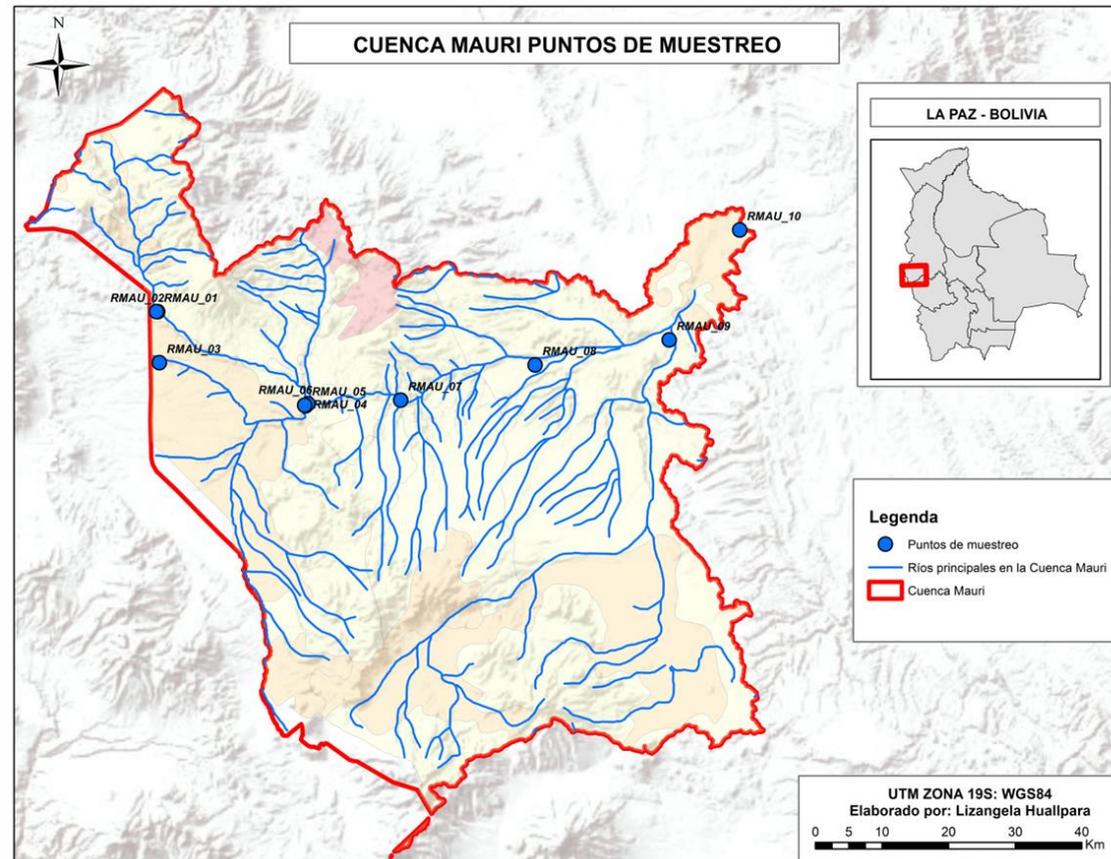


Figura 24. Cuenca Mauri – Puntos de Muestreo – Bolivia.

## 2.2.1. CUENCA MAURI – AVENIDA

Se consideró 8 estaciones de monitoreo, sobre el cauce principal del río Mauri (Tabla 4).

Tabla 4. Estaciones de monitoreo - Cuenca Mauri (Bolivia)

Código	Punto de muestreo	Cuerpo de agua	X	Y
RMAU_01a	Río Mauri en puente Chinche	Río	454422	8072836
RMAU_03	Río Caño en estación Jalaro	Río	451602	8068747
RMAU_04a	Río kaquena antes del río Abaroa	Río	465474	8056711
RMAU_05	Río Mauri en Abaroa	Río	473407	8062410
RMAU_07a	Río Taipuma - Vilca Palca	Río	486470	8062893
RMAU_08	Río Mauri en Campero	Río	508027	8068416
RMAU_10	Río Mauri en Calacoto	Río	538756	8088518
RMAU_11	Río Blanco en Calacoto	Río	527923	8073132

Se registró en una base de datos la información de 1 campaña de monitoreo en avenida:

- o 1° Campaña – abril 2015

*En la Tabla 5 se presenta un resumen estadístico de la base de datos consolidada de la Cuenca Mauri en época de avenida, donde se puede evidenciar las principales características de los cuerpos de agua.*

Tabla 5. Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos. Cuenca Mauri - Avenida.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Mediana	Valor crítico RMCH
pH	9,0	8,0	9,0	< 6 y > 9
Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$	1710,0	216,0	769,0	>1600
Cloruros, mg/L	268,0	9,0	147,0	>500
Sulfatos, mg/L	ND	ND	ND	>400
Fosfatos, mg/L	2,0	1,0	1,0	>1,0
Nitratos, mg/L	0,4	0,1	0,1	>50
Calcio, mg/L	68,0	11,0	20,0	>400
Magnesio, mg/L	ND	ND	ND	>150
Sodio, mg/L	99,0	11,0	73,0	>200
Arsénico, mg/L	2,17	0,001	0,02	>0,1
Boro, mg/L	4,8	0,3	3,2	>1,0
Cadmio, mg/L	0,01	0,001	0,005	>0,005

La conductividad eléctrica varió en un rango desde los 1710 hasta los 216  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 1769  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , de los parámetros mencionados el que supera los valores críticos según El RMCH es la

conductividad. Las figuras 25 y 26 muestran la variación espacio temporal de la CE de los cuerpos de agua medidos en 8 muestras de agua. La muestra con el código RMAU\_04a que corresponde al río Kaquena presenta una CE de 1710  $\mu\text{S}/\text{cm}$  que supera al valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  según el RMCH.

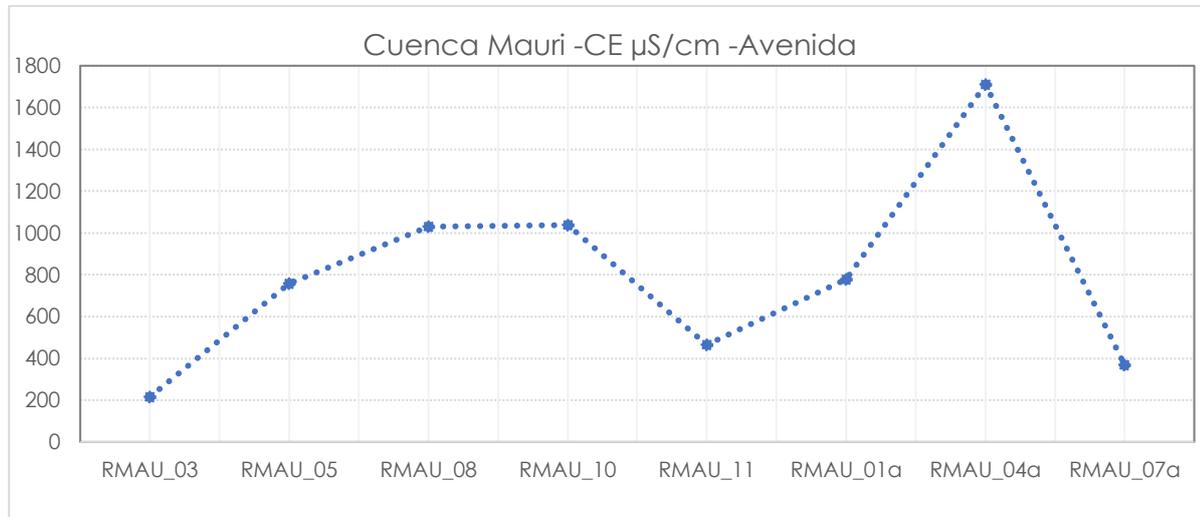


Figura 25. Gráfico de tendencias de la CE en la Cuenca Mauri – Avenida.

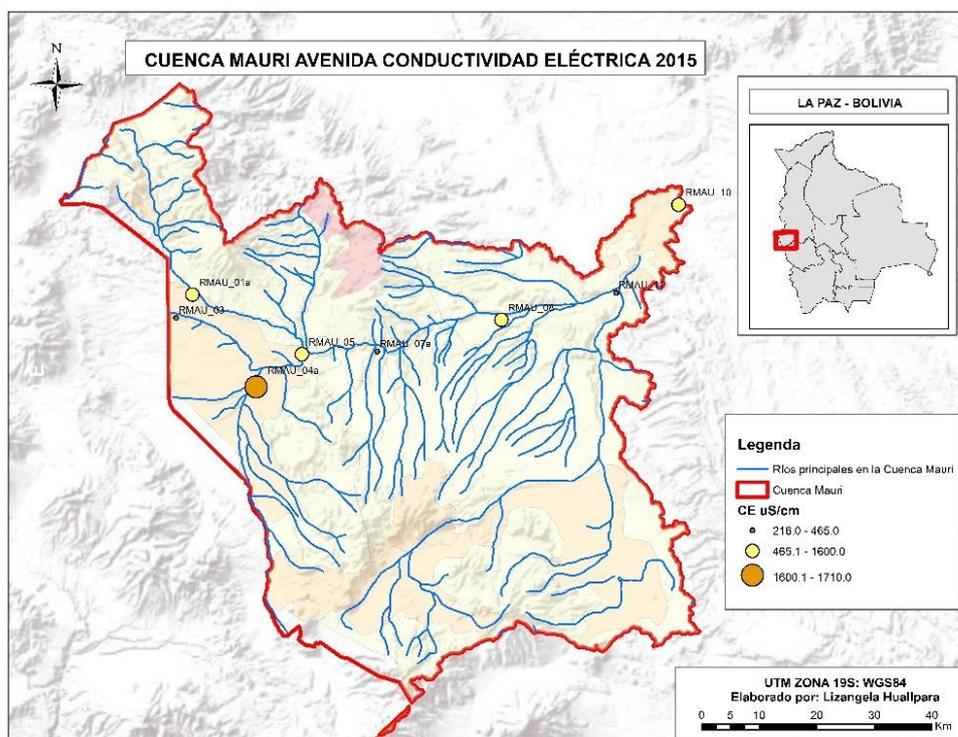


Figura 26. Variación de la CE de la Cuenca Mauri – Avenida.

En cuanto a los iones mayoritarios figuras 27 y 28, las concentraciones de cloruros, sulfatos, nitratos, calcio y sodio se encuentran por debajo del valor crítico según el RMCH. Se identificó varias muestras que presentan elevadas concentraciones de fosfatos con valores de 1 hasta los 1.62 mg/L que

sobrepasan el valor crítico según el RMCH y corresponden a las muestras RMAU\_03, RMAU\_05, RMAU\_08, RMAU\_10, RMAU\_01a y RMAU\_04a del 2015.

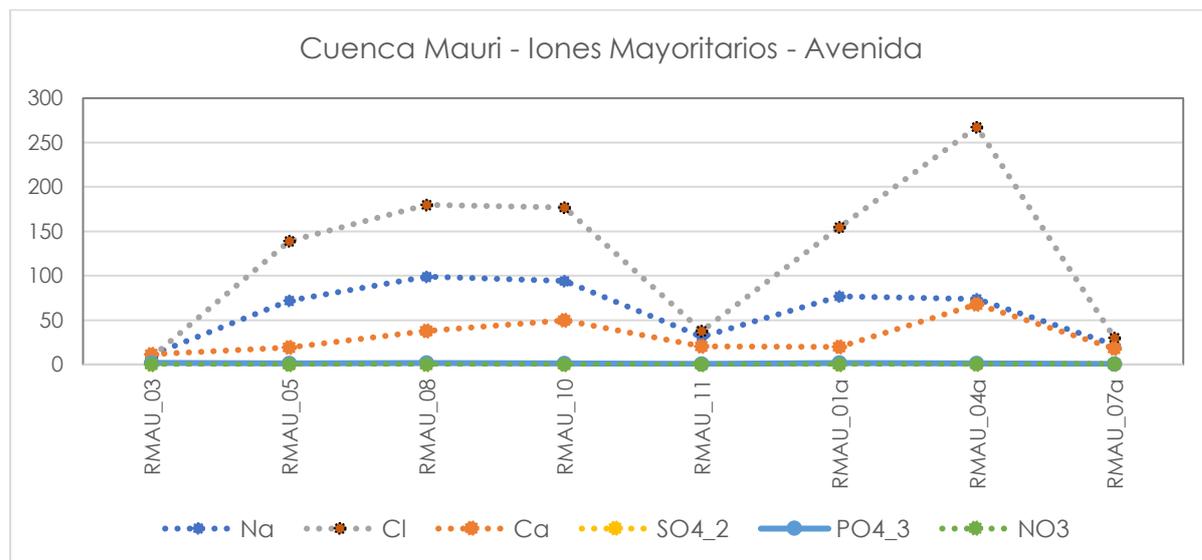


Figura 27. Gráfico de tendencias de Iones Mayoritarios en la Cuenca Mauri – Avenida.

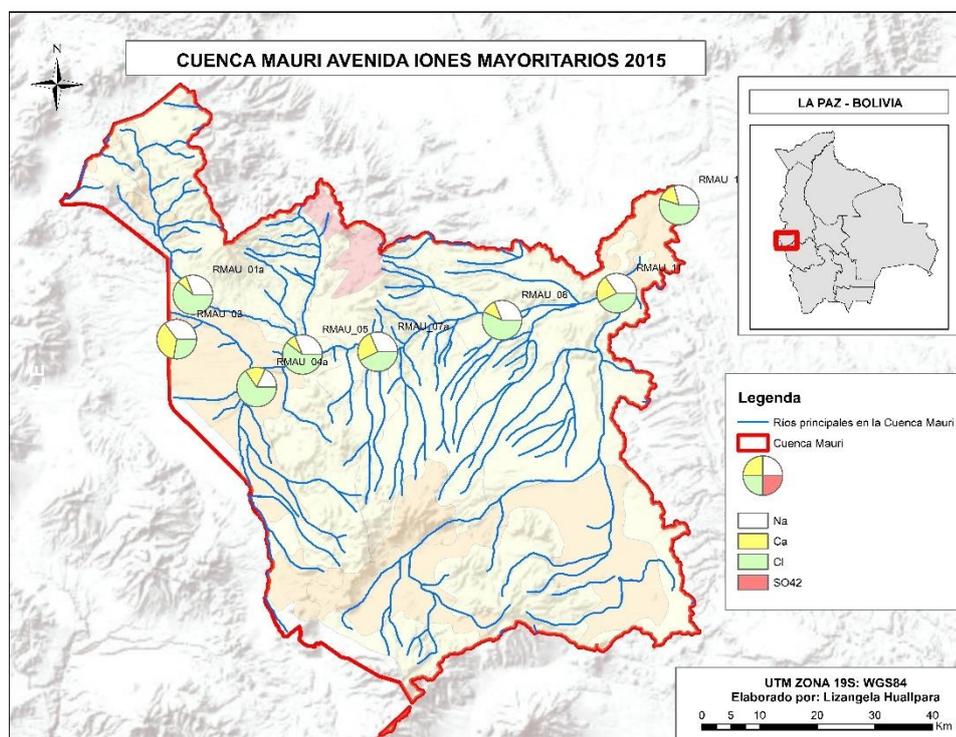


Figura 28. Variación de los Iones Mayoritarios de la Cuenca Mauri – Avenida.

Los constituyentes metálicos inorgánicos específicamente: As, Cd, Hg y B presentan valores que superan el valor crítico según el RMCH (figuras 29 y 30). Estudios anteriores demuestran que el río arrastra una importante concentración de arsénico y boro luego de que sus aguas atraviesan por unas borateras en la parte alta de la cuenca, lo que constituye un proceso

hidro-químico que causa la contaminación de los cuerpos de agua en la Cuenca Mauri ((PNUMA), 2011).

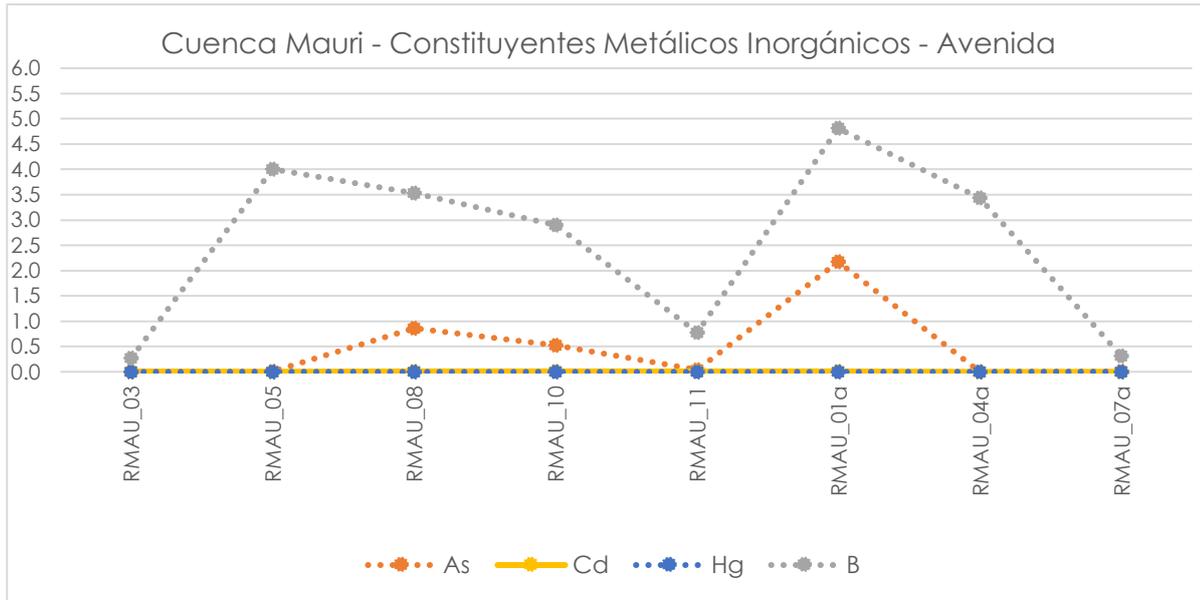


Figura 29. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos en la Cuenca Mauri – Avenida.

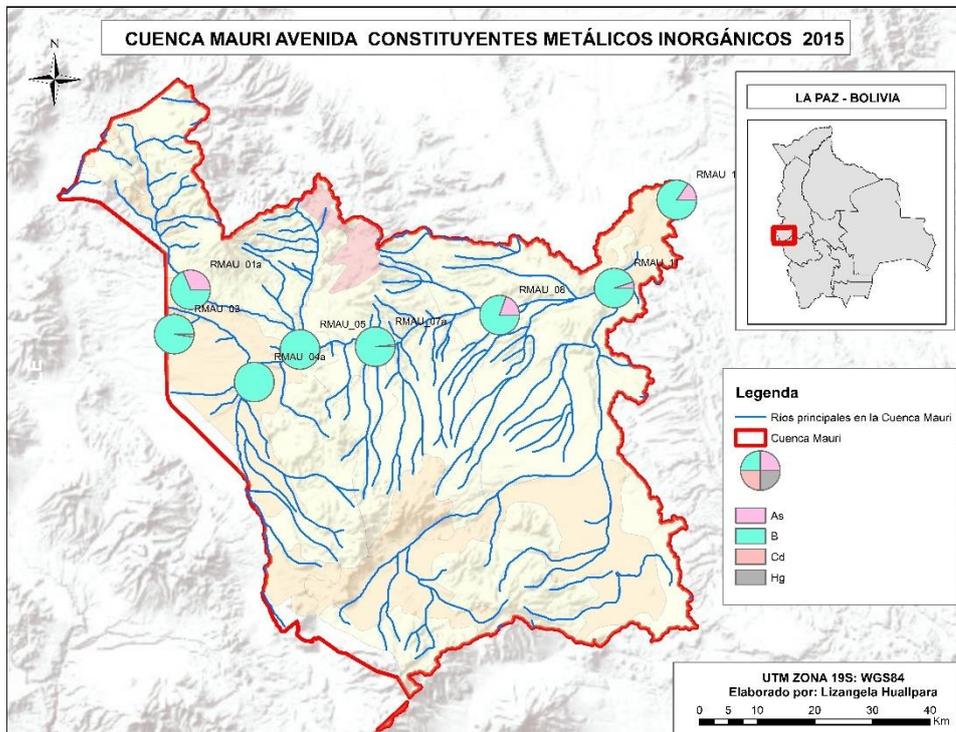


Figura 30. Variación Constituyentes Metálicos de la Cuenca Mauri – Avenida.

El gráfico estadístico (Figura 31) de componentes mayoritarios muestra que el tipo de agua característica de la Cuenca Mauri en avenida es del tipo **Na-Ca-Cl-B** ya que son los componentes mayoritarios que caracterizan las muestras colectadas en avenida.

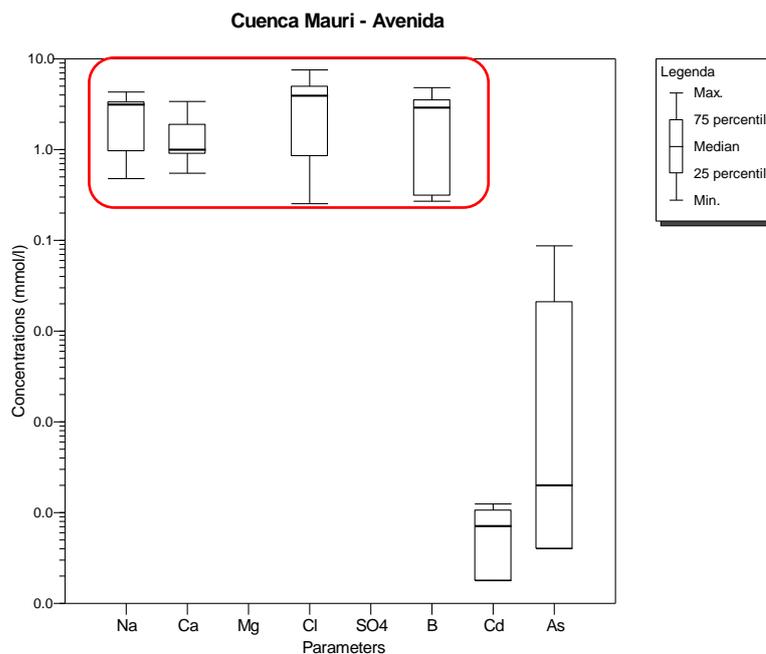


Figura 31. Gráfico estadístico de Composición del agua- Cuenca Mauri -Avenida.

### 2.2.1. CUENCA MAURI – ESTIAJE

En la Tabla 6 se presenta un resumen estadístico de la base de datos consolidada de la Cuenca Mauri en época seca, donde se puede evidenciar las principales características fisicoquímicas de 123 muestras de agua que corresponden a 10 puntos de monitoreo en los años 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019.

Tabla 6. Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos. Cuenca Mauri - Estiaje.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Mediana	Valor crítico RMCH
pH	10,0	7,0	8,0	< 6 y > 9
Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$	4390,0	12,0	1040,0	>1600
Cloruros, mg/L	1073,0	2,0	149,0	>500
Sulfatos, mg/L	290,0	2,0	30,0	>400
Fosfatos, mg/L	2,0	0,01	0,3	>1,0
Nitratos, mg/L	1,0	0,1	1,0	>50
Calcio, mg/L	152,0	1,0	32,0	>400
Magnesio, mg/L	67,0	1,0	13,0	>150
Sodio, mg/L	723,0	5,0	123,0	>200
Antimonio, mg/L	0,03	0,0001	0,002	>0,01
Arsénico, mg/L	4,9	0,001	0,2	>0,1
Boro, mg/L	14,9	0,04	2,5	>1,0
Cadmio, mg/L	0,1	0,00001	0,001	>0,005
Mercurio, mg/L	0,1	0,0003	0,001	>0,001

Se registró en una base de datos la información de 11 campañas de monitoreo en estiaje:

- 1° Campaña – mayo 2011
- 2° Campaña – noviembre 2011
- 3° Campaña – junio 2012
- 4° Campaña – noviembre 2012
- 5° Campaña – octubre 2014
- 6° Campaña – abril 2015
- 7° Campaña – noviembre 2015
- 8° Campaña – noviembre 2016
- 9° Campaña – octubre 2017
- 10° Campaña – octubre 2018
- 11° Campaña – julio 2019

La conductividad eléctrica varió en un rango de 12 a 4390  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 1040  $\mu\text{S}/\text{cm}$  valores que superan el valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  según El RMCH.

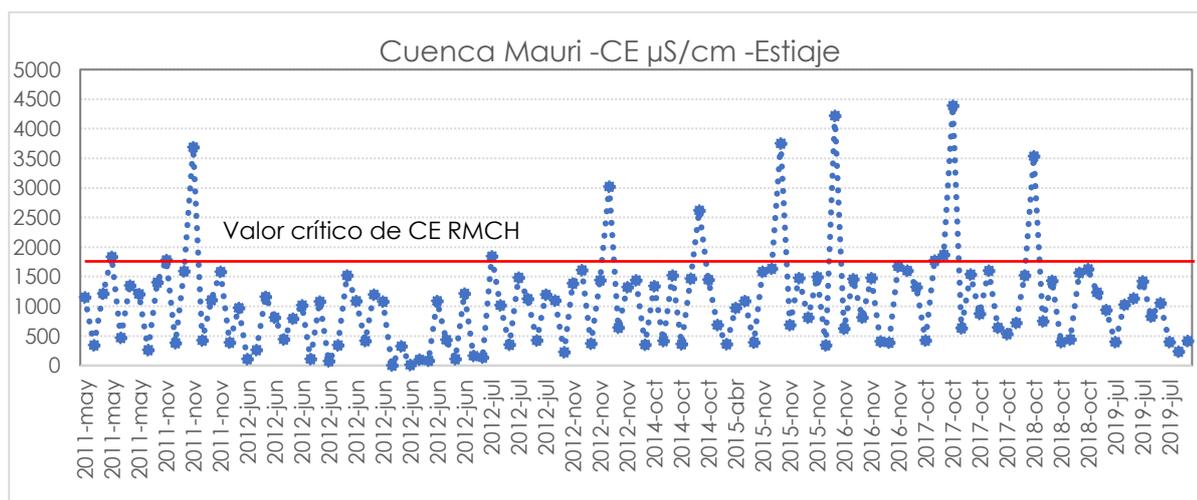


Figura 32. Gráfico de tendencias de la CE en la Cuenca Mauri – Estiaje.

Las figuras 32, 33 y 34 muestran la variación espacio temporal de la CE de los cuerpos de agua medidos en 123 muestras, todos los valores medidos en estiaje corresponden a los años 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. Se puede observar que las muestras RMAU\_06a, RMAU\_08, RMAU\_10, RMAU\_07, RMAU\_04 y RMAU\_01 superan el valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  según El RMCH.

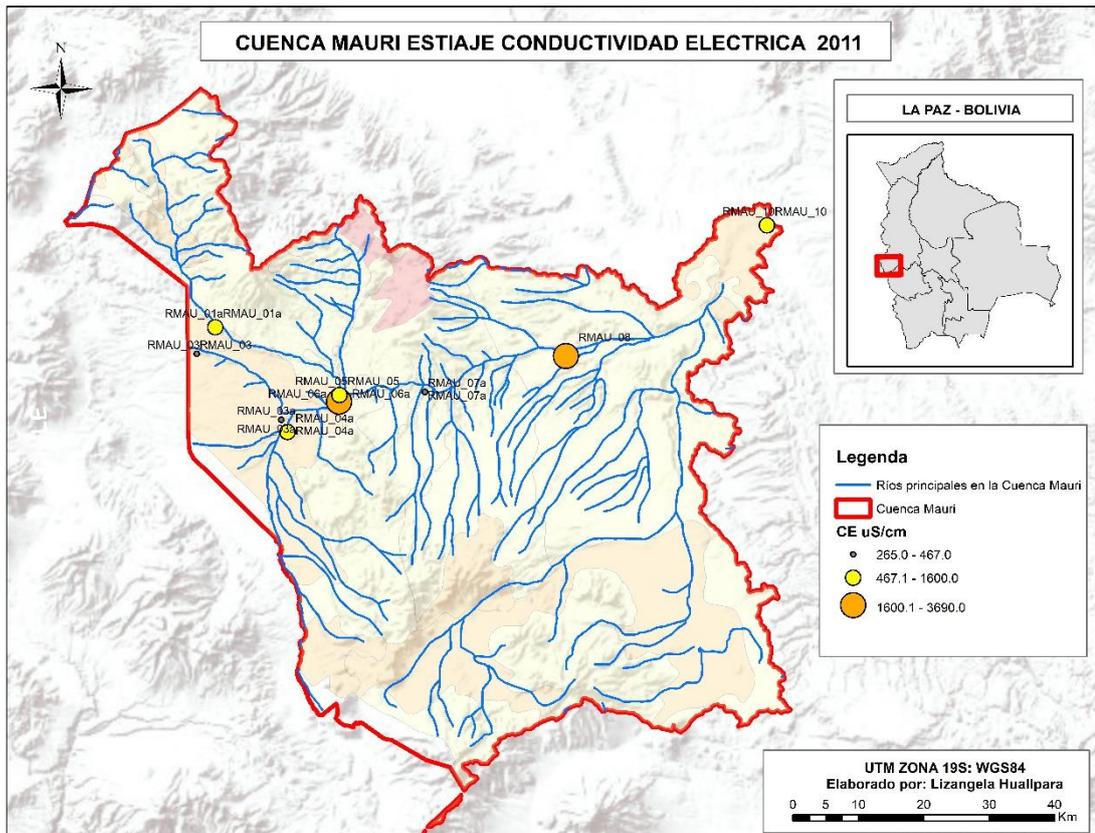


Figura 33. Mapa de variación de CE - Cuenca Mauri – Estiaje, 2011.

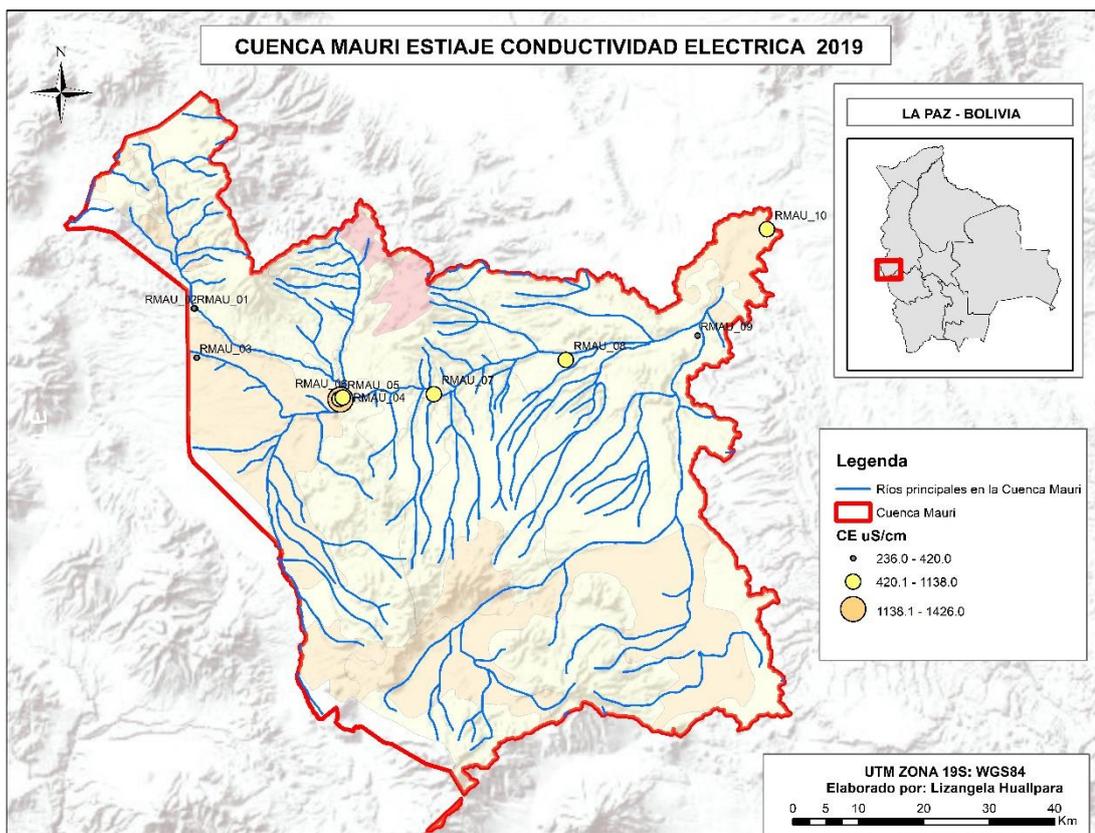


Figura 34. Mapa de variación la CE de la Cuenca Mauri – Estiaje, 2019.

Con respecto a los iones mayoritarios figuras 35, 36 y 37, se puede observar que las concentraciones de cloruros, fosfatos y sodio se encuentran por encima del valor crítico según el RMCH, característica que presentan las muestras RMAU\_01, RMAU\_01a, RMAU\_06a, RMAU\_07, RMAU\_08, RMAU\_05, MAUR\_035\_ASP, MAUR\_033\_ASP, RMAU\_10, RMAU\_02, RMAU\_03 y RMAU\_04. En cuanto a la concentración de los iones nitratos, calcio y magnesio están por debajo del valor crítico según el RMCH.

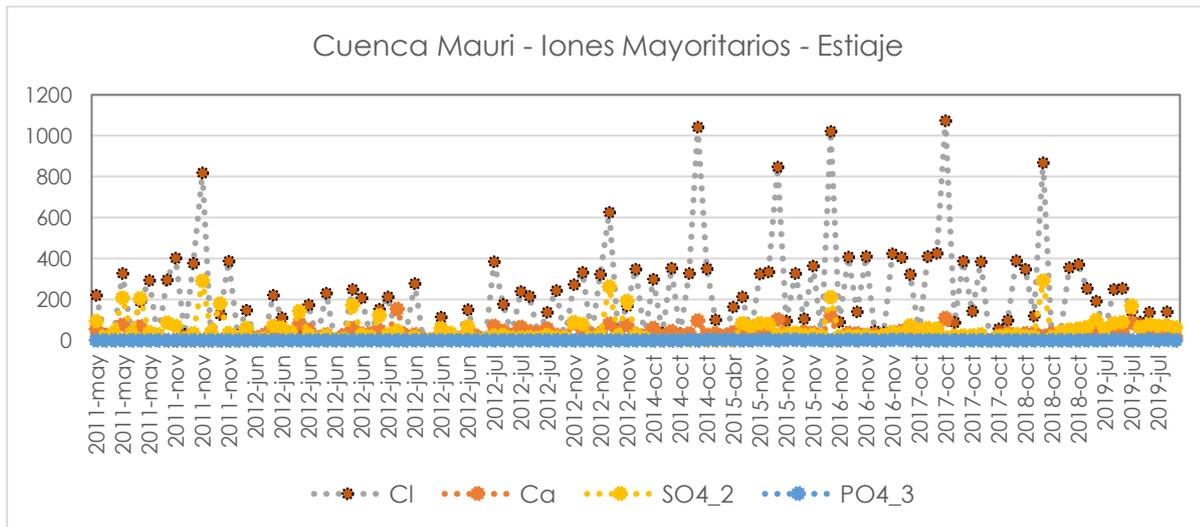


Figura 35. Gráfico de tendencias de Iones Mayoritarios en la Cuenca Mauri – Estiaje.

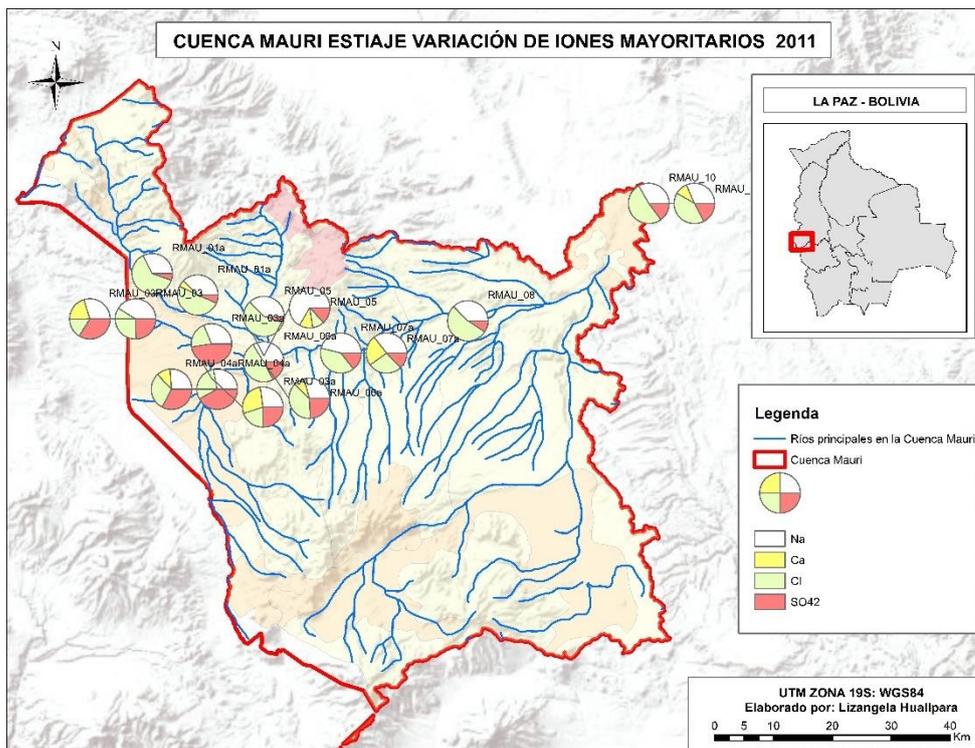


Figura 36. Mapa de variación de Iones Mayoritarios - Cuenca Mauri – Estiaje, 2011.

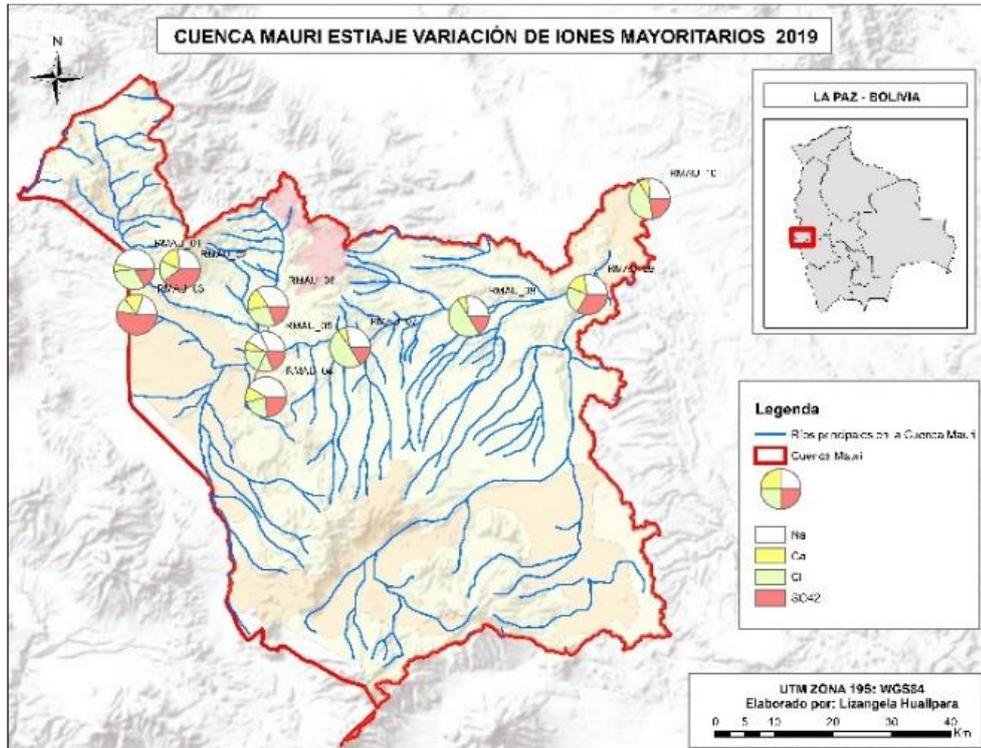


Figura 37. Mapa de variación de Iones Mayoritarios - Cuenca Mauri – Estiaje, 2019.

Los constituyentes metálicos inorgánicos de la Cuenca Mauri en estiaje figuras 38, 39 y 40, muestran la variación de Al, B, Cd y Hg, todos estos elementos se encuentran sobre el valor crítico según el RMCH valores que muestran la contaminación de los cuerpos de agua.

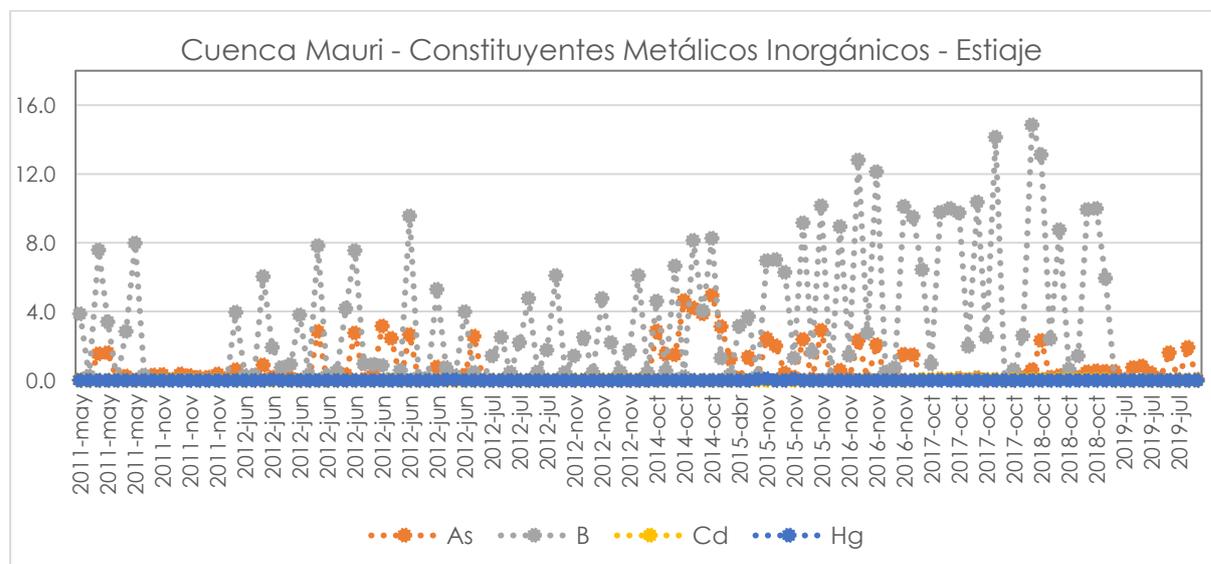


Figura 38. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos en la Cuenca Mauri – Estiaje.

Se puede evidenciar también elevadas concentraciones de B y As, que se encuentran sobre los valores crítico según el RMCH y confirman la

contaminación por estos elementos tanto en época húmeda como en época seca.

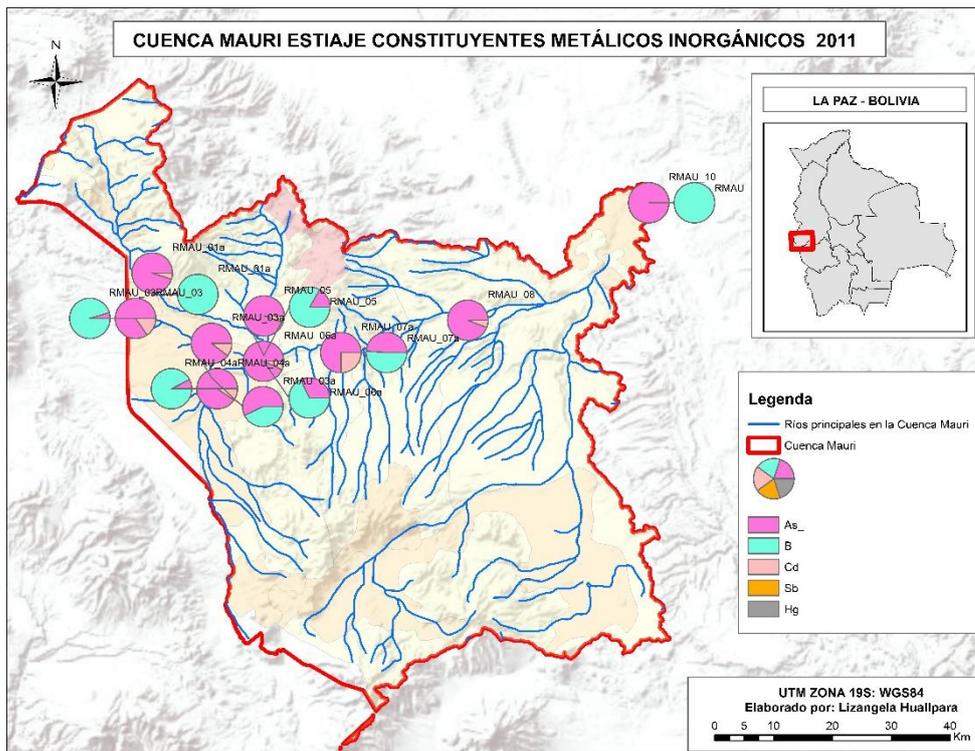


Figura 39 .Mapa de variación de Constituyentes Metálicos – Cuenca Mauri – Estiaje, 2011.

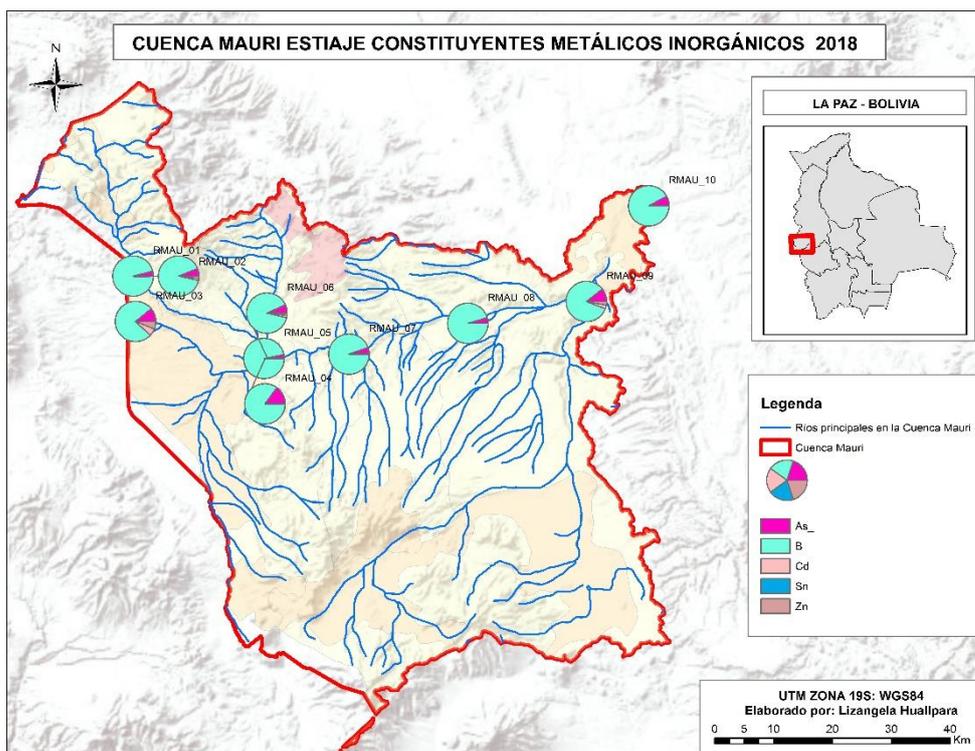


Figura 40 .Mapa de variación de Constituyentes Metálicos – Cuenca Mauri – Estiaje, 2018.

El gráfico estadístico de componentes mayoritarios (figura 41) muestra que el tipo de agua característica de la Cuenca Mauri en estiaje es del tipo **Na-Ca-Mg-Cl-SO4-B** ya que representan los componentes mayoritarios de las muestras colectadas en estiaje.

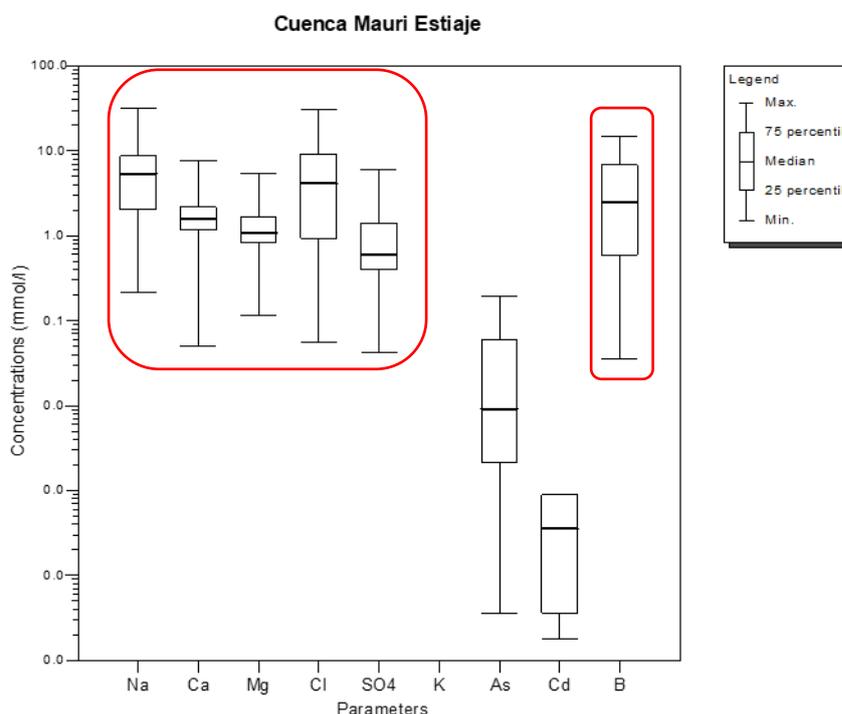


Figura 41. Gráfico estadístico de Composición del agua- Cuenca Mauri - Estiaje.

La concentración de los componentes mayoritarios en la Cuenca Mauri se incrementa en época seca esto debido a que el volumen de agua disminuye y se concentran las especies químicas dentro de la misma, se hace evidente en el resumen estadístico de ambas épocas.

La calidad de agua de la oferta futura de la cuenca del río Mauri presenta serias restricciones para su uso. Para uso poblacional posee condiciones fisicoquímicas de muy mala a no potable, debido a que las concentraciones de sales y elementos tóxicos, principalmente boro y arsénico (Mapa 16), superan los límites establecidos por la OMS así como también los valores críticos según el RMCH. Para uso agrícola presenta problemas severos en cuanto a salinidad (alta concentración de sodio y cloruros) y alta toxicidad (elevada concentración de boro y arsénico) (ANA, 2011).

### 2.3. CUENCA POOPÓ

La Cuenca del Lago Poopó se encuentra en el departamento de Oruro, es el segundo lago más grande de Bolivia después del Titicaca y ambos están conectados por el río Desaguadero. En la figura 42 se puede observar la delimitación geográfica de la Cuenca Poopó y la red de puntos de monitoreo de calidad del agua,

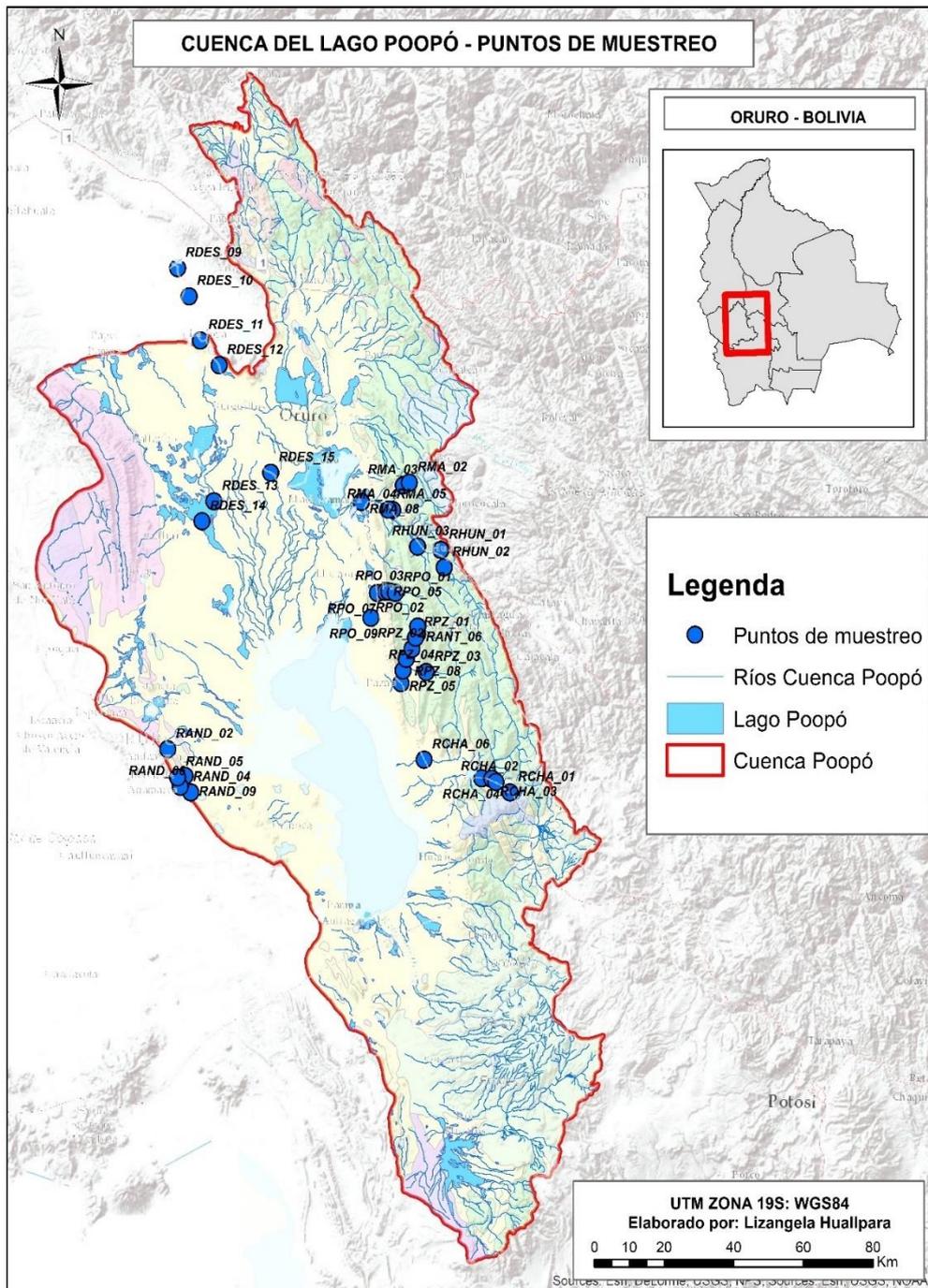


Figura 42. Cuenca Poopó – Puntos de Muestreo – Bolivia.

### 2.3.1. CUENCA POOPÓ – AVENIDA

Se consideró 51 estaciones de monitoreo sobre ríos y vertientes que aportan al Lago Poopó (Tabla 7).

Tabla 7. Estaciones de monitoreo - Cuenca Poopó (Bolivia)

Código	Punto de muestreo	Cuerpo de agua	X	Y
RPO_02	Cabrería	Río	717113	7966318
RCHA_04	Antes de la represa Tacahua	Río	743487	7916166
CAR_05	Cayhuasi	Río	707632	8045798
CAR_02	Chilcani Jahuira	Río	688478	8055240
RAND_07	Com. Lloko (Collana)	Vertiente	678089	7910065
DP_12	Comunidad	Río	706506	7968652
DP_04	Huanuni	Río	729277	7976787
RPO_01	Inca Pinta	Río	718737	7966027
RMA_08	Ingenio	Río	708984	7990434
RPO_05	Mina Machacamarquita	Río	715808	7966269
RHUN_01	Mina río San José	Río	731804	7977553
RTAC_45	Peñas	Río	737043	7943282
RHUN_03	Playa Verde, río San Juan de Sora Sora	Río	725117	7978438
RCHA_02	Puente Ancacato	Río	747563	7915165
RAND_09	Puente Avaroa	Río	659996	7912385
RCHA_06	Puente camino carretera	Río	726984	7921162
RDES_15	Puente Challacollo	Río	682936	7998289
RDES_09	Puente Eucaliptus	Río	656189	8053292
RDES_11	Puente La Joya antes bifurcación	Río	662743	8033844
RDES_12	Puente peatonal brazo izquierdo río Desaguadero	Río	668113	8027193
RPO_07	Puente Poopó	Río	713556	7965986
RDES_13	Puente Toledo brazo derecho río Desaguadero	Río	666631	7990601
RPO_09	Puñaca	Río	711685	7959309
RPO_08	Quesu Quesuni	Río	7116693	7963699
DP_17	Río Marquez	Río	727013	7833084
DP_13	Río Antequera	Río	726912	7955918
DP_14	Río Antequera	Río	718093	7941917
RPZ_02	Río Antequera en Avicaya	Río	723483	7950931
RPZ_05	Río Antequera en Pazña	Río	720359	7941744
RPZ_04	Río Antequera en Vilaque	Río	720933	7945139
RPZ_01	Río Antequera Totoral	Río	724519	7953975
RAND_05	Río Buena Vista	Río	656198	7916415
RAND_04	Río Chillajahuira	Río	658337	7916784
RAND_02	Río Copacabana	Río	653383	7923969
RMA_03	Río de Irupampa (Cebada Mayu)	Río	721018	7994903
RCHA_03	Río Huancarani	Río	746368	7916058
RAND_06	Río Kapiri	Río	656971	7913903
RAND_03	Río Kullco	Río	654771	7222007
RMA_02	Río Kullcuma (Cebada Mayu)	Río	722754	7995619

RMA_04	Río Pairumani, tres pozos	Río	717947	7988319
RMA_05	Río San Juan de Sora Sora	Río	716750	7988364
DP_07	Río Uru uru	Río	695751	8005294
RPZ_08	Salida LagunaEstalsa	Río	721857	7948259
HUA_19	Santa Fe	Río	729385	7992039
DP_01	Sepulturas	Río	710088	8011040
RTAC_48	Tacagua	Río	730584	7914088
DP_21	Tagarete	Río	701910	8010503
CAR_06	Thola Pampa	Río	716780	716780
RPO_14	Umapirhua B	Río	717390	7958442
POO_43	Urmiri	Río	722051	7943718
HUA_23	Venta y Media	Río	727491	7971563

Se registró en una base de datos la información de 8 campañas de monitoreo en avenida:

- 1° Campaña – diciembre 2011
- 2° Campaña – diciembre 2012
- 3° Campaña – enero y febrero 2013
- 4° Campaña – abril 2013
- 5° Campaña – diciembre 2013
- 6° Campaña – diciembre 2016
- 7° Campaña – diciembre 2018
- 8° Campaña – abril 2019

Tabla 8. Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos. Cuenca Poopó - Avenida.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Mediana	Valor crítico RMCH
pH	10,0	2,0	8,0	< 6 y > 9
Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$	41600,0	2,0	2240,0	>1600
Cloruros, mg/L	14289,0	4,0	212,0	>500
Sulfatos, mg/L	3147,0	17,0	280,0	>400
Fosfatos, mg/L	8,0	0,1	0,4	>1,0
Nitratos, mg/L	8,0	0,0	0,02	>50
Calcio, mg/L	848,0	3,0	91,0	>400
Magnesio, mg/L	111,0	4,0	28,0	>150
Sodio, mg/L	13016,0	2,0	75,0	>200
Arsénico, mg/L	0,6	0,001	0,03	>0,1
Cadmio, mg/L	7,92	0,00002	0,05	>0,005
Hierro, mg/L	690,0	0,002	0,20	Fe (s) >1,0
Manganeso, mg/L	37,6	0,01	0,3	>1,0
Plomo, mg/L	2,0	0,0003	0,02	>0,1
Zinc, mg/L	183,9	0,01	0,1	>5,0

Los valores de pH se presentan en un amplio rango diferenciados desde ácidos hasta alcalinos comprendidos entre 2 y 10 con una mediana de 8. El 37% de las muestras presentan pH ácidos valores por debajo de 7 y el 5,3 % de las muestras tienen valores mayores a pH 9, en total el 42,4 % de las muestras superan el rango permitido de pH según el RMCH. Esta tendencia es característica del sector este de la Cuenca del Lago Poopó (figuras 43 y 44).

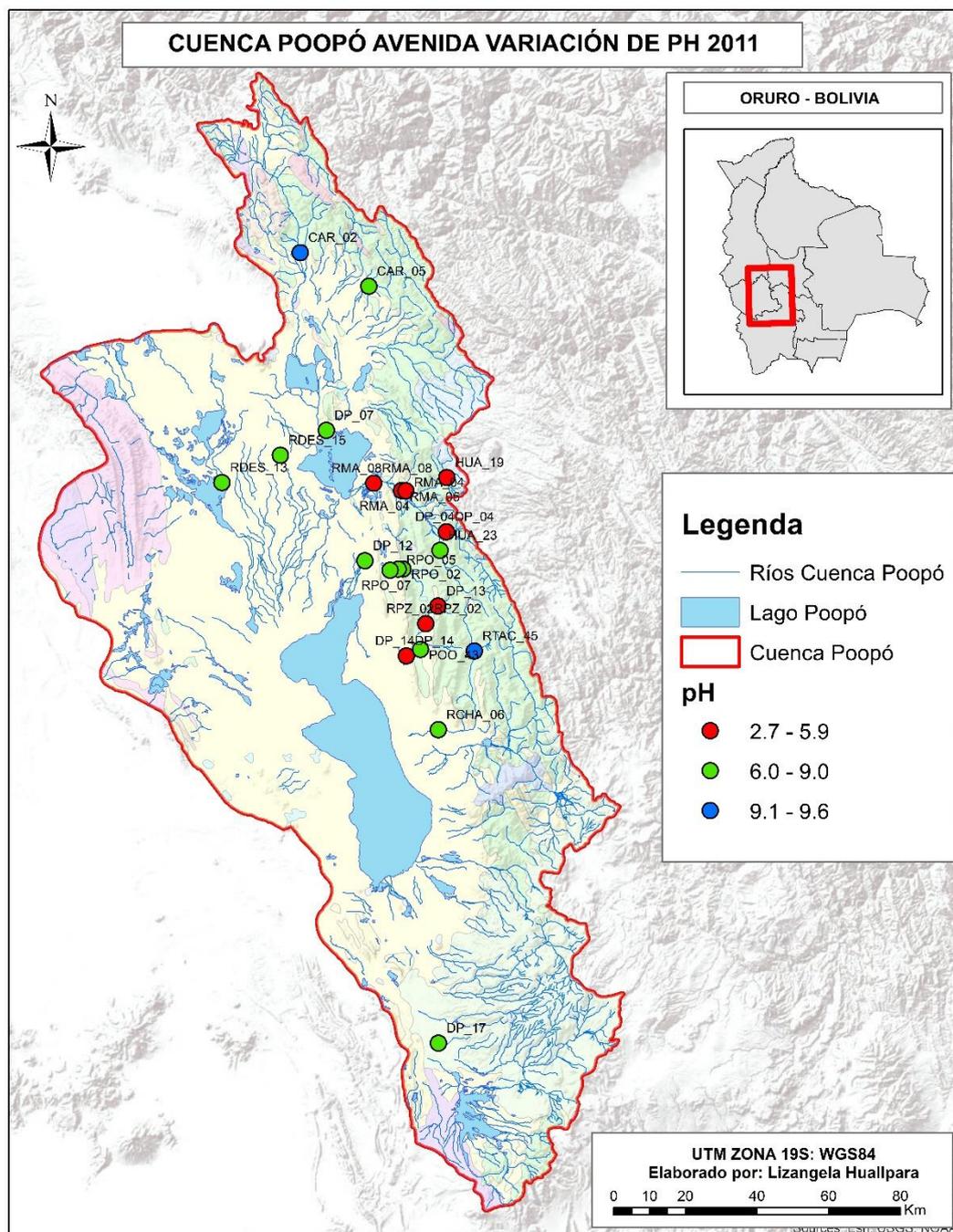


Figura 43. Mapa de variación del pH—Cuenca Poopó – Avenida, 2011.

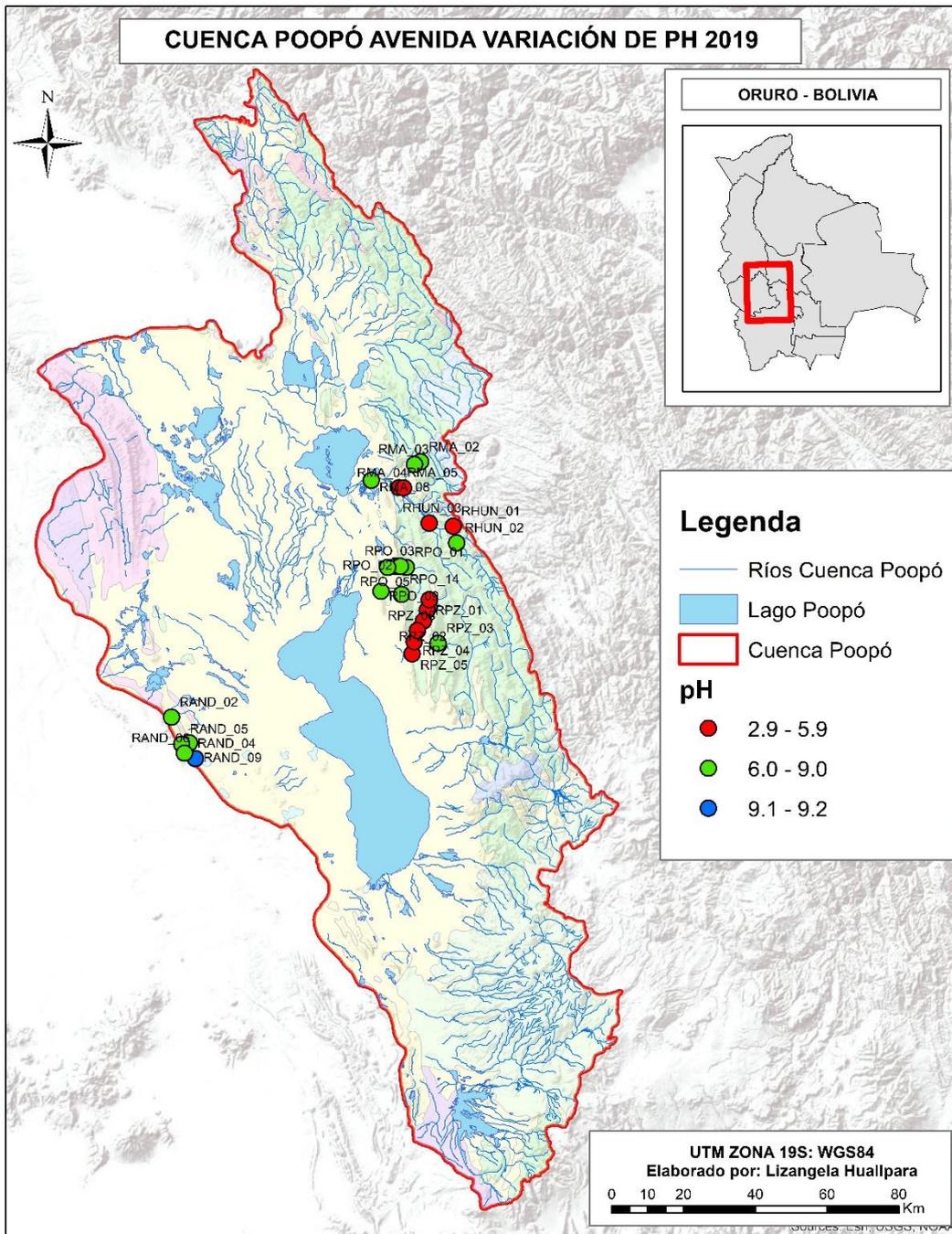


Figura 44. Mapa de variación del pH—Cuenca Poopó – Avenida, 2019.

La conductividad eléctrica varió en un rango de 2 a 41600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 2240  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Las figuras 45, 46 y 47 muestran la variación espacio temporal de la CE de los cuerpos de agua medidos en 151 muestras, todos los valores medidos en avenida corresponden a los años 2011, 2012, 2013, 2016, 2018 y 2019. El 58% de las muestras superan el valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  según el RMCH presentando los valores más elevados en la parte noreste de la Cuenca del Lago Poopó en avenida.

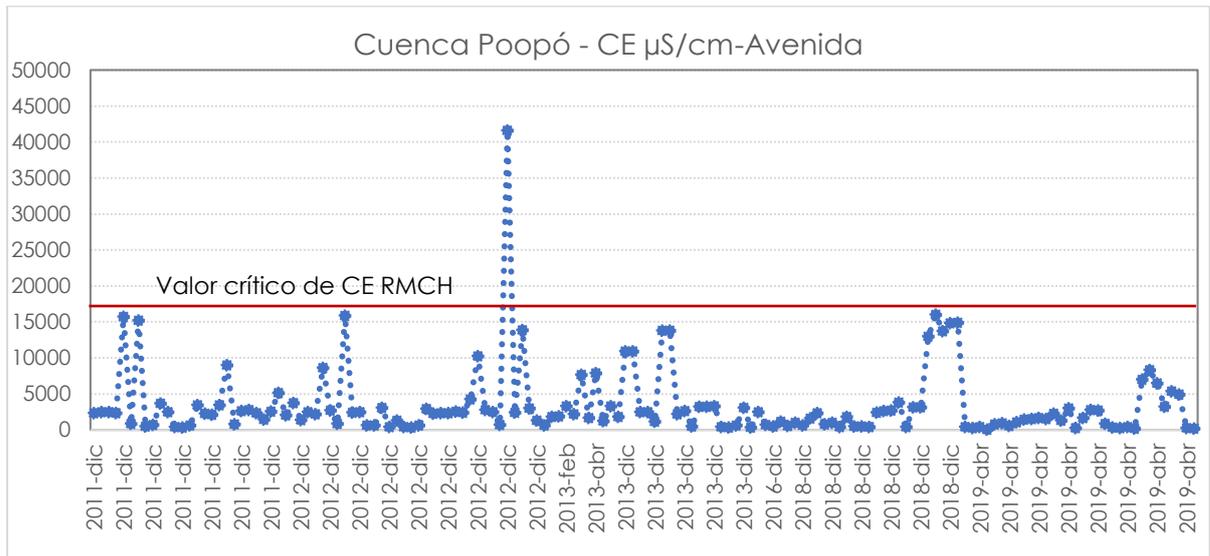


Figura 45. Gráfico de tendencias de la CE en la Cuenca Poopó – Avenida.

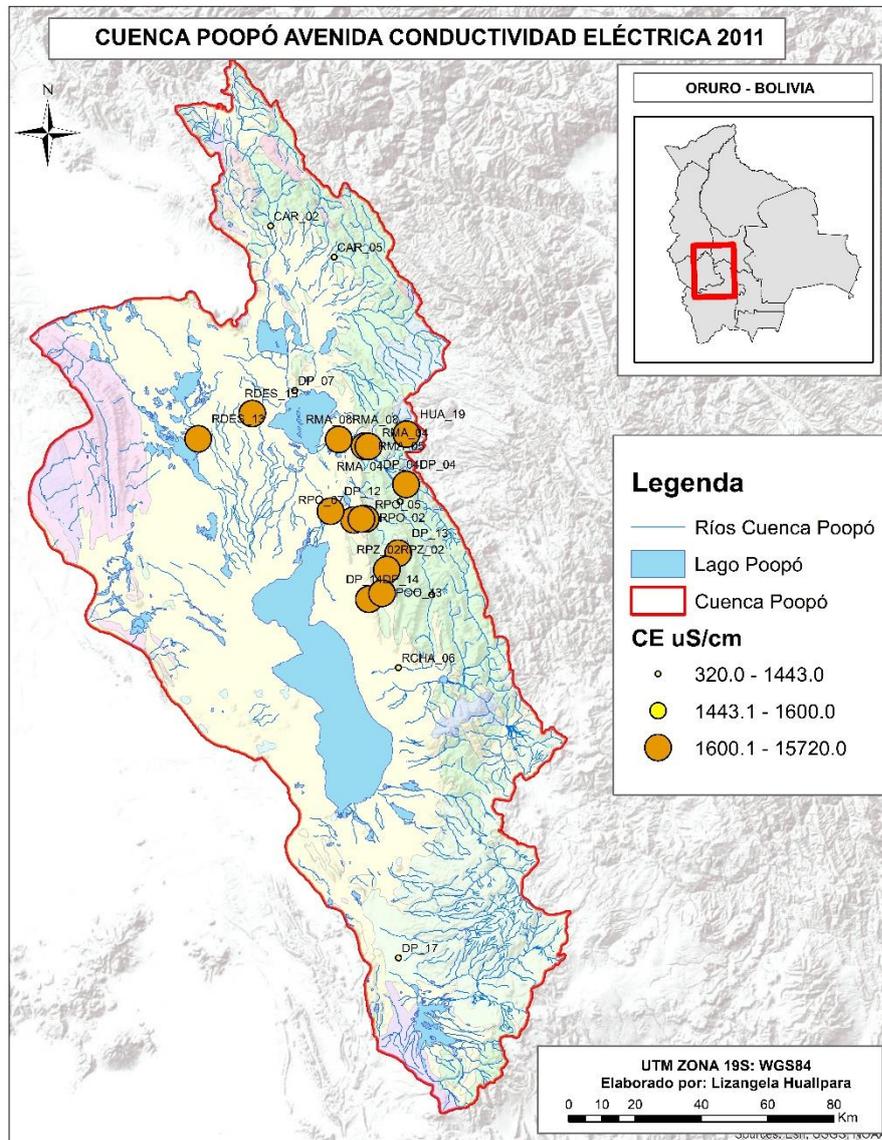


Figura 46. Mapa de variación de la CE de la Cuenca Poopó – Avenida, 2011.

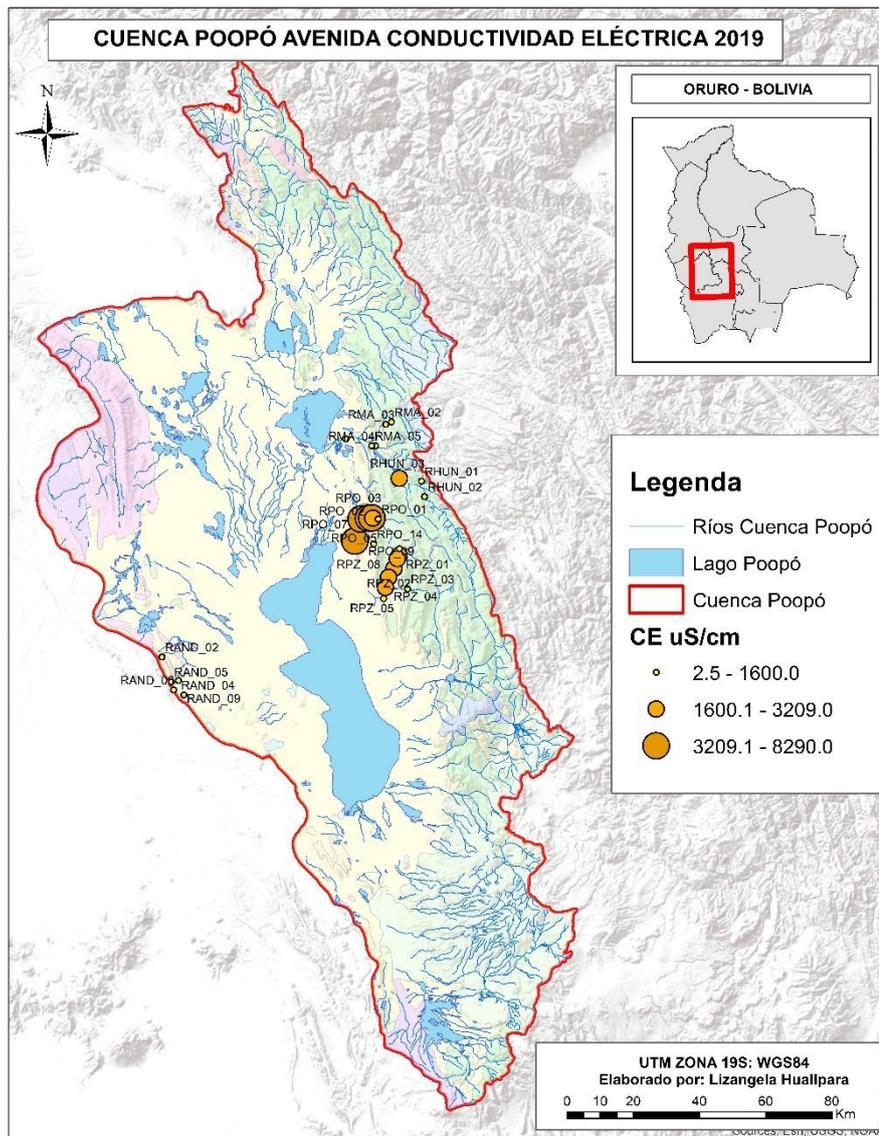


Figura 47. Mapa de variación de la CE de la Cuenca Poopó – Avenida, 2019.

Con respecto a los iones mayoritarios figuras 48 y 49, se puede observar que las concentraciones de cloruros, sulfatos, fosfatos, calcio y sodio se encuentran por encima de los valores críticos según el RMCH, característica que presentan las muestras POO\_43, RPO\_07, RPO\_02, RPO\_05, RPO\_07, RPO\_08, RPO\_09, DP\_04, DP\_14, RDES\_15, RDES\_13, HUA\_19, RDES\_13, DP\_21, RPO\_05, RMA\_04, RMA\_05, RMA\_08 y RAND\_04. En cuanto a la concentración de los iones nitratos y magnesio, están por debajo de los valores críticos según el RMCH.

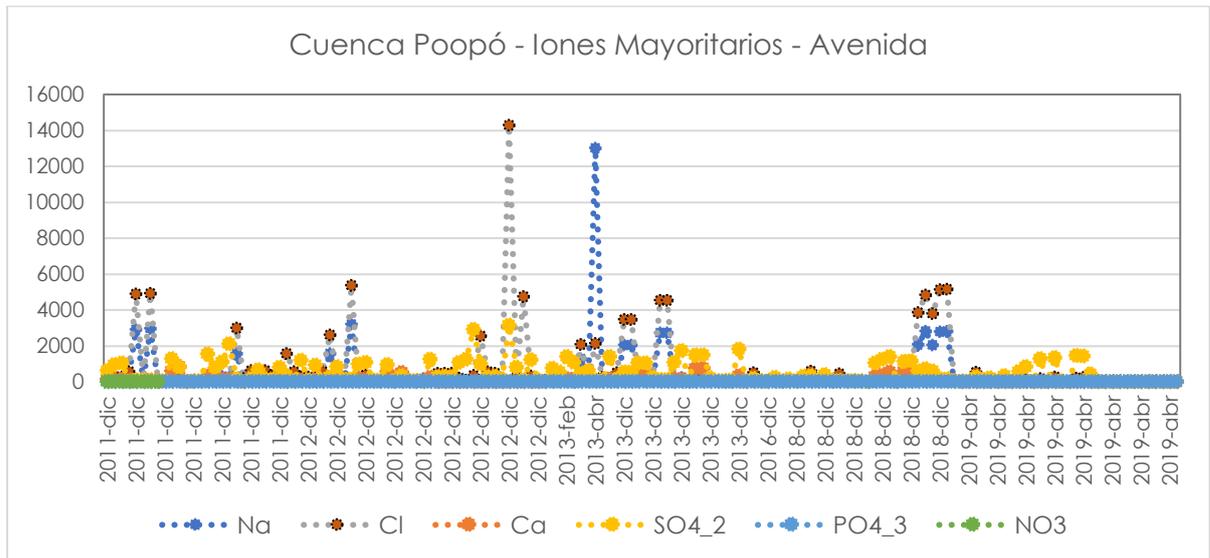


Figura 48. Gráfico de tendencias de Iones Mayoritarios en la Cuenca Poopó – Avenida.

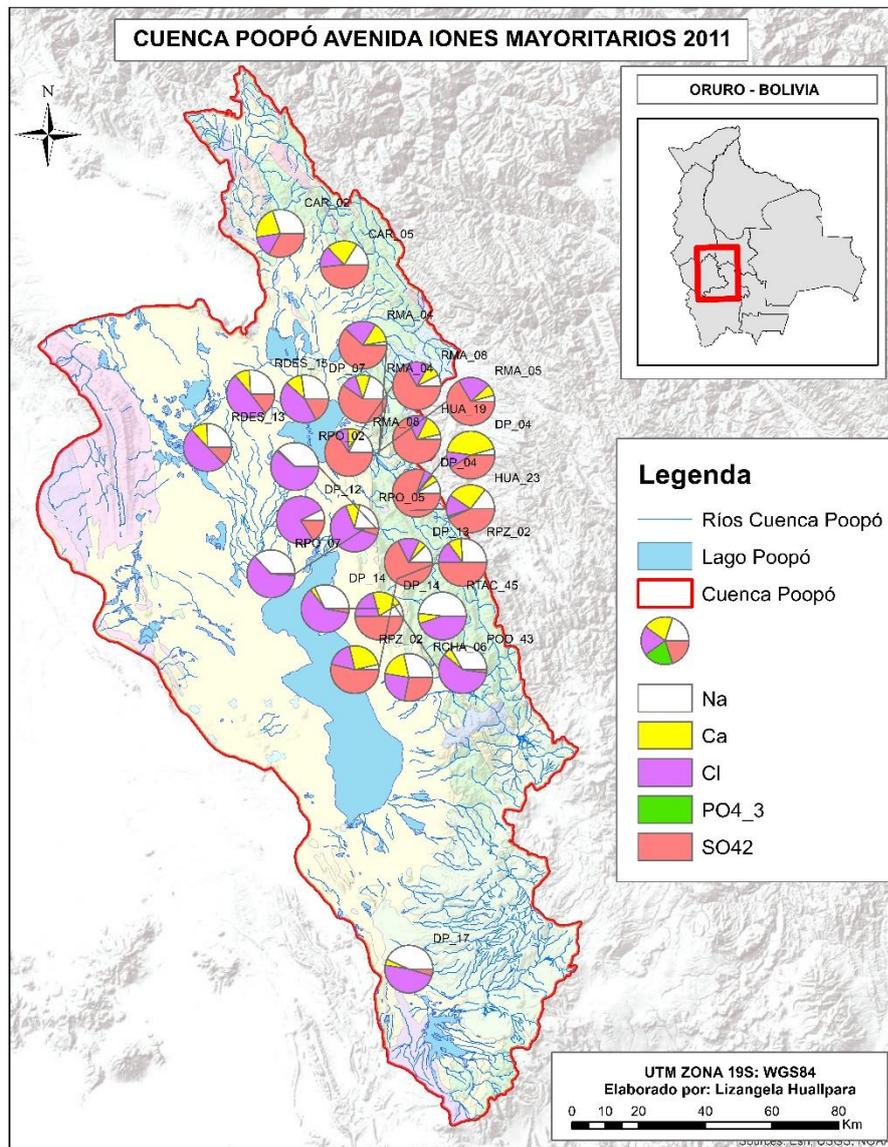


Figura 49. Mapa de variación de Iones Mayoritarios - Cuenca Poopó – Avenida, 2011.

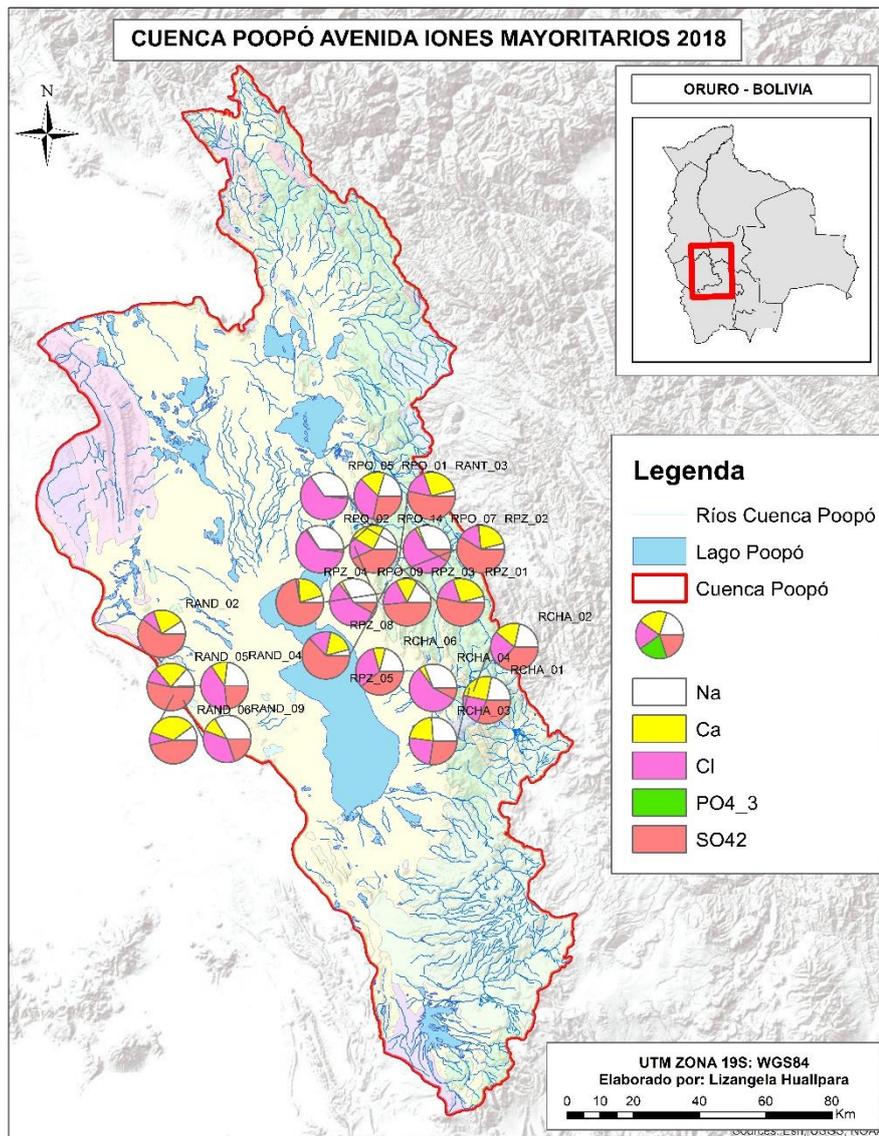


Figura 50. Mapa de variación de Iones Mayoritarios - Cuenca Poopó – Avenida, 2018.

Los componentes constituyentes metálicos inorgánicos de la Cuenca del Lago Poopó en avenida figuras 51, 52 y 53, presentan concentraciones de As, Cd, Fe, Mn, Pb y Zn, que sobrepasan los valores críticos según el RMCH, tendencia característica del sector este de la Cuenca del Lago Poopó en los años 2011, 2012, 2013 y 2018, porque no se cuentan con datos de todos los elementos traza en los años 2016 y 2019 donde solamente se analizaron As, Cd y Fe. La presencia de elevadas concentraciones de metales como los que se describieron en el apartado anterior, específicamente en el sector noreste de la cuenca es por la actividad minera que se desarrolla en la zona.

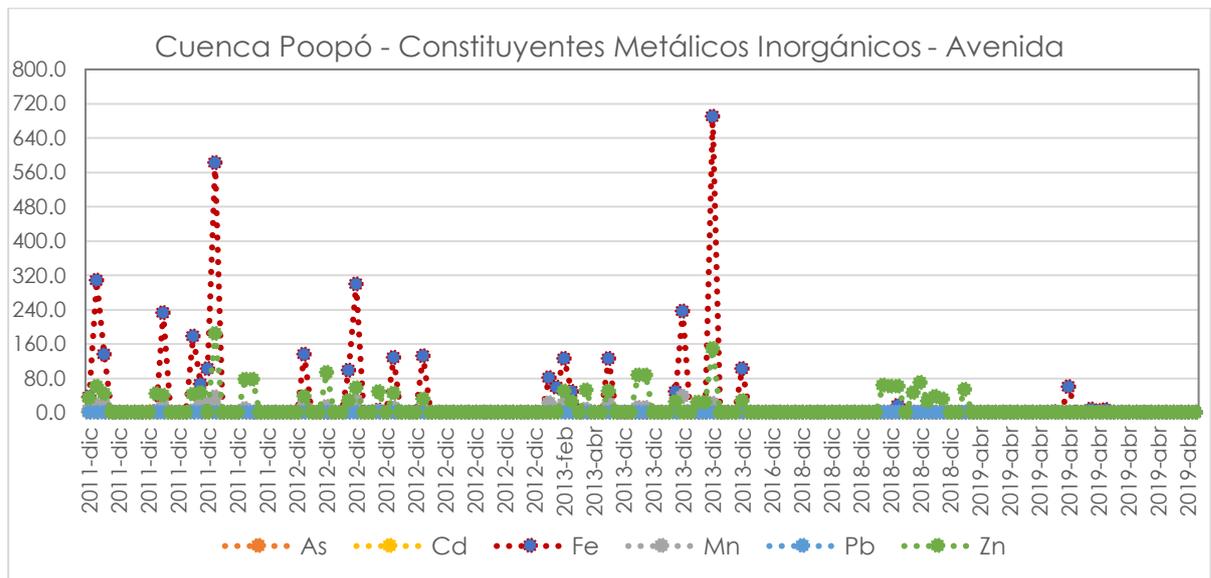


Figura 51. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos en la Cuenca Poopó – Avenida.

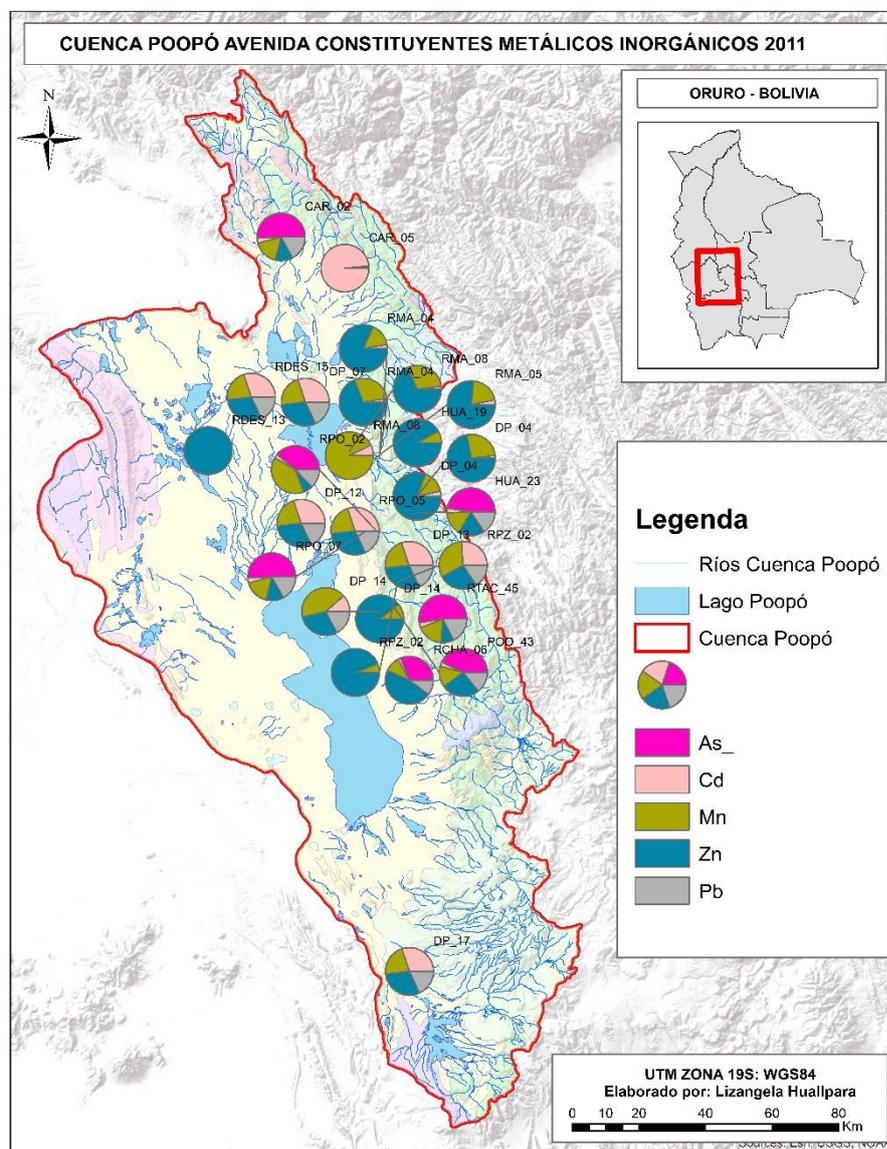


Figura 52 .Mapa de variación de Constituyentes Metálicos - Cuenca Poopó – Avenida, 2011.

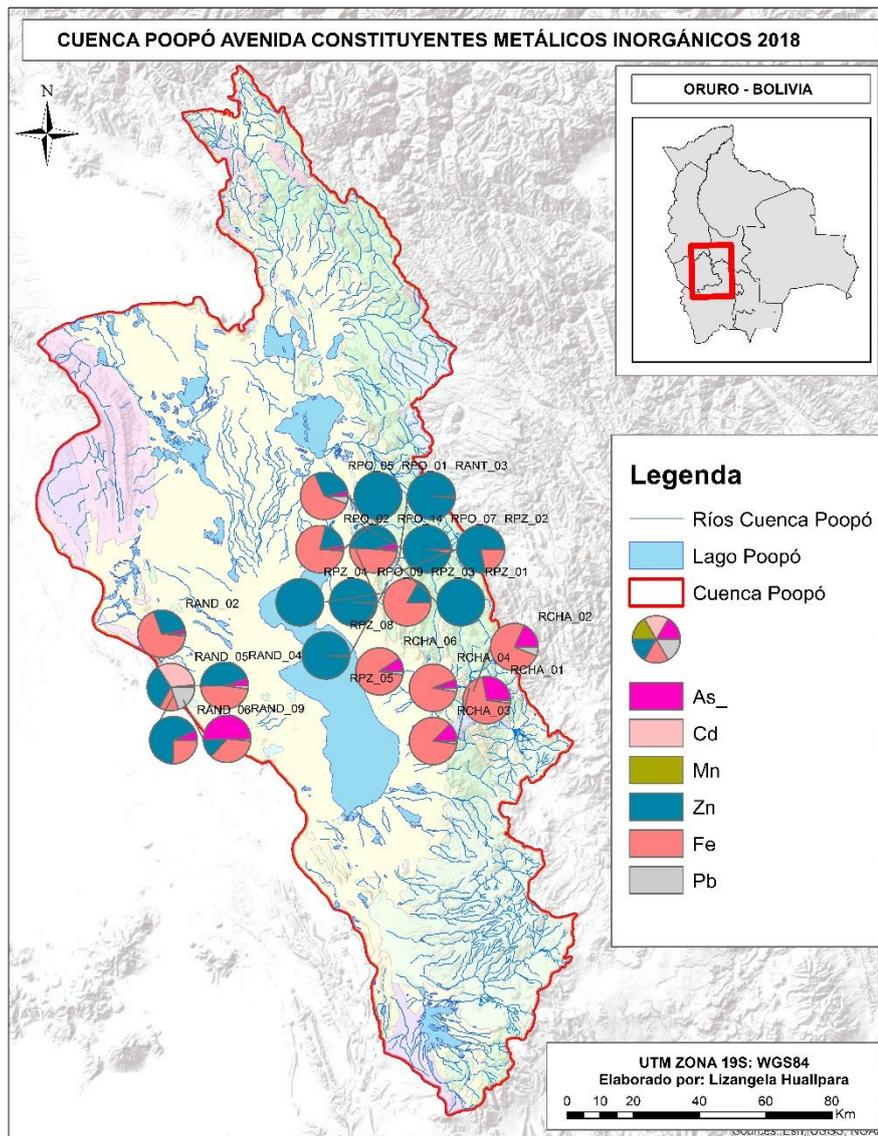


Figura 53 .Mapa de variación de Constituyentes Metálicos - Cuenca Poopó – Avenida, 2018.

El gráfico estadístico de componentes mayoritarios figura 54, muestra que el tipo de agua característica de la Cuenca Poopó en avenida es del tipo **Na-Ca-Mg-Cl-SO4-Fe**, específicamente para el sector este de la cuenca del Lago Poopó donde se desarrolla la actividad minera, ya que son los componentes mayoritarios que caracterizan las muestras colectadas en avenida. Diferentes estudios demuestran casos de contaminación en la cuenca Poopó que tienen que ver con el uso y contaminación de sus aguas, por históricos procesos relacionados con la actividad minera que incluyen pasivos ambientales no remediados. También tiene que ver el uso de las aguas del río Desaguadero en actividades agrícolas entre otros (Rey-Ortíz, 2021)

El sector oeste de la Cuenca del Lago Poopó es diferente porque la presencia de elevadas concentraciones de As y otros elementos están relacionados con la geología del lugar hace que exista valores de fondo de metales en agua en elevadas concentraciones, que superan los valores límite de la normativa nacional.

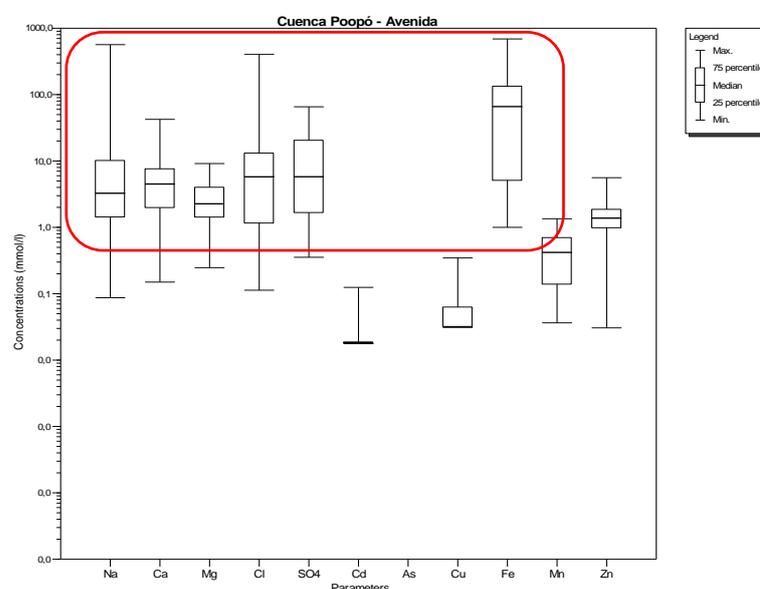


Figura 54. Gráfico estadístico de Composición del agua. Cuenca Poopó - Avenida.

### 2.3.2. CUENCA POOPÓ – ESTIAJE

Tabla 9. Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos. Cuenca Poopó - Estiaje.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Mediana	Valor crítico RMCH
pH	11,5	2,0	8,0	< 6 y > 9
Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$	55540,0	6,0	200,0	>1600
Cloruros, mg/L	13094,0	6,0	200,0	>500
Sulfatos, mg/L	7774,0	1,0	206,0	>400
Fosfatos, mg/L	4,0	0,04	0,2	>1,0
Nitratos, mg/L	8,0	0,02	0,3	>50
Calcio, mg/L	218,0	2,0	68,0	>400
Magnesio, mg/L	350,0	0,1	30,0	>150
Sodio, mg/L	13016,0	0,3	100,0	>200
Arsénico, mg/L	0,7	0,0001	0,005	>0,1
Cadmio, mg/L	9,1	0,00002	0,05	>0,005
Hierro, mg/L	1000,0	0,02	0,1	Fe (s)>1,0
Manganeso, mg/L	27,0	0,0003	0,04	>1,0
Zinc, mg/L	225,0	0,01	0,06	>5,0

En la tabla 9 se presenta un resumen estadístico de la base de datos consolidada de la Cuenca Poopó en época seca, donde se puede evidenciar las principales características fisicoquímicas de 249 muestras de cuerpos de agua corresponden a colectadas en diferentes campañas en los

años 2011, 2012, 2013, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. Se registró en una base de datos la información de 12 campañas de monitoreo en estiaje:

- 1° Campaña – junio 2011
- 2° Campaña – noviembre 2011
- 3° Campaña – junio 2012
- 4° Campaña – julio 2012
- 5° Campaña – julio 2013
- 6° Campaña – octubre 2015
- 7° Campaña – noviembre 2016
- 8° Campaña – agosto 2017
- 9° Campaña – octubre 2017
- 10° Campaña – noviembre 2018
- 11° Campaña – agosto 2019
- 12° Campaña – septiembre 2019

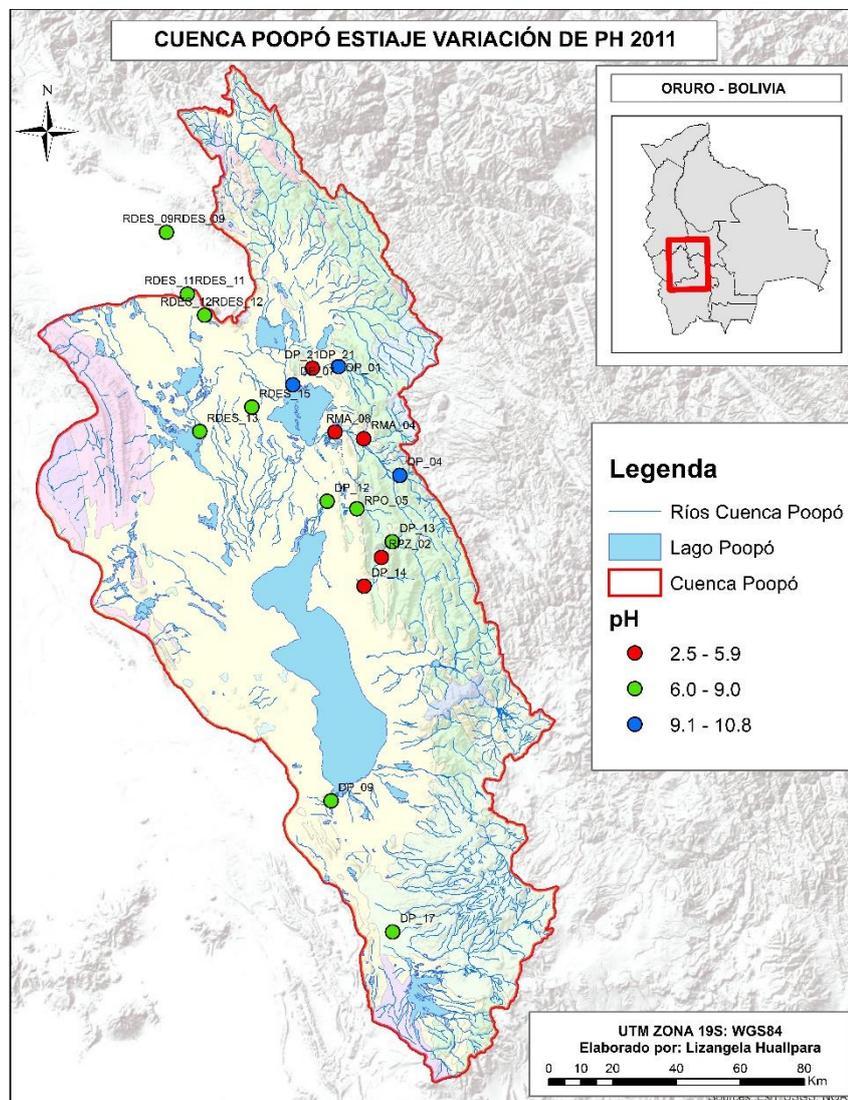


Figura 55. Mapa multitemporal de variación del pH - Cuenca Poopó – Estiaje, 2011.

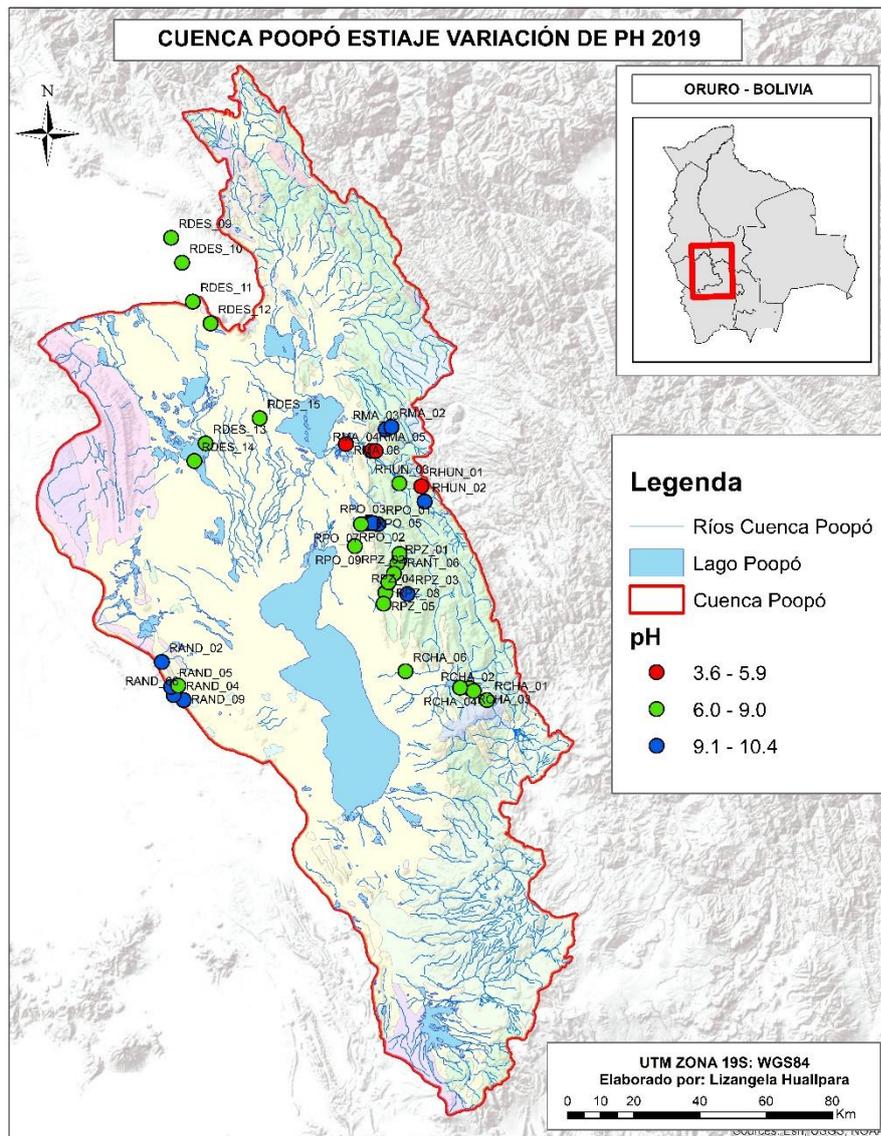


Figura 56. Mapa multitemporal de variación del pH - Cuenca Poopó – Estiaje, 2019.

Los valores de pH son diferenciados desde ácidos hasta alcalinos comprendidos entre 11,5 y 2 con una mediana de 8. El 23,5% de las muestras presentan pH ácidos valores por debajo de 7 y el 12,2 % de las muestras tienen valores mayores a pH 9, en total el 35,6 % de las muestras superan el rango permitido de pH según el RMCH. Esta tendencia es característica del sector noreste de la Cuenca del Lago Poopó en estiaje (figuras 55 y 56).

La CE varió en un rango desde los 6 a 55540  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La variación espacio temporal de la CE de los cuerpos de agua medidos en 247 muestras medidos en estiaje corresponden a los años 2011, 2012, 2013, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. El 80.2% de las muestras superan el valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  según el RMCH presentando los valores más

elevados en la parte noreste de la Cuenca del Lago Poopó (figuras 57, 58 y 59).

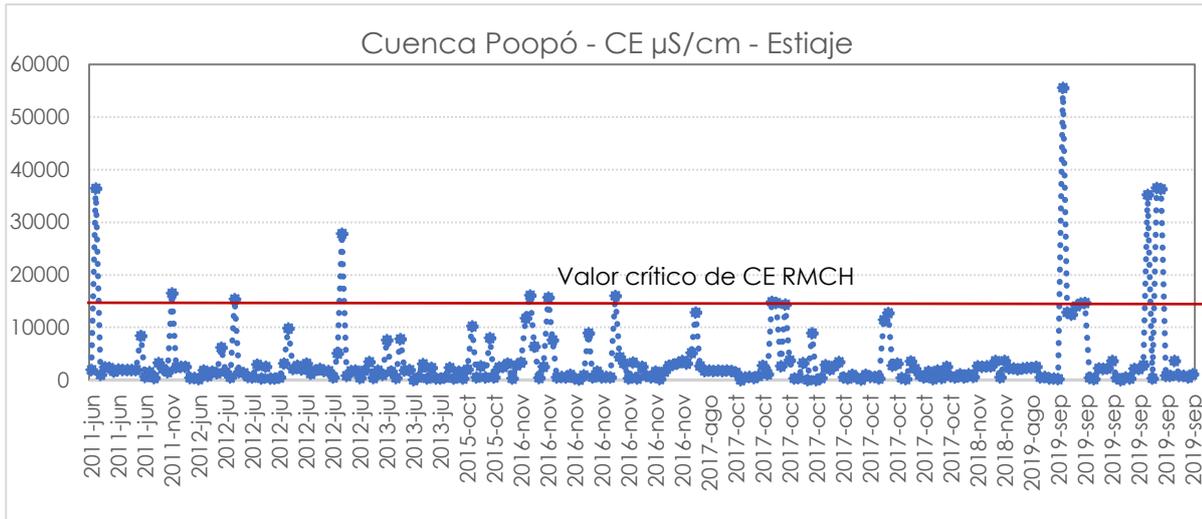


Figura 57. Gráfico de tendencias de la CE en la Cuenca Poopó – Estiaje.

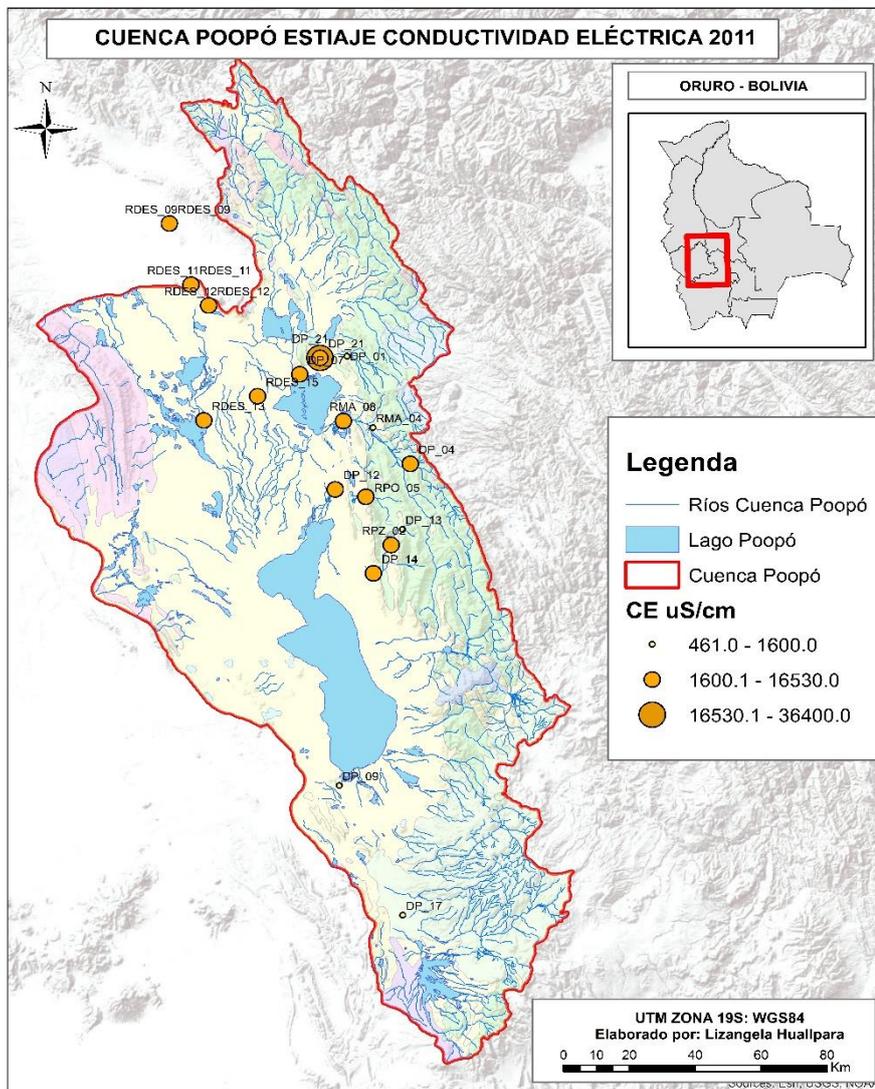


Figura 58. Mapa de variación de CE – Cuenca Poopó – Estiaje, 2011.

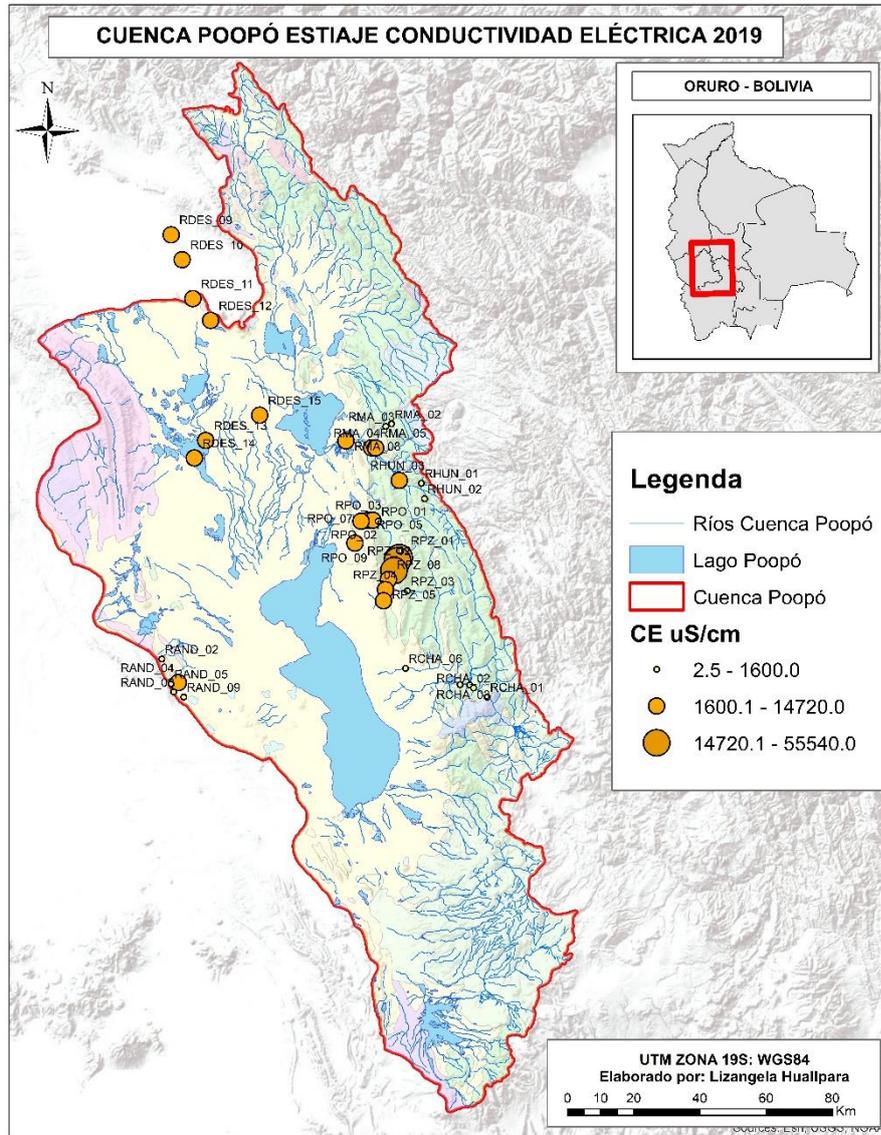


Figura 59. Mapa de variación de CE – Cuenca Poopó – Estiaje, 2019.

Con respecto a los iones mayoritarios figuras 60, 61 y 62, se puede observar que las concentraciones de cloruros, sulfatos, fosfatos, calcio, magnesio y sodio se encuentran por encima de los valores críticos según el RMCH, característica que presentan las muestras DP\_14, DP\_21, DP\_07, RMA\_08, RDES\_13, RDES\_11, RDES\_15, RDES\_12, RDES\_09, RPO\_05, RMA\_04, RPZ\_02, DP\_04, RPO\_03, RPO\_07, RPO\_08, RPO\_09, RPO\_02, RMA\_05, HUA\_19, DP\_12, PANT\_02, CPO\_04, RPZ\_01, RPZ\_04, RPZ\_05, RCHA\_04, DP\_12, RHUN\_03, RANT\_06, PPO\_06 y RANT\_03. En cuanto a la concentración del ion nitrato está por debajo del valor crítico según el RMCH.

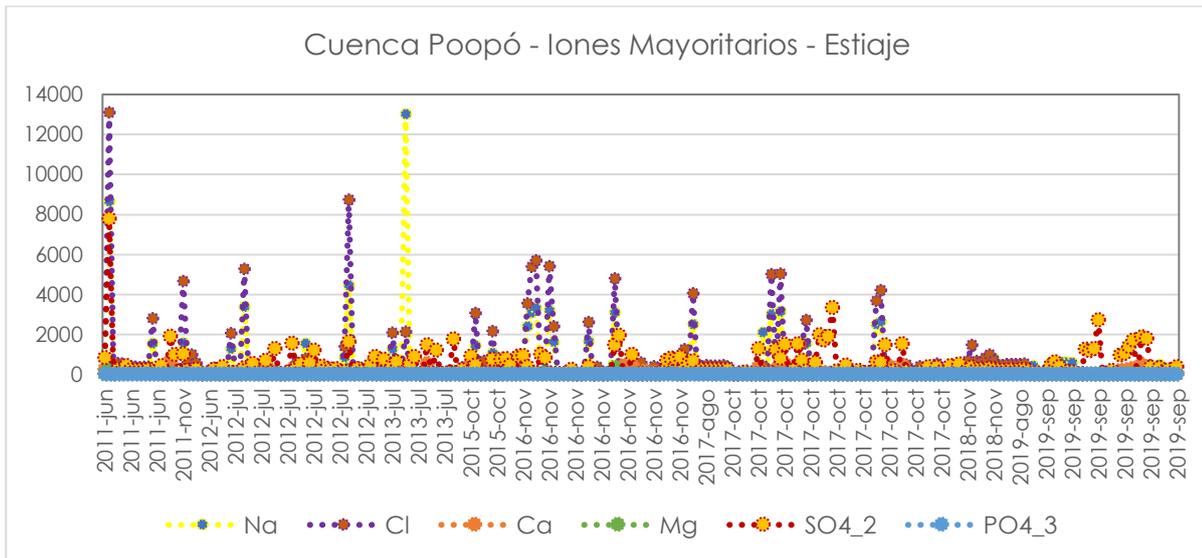


Figura 60. Gráfico de tendencias de Iones Mayoritarios en la Cuenca Poopó – Estiaje.

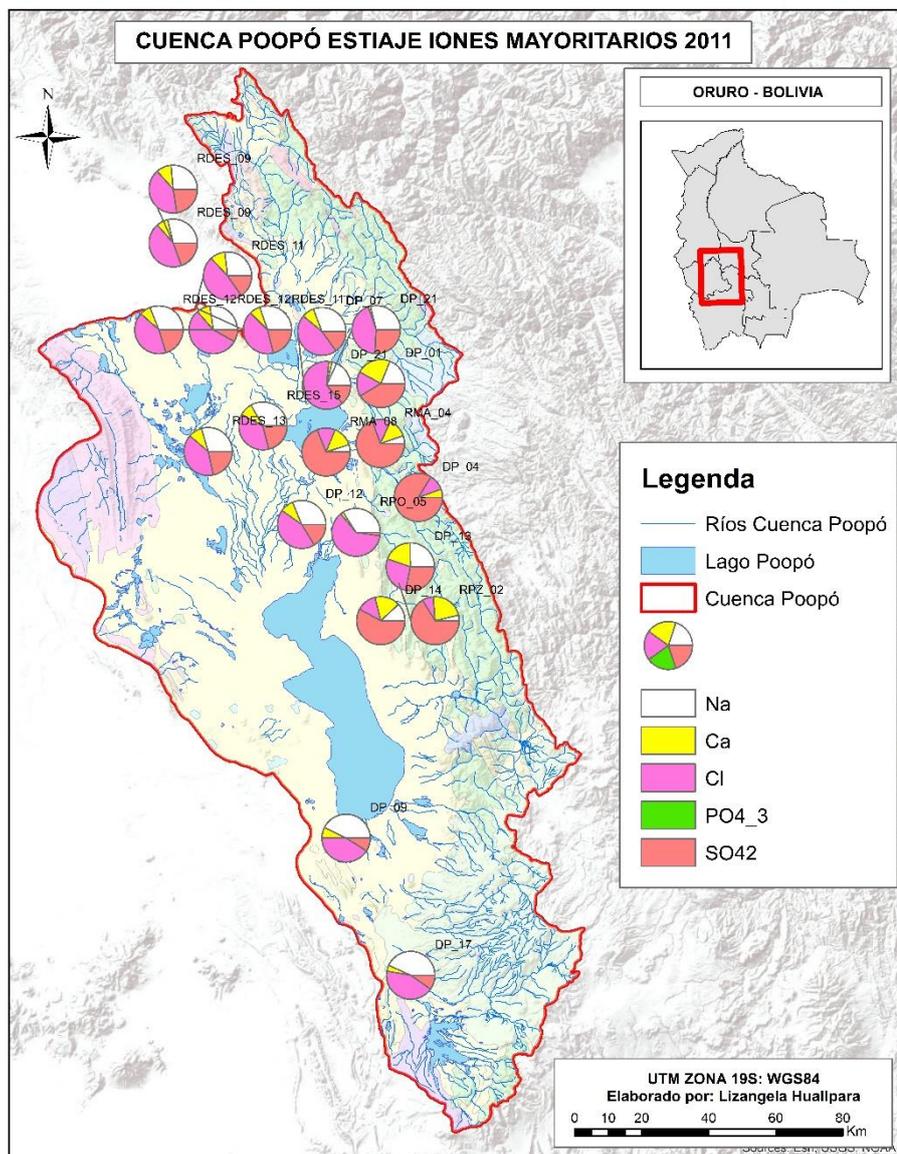


Figura 61. Mapa de variación de Iones Mayoritarios - Cuenca Poopó – Estiaje, 2011.

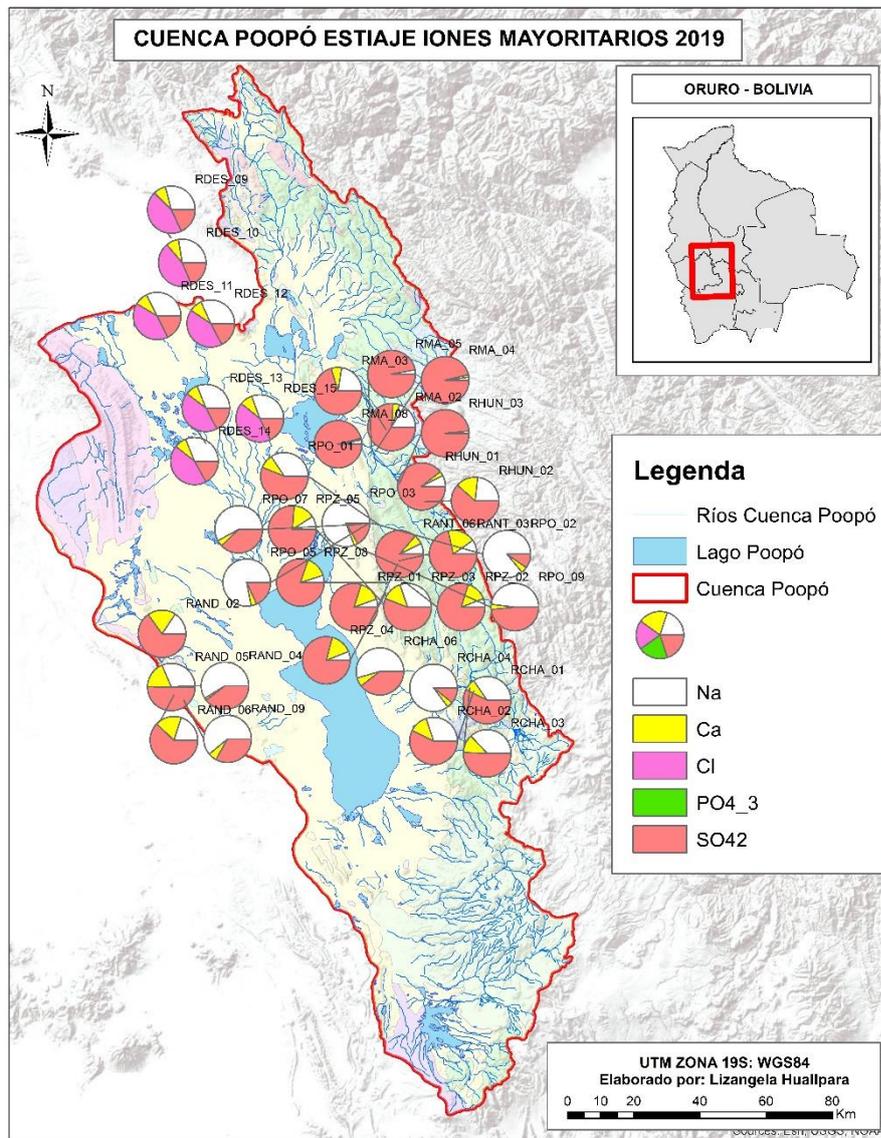


Figura 62. Mapa de variación de Iones Mayoritarios - Cuenca Poopó – Estiaje, 2019.

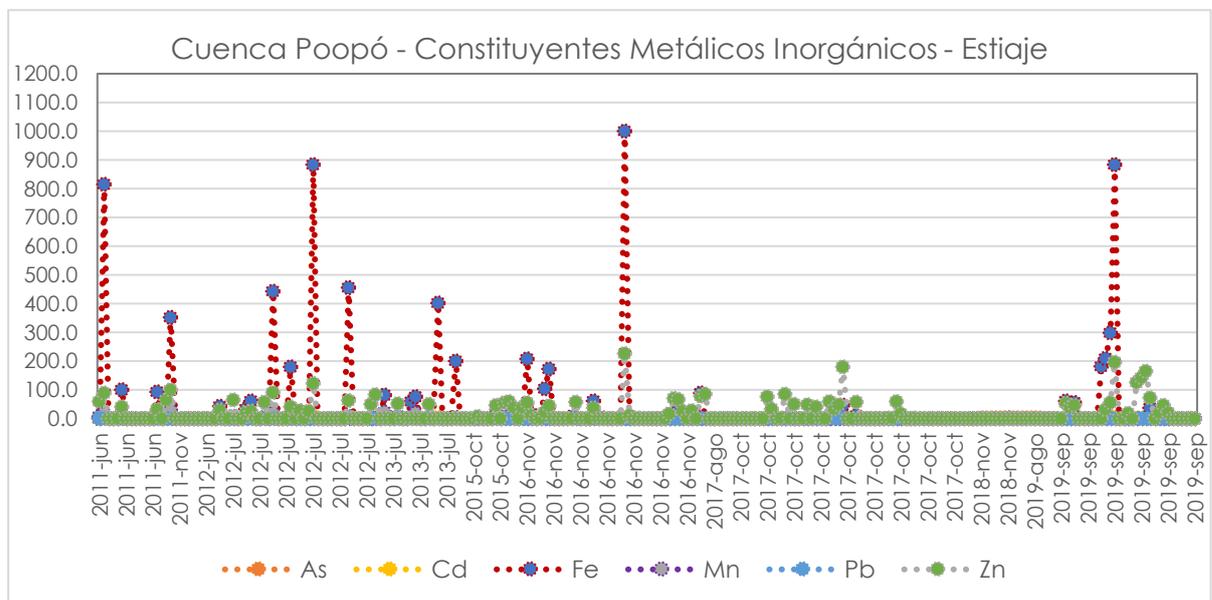


Figura 63. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos en la Cuenca Poopó – Estiaje.

Los constituyentes metálicos inorgánicos de la Cuenca del Lago Poopó en estiaje (figuras 63, 64 y 65), presentan concentraciones de As, Cd, Fe, Mn, Pb y Zn, que sobrepasan los valores críticos según el RMCH, tendencia característica del sector noreste de la Cuenca del Lago Poopó en los años 2011, 2012, 2013, 2015, 2016, 2017 y 2019, porque no se cuentan con datos de todos estos elementos el 2018 donde sólo se determinaron As, Fe y Zn.

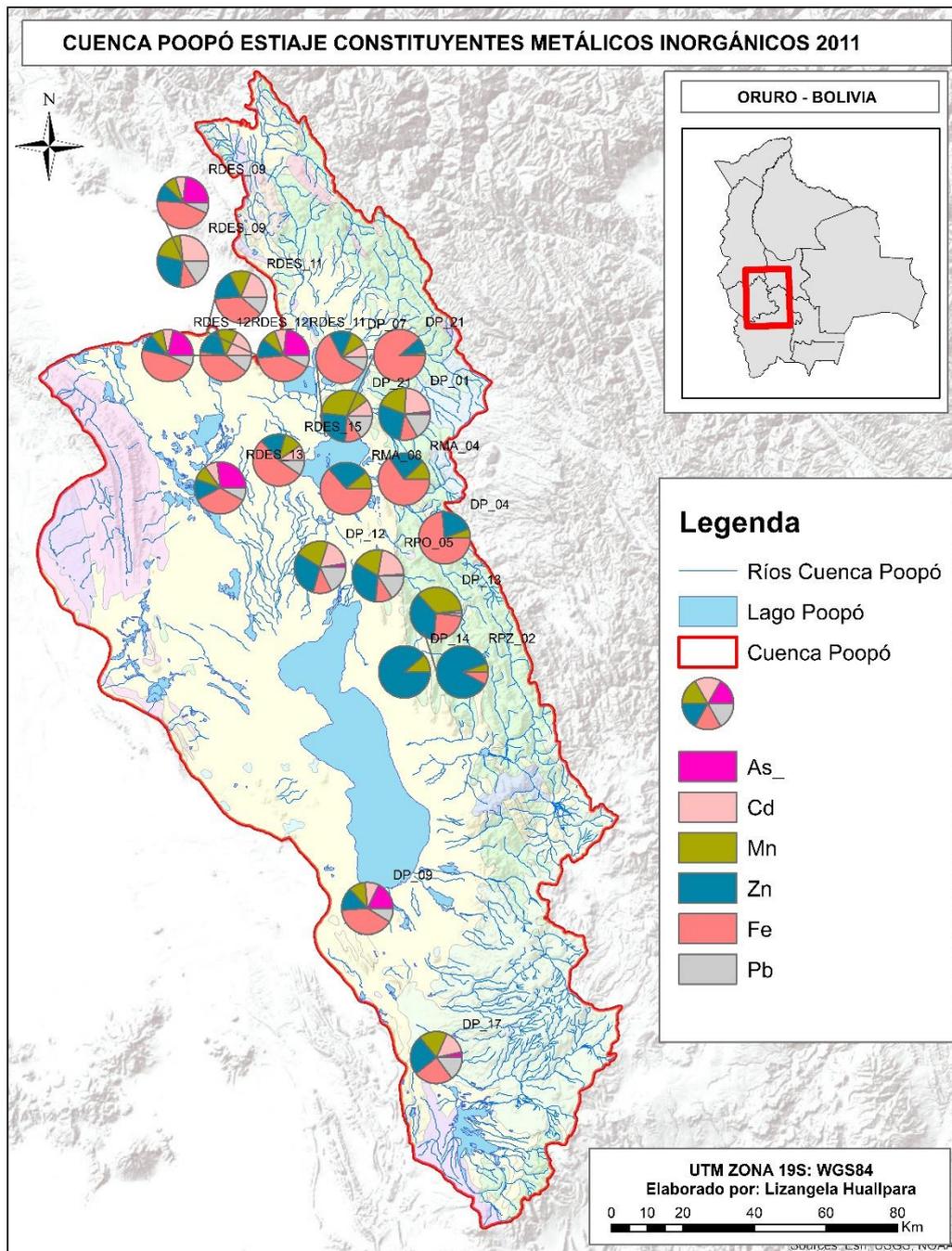


Figura 64. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos - Cuenca Poopó – Estiaje, 2011.

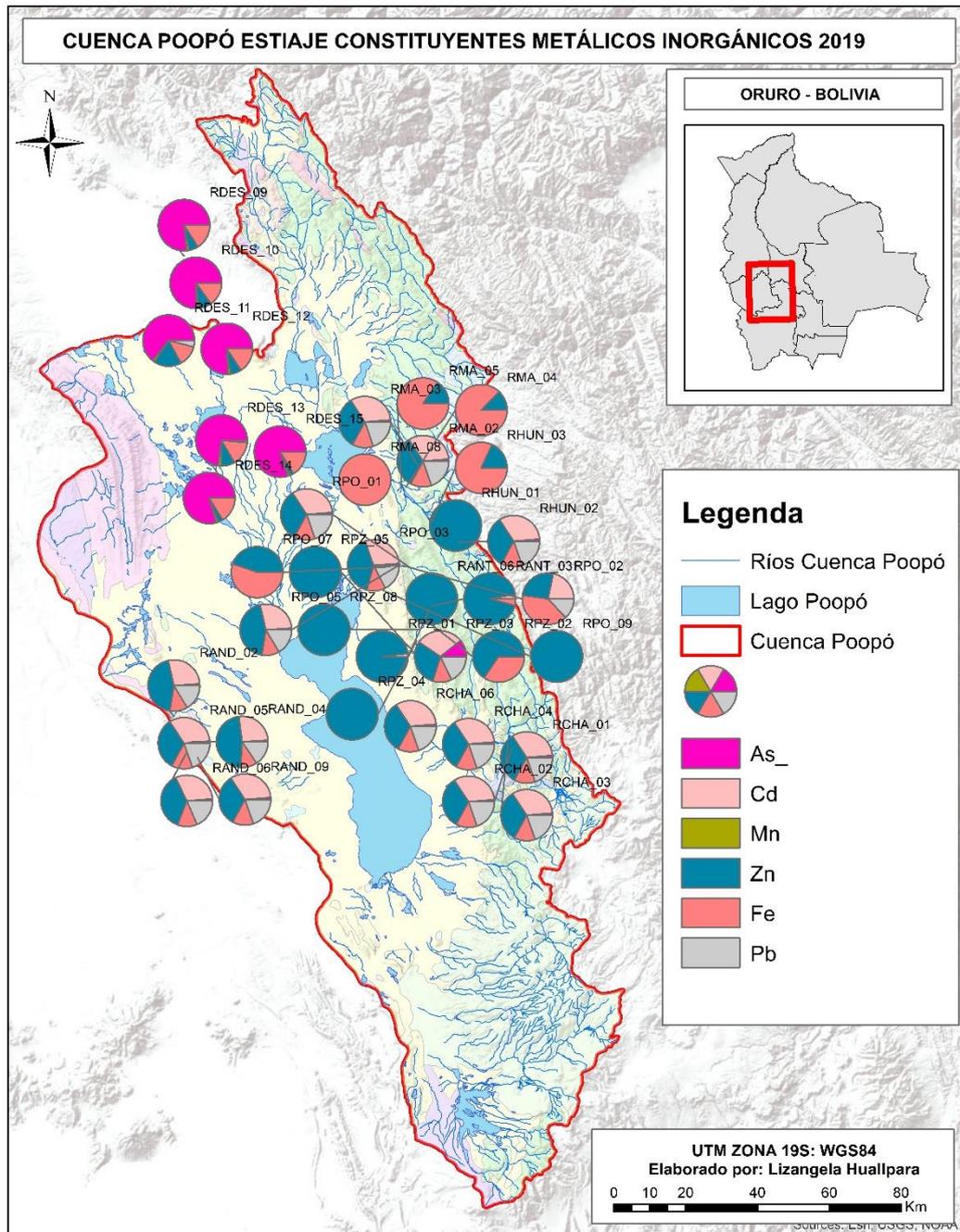


Figura 65. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos - Cuenca Poopó – Estiaje, 2011.

El gráfico estadístico de componentes mayoritarios muestra que el tipo de agua característica de la Cuenca Poopó en estiaje es del tipo **Na-Ca-Mg-Cl-SO4-Pb-Fe** (figura 66) ya que son los componentes mayoritarios que caracterizan las muestras colectadas.

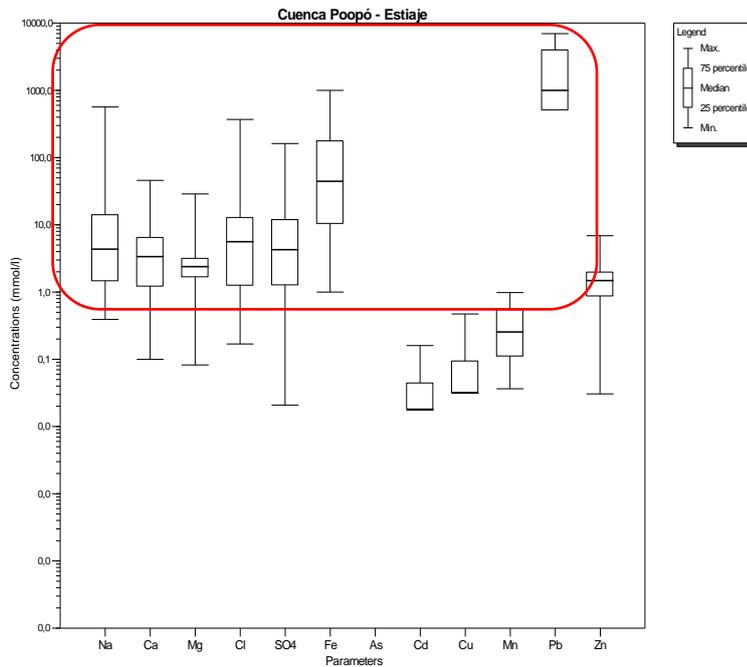


Figura 66. Gráfico estadístico de Composición del agua. Cuenca Poopó - Estiaje.

Similares características de la composición del agua se evidencia en época seca y húmeda. La geología del lugar y la presencia de agua hidrotermal en la cuenca del Lago Poopó hace que presente alta salinidad, composición clorurada sódica.

La presencia de elevadas concentraciones de de As, Cd, Fe, Mn, Pb y Zn, que sobrepasan los valores críticos según el RMCH, específicamente para el sector este de la cuenca del Lago Poopó donde se desarrolla la actividad minera.

Diferentes estudios demuestran casos de contaminación en la cuenca Poopó que tienen que ver con el uso y contaminación de sus aguas, por históricos procesos relacionados con la actividad minera que incluyen pasivos ambientales no remediados. También tiene que ver el uso de las aguas del río Desaguadero en actividades agrícolas entre otros (Rey-Ortíz, 2021)

El sector oeste de la Cuenca del Lago Poopó es diferente porque la presencia de elevadas concentraciones de As y otros elementos están relacionados con la geología del lugar hace que exista valores de fondo de metales en agua en elevadas concentraciones, que superan los valores límite de la normativa nacional.

## 2.4. CUENCA ALTO DESAGUADERO

La Cuenca Alto Desaguadero ocupa un extenso sector al suroeste y sur del Lago Titicaca, desde el nacimiento del río en el lago hasta la localidad de Calacoto. En la figura 67 se puede observar la delimitación geográfica de la Cuenca Alto Desaguadero y la red de puntos de Monitoreo de calidad del agua,



Figura 67. Cuenca Alto Desaguadero – Puntos de Muestreo – Bolivia.

## 2.4.1. CUENCA ALTO DESAGUADERO – ESTIAJE

Se consideró 12 estaciones de monitoreo sobre el río principal y afluentes (Tabla 10).

Tabla 10. Estaciones de monitoreo - Cuenca Alto Desaguadero (Bolivia)

Código	Punto de muestreo	Cuerpo de agua	X	Y
RDES_00	Desaguadero - Puente Internacional	Río	496238	8166865
RDES_01	Puente Aguallamalla	Río	509929	8141074
RDES_02	Puente Nazacara	Río	524822	8127345
RDES_03	Puente Vichaya	Río	523400	8107617
RDES_04	Antes de la confluencia rio Mauri	Río	541108	8088889
JAMA_020_ASP	San Andres de Machaca	Río	492201	8122251
DESA_084_ASP	Caquiaviri	Río	538773	8119553
DESA_090_ASP	Coro Coro	Río	547577	8110420
JACH_003_ASP	Jesús de Machaca	Río	542709	8141710
JAMA_160_ASP	Santiago de Machaca	Río	473984	8103972
JACH_001_ASP	Comanche	Río	549925	8129069
DESA_200_ASP	Colquencha	Río	576033	8111414

Se registró en una base de datos la información de 5 campañas de monitoreo en estiaje:

- 1° Campaña – junio 2011
- 2° Campaña – mayo y junio 2012 (mayor cantidad de puntos de muestreo)
- 3° Campaña – agosto 2017
- 4° Campaña – noviembre 2018
- 5° Campaña – agosto 2019

Tabla 11. Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos. Cuenca Alto desaguadero - Estiaje.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Mediana	Valor crítico RMCH
pH	9,0	7,0	8,0	< 6 y > 9
Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$	2920,0	164,0	1833,0	>1600
Cloruros, mg/L	681,0	50,0	440,0	>500
Sulfatos, mg/L	889,0	5,0	274,0	>400
Fosfatos, mg/L	2,0	0,1	0,2	>1,0
Nitratos, mg/L	0,5	0,1	0,1	>50
Calcio, mg/L	147,0	1,0	81,0	>400
Magnesio, mg/L	70,0	0,4	38,0	>150
Sodio, mg/L	546,0	5,0	270,0	>200
Antimonio, mg/L	0,01	0,0001	0,001	>0,01
Berilio, mg/L	0,005	0,0001	0,001	>0,001
Boro, mg/L	13,0	0,2	1,6	>1,0
Mercurio, mg/L	0,01	0,001	0,001	>0,001

En la Tabla 11 se presenta un resumen estadístico de la base de datos consolidada de la Cuenca Alto Desaguadero en época estiaje, donde se puede evidenciar las principales características fisicoquímicas de 41 muestras de agua que corresponden a 12 estaciones de monitoreo colectadas en los años 2011, 2012, 2017, 2018 y 2019.

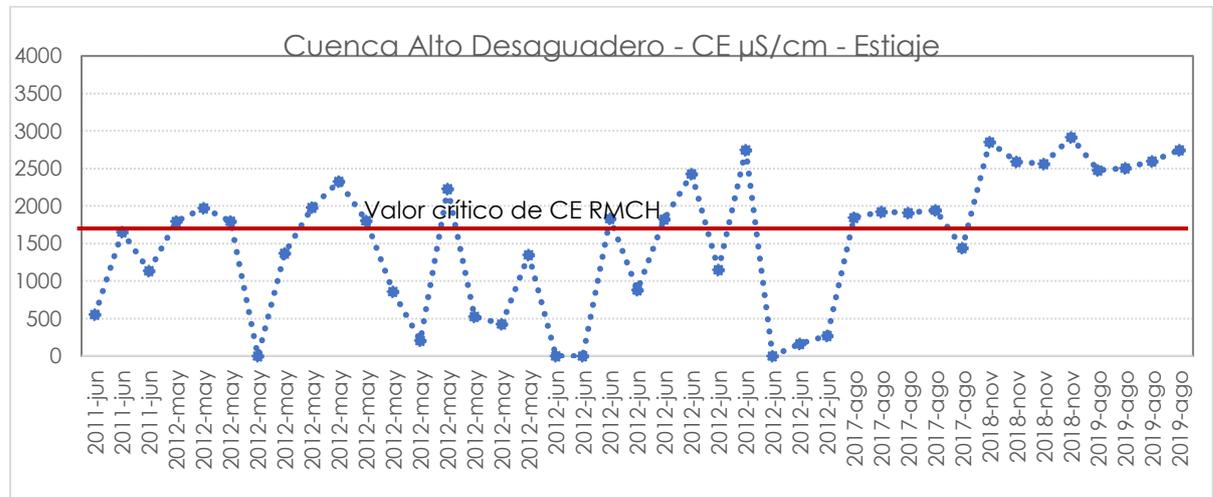


Figura 68. Gráfico de tendencias de la CE en la Cuenca Alto Desaguadero – Estiaje.

La variación espacio temporal de la CE de los cuerpos de agua medidos se puede observar en las figuras 68, 69 y 70, la conductividad eléctrica varió en un rango de 164 a 2920  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 1833  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El 58,5 % de las muestras superan el valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  según el RMCH presentando una tendencia a incrementar ligeramente, los valores más elevados se presentan el año 2019 (figura 68).

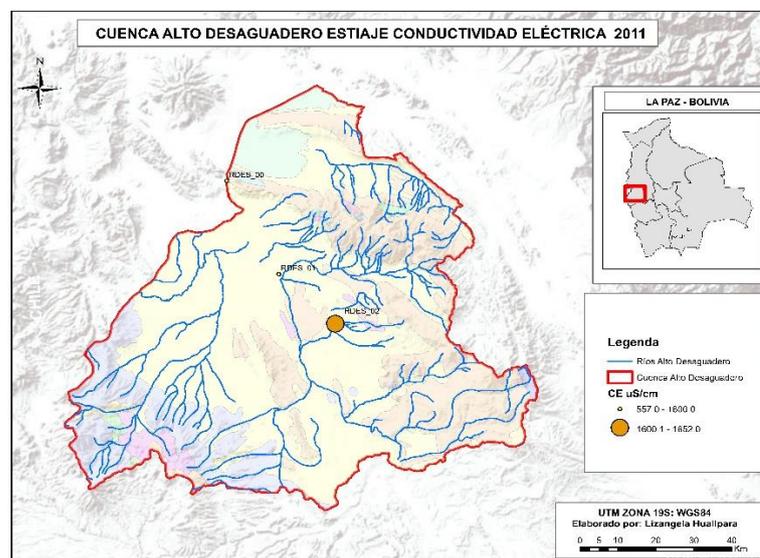


Figura 69. Mapa de variación de la CE - Cuenca Alto Desaguadero – Estiaje, 2011.

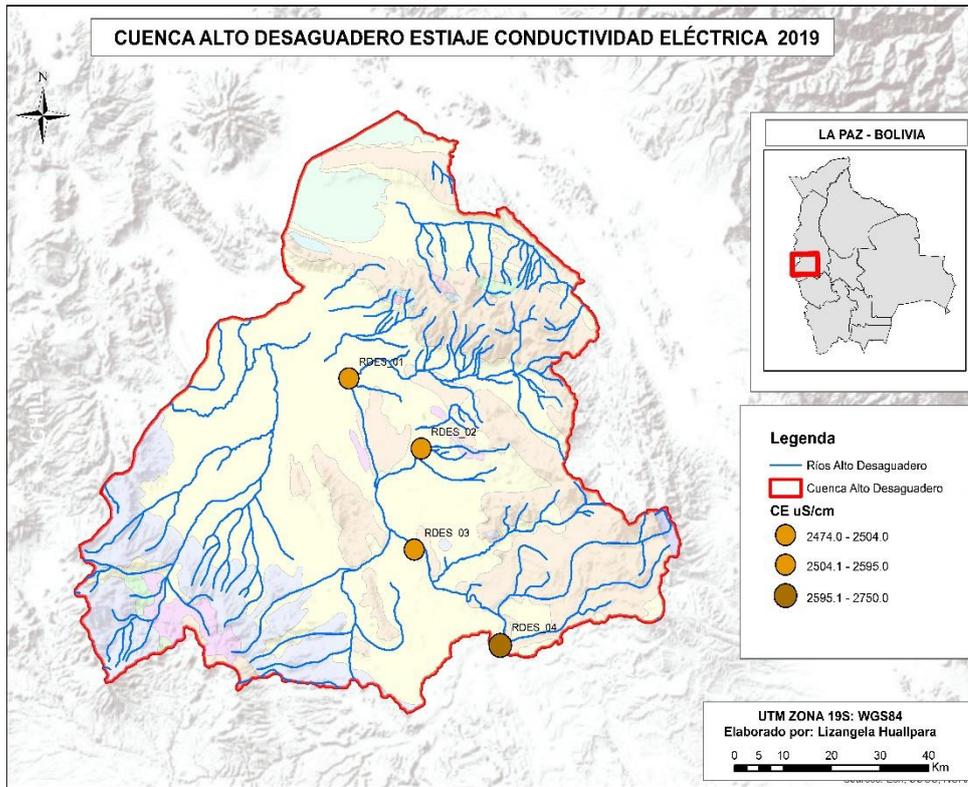


Figura 70. Mapa de variación de la CE - Cuenca Alto Desaguadero – Estiaje, 2019.

Con respecto a los iones mayoritarios figuras 71, 72 y 73, se puede observar que las concentraciones de cloruros, sulfatos, fosfatos y sodio se encuentran por encima de los valores críticos según el RMCH, los iones nitrato, calcio y magnesio están por debajo de los valores críticos según el RMCH.

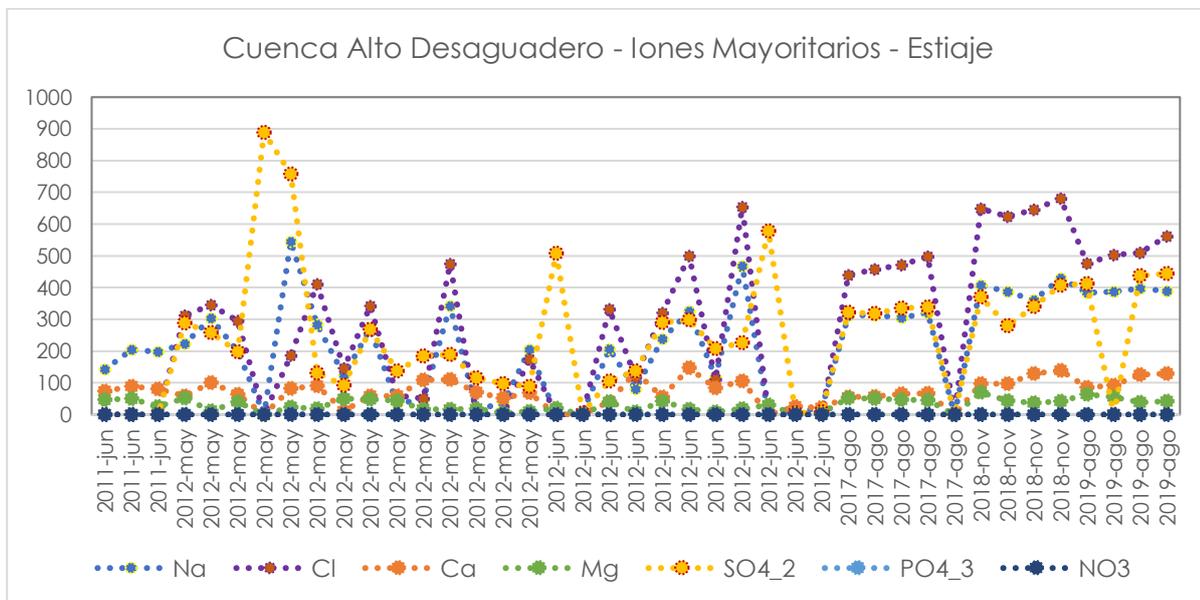


Figura 71. Gráfico de tendencias de Iones Mayoritarios - Cuenca Alto Desaguadero – Estiaje.

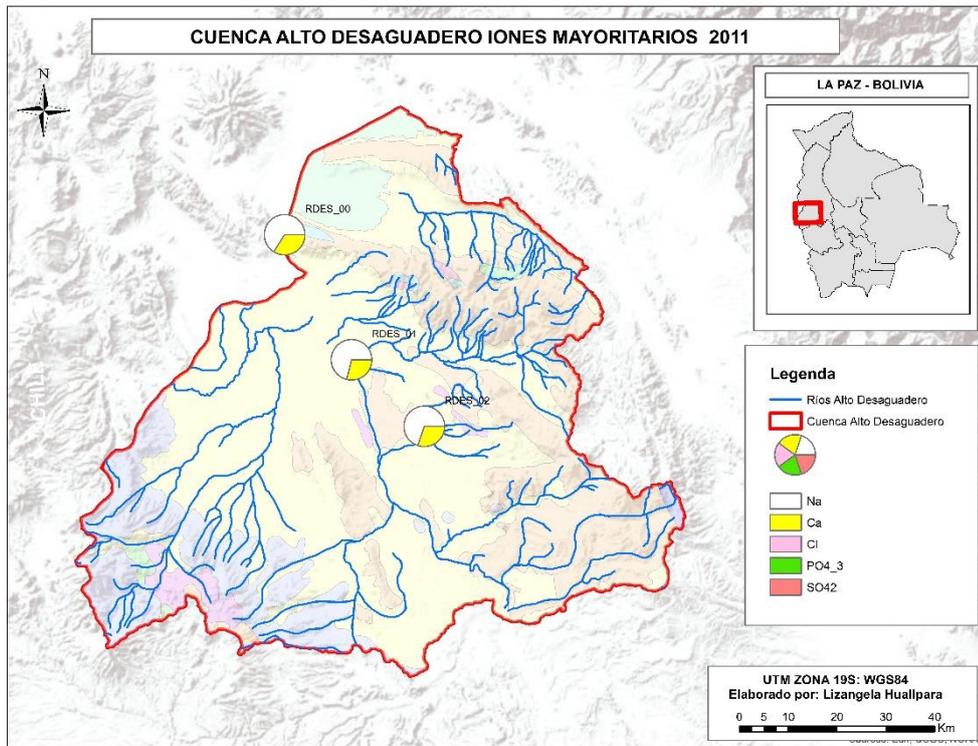


Figura 72. Mapa de variación de Iones Mayoritarios - Cuenca Alto Desaguadero – Estiaje, 2011.

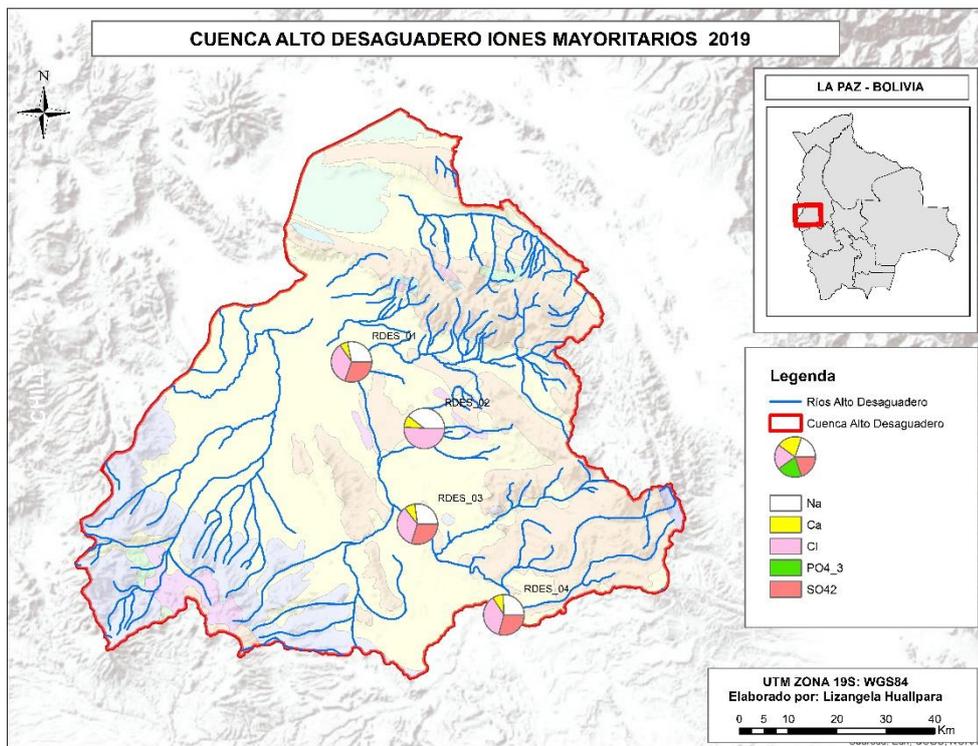


Figura 73. Mapa de variación de Iones Mayoritarios - Cuenca Alto Desaguadero – Estiaje, 2019.

En cuanto a los constituyentes metálicos inorgánicos de la Cuenca Alto Desaguadero en estiaje figuras 74, 75 y 76, presentan concentraciones de B, Be y Hg que sobrepasan los valores críticos según el RMCH, en las muestras

RDES 01, RDES 02, RDES 03 y RDES 04, características del río principal en los años 2011, 2012, 2017, 2018 y 2019.

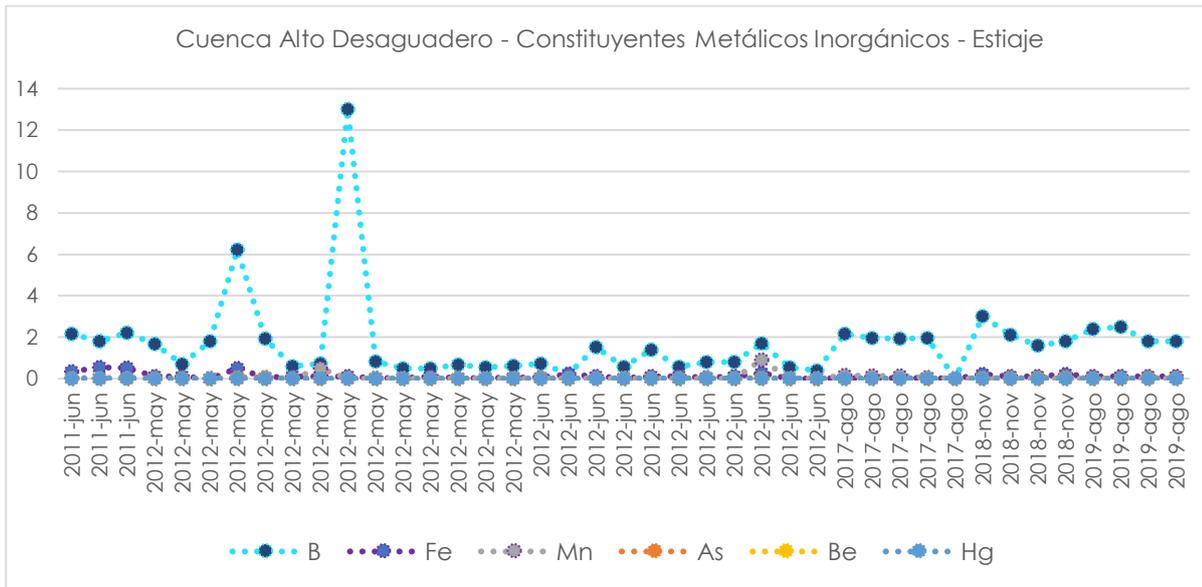


Figura 74. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos - Cuenca Alto Desaguadero – Estiaje

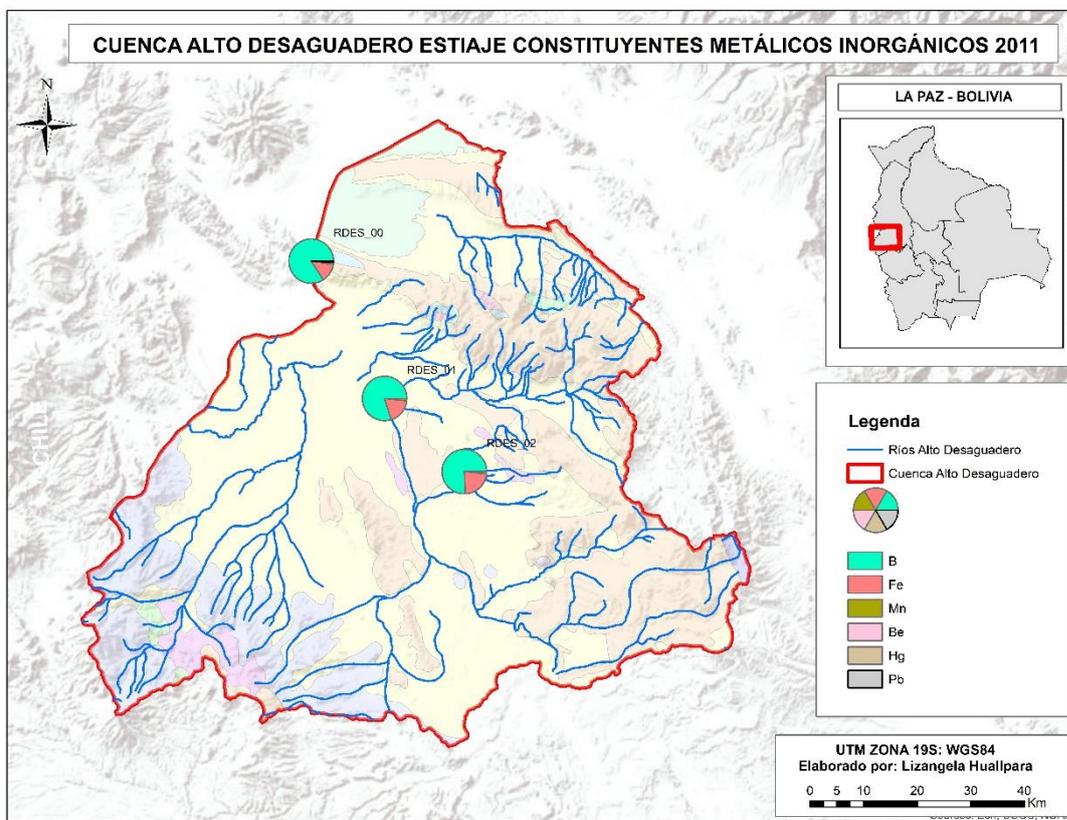


Figura 75. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos - Cuenca Alto Desaguadero – Estiaje, 2011.

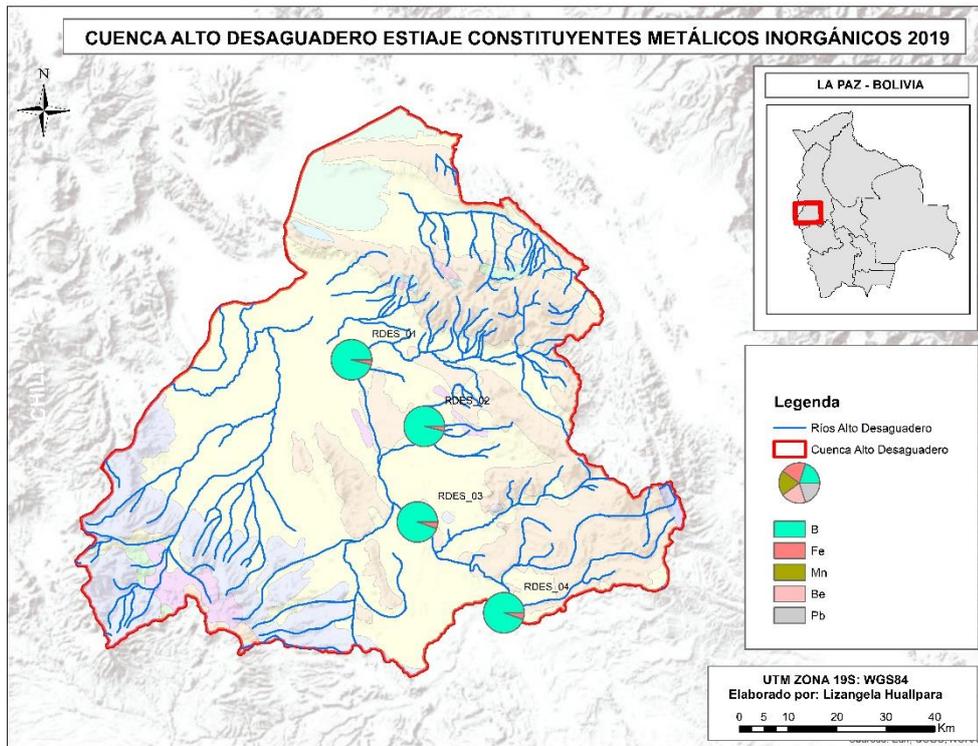


Figura 76. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos - Cuenca Alto Desaguadero – Estiaje, 2019.

El gráfico estadístico de componentes mayoritarios (figura 77), muestra que el tipo de agua característica de la Cuenca Alto Desaguadero en estiaje es del tipo **Na-Ca-Mg-Cl-SO4-B** ya que son los componentes mayoritarios que caracterizan las muestras colectadas en avenida.

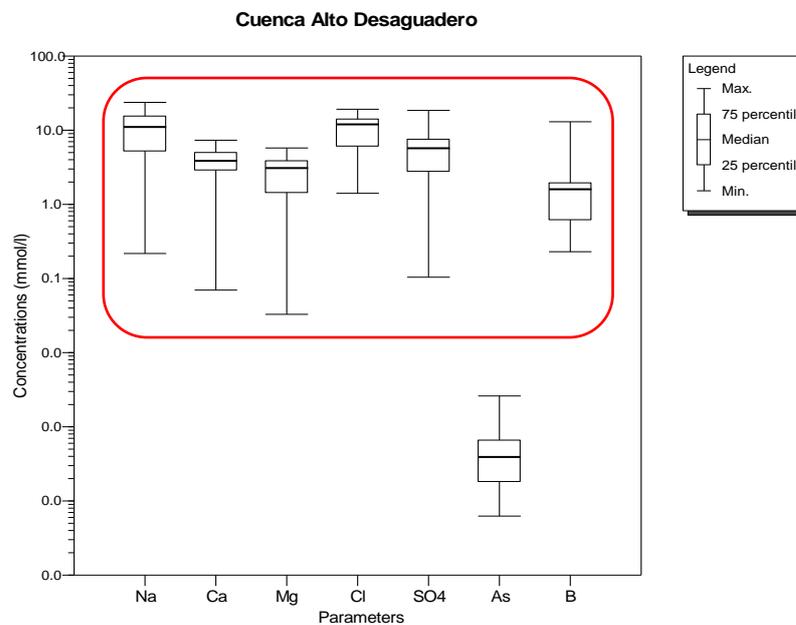


Figura 77. Gráfico estadístico de Composición del agua- Cuenca Alto Desaguadero-Estiaje.

En la parte alta de la cuenca se encuentran suelos salados que constituyen evaporitas con alto contenido de bórax y ácido bórico, los cuales hacen aportes importantes de boro al río. Estudios anteriores demuestran casos de contaminación en la cuenca Alto Desaguadero que presentan valores de pH básicos, los valores altos de oxígeno disuelto pueden estar relacionados al manejo inadecuado de camélidos circundantes en la zona, además, se identificó algunas actividades mineras con impactos directos sobre el río Desaguadero; sin embargo, no en todo el sector existe actividad minera que realice descargas de agua hacia la cuenca del río (Ministerio de relaciones exteriores, 2016).

## 2.5. CUENCA MEDIO DESAGUADERO

La Cuenca Medio Desaguadero se caracteriza porque su río principal desemboca en el Lago Poopó se extiende al occidente de la cuenca del Mauri y sursuroeste de la cuenca Alto Desaguadero. En la figura 78 se puede observar la delimitación geográfica de la Cuenca Medio Desaguadero y la red de puntos de Monitoreo de calidad del agua,

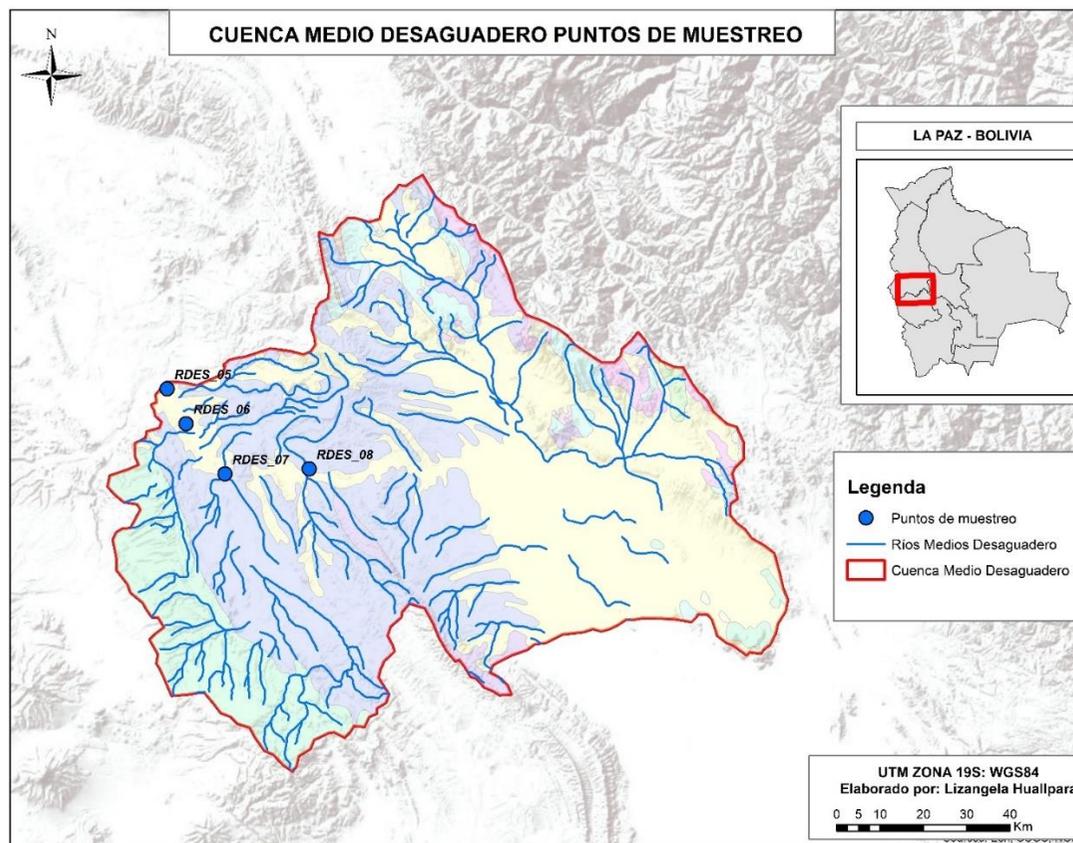


Figura 78. Cuenca Medio Desaguadero – Puntos de Muestreo – Bolivia.

### 2.5.1. CUENCA MEDIO DESAGUADERO – ESTIAJE

Se consideró 22 estaciones de monitoreo sobre el río principal y afluentes (Tabla 12).

Tabla 12. Estaciones de monitoreo - Cuenca Alto Desaguadero (Bolivia)

Código	Punto de muestreo	Cuerpo de agua	X	Y
DESA_081_ASP	Calacoto	Río	544390	8042205
DESA_098_ASP	Calacoto	Río	543994	8084510
DESA_100_ASP	Santiago de Callapa	Río	549431	8072847
DESA_101_ASP	Santiago de Callapa	Río	550024	8069288
DESA_104_ASP	Santiago de Callapa	Río	577206	8065236
DESA_107_ASP	Curahuara	Río	613242	8061391
DESA_109_ASP	Papel Pampa	Río	648375	8056438
RDES_05	Calacoto	Río	540669	8086010
RDES_06	Calacoto	Río	545034	8078017
RDES_07	Calacoto	Río	554021	8066542
RDES_08	Santiago de Callapa	Río	613242	8061391
UMAL_063_ASP	Coro Coro	Río	582643	8101710
UMAL_064_ASP	Calamarca	Río	592600	8125500
UMAL_065_ASP	Colquencha	Río	578491	8116932
UMAL_066_ASP	Ayo Ayo	Río	597834	8113851
UMAL_067_ASP	Patacamaya	Río	612159	8101844
UMAL_068_ASP	Patacamaya	Río	608802	8090825
UMAL_069_ASP	Aroma	Río	616352	8082574
UMAL_070_ASP	Sica Sica	Río	633402	8072136
UMAL_071_ASP	Sica Sica	Río	643433	8069783
UMAL_072_ASP	-	Río	644125	8071661
UMAL_073_ASP	-	Río	646200	8070178

Se registró en una base de datos la información de 5 campañas de monitoreo en estiaje:

- 1° Campaña – junio 2011
- 2° Campaña – mayo y junio 2012 (mayor cantidad de puntos de muestreo)
- 3° Campaña – agosto 2017
- 4° Campaña – noviembre 2018
- 5° Campaña – agosto 2019

En la tabla 13 se presenta un resumen estadístico de la base de datos consolidada de la Cuenca Medio Desaguadero en época seca, donde se puede evidenciar las principales características fisicoquímicas de 36 muestras

de cuerpos de agua colectadas en 22 estaciones de monitoreo en los años 2011, 2012, 2017, 2018 y 2019.

Tabla 13. Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos. Cuenca Medio desaguadero - Estiaje.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Mediana	Valor crítico RMCH
pH	10,0	8,0	8,0	< 6 y > 9
Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$	5050,0	310,0	1580,0	>1600
Cloruros, mg/L	1357,0	73,0	370,0	>500
Sulfatos, mg/L	386,0	6,0	166,0	>400
Fosfatos, mg/L	1,0	0,1	0,2	>1,0
Nitratos, mg/L	0,2	0,01	0,01	>50
Calcio, mg/L	370,0	8,0	60,0	>400
Magnesio, mg/L	43,0	3,0	22,0	>150
Sodio, mg/L	994,0	24,0	220,0	>200
Arsénico, mg/L	0,6	0,001	0,07	>0,1
Boro, mg/L	5,7	0,6	1,7	>1,0
Cobre, mg/L	0,07	0,001	0,004	>1,0
Mercurio, mg/L	0,002	0,001	0,001	>0,001

La conductividad eléctrica varió en un rango desde 310 a 5050  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 1580  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (figuras 79, 80 y 81). La variación espacio temporal de la CE de los cuerpos de agua medidos en 36 muestras en estiaje corresponden a los años 2011, 2012, 2017, 2018 y 2019. El 43,2% de las muestras superan el valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  según el RMCH presentando los valores más elevados en el río principal de la Cuenca Medio Desaguadero.

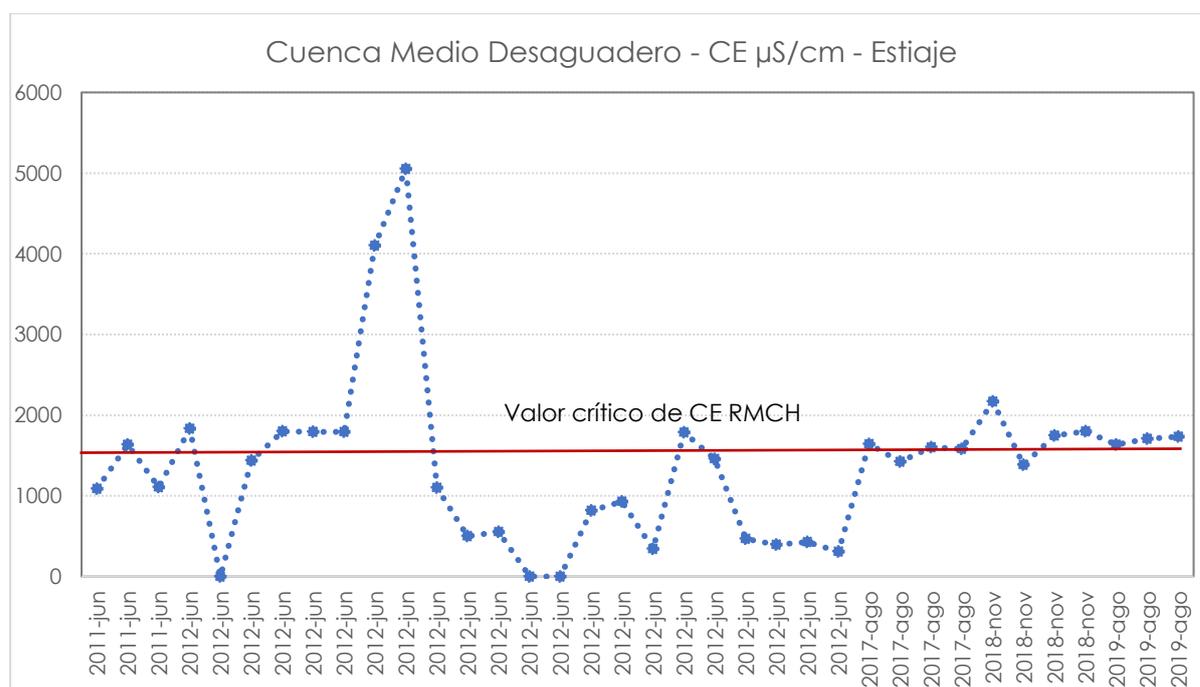


Figura 79. Gráfico de tendencias de la CE en la Cuenca Medio Desaguadero – Estiaje.

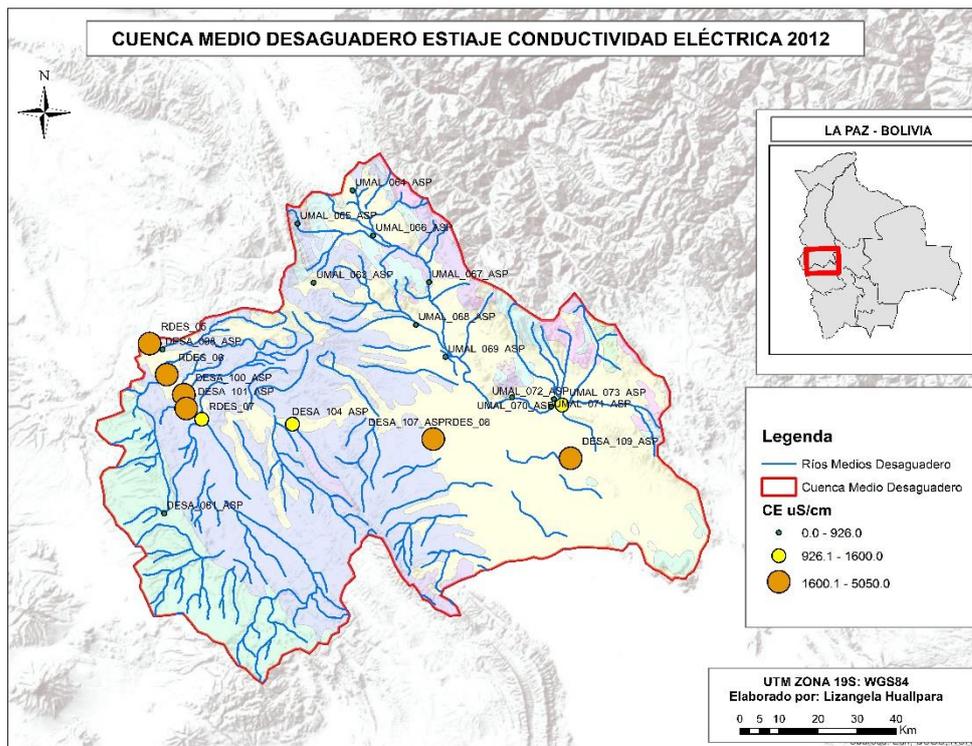


Figura 80. Mapa de variación de la CE – Cuenca Medio Desaguadero – Estiaje, 2012.

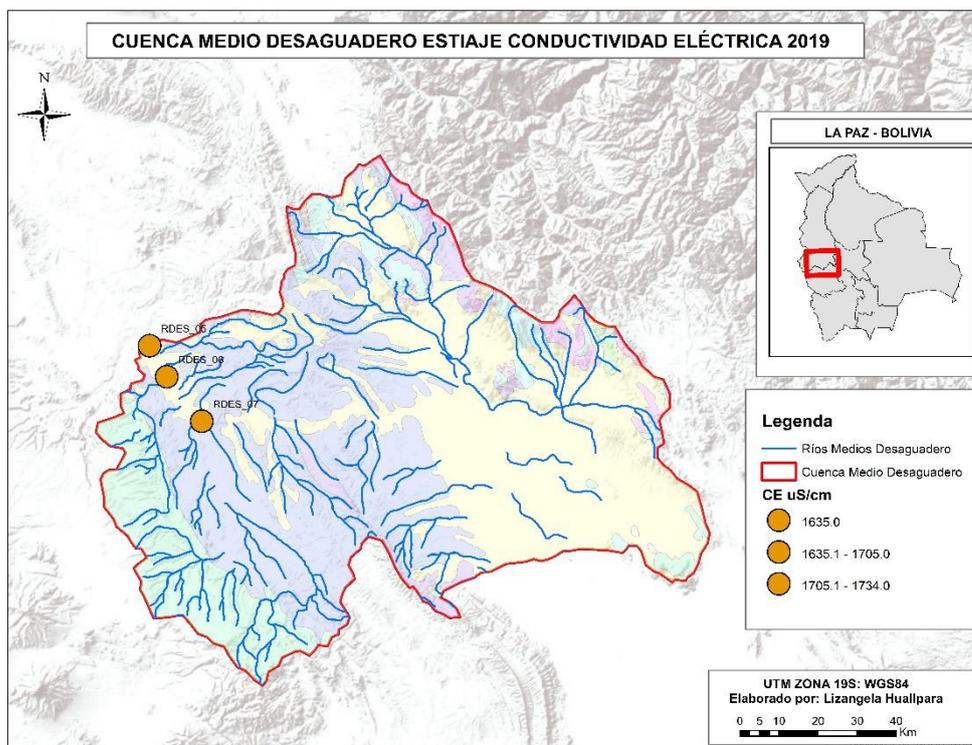


Figura 81. Mapa de variación de la CE – Cuenca Medio Desaguadero – Estiaje, 2019.

Con respecto a los iones mayoritarios figuras 82, 83 y 84, se puede observar que las concentraciones de cloruros y sodio de los cuerpos de agua monitoreados en la Cuenca Medio Desaguadero, en estiaje, se encuentran por encima de los valores críticos según el RMCH. En cuanto a la

concentración de los iones nitrato, fosfato calcio y magnesio están por debajo de los valores críticos según el RMCH.

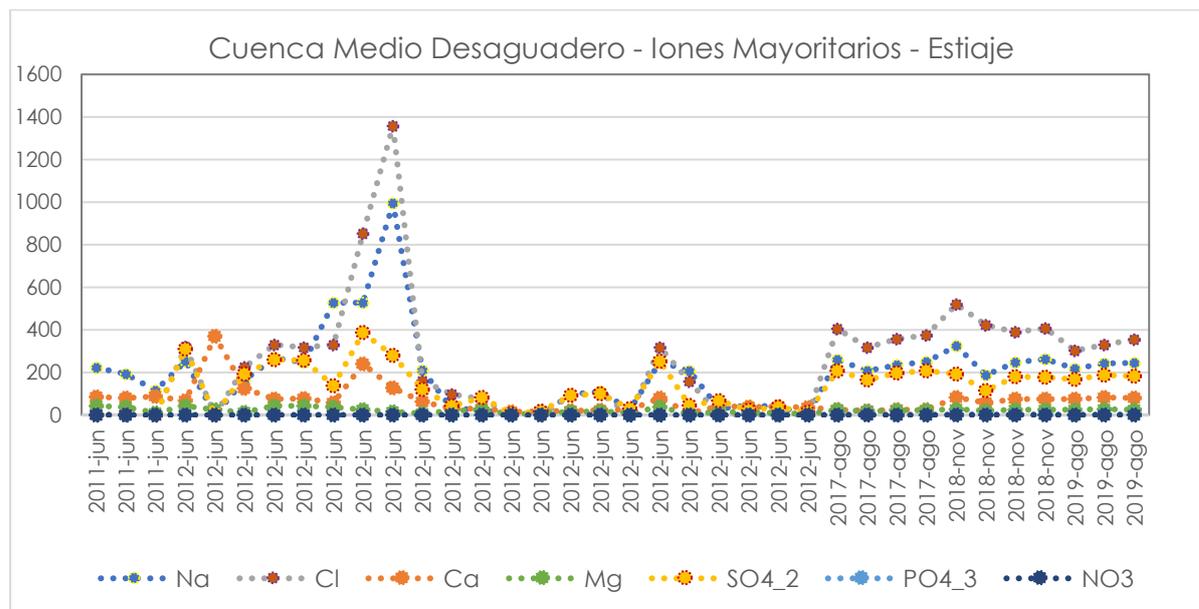


Figura 82. Gráfico de tendencias de Iones Mayoritarios - Cuenca Medio Desaguadero – Estiaje.

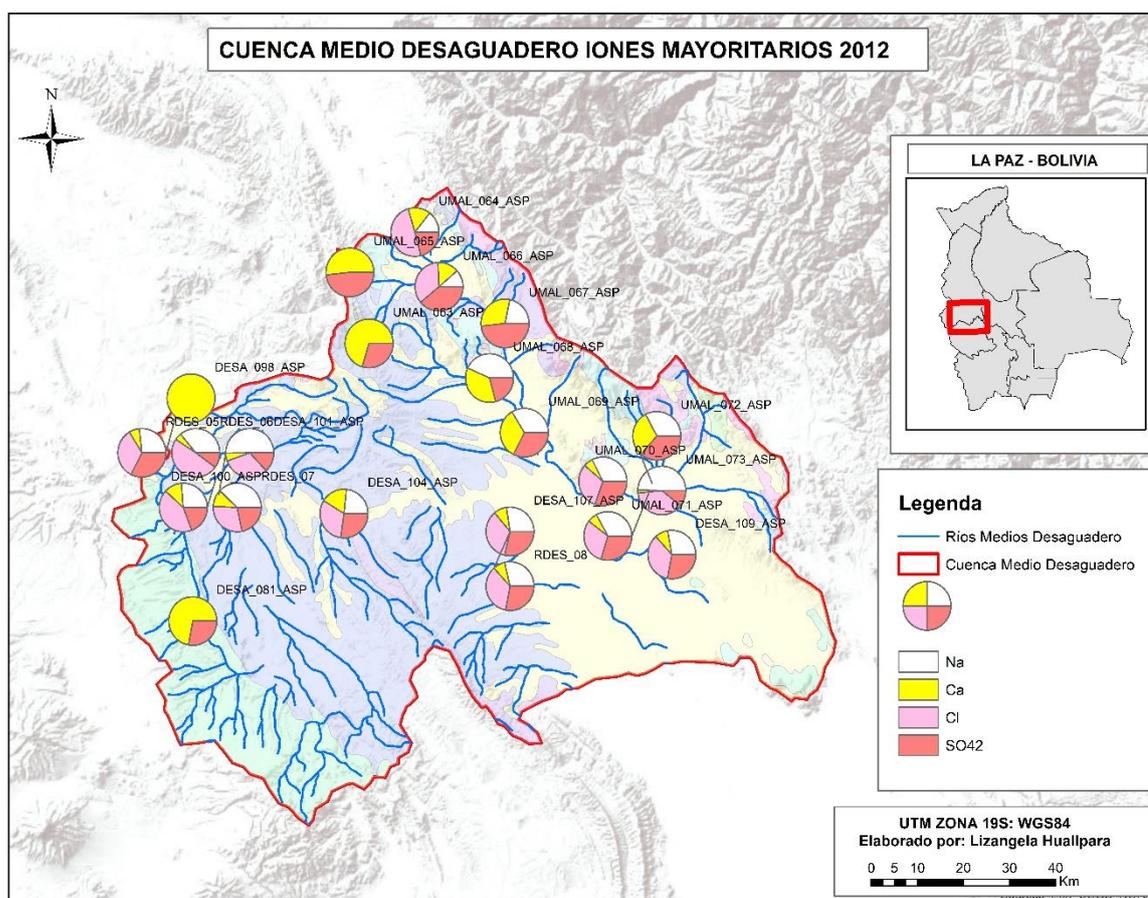


Figura 83. Mapa de variación de Iones Mayoritarios de la Cuenca Medio Desaguadero – Estiaje, 2012.

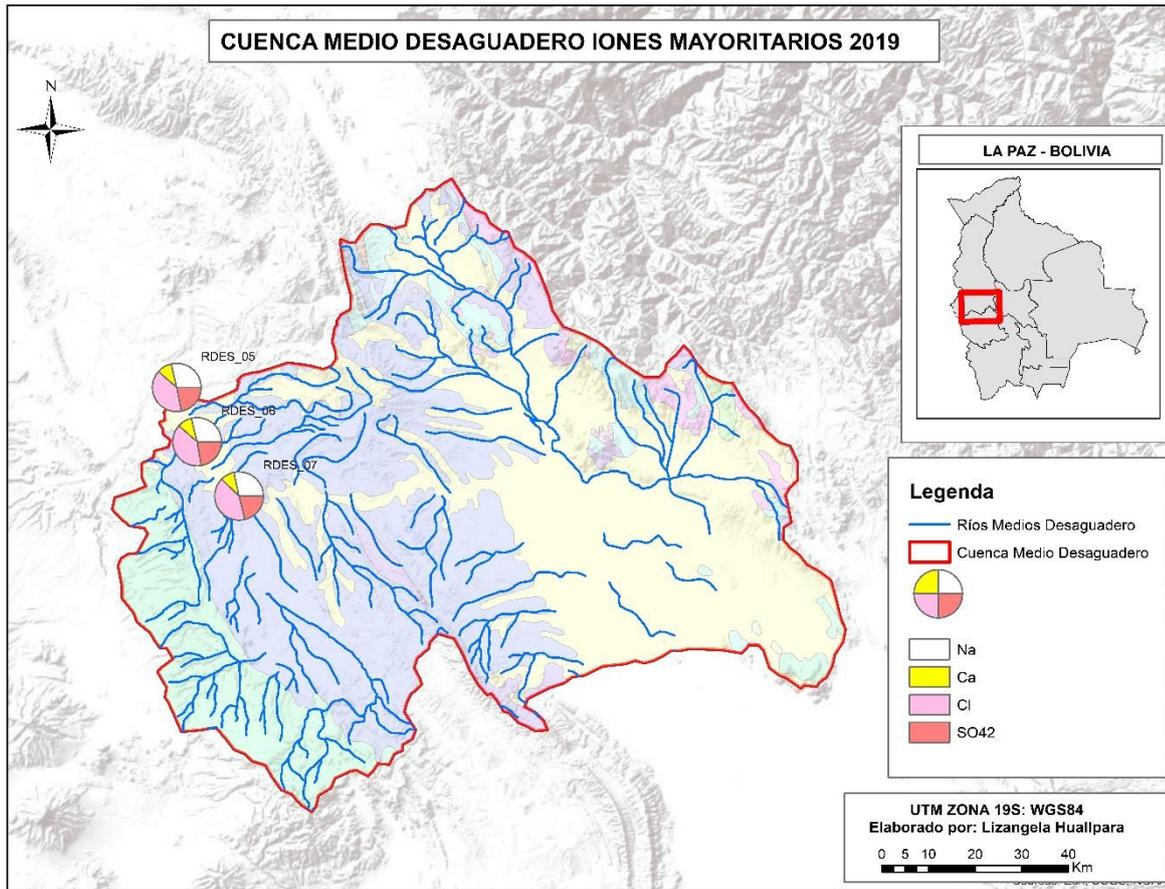


Figura 84. Mapa de variación de Iones Mayoritarios de la Cuenca Medio Desaguadero – Estiaje, 2019.

En cuanto a los constituyentes metálicos inorgánicos de la Cuenca Medio Desaguadero en estiaje figuras 85, 86 y 87, presentan concentraciones de As, B, Cu, Hg y Fe que sobrepasan los valores críticos según el RMCH, tendencia principal en los años 2011, 2012, 2017, 2018 y 2019.

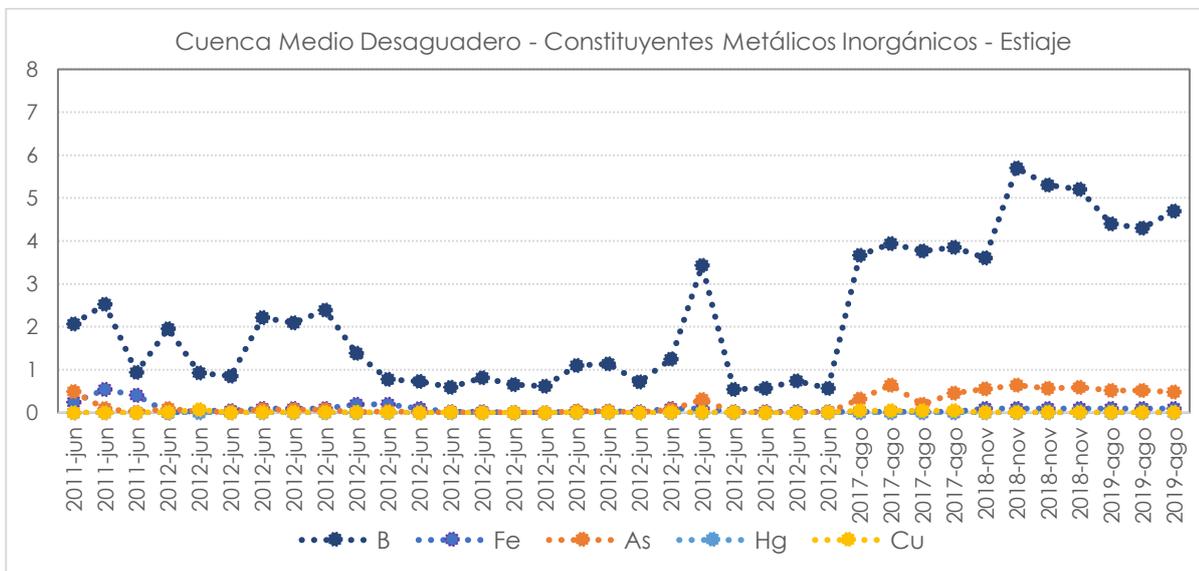


Figura 85. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos - Cuenca Medio Desaguadero – Estiaje.

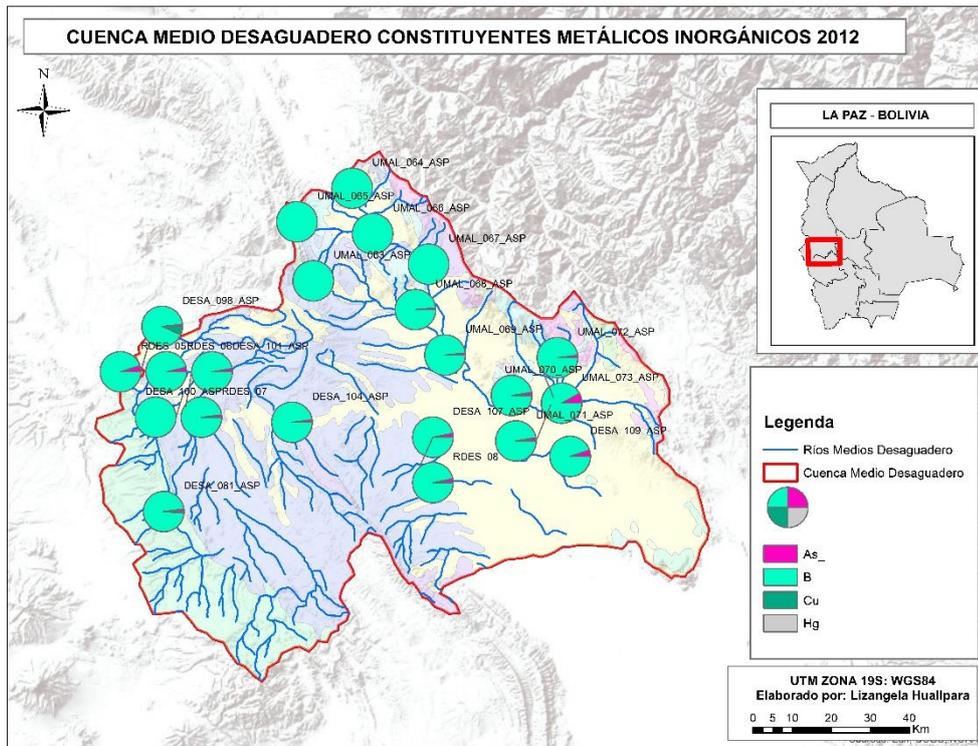


Figura 86. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos - Cuenca Medio Desaguadero – Estiaje, 2012.

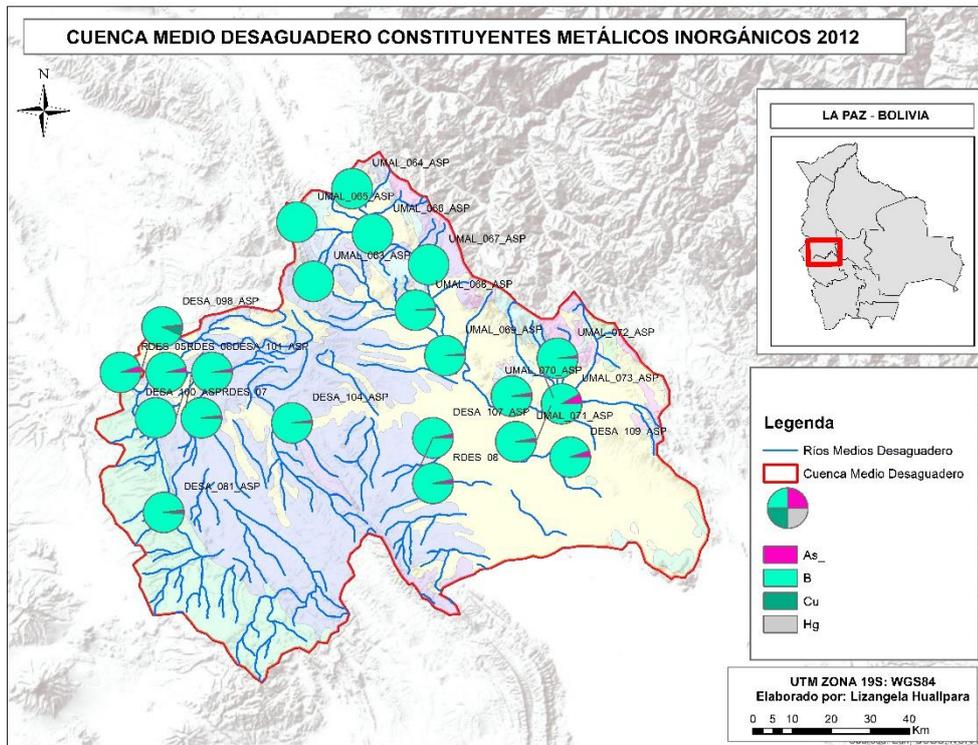


Figura 87. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos - Cuenca Medio Desaguadero – Estiaje, 2019.

El gráfico estadístico de componentes mayoritarios figura 88 , muestra que el tipo de agua característica de la Cuenca Medio Desaguadero en estiaje es del tipo **Na-Ca-Mg-Cl-SO<sub>4</sub>-B** ya que son los componentes mayoritarios que caracterizan las muestras colectadas en estiaje.

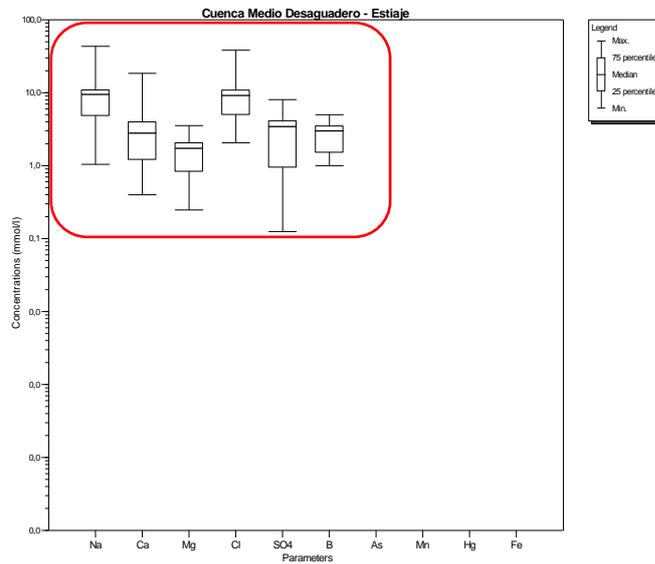


Figura 88. Gráfico estadístico de Composición del agua - Cuenca Medio Desaguadero - Estiaje

En la parte alta de la cuenca se encuentran suelos salados que constituyen evaporitas con alto contenido de bórax y ácido bórico, los cuales hacen aportes importantes de boro al río, este aporte se encuentra incrementando. En diferentes estudios realizados en la Cuenca Medio Desaguadero se identificaron actividades mineras con impactos directos sobre el río Desaguadero; sin embargo, esta problemática no se extiende en toda el áreas, otra fuente de contaminación del recurso hídrico es el deficiente sistema de aguas servidas de la ciudad de Oruro y el deficiente manejo de los residuos industriales (Ministerio de relaciones exteriores, 2016).

## 2.6. CUENCA KATARI

La Cuenca Katari está ubicada en el departamento de La Paz, el río Katari guarda una estrecha relación con al menos 9 municipios desde su nacimiento en Comanche, después de su recorrido vierte sus aguas en el lago Titicaca. En la figura 89 se puede observar la delimitación geográfica de la Cuenca Katari y la red de puntos de Monitoreo de calidad del agua,

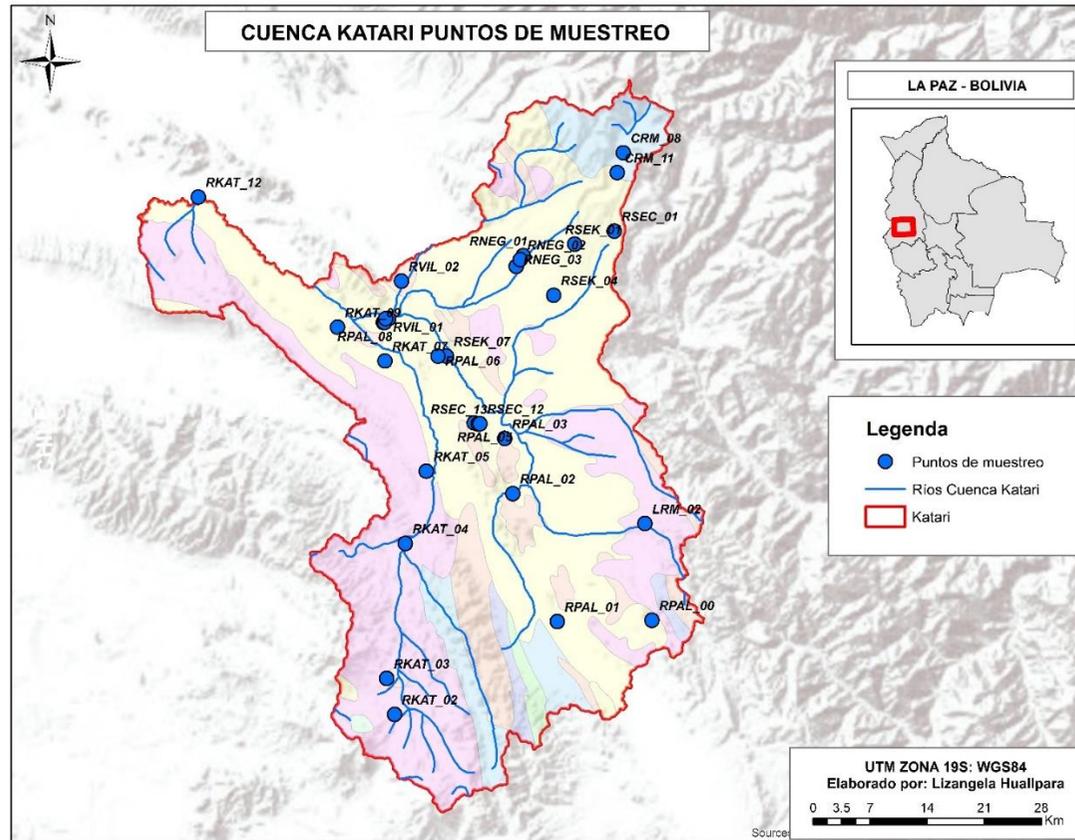


Figura 89. Cuenca Katari – Puntos de Muestreo – Bolivia

### 2.6.1. CUENCA KATARI – AVENIDA

Se consideró 58 estaciones de monitoreo sobre 49 puntos sobre el río principal, 4 puntos sobre la Bahía Cohana, 1 Laguna Zongo y 4 puntos del canal en Janka Khota (Tabla 14).

Tabla 14. Estaciones de monitoreo - Cuenca Katari (Bolivia)

Código	Punto de Muestreo	Cuerpo de agua	X	Y
COH_4	Bahía Cohana Cascachi	Lago	534136	8192898
COH_3	Bahía de Cohana (Pajchiri)	Lago	534042	8190416
COH_2	Bahía de Cohana (WARAPAMPA)	Lago	535101	8189428
COH_1	Bahía de Cohana Muelle	Lago	536300	8189884
RKAT_09	Confluencia ríos C. y P.	Río	554807	8171527
RSEC_04	Afluente planta Puchukollo	Río	577534	8170156
RSEC_08	Final Canalizacion antes de la entrada a Laja	Río	581244	8172318
MRM_5	Ingreso canal bypass Janka Khota	Canal	590471	8195611
MRM_3	Ingreso Janka Khota	Río	592253	8196958
LRM_02	Laguna Zongo	Laguna	592549	8147635
CRM_08	Milluni chico	Río	589902	8192758
RNEG_01	Naciente del Rio Negro	Río	577611	8180235
RSEK_01	Naciente del Rio Seke	Río	583923	8181634
RSEK_04	Puente Seke- Puente Peatonal	Río	581343	8175419
RSK_03	Puente sobre Av. Juan Pablo II (próximo a ex-FANVIPLAN)	Río	582751	8176859
RSC_06	R. H. conf R. Seco El Alto	Río	583881	8174415
RSEC_03	R. H. conf R. Seco El Alto	Río	585729	8178483
RPAL_05	R. P. despues conf R Seke	Río	571580	8159878
RSC_06	R. S. El Alto Av. Costanera	Río	583965	8174485
SEW_2	R. S. puente Aygachi	Río	542995	8188341
RSEK_07	Río Jalakery	Río	568170	8168005
RKAT_12	Río Katari - Comunidad Korilla (Puente Katari)	Río	537726	8187376
RKAT_01	Río Katari - naciente	Río	562843	8124001
RKAT_07	Río Katari después confluencia J. Jahuira	Río	560627	8167425
RKAT_04	Río Katari después confluencia K. Jahuira	Río	563134	8145188
RKAT_03	Río Katari después confluencia Pakota	Río	560840	8128772
RKAT_02	Río Katari en Comanche	Río	561813	8124393
RKAT_05	Río Katari en Viacha	Río	565701	8154010
RNEG_07	Río Negro - antes confluencia río Pallina	Río	561080	8172572
RNEG_03	Río Negro - empresa áridos	Río	576746	8178929
RPAL_02	Río Pallina	Río	576314	8151272
RPAL_00	Río Pallina - naciente	Río	593405	8135847
RPAL_06	Río Pallina 06	Río	567139	8168014
RPAL_08	Río Pallina 08	Río	560582	8172106
RPAL_09	Río Pallina 09	Río	560432	8172123
RPAL_03	Río Pallina antes de Viacha	Río	575331	8157989
RPAL_01	Río Pallina en Collana	Río	581786	8135694
RSEC_07	Río Seco - puente Mercedario	Río	582183	8172808

RSEC_01	Río Seco 01	Río	588785	8183218
RSEC_02	Río Seco 02	Río	587900	8181267
RSEC_12	Río Seco antes confluencia Khala	Río	572280	8159778
RSEC_05	Río Seco después de la planta de Puchucollo-Quiluyo	Río	584922	8176258
RSEC_13	Río Seco Río Tujsa Jahuira	Río	572068	8159753
RSEK_05	Río Seke - Después de EL Alto	Río	577775	8172671
RSEK_05	Río Seke - Después de EL Alto	Río	577775	8172671
RSEK_03	Río Seke - Después Represa Milluni	Río	588644	8188862
RSEK_02	Río Seke -Milluni Nacientes	Río	592800	8198217
RVIL_01	Río Vilaque	Río	560723	8172567
RVIL_02	Río Vilaque 02	Río	562650	8177145
MRM_6	Salida bocamina entrada principal nivel 0	Canal	590812	8194888
MRM_4	Salida Bocamina Nivel 36	Canal	590990	8195559
MRM_7	Salida canal bypass nivel 36	Canal	589956	8194122

Se registró en una base de datos la información de 8 campañas de monitoreo en avenida:

- 1° Campaña – abril 2006
- 2° Campaña – abril 2007
- 3° Campaña – marzo 2008
- 4° Campaña – abril 2008
- 5° Campaña – abril 2009
- 6° Campaña – abril 2015
- 7° Campaña – diciembre 2016
- 8° Campaña – marzo 2019

En la tabla 15 se presenta un resumen estadístico de la base de datos consolidada de la Cuenca Katari en época húmeda, donde se puede evidenciar las principales características fisicoquímicas de 139 muestras de agua colectadas en los años 2015, 2016 y 2019.

Los valores de pH presentan un rango bastante amplio desde pH ácidos hasta alcalinos comprendidos entre 2,5 y 10,0 con una mediana de 7,5. Las muestras RSEK\_07, RSEK\_03, E\_3, RSEK\_05, O\_1, RSEK\_01, RSC\_06, RSEC\_01, PAL\_1, CRM\_08, CRM\_11, MRM\_4, MRM\_6, MRM\_7, RVIL\_01 y RSEK\_01 sobrepasan el intervalo crítico de <6 pH >9 según el RMCH (figuras 90 y 91).

Tabla 15. Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos. Cuenca Katari - Avenida.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Mediana	Valor crítico RMCH
pH	10,0	2,5	7,5	< 6 y > 9
Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$	1981,0	35,0	794,0	>1600
Cloruros, mg/L	298,0	0,2	36,0	>500
Sulfatos, mg/L	1250,0	1,0	89,0	>400
Fosfatos, mg/L	20,0	0,04	1,0	>1,0
Nitratos, mg/L	60,0	0,02	2,0	>50
Calcio, mg/L	128,0	4,0	25,0	>400
Magnesio, mg/L	77,0	0,2	7,0	>150
Sodio, mg/L	611,0	1,0	21,0	>200
Aluminio, mg/L	2,0	0,01	0,4	>1,0
Arsénico, mg/L	1,0	0,001	0,02	>0,1
Cadmio, mg/L	1,8	0,0001	0,004	>1,0
Cobre, mg/L	1,0	0,01	0,1	>1,0
Hierro, mg/L	348,9	0,1	1,7	Fe (s)>1,0
Manganeso, mg/L	22,8	0,01	0,3	>1,0
Mercurio, mg/L	0,6	0,0002	0,1	>0,001
Plomo, mg/L	2,5	0,002	0,02	>0,1

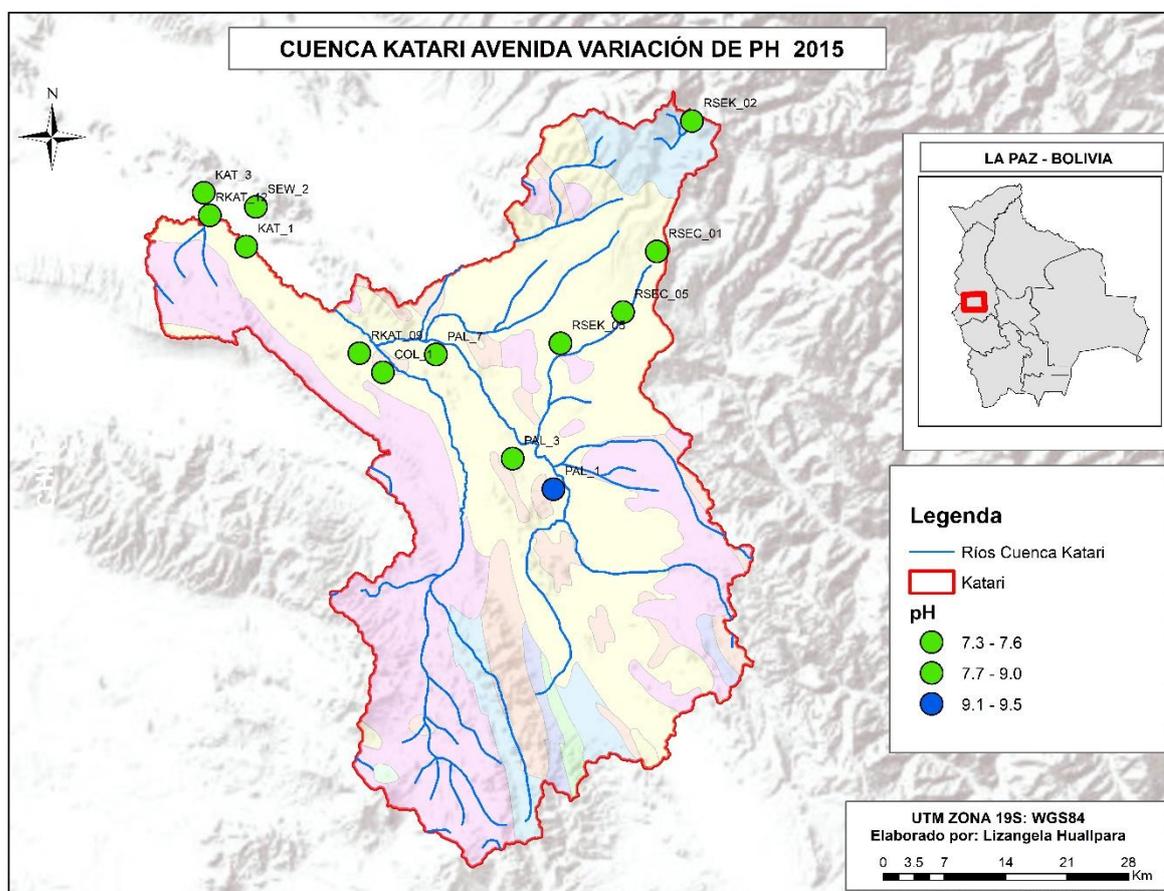


Figura 90. Mapa de variación del pH de la Cuenca Katari - Avenida, 2015.

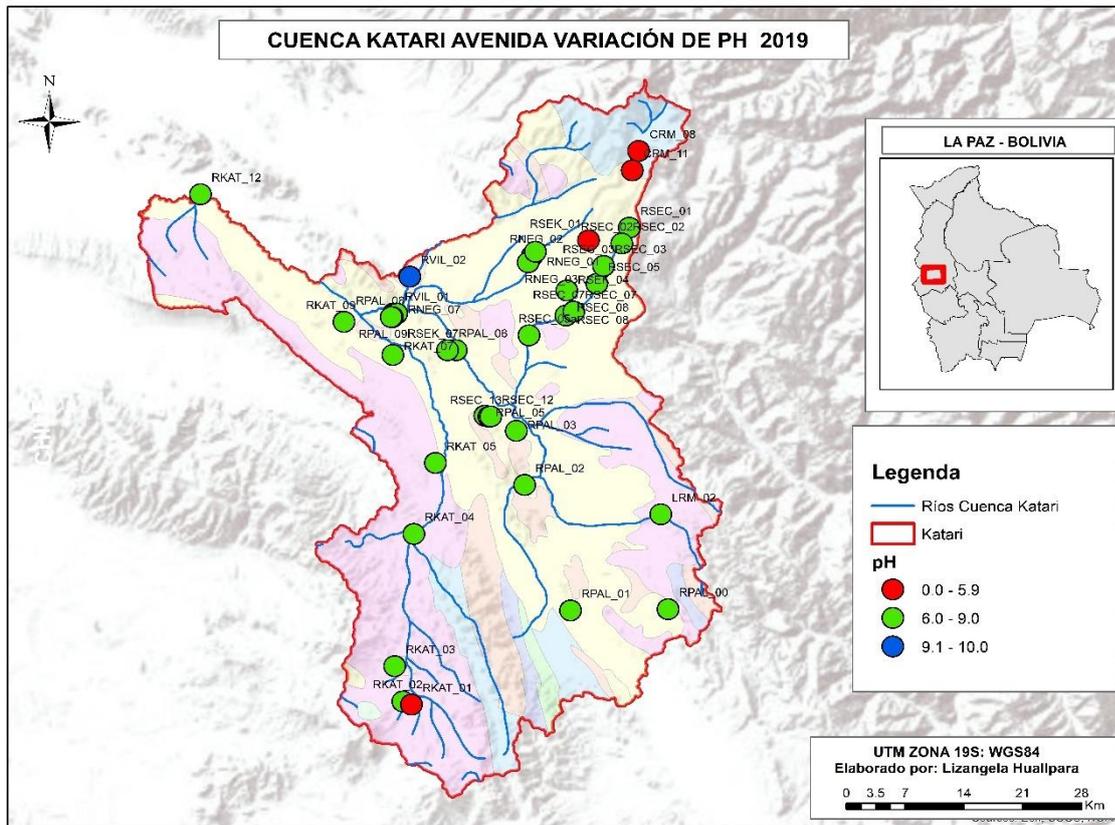


Figura 91. Mapa de variación del pH de la Cuenca Katari – Avenida, 2019.

La conductividad eléctrica varió en un rango de 198 a 794  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 35  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La variación espacio temporal de la CE de los cuerpos de agua medidos en 139 muestras en avenida corresponden al año 2015, 2016 y 2019 se muestran en las figuras 92, 93 y 94. Al año 2019 no se observa un incremento significativo (figura 92).

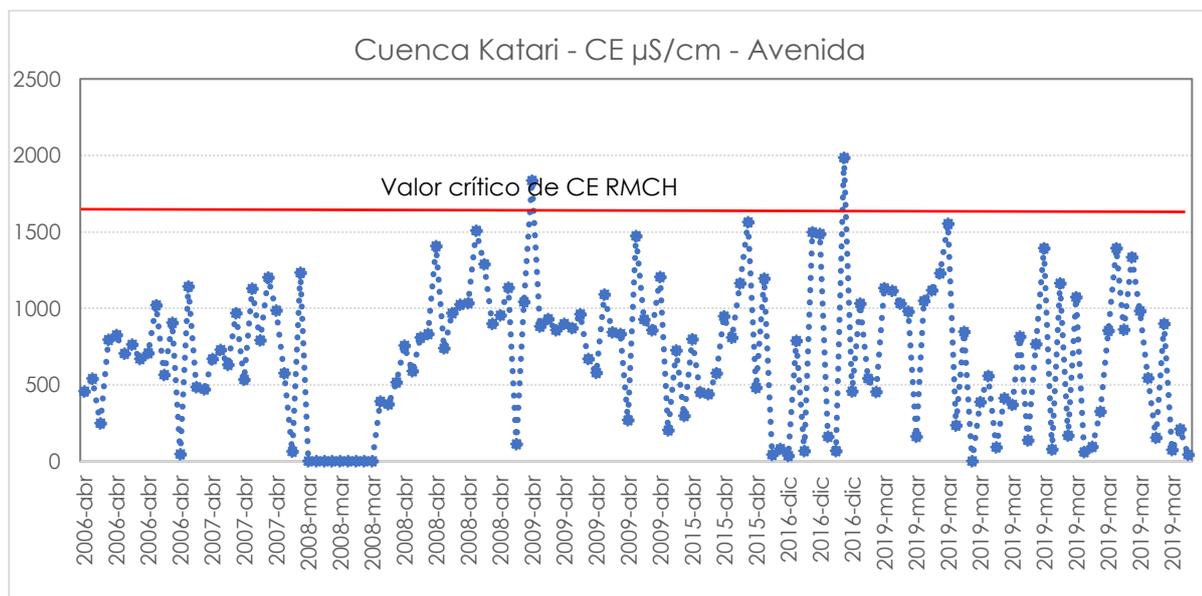


Figura 92. Gráfico de tendencias de la CE en la Cuenca Medio Katari – Avenida.

Las muestras con códigos MRM\_4 y COH\_1 que corresponden a la Salida Bocamina Nivel 36 presenta una CE de 1981  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y la otra de la Bahía de Cohana Muelle presenta una CE de 1834  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente, ambos cuerpos de agua superan el valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de CE según el RMCH.

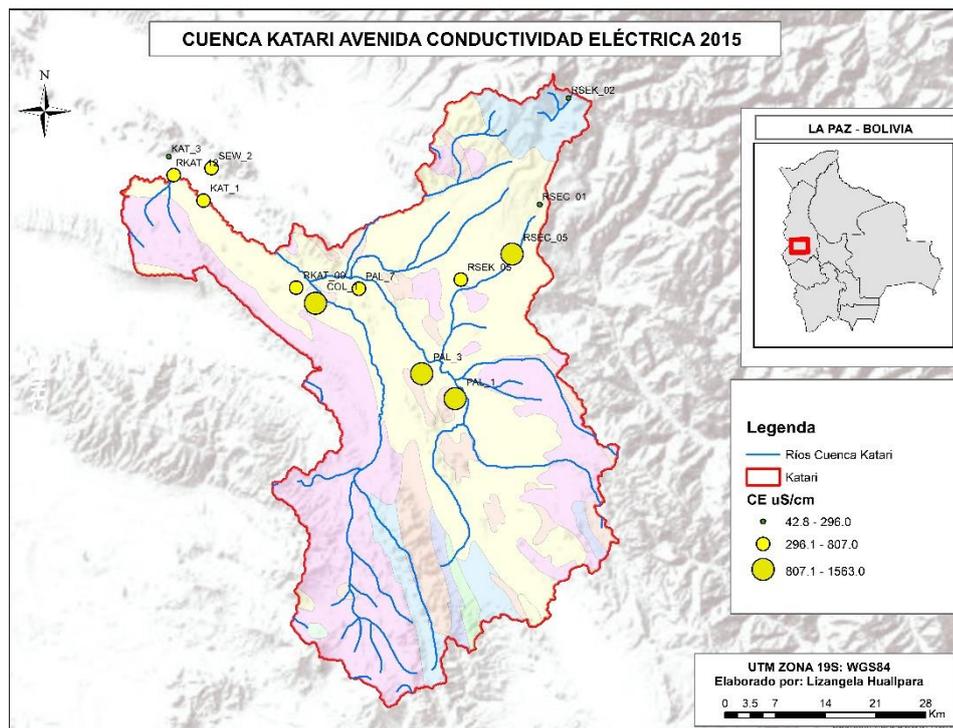


Figura 93. Mapa de variación de la CE de Cuenca Katari – Avenida, 2015.

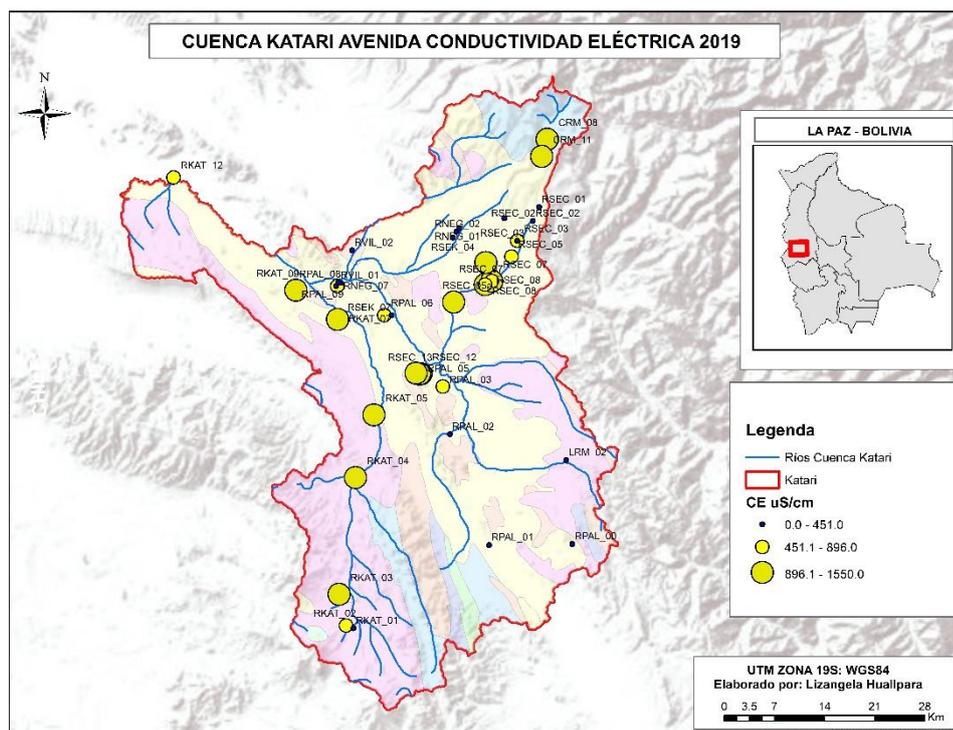


Figura 94. Mapa de variación de la CE de Cuenca Katari – Avenida, 2019.

En cuanto a los iones mayoritarios de la Cuenca Katari en avenida figuras 95 y 97, se puede observar que las concentraciones de sodio, sulfatos, fosfatos y nitratos se encuentran por encima de los valores críticos según el RMCH. Específicamente en las muestras RKAT\_12, PAL\_7, PAL\_3, RSEC\_12, RSEC\_13, PAL\_1, RSC\_06, RSEC\_05, KAT\_3, RKAT\_05, RKAT\_09, COL\_1, RPAL\_05, RPAL\_08, RPAL\_09, RKAT\_12, RVIL\_01, RPAL\_06 y RSEK\_04.

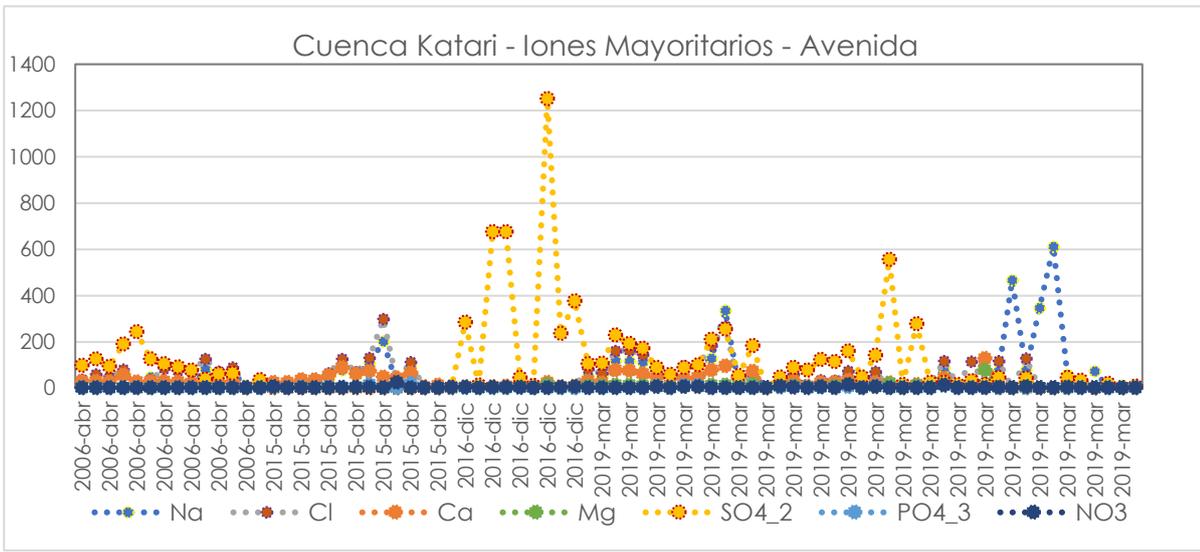


Figura 95. Gráfico de tendencias de la CE en la Cuenca Katari – Avenida.

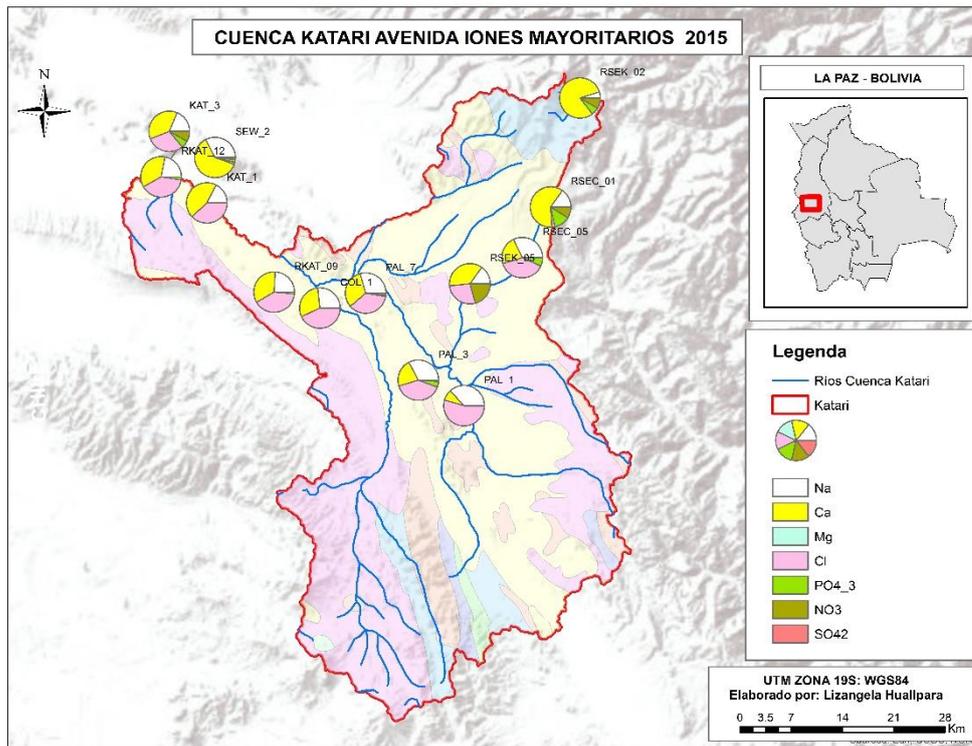


Figura 96. Mapas de variación de Iones Mayoritarios – Cuenca Katari – Avenida, 2015.

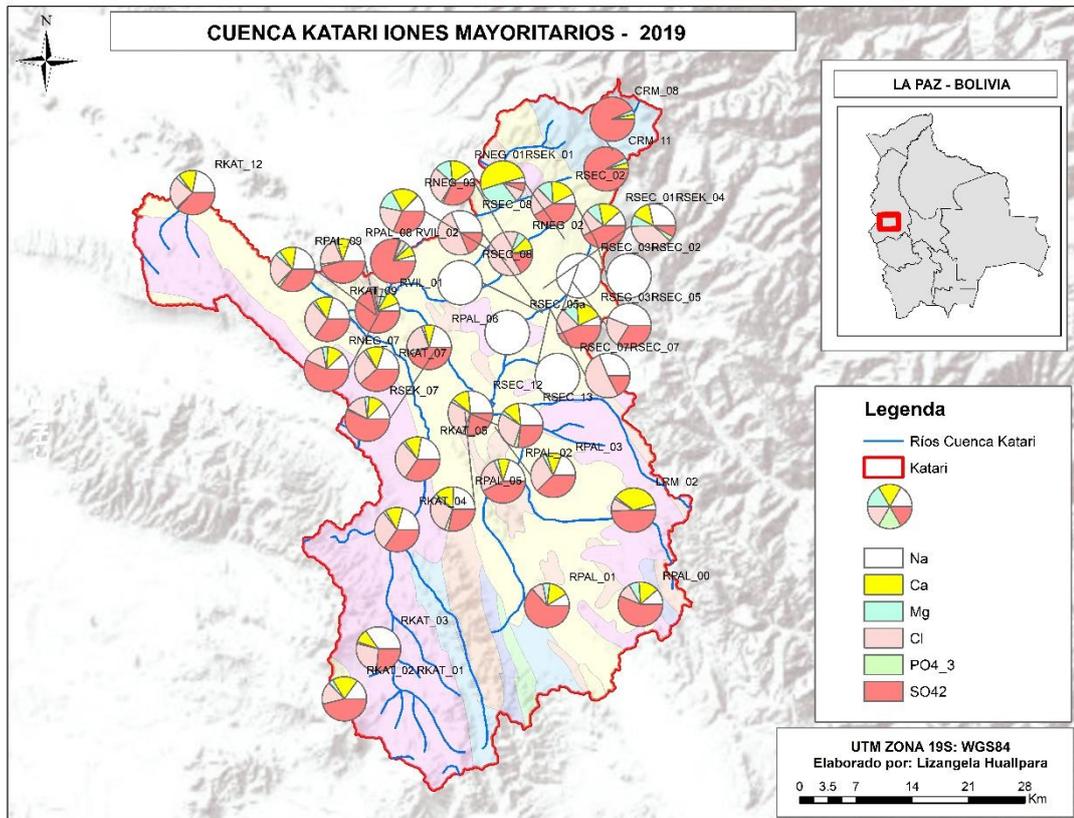


Figura 97. Mapas de variación de Iones Mayoritarios – Cuenca Katari – Avenida, 2019.

Los constituyentes metálicos inorgánicos como: Al, B, As, Cu, Cd, Fe, Mn, Hg y Pb de la Cuenca Katari en avenida figuras 98, 99 y 100, presentan concentraciones que superan los valores críticos según el RMCH, tendencia que se repite en los años 2015, 2016 y 2019.

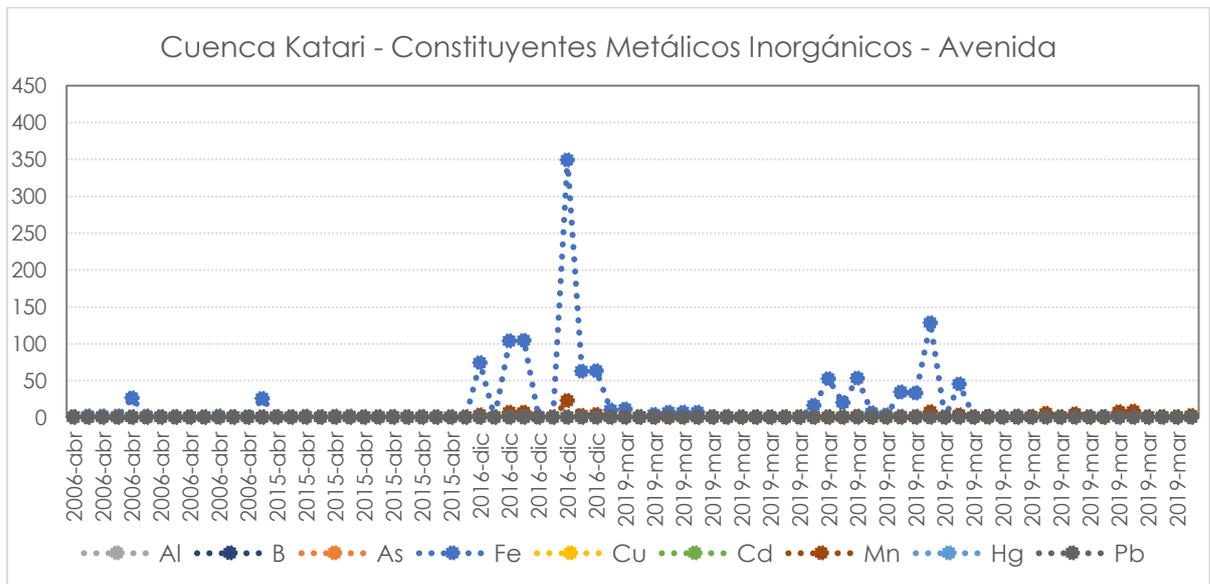


Figura 98. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos - Cuenca Katari – Avenida.

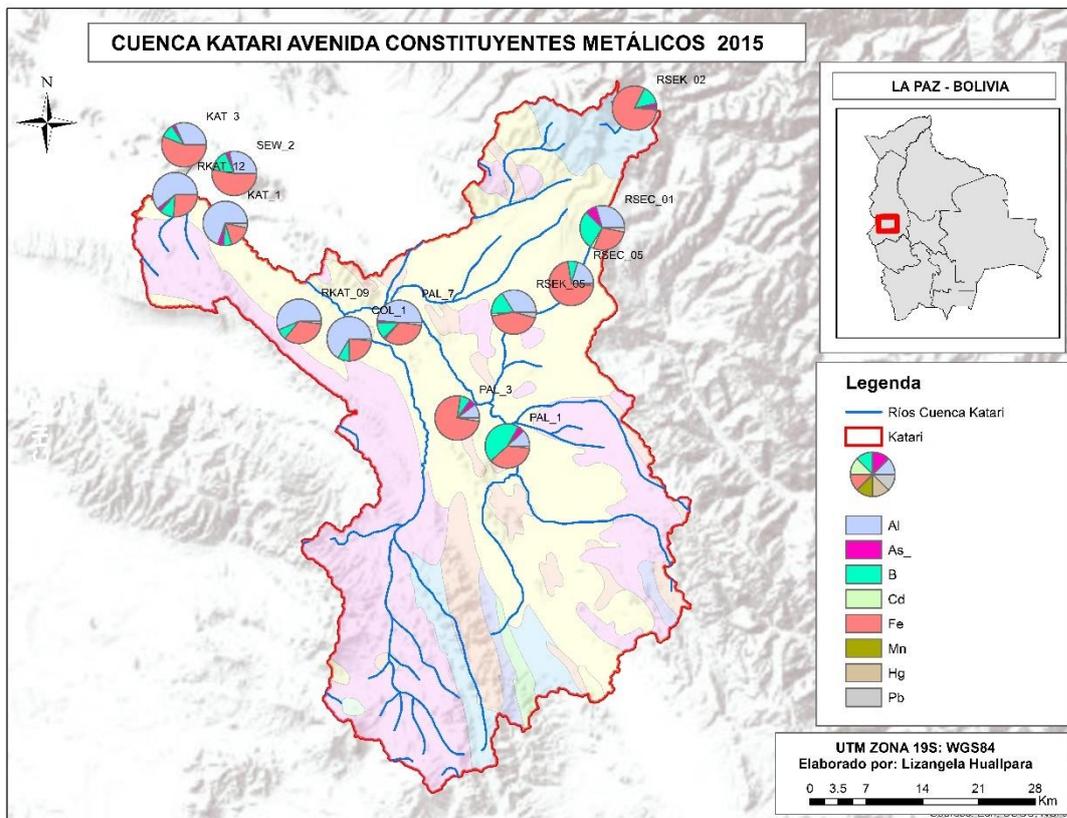


Figura 99. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos - Cuenca Katari – Avenida, 2015.

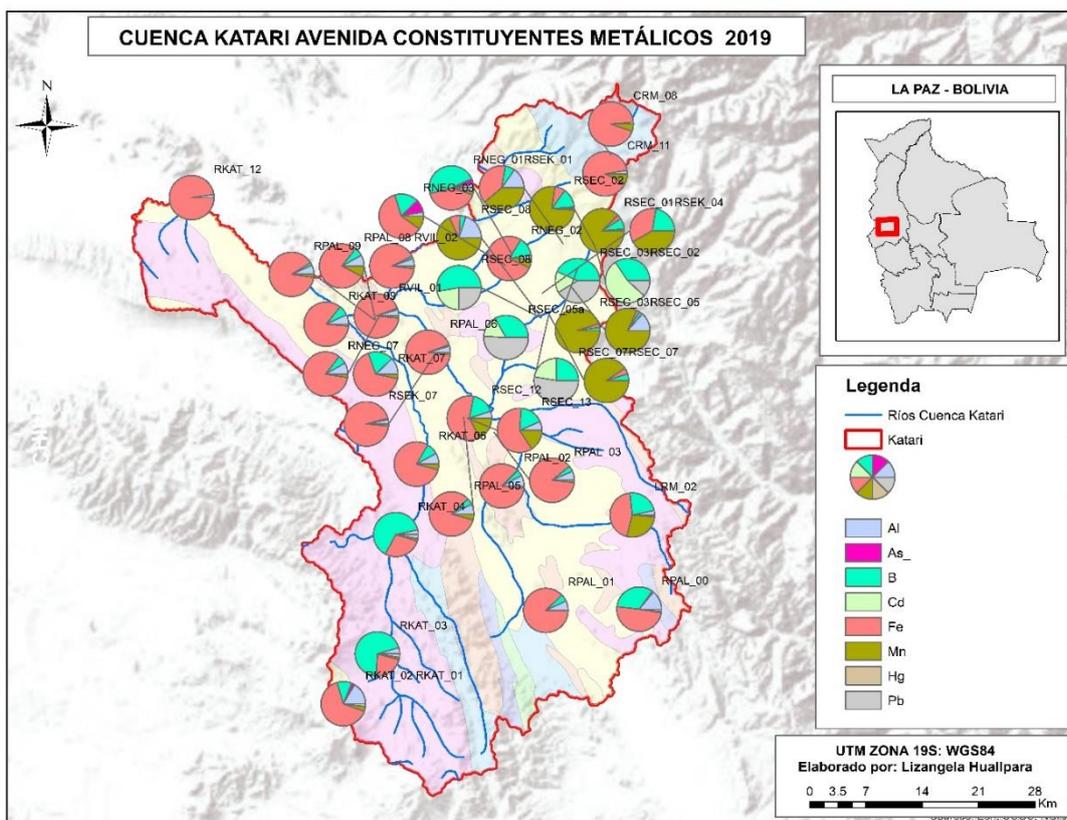


Figura 100. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos - Cuenca Katari – Avenida, 2019.

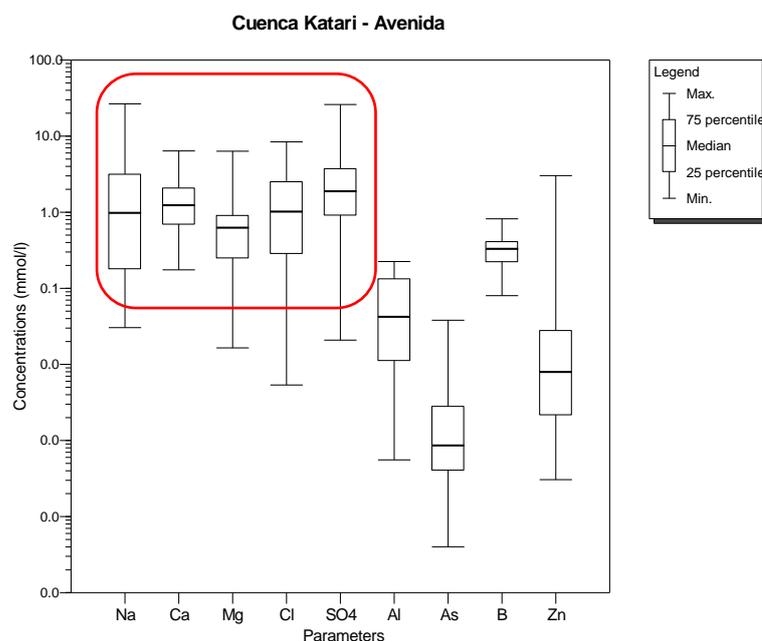


Figura 101. Gráfico estadístico de Composición del agua– Cuenca Katari-Avenida.

El gráfico estadístico de componentes mayoritarios, figura 101, muestra que el tipo de agua característica de la Cuenca Katari en avenida es del tipo **Na-Ca-Mg-Cl-SO<sub>4</sub>** ya que son los componentes mayoritarios que caracterizan las muestras colectadas en avenida, sin embargo, también se puede observar que los constituyentes metálicos inorgánicos específicamente los componentes traza: Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Hg y Pb, presentan valores que se encuentran sobre el valor crítico según el RMCH. Estudios anteriores demuestran concentraciones preocupantes de Cd, Cr y Sb, incluyendo los elementos traza mencionados anteriormente están relacionados con las descargas mineras, orgánicas e industriales que se originan en las ciudades del El Alto, Viacha y otras poblaciones que se desarrollan aceleradamente en esta región ((PNUMA), 2011).

## 2.6.2. CUENCA KATARI – ESTIAJE

Tabla 16. Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos. Cuenca Katari – Estiaje.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Mediana	Valor crítico RMCH
pH	10,7	2,7	8,1	< 6 y > 9
Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$	7115,0	14,0	984,0	>1600
Cloruros, mg/L	1940,0	1,0	112,0	>500
Sulfatos, mg/L	1372,0	0,0	106,0	>400
Fosfatos, mg/L	51,0	0,04	1,0	>1,0
Nitratos, mg/L	169,0	0,02	2,0	>50
Calcio, mg/L	500,0	3,0	50,0	>400
Magnesio, mg/L	192,0	0,3	17,0	>150
Sodio, mg/L	1076,0	1,0	101,1	>200
Aluminio, mg/L	24,9	0,001	0,1	>1,0
Arsénico, mg/L	4,9	0,001	0,01	>0,1
Boro, mg/L	4,1	0,04	0,4	>1,0
Cadmio, mg/L	1,7	0,001	0,01	>1,0
Cobre, mg/L	4,8	0,002	0,01	>1,0
Hierro, mg/L	425,8	0,01	0,9	Fe (s) >1,0
Manganeso, mg/L	31,0	0,002	0,3	>1,0
Mercurio, mg/L	0,9	0,0002	0,0003	>0,001
Plomo, mg/L	1,2	0,001	0,03	>0,1
Zinc, mg/L	166,8	0,001	0,1	>5,0

En la Tabla 16 se presenta un resumen estadístico de la base de datos consolidada de la Cuenca Katari en época seca, donde se puede evidenciar las principales características fisicoquímicas de 305 muestras de agua de diferentes campañas de muestreo en los años 2007, 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019.

Se registró en una base de datos la información de 13 campañas de monitoreo en estiaje:

- 1° Campaña – noviembre 2007
- 2° Campaña – junio 2011
- 3° Campaña – noviembre 2011
- 4° Campaña – septiembre 2014
- 5° Campaña – octubre 2014
- 6° Campaña – noviembre 2015
- 7° Campaña – mayo 2016

- 8° Campaña – noviembre 2016
- 9° Campaña – junio 2017
- 10° Campaña – octubre 2017
- 11° Campaña – mayo 2018
- 12° Campaña – noviembre 2018
- 13° Campaña – octubre 2019

En las figuras 102 y 103 se puede observar que los valores de pH varían en un amplio rango desde ácidos hasta alcalinos comprendidos entre 2,7 y 10,7 con una mediana de 8,1. Las muestras KAT\_3, KAT\_1, RSEK\_07, RSEC\_01, RSEK\_03, COH\_4, RKAT\_12, PAL\_1, RSEK\_01, RSEK\_03, HUA\_1, SEW\_2, RSEC\_05, RN\_04, RSEC\_02, CRM\_11, CRM\_08, RPAL\_02, RNEG\_02, RNEG\_07, RVIL\_01 y LRM\_02 superan el intervalo crítico de <6 pH >9.

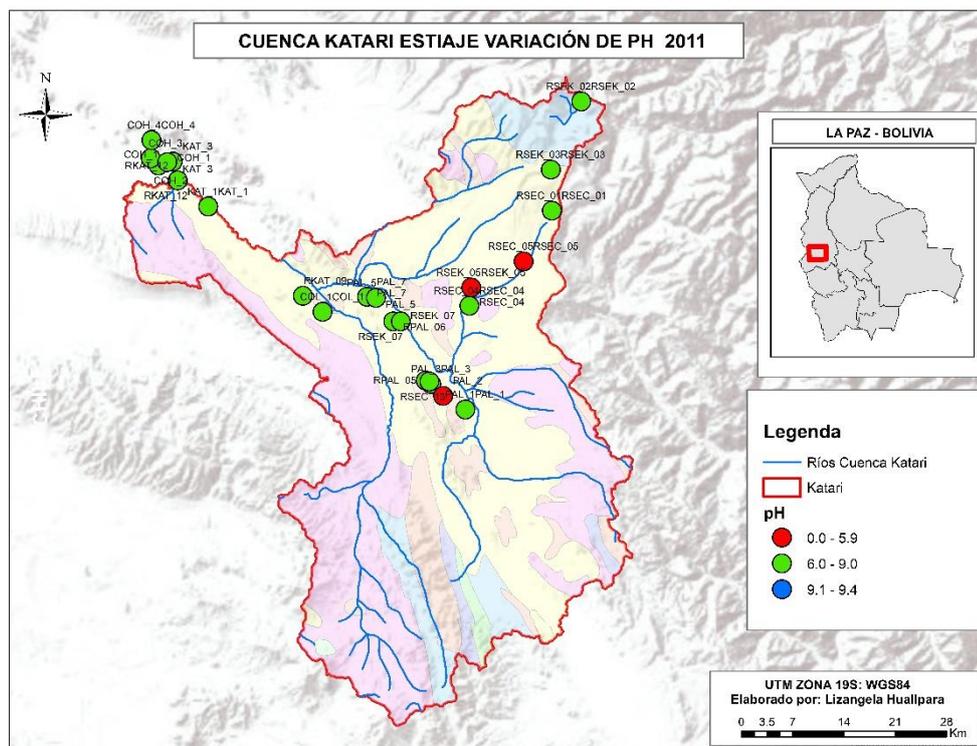


Figura 102. Mapa de variación del pH de la Cuenca Katari – Estiaje, 2011.

La variación espacio temporal de la CE de los cuerpos de agua medidos en 301 muestras medidos en estiaje corresponden a los años 2007, 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019. La conductividad eléctrica varía desde los 14 hasta los 7115  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 984  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , las muestras

COL\_01, RSEC\_04, RSC\_06, RSEK\_07, RSEC\_13, COH\_4, RSEC\_05, RSEC\_03, RSEC\_08, SK\_05, CRM\_08, RKAT\_03, RKAT\_02 y RSEC\_12 superan el valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  según El RMCH (figuras 104, 105 y 106).

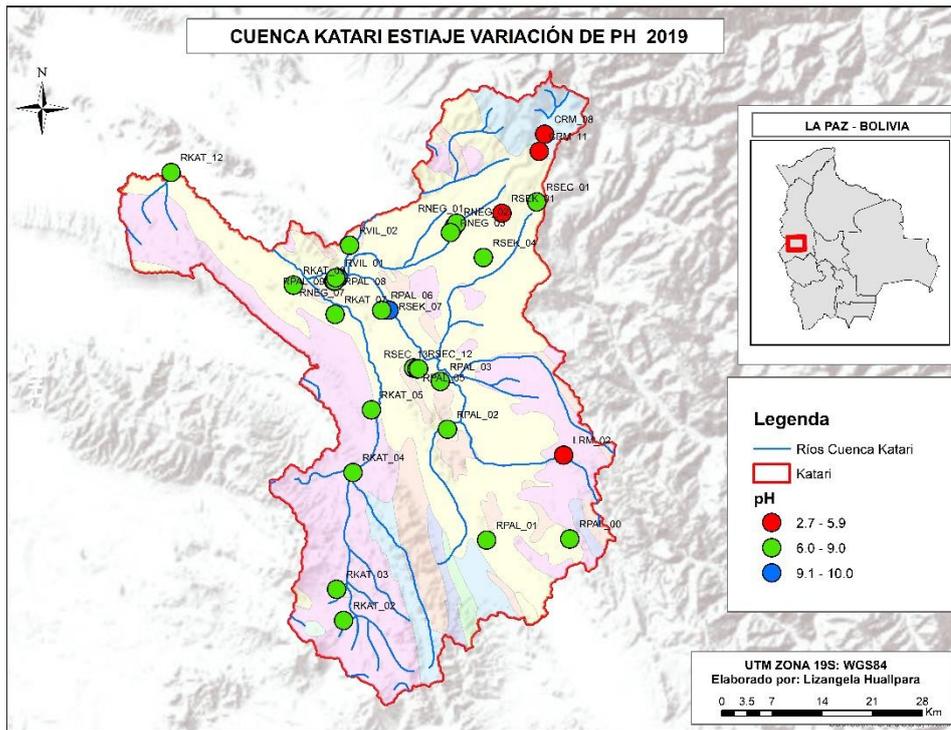


Figura 103. Mapa de variación del pH de la Cuenca Katari – Estiaje, 2019.

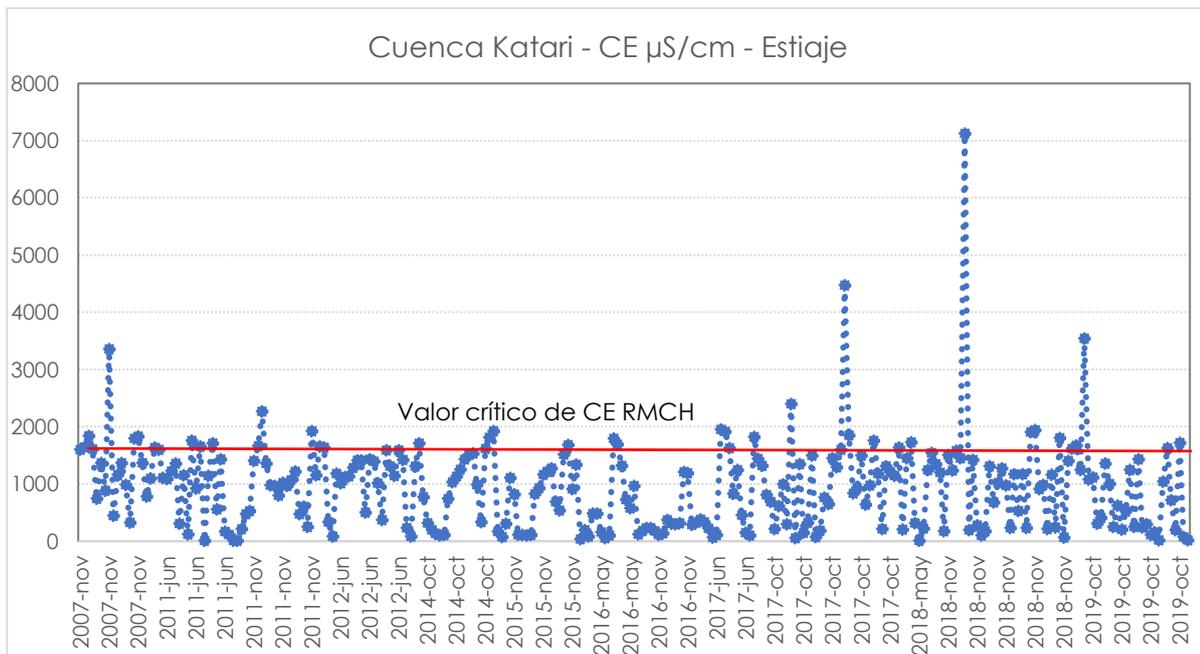


Figura 104. Gráfico de tendencias de la CE en la Cuenca Medio Katari – Estiaje.

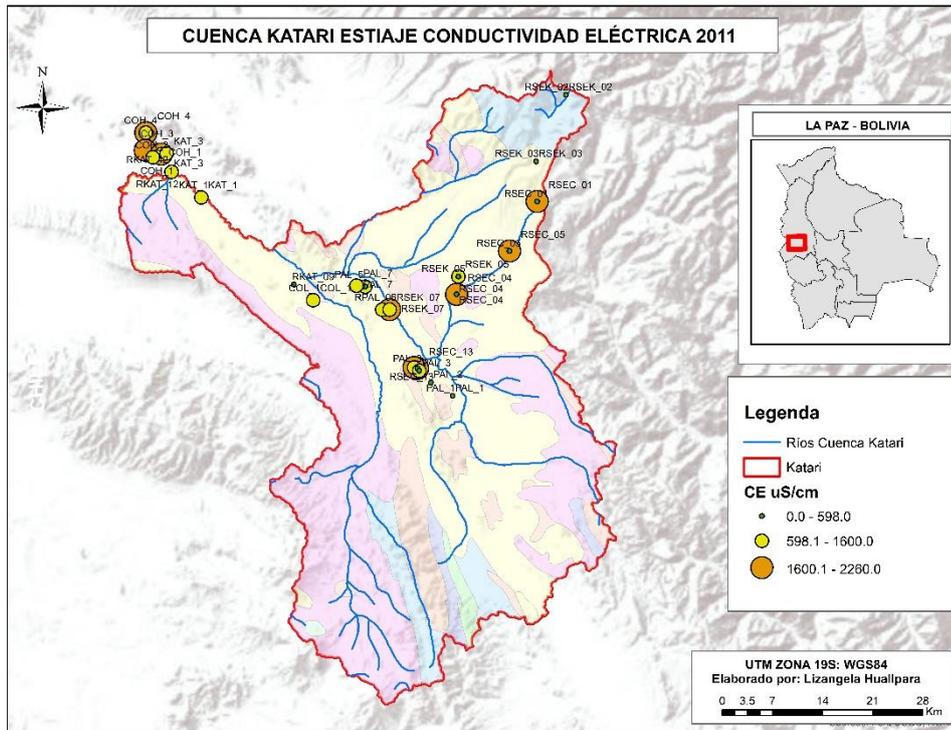


Figura 105. Mapa de variación de la CE de Cuenca Katari – Estiaje, 2011.

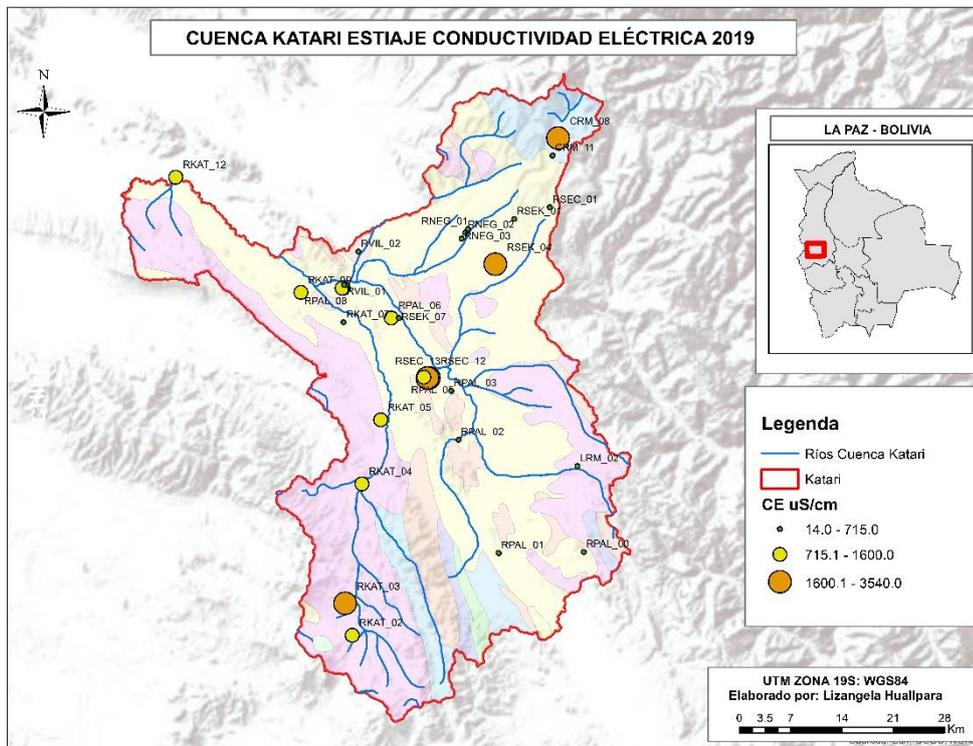


Figura 106. Mapa de variación de la CE de Cuenca Katari – Estiaje, 2019.

En cuanto a los iones mayoritarios de la Cuenca Katari en estiaje figuras 107, 108 y 109, se pueden observar que las concentraciones de sodio, sulfatos, fosfatos, nitratos, calcio y magnesio se encuentran por encima de los valores críticos según el RMCH. Específicamente en las muestras RPAL\_03, RPAL\_05,

RSEC\_01, RSEC\_03, RSEC\_04, PAL\_5, RSEC\_13, RPAL\_06, RPAL\_08, COH\_1, PAL\_1, PAL\_3, PAL\_7, RSEC\_04, RSEC\_05, KAT\_1, KAT\_3, RKAT\_09, SEW\_1, SEW\_2, CAL\_1, RKAT\_12, CRM\_08, CRM\_11 y LRM\_02.

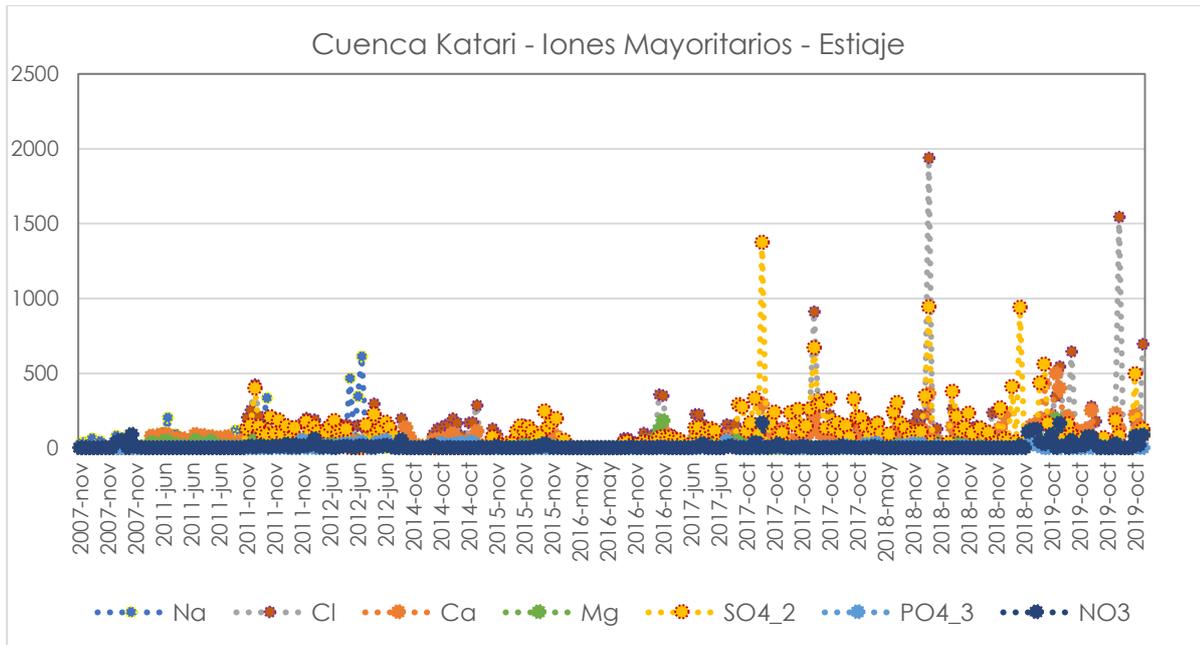


Figura 107. Gráfico de tendencias de Iones Mayoritarios - Cuenca Katari – Estiaje.

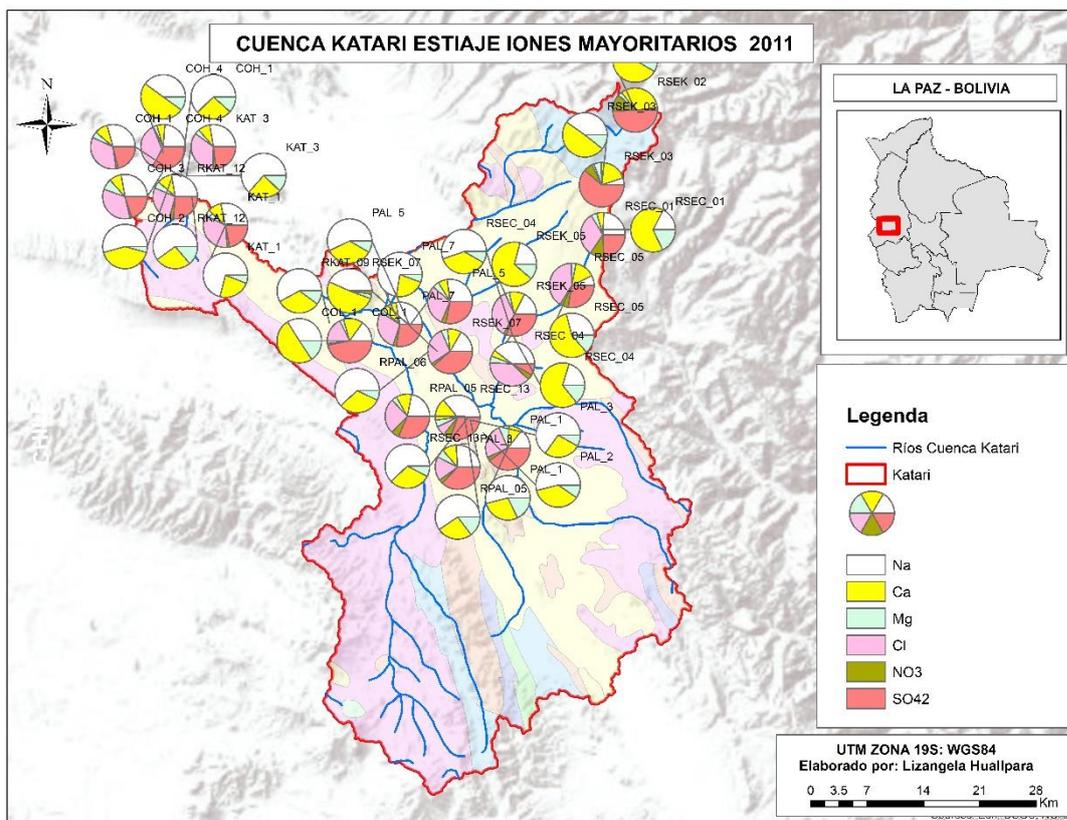


Figura 108. Mapa de variación de Iones Mayoritarios - Cuenca Katari – Estiaje, 2011.

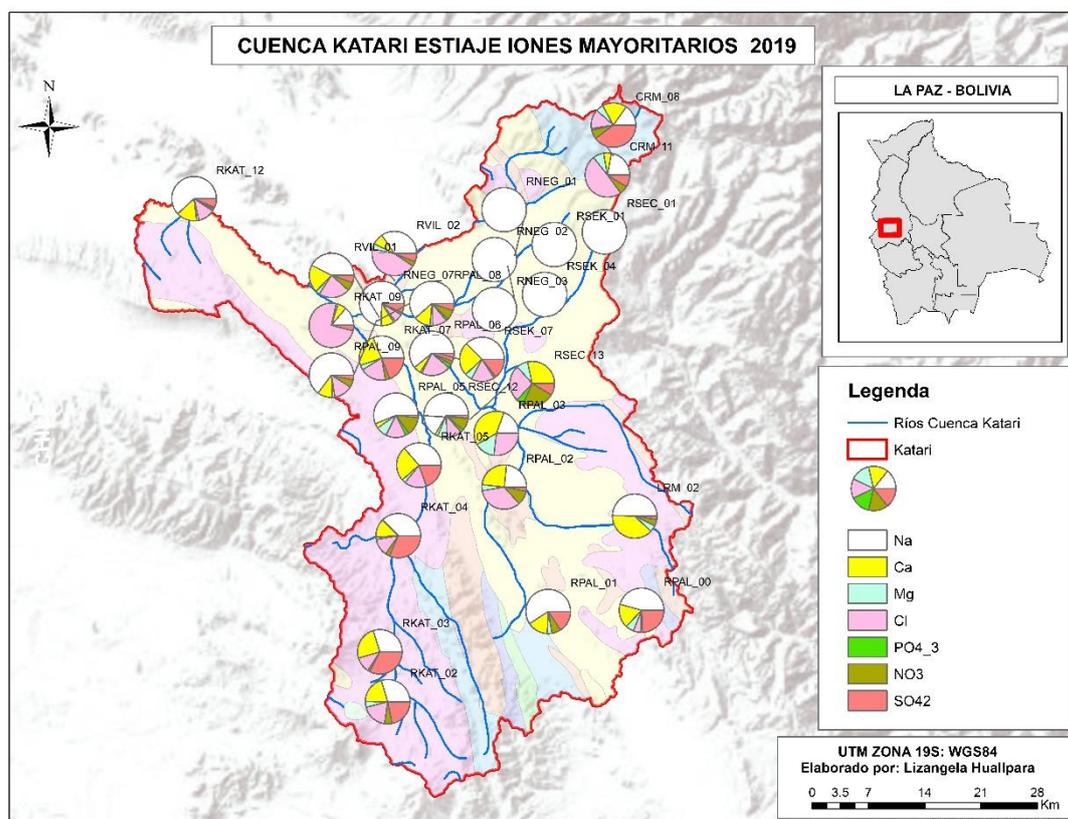


Figura 109. Mapa de variación de Iones Mayoritarios - Cuenca Katari – Estiaje, 2019.

Los constituyentes metálicos inorgánicos específicamente los componentes de: Al, As, B, Cd, Cu, Fe, Mn, Hg, Pb y Zn, presentan valores que se encuentran sobre los valores críticos según el RMCH. Tendencia que se repite en los años 2011, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019 (figuras 110, 111 y 112).

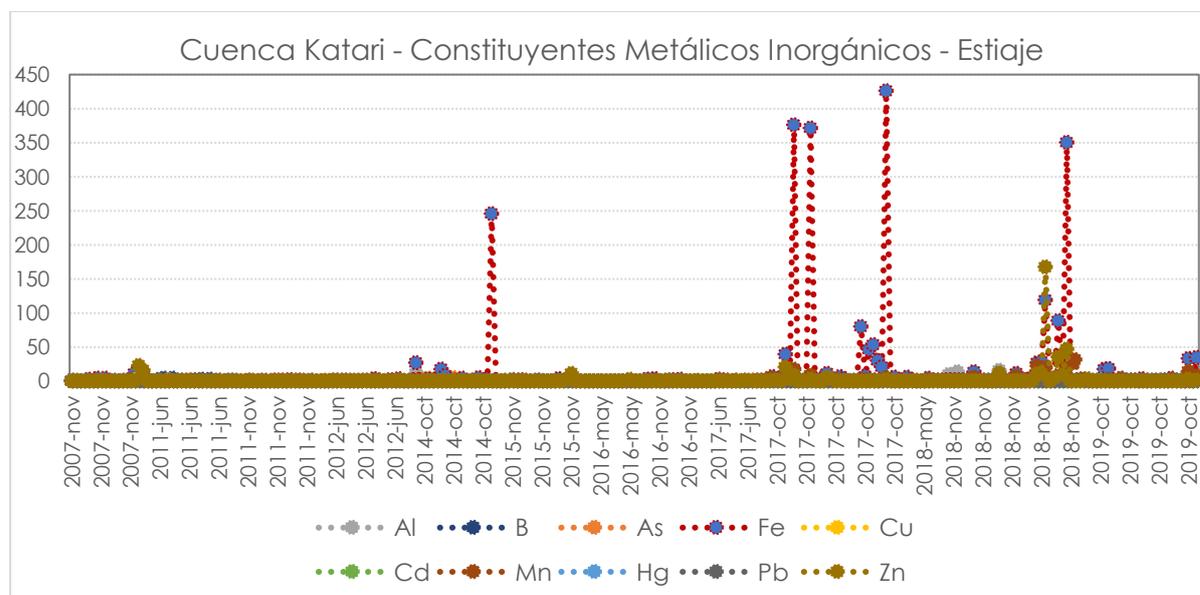


Figura 110. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos - Cuenca Katari – Estiaje.

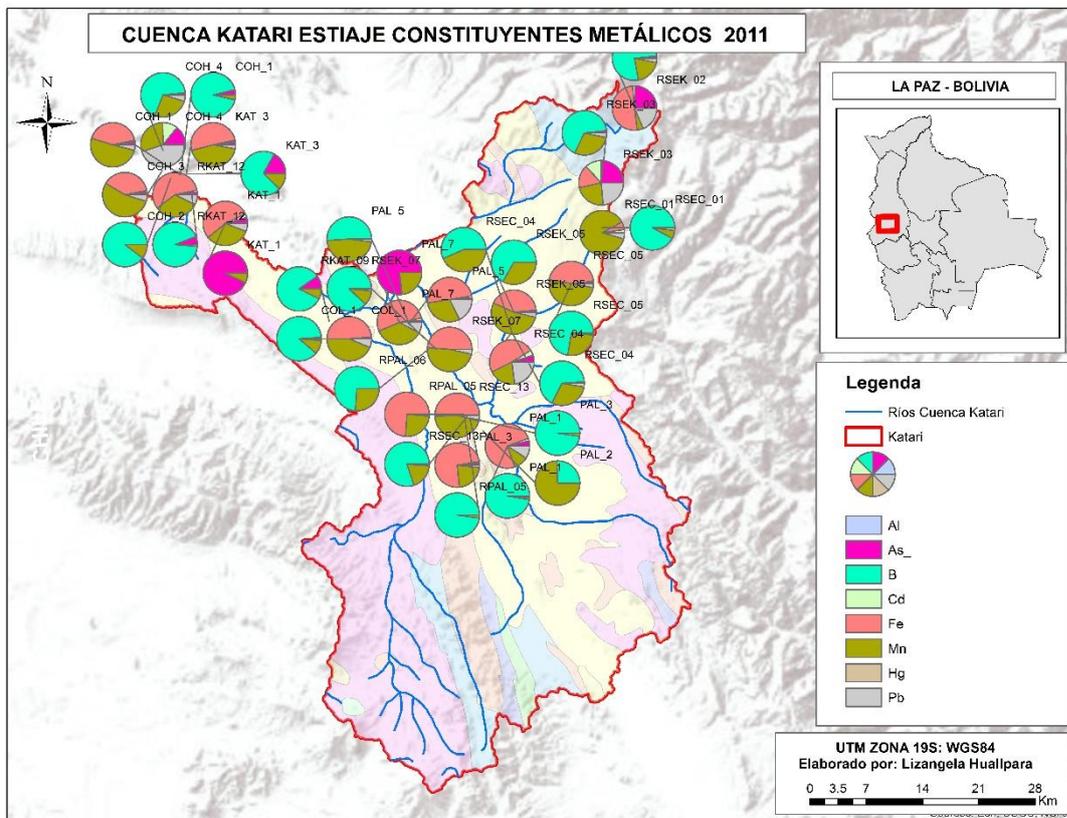


Figura 111. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos—Cuenca Katari – Estiaje, 2011.

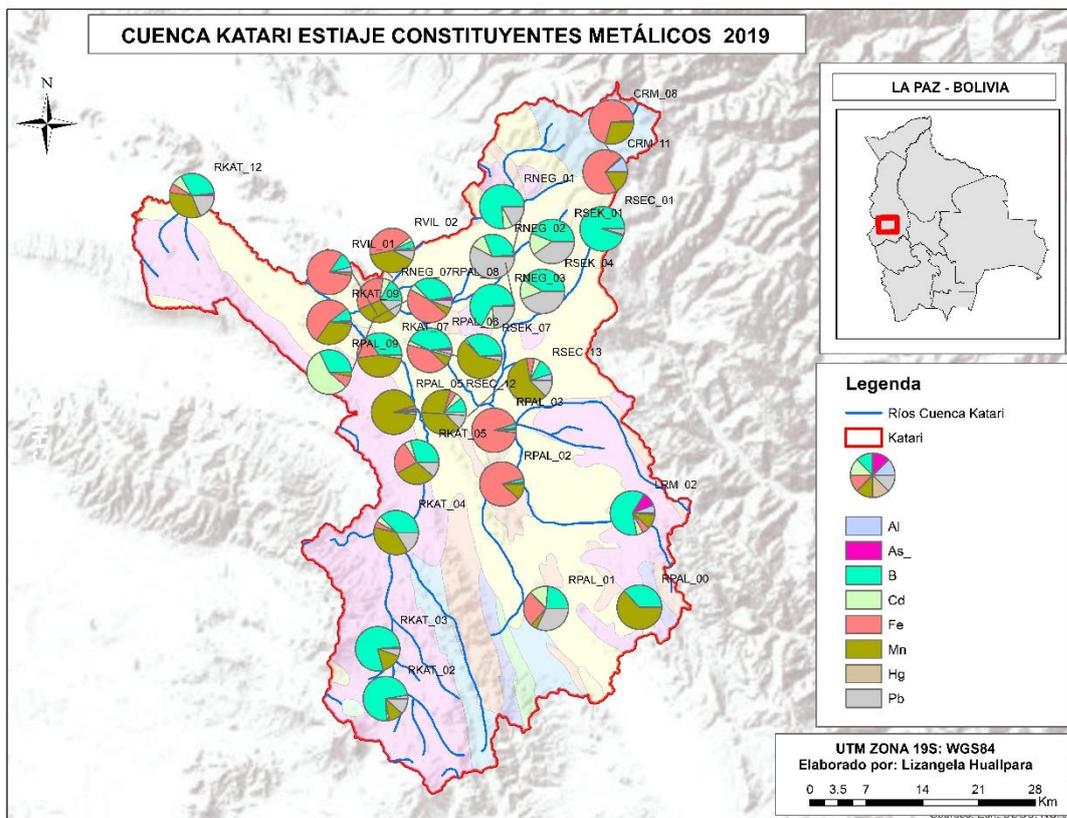


Figura 112. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos—Cuenca Katari – Estiaje, 2019.

El gráfico estadístico de componentes mayoritarios figura 113, muestra que el tipo de agua característica de la Cuenca Katari en estiaje es del tipo **Na-Ca-Mg-Cl-SO<sub>4</sub>** ya que son los componentes mayoritarios que caracterizan las muestras colectadas.

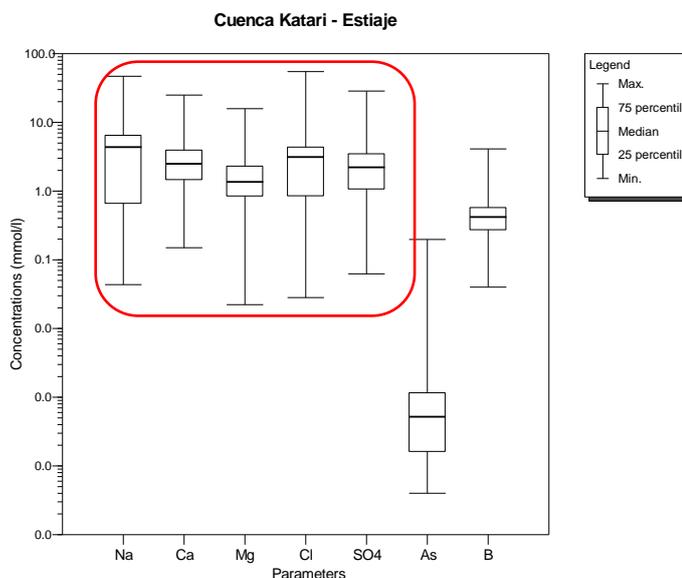


Figura 113. Gráfico estadístico de Composición del agua- Cuenca Katari-Estiaje.

En la figura 113 se puede observar que también existen elevadas concentraciones de As y B en la Cuenca Katari en estiaje.

La concentración de los componentes mayoritarios en la Cuenca Katari se incrementa en época seca esto debido a que el volumen de agua disminuye y se concentran las especies químicas dentro de la misma, se hace evidente en el resumen estadístico de ambas épocas.

Los constituyentes metálicos inorgánicos específicamente los componentes traza: Al, As, B, Cd, Cu, Fe, Mn, Hg, Pb y Zn, presentan valores que se encuentran sobre los valores críticos según el RMCH. Estudios anteriores reportan que las fuentes de contaminación son, la actividad minera de Milluni envía aguas ácidas hacia la cuenca Katari y a estas se suman las aguas residuales de la aglomeración urbana de El Alto. Además, el río Katari, aguas abajo, recibe nuevos aportes orgánicos provenientes de la actividad agropecuaria que se desarrolla en los municipios de Viacha, Laja y Pucarani, hasta llegar finalmente a la bahía de Cohana (H., 2021).

## 2.7. LAGO TITICACA

El Lago Titicaca está ubicada en el departamento de La Paz es el segundo lago más grande de Sudamérica y se comparte Bolivia y Perú. En la figura 114 se puede observar la delimitación geográfica del Lago Titicaca lado boliviano y la red de puntos de Monitoreo de calidad del agua,

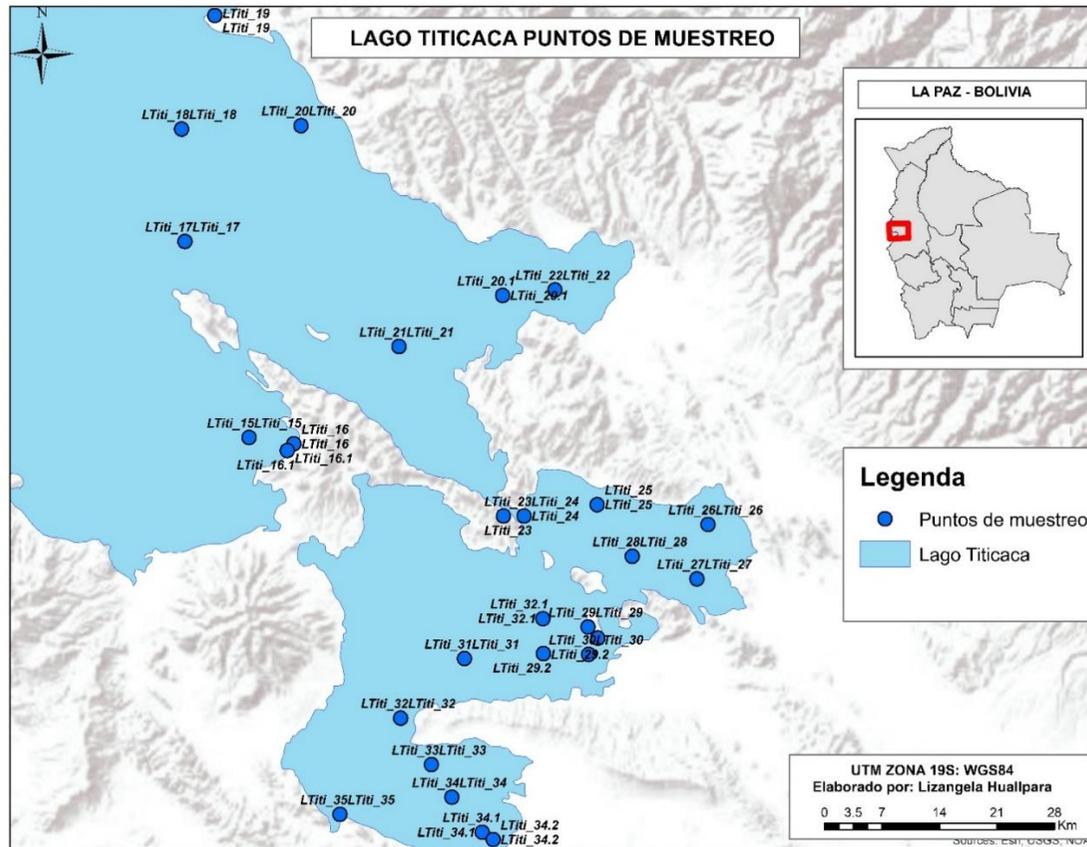


Figura 114. Lago Titicaca – Puntos de Muestreo – Bolivia

## 2.7.1. LAGO TITICACA – AVENIDA

Se consideró 45 estaciones de monitoreo sobre en Lago Titicaca (Tabla 17).

Tabla 17.. Estaciones de monitoreo – Lago Titicaca (Bolivia)

Código	Punto de Muestreo	Cuerpo de agua	X	Y
LTiti_11	-	Lago	463452	8273404
LTiti_15	Bahía de Copacabana	Lago	485255	8214523
LTiti_16	Bahía de Cohana II	Lago	490716	8213763
LTiti_16.1	Bahía de Copacabana frente a hoteles	Lago	489913	8212943
LTiti_17	Bahía de Copacabana	Lago	477441	8238192
LTiti_17.1	Entre la Isla del sol y copacabana	Lago	477441	8238192
LTiti_18	Centro entre Isla del Sol y Escoma	Lago	477030	8251762
LTiti_19	Desembocadura del río Suchez	Lago	481085	8265470
LTiti_20	Lagomayor frente a Carabuco	Lago	491586	8252173
LTiti_20.1	Frente Ancoraimes	Lago	516127	8231667
LTiti_21	Al sur oeste de la Isla de la Luna	Lago	503515	8225496
LTiti_22	Frente a bahía de Achacachi	Lago	522521	8232333
LTiti_23	Santiago de Huata	Lago	516233	8205039
LTiti_24	Salida estrecho de Tiquina	Lago	518739	8205039
LTiti_25	Bahía de Chua	Lago	527646	8206407
LTiti_26	Bahía de Huarina	Lago	541147	8204018
LTiti_27	Frente a Puerto Perez	Lago	539797	8197450
LTiti_28	Este de Suriqui	Lago	531922	8200171
LTiti_29	Bahía Tiraska	Lago	526535	8191642
LTiti_29.1	Bahía de Cohana II	Lago	527740	8190305
LTiti_29.2	Bahía de Cohana II	Lago	521106	8188431
LTiti_30	Norte de Taraco	Lago	526596	8188330
LTiti_31	Limite p/b del noreste de Taraco	Lago	511484	8187823
LTiti_32	Bahía de Cohana II	Lago	503712	8180630
LTiti_32.1	Frente a bahía de Cohana por Anapia	Lago	521041	8192634
LTiti_33	Intervalo entre Santa Rosa y Guaqui	Lago	507468	8175020
LTiti_34	Frente bahía de Guaqui	Lago	509953	8171090
LTiti_34.1	Guaqui	Lago	513648	8166856
LTiti_35	Bahía Desaguadero	Lago	496323	8169015
LTiti_36	-	Lago	516113	8206331
LTiti_37	-	Lago	522497	8205575
LTiti_38	-	Lago	528529	8204715
LTiti_39	-	Lago	534950	8203672
LTiti_40	-	Lago	540748	8202974
LTiti_42	-	Lago	521812	8200814
LTiti_43	-	Lago	527587	8200704
LTiti_44	-	Lago	534141	8199747
LTiti_45	-	Lago	540212	8198950
LTiti_45a	-	Lago	539238	8194658
LTiti_45b	-	Lago	529538	8190447
LTiti_45c	-	Lago	529889	8188764
LTiti_49	-	Lago	526452	8191538

LTiti_51	-	Lago	511496	8188465
LTiti_52	-	Lago	523616	8188049
LTiti_57	-	Lago	505299	8169034

Se registró en una base de datos la información de 3 campañas de monitoreo en avenida:

- o 1° Campaña – marzo 2014
- o 2° Campaña – abril 2016
- o 3° Campaña – abril 2019

En la tabla 18 se presenta un resumen estadístico de la base de datos consolidada del Lago Titicaca en época húmeda, donde se puede evidenciar las principales características fisicoquímicas de 88 muestras de agua de diferentes campañas de muestreo en los años 2014, 2016 y 2019.

*Tabla 18. Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos. Lago Titicaca - Avenida.*

Parámetro	Máximo	Mínimo	Mediana	Valor crítico RMCH
pH	10,0	7,0	9,0	< 6 y > 9
Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$	1955,0	249,0	1507,0	>1600
Cloruros, mg/L	326,0	28,0	247,0	>500
Sulfatos, mg/L	441,0	42,0	274,0	>400
Fosfatos, mg/L	1,0	0,04	0,1	>1,0
Nitratos, mg/L	4,0	0,04	0,3	>50
Calcio, mg/L	62,0	17,0	58,0	>400
Magnesio, mg/L	54,0	10,0	34,0	>150
Sodio, mg/L	326,0	17,0	183,0	>200
Boro, mg/L	1,9	0,06	1,2	>1,0
Hierro, mg/L	4,0	0,01	0,1	Fe (s)>1,0
Mercurio, mg/L	0,3	0,0001	0,0003	>0,001

La variación espacio temporal de la CE de los cuerpos de agua medidos en 84 muestras en avenida corresponden a los años 2014, 2016 y 2019 (figuras 115, 116 y 117), la conductividad eléctrica varía desde los 249 hasta los 1955  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 1507  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , las muestras LTiti\_31, LTiti\_32, LTiti\_33, LTiti\_34, LTiti\_35, LTiti\_34.1, LTiti\_37, LTiti\_38, LTiti\_39, LTiti\_40, LTiti\_42, LTiti\_51 y LTiti\_57 superan el valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  según El RMCH.

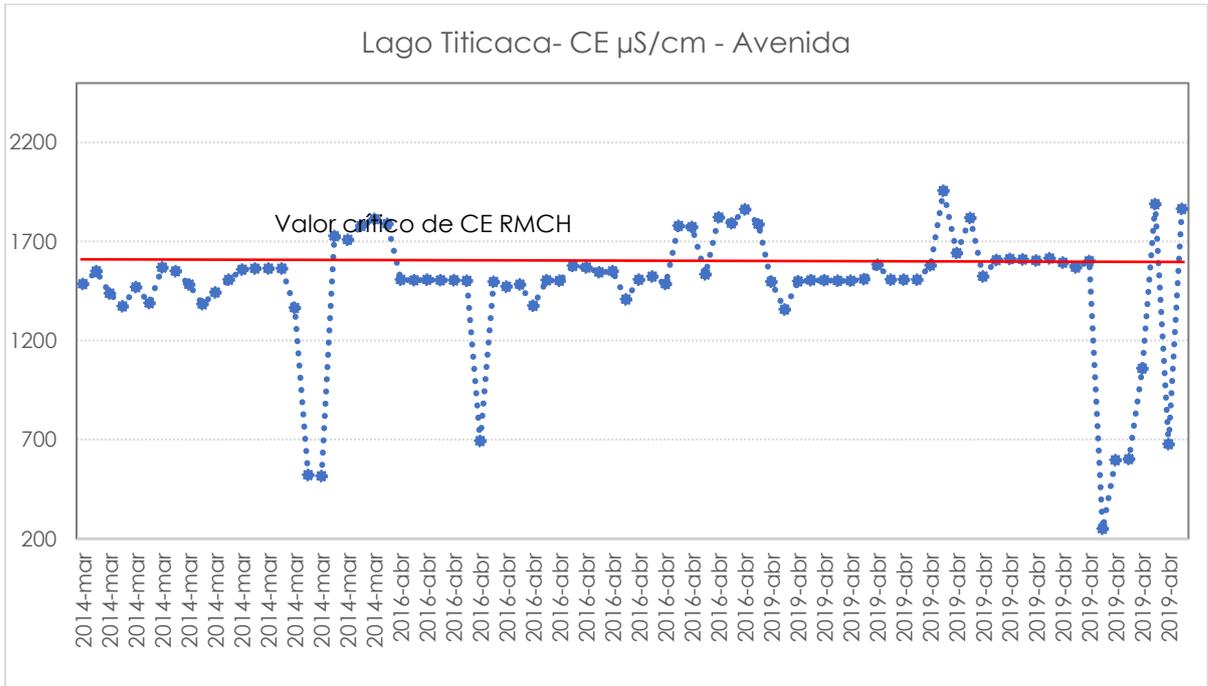


Figura 115. Gráfico de tendencias de la CE- Lago Titicaca – Avenida.

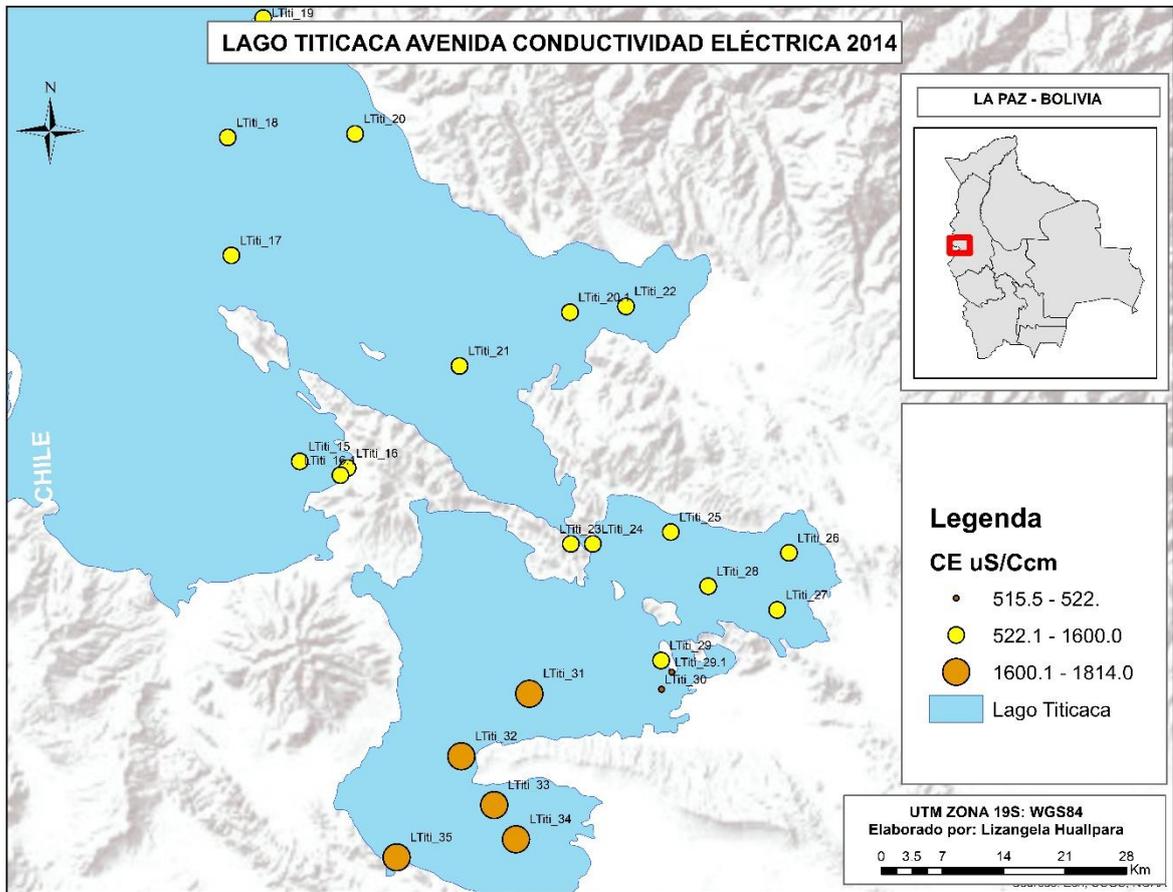


Figura 116. Mapa de variación de la CE del Lago Titicaca – Avenida, 2014.

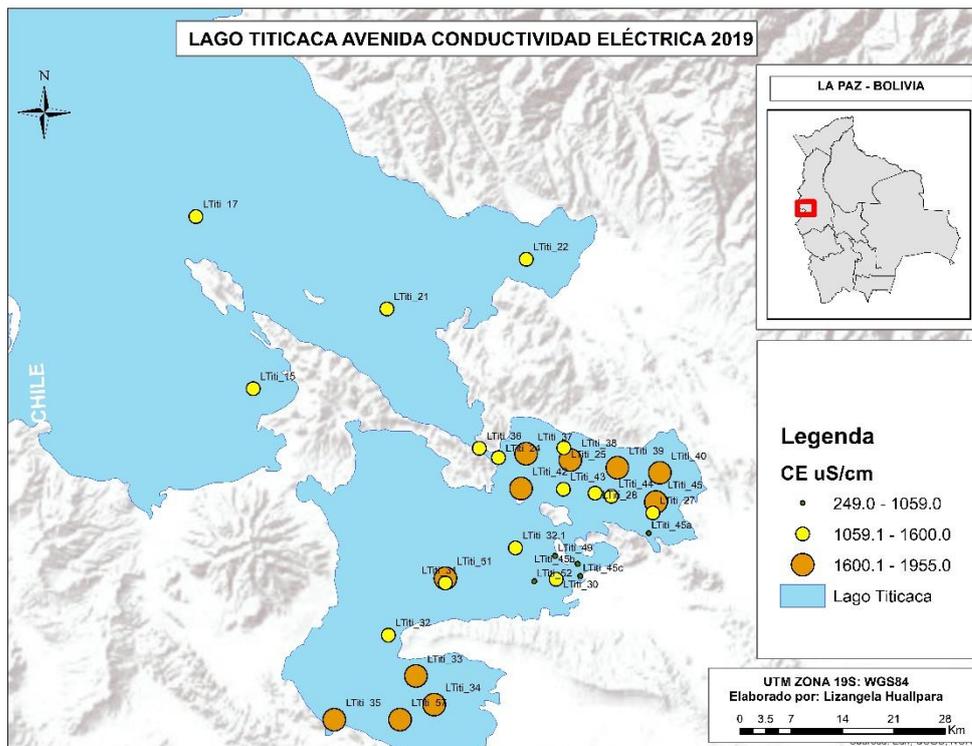


Figura 117. Mapa de variación de la CE del Lago Titicaca – Avenida, 2019.

En cuanto a los iones mayoritarios se incrementan en concentración paulatinamente hasta el año 2019, figuras 118, 119 y 120 las concentraciones de sodio sulfatos, cloruros y fosfatos superan los valores permitidos para clase A, B y C según el RMCH. Específicamente en las muestras cercanas a orillas del lago con códigos LTit\_17, LTit\_20, LTit\_21, LTit\_22, LTit\_24, LTit\_25, LTit\_27, LTit\_30, LTit\_31, LTit\_32, LTit\_33, LTit\_34, LTit\_35, LTit\_36, LTit\_37, LTit\_38, LTit\_39, LTit\_40, LTit\_41, LTit\_42, LTit\_43, LTit\_44, LTit\_45, LTit\_51 y LTit\_57.

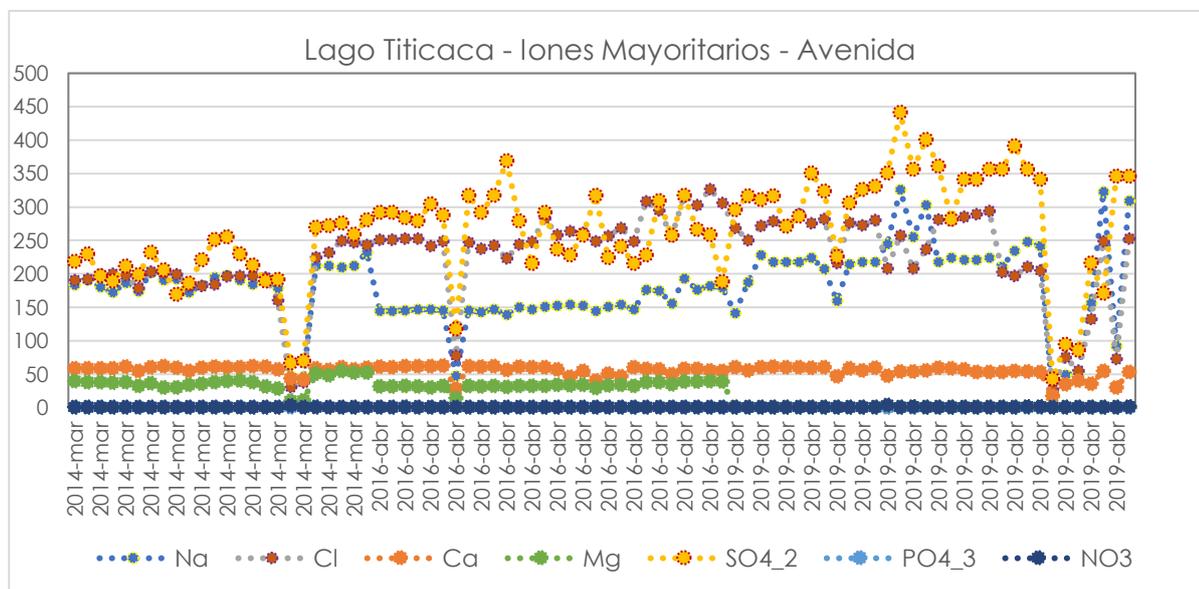


Figura 118. Gráfico de tendencias de la CE -Lago Titicaca – Avenida.

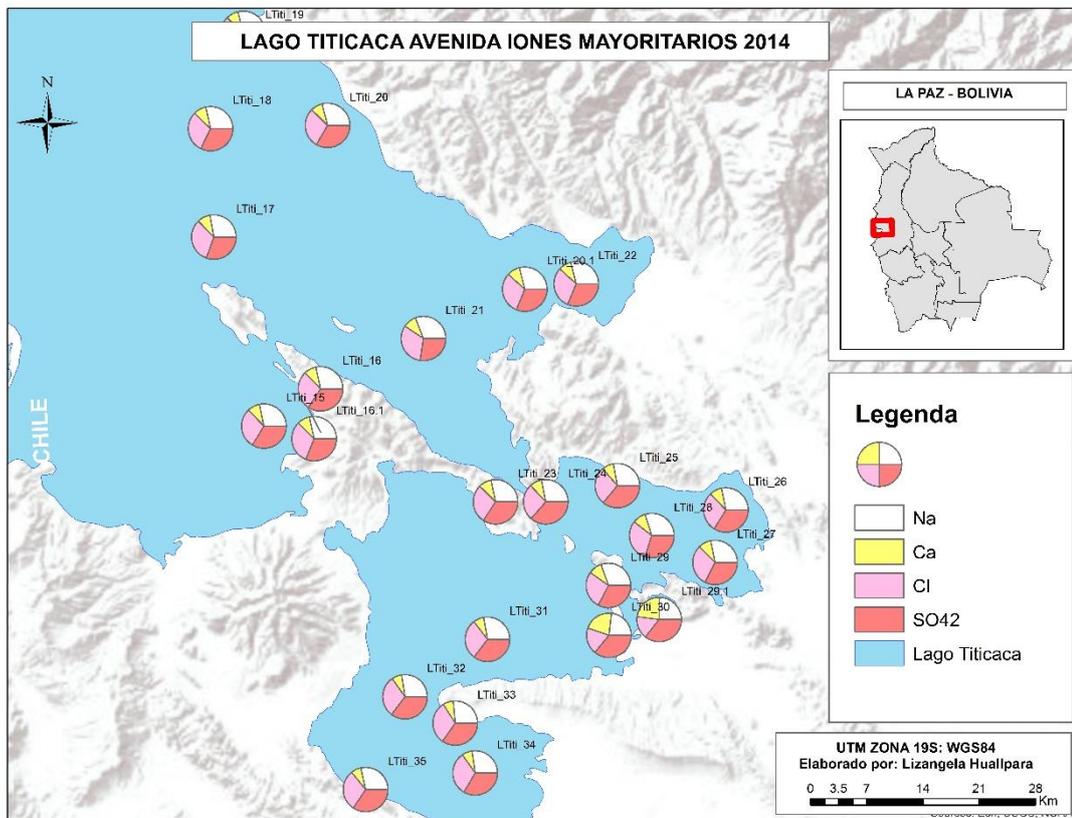


Figura 119. Mapa de variación de Iones Mayoritarios - Lago Titicaca – Avenida, 2014.

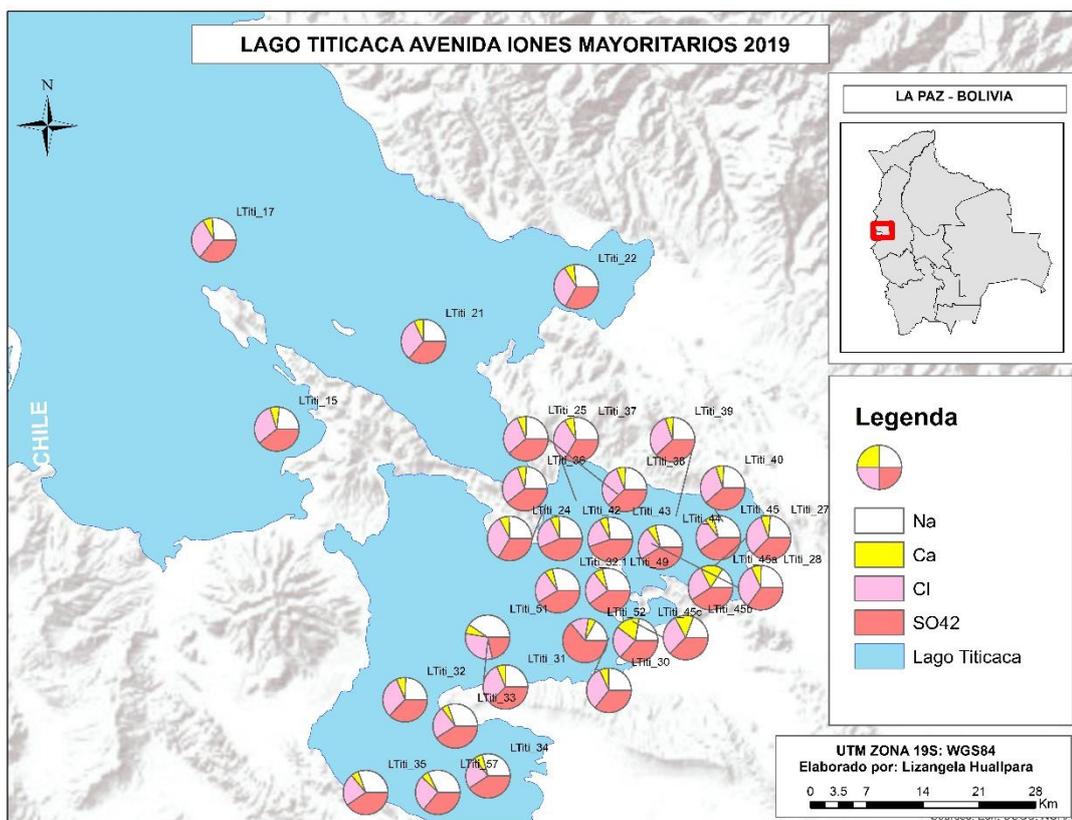


Figura 120. Mapa de variación de Iones Mayoritarios - Lago Titicaca – Avenida, 2019.

Los constituyentes metálicos inorgánicos del Lago Titicaca figuras 121, 122 y 123, específicamente los componentes: B, Fe y Hg, presentan valores que se encuentran sobre los valores críticos según el RMCH. Tendencia que se repite en los años 2014, 2016 y 2019.

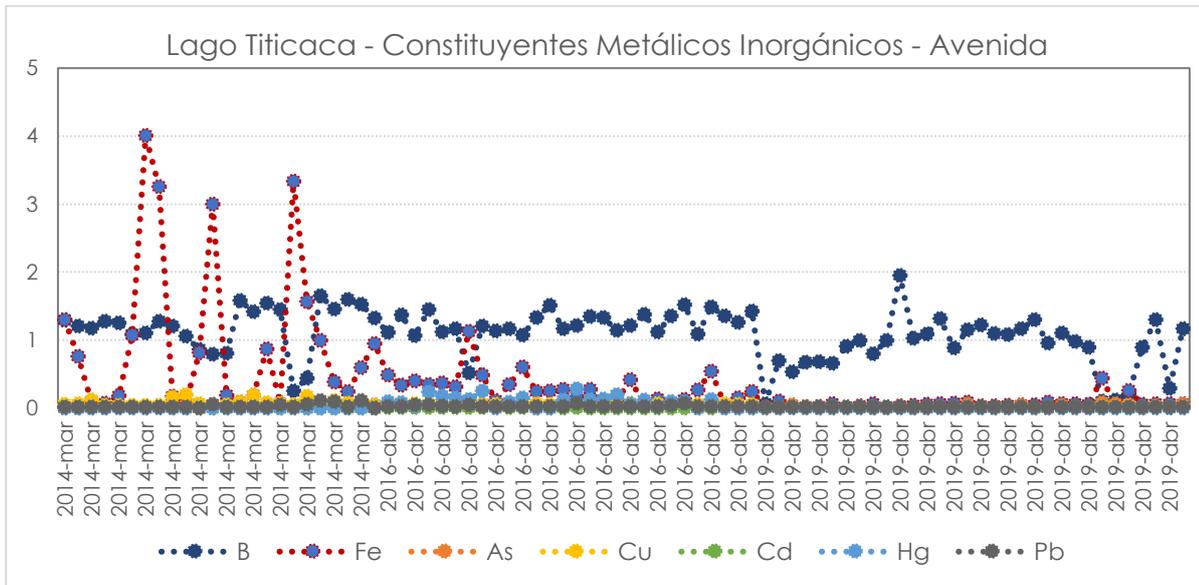


Figura 121. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos - Lago Titicaca – Avenida.

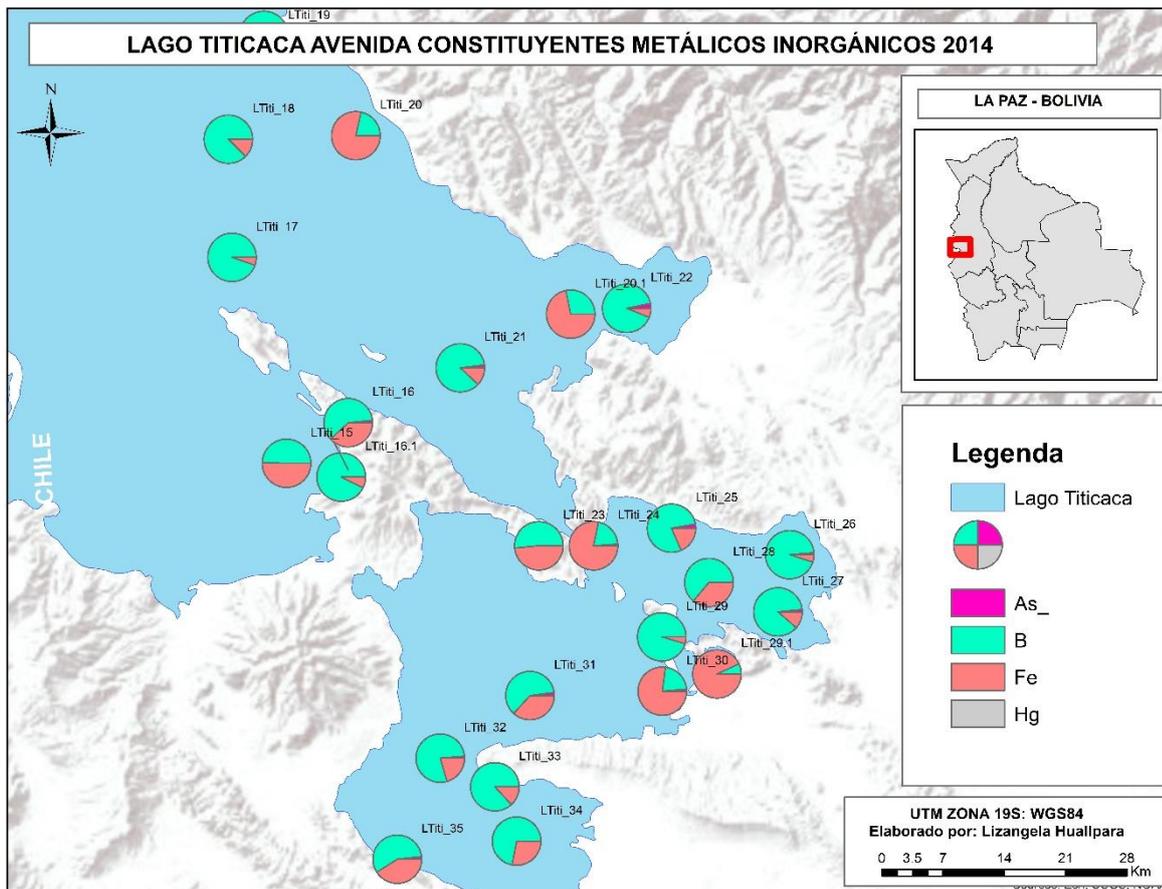


Figura 122. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos del Lago Titicaca – Avenida, 2014.

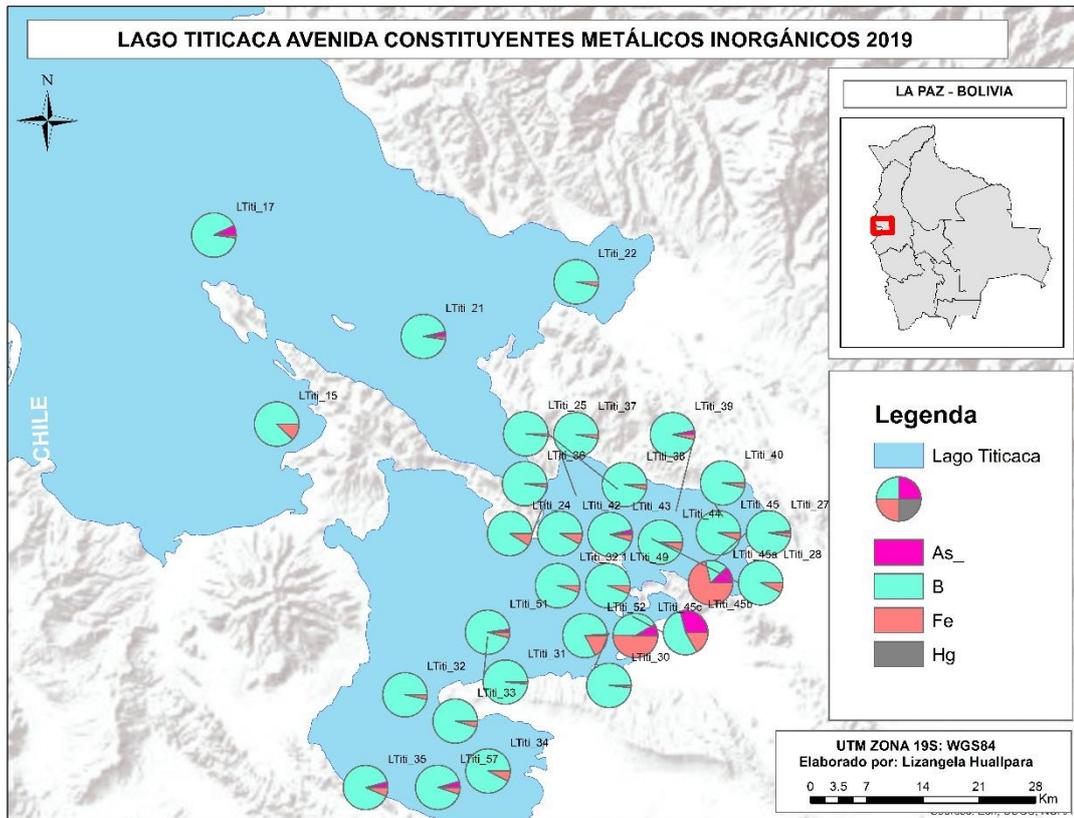


Figura 123. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos del Lago Titicaca – Avenida, 2019.

El gráfico estadístico de componentes mayoritarios muestra que el tipo de agua característica del Lago Titicaca en avenida es del tipo **Na-Ca-Mg-Cl-B-Fe-SO<sub>4</sub>** ya que son los componentes mayoritarios que caracterizan las muestras colectadas en avenida (figura 124).

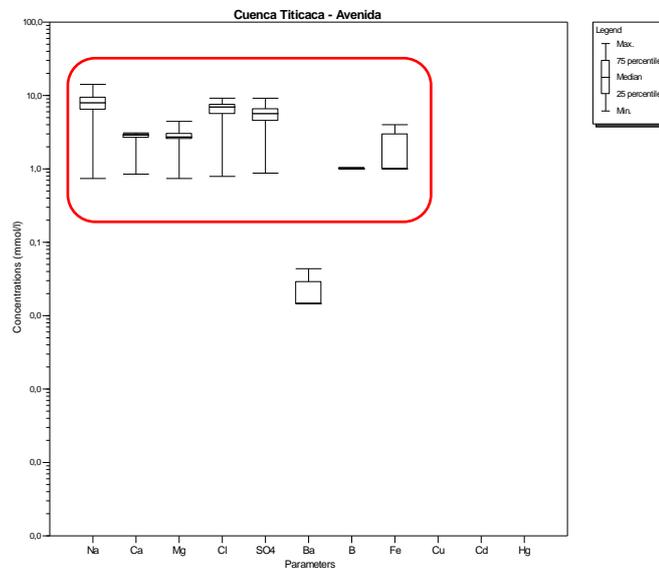


Figura 124. Gráfico estadístico de Composición del agua. Cuenca Titicaca - Avenida.

Los constituyentes metálicos inorgánicos específicamente los componentes traza: B, Fe y Hg, presentan concentraciones que se encuentran sobre los valores críticos según el RMCH. Estudios anteriores mencionan que las fuentes de contaminación son las descargas orgánicas, actividad minera e industrial que se originan en las ciudades de El Alto, Viacha y otras poblaciones que se desarrollan aceleradamente en esta región ((PNUMA), 2011).

### 2.7.2. LAGO TITICACA – ESTIAJE

La Tabla 19 se presenta un resumen estadístico de la base de datos consolidada del Lago Titicaca en época seca, donde se puede evidenciar las principales características fisicoquímicas de 153 muestras de agua que fueron colectadas en los años 2011, 2012, 2014, 2015, 2017 y 2018. Se registró en una base de datos la información de 8 campañas de monitoreo en estiaje:

- 1° Campaña – junio 2011
- 2° Campaña – mayo 2012
- 3° Campaña – octubre 2014
- 4° Campaña – octubre 2015
- 5° Campaña – noviembre 2017
- 6° Campaña – octubre 2015
- 7° Campaña – julio 2018
- 8° Campaña – noviembre 2018

Tabla 19. Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos. Lago Titicaca - Estiaje.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Mediana	Valor crítico RMCH
pH	10,0	7,0	9,0	< 6 y > 9
Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$	2472,0	110,0	1563,0	>1600
Cloruros, mg/L	520,0	48,0	266,0	>500
Fluoruros, mg/L	-	-	-	>1,7
Sulfatos, mg/L	636,0	120,0	246,0	>400
Fosfatos, mg/L	1,0	0,04	0,1	>1,0
Nitratos, mg/L	6,0	0,1	0,3	>50
Calcio, mg/L	760,0	12,0	68,0	>400
Magnesio, mg/L	255,0	3,0	31,0	>150
Sodio, mg/L	344,0	4,0	170,0	>200
Potasio, mg/L	-	-	-	-
Arsénico, mg/L	0,2	0,001	0,01	>0,1
Boro, mg/L	3,0	0,2	1,1	>1,0

La conductividad eléctrica varía desde los 110 hasta los 2472  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 1562  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , las muestras JACH\_007\_ASP, DESA\_078\_ASP, LTiti\_31, LTiti\_32, LTiti\_33, LTiti\_34, LTiti\_34.1, LTiti\_34.2, LTiti\_35, LTiti\_32.1, LTiti\_24, LTiti\_25, LTiti\_26, LTiti\_27, LTiti\_28, LTiti\_29.2, LTiti\_30, superan el valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  según El RMCH (figuras 125, 126 y 127).

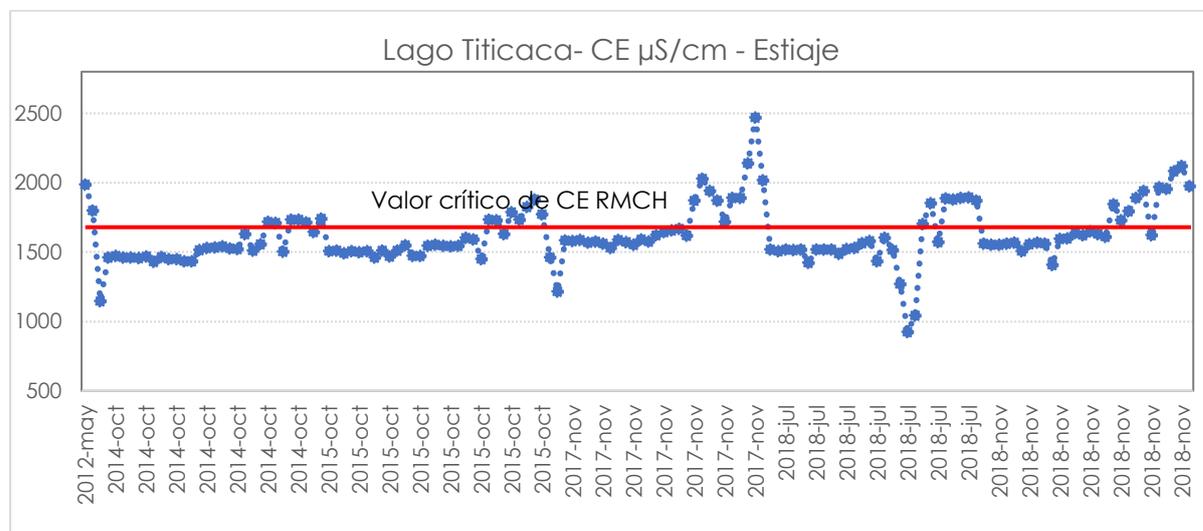


Figura 125. Gráfico de tendencias de la CE- Lago Titicaca – Estiaje.

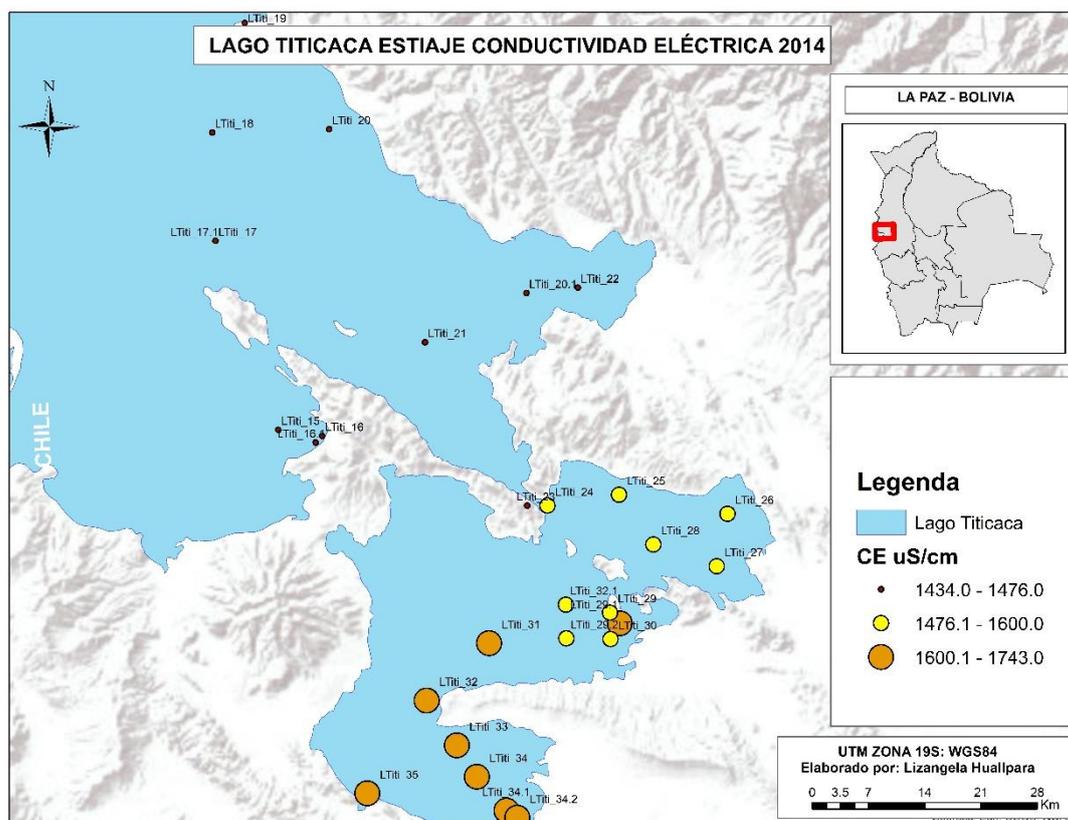


Figura 126 . Mapa de variación de la CE de Lago Titicaca – Estiaje, 2014.

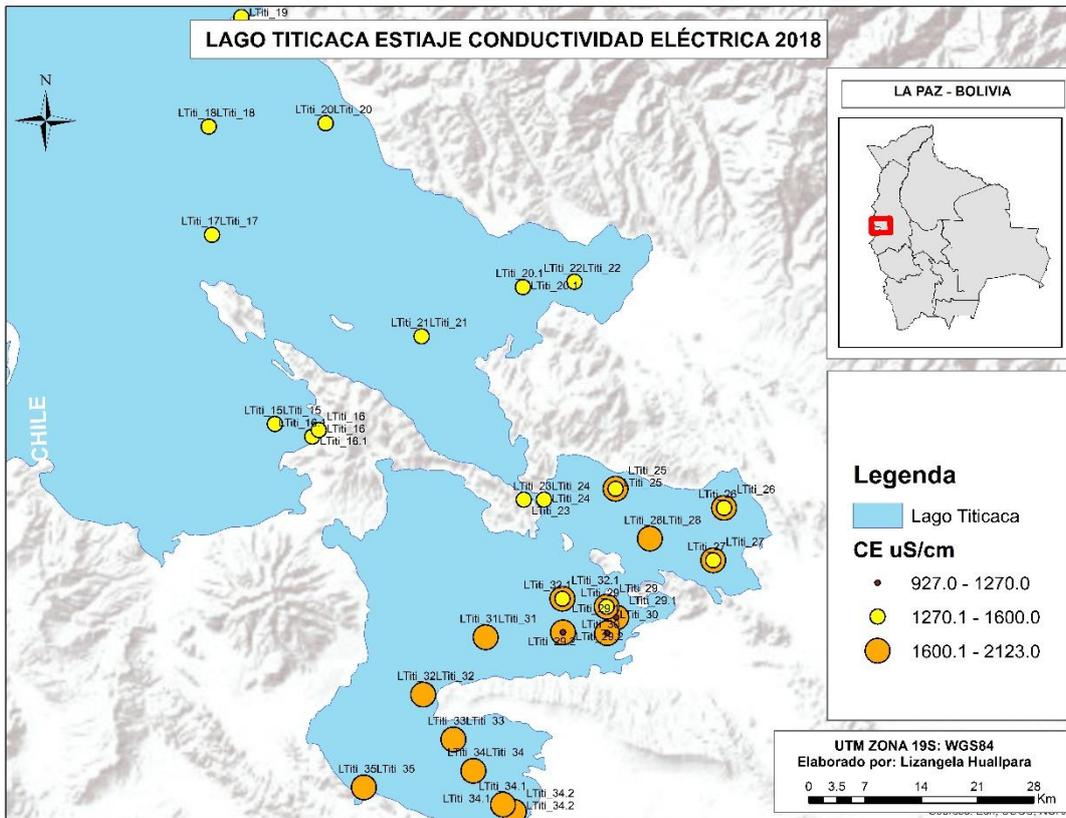


Figura 127 . Mapa de variación de la CE de Lago Titicaca – Estiaje, 2018.

En cuanto a los iones mayoritarios presentes en el Lago Titicaca en estiaje, estos se encuentran incrementando paulatinamente hasta el año 2018, las figuras 128, 129 y 130, muestran que las concentraciones de sodio, calcio, magnesio, cloruro y sulfatos superan los valores permitidos para clase A, B y C según el RMCH. Específicamente en las muestras CIR\_08, JILA\_010\_ASP, JACH\_007\_ASP, LTiti\_35, RKata\_01, LTiti\_32, LTiti\_33, LTiti\_34, LTiti\_34.2 y LTiti\_35.

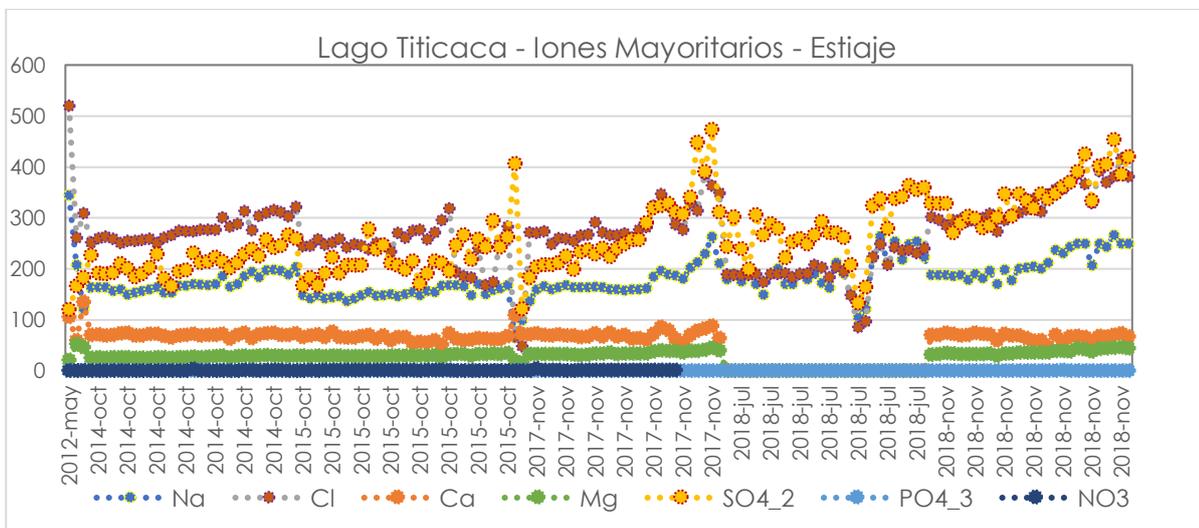


Figura 128. Gráfico de tendencias de Iones Mayoritarios – Lago Titicaca – Estiaje.

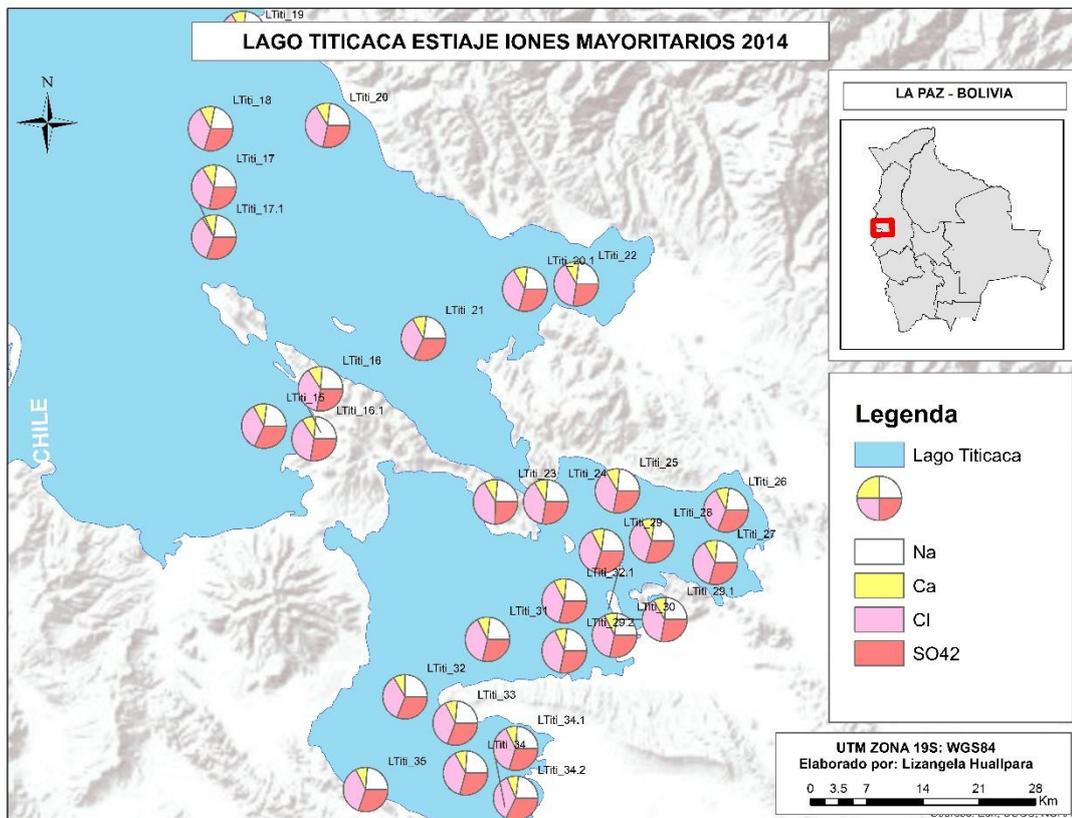


Figura 129. Mapa de variación de Iones Mayoritarios del Lago Titicaca – Estiaje, 2014.

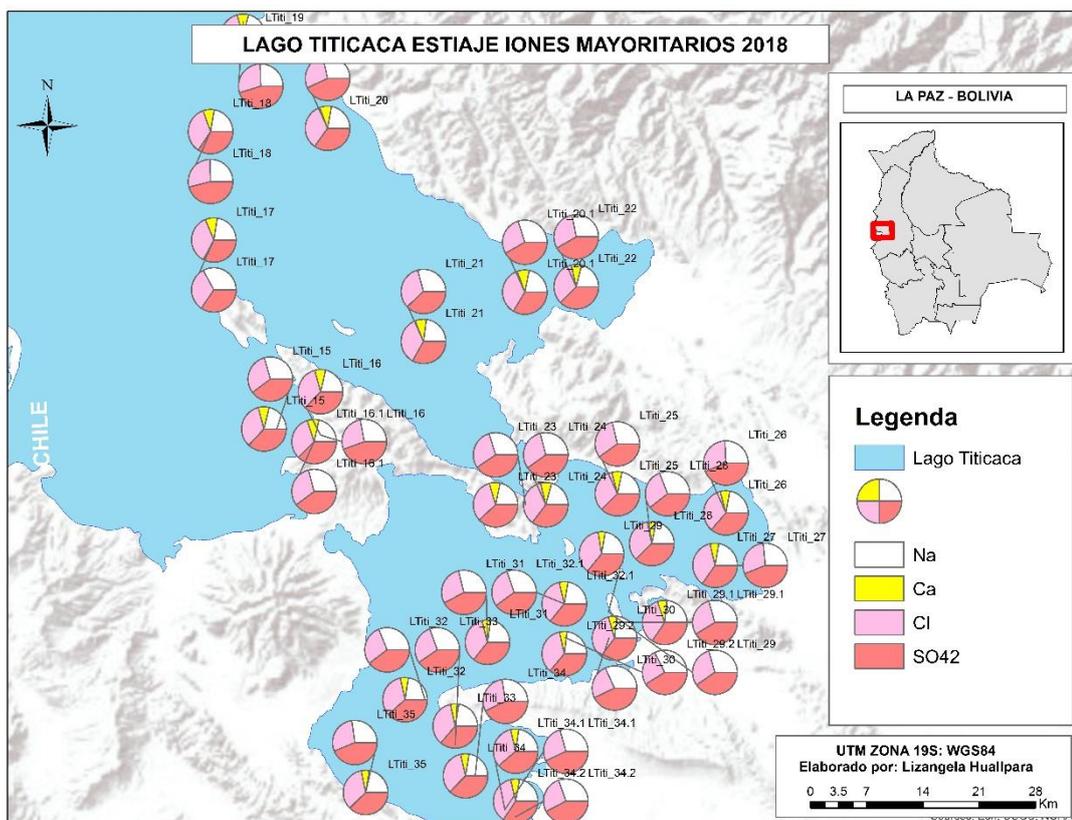


Figura 130. Mapa de variación de Iones Mayoritarios del Lago Titicaca – Estiaje, 2018.

Los constituyentes metálicos inorgánicos del Lago Titicaca en estiaje, figuras 131, 132 y 133, específicamente los componentes de: As, B y Hg presentan valores que se encuentran sobre los valores críticos según el RMCH. Tendencia que se repite en los años 2014, 2015, 2017 y 2018.

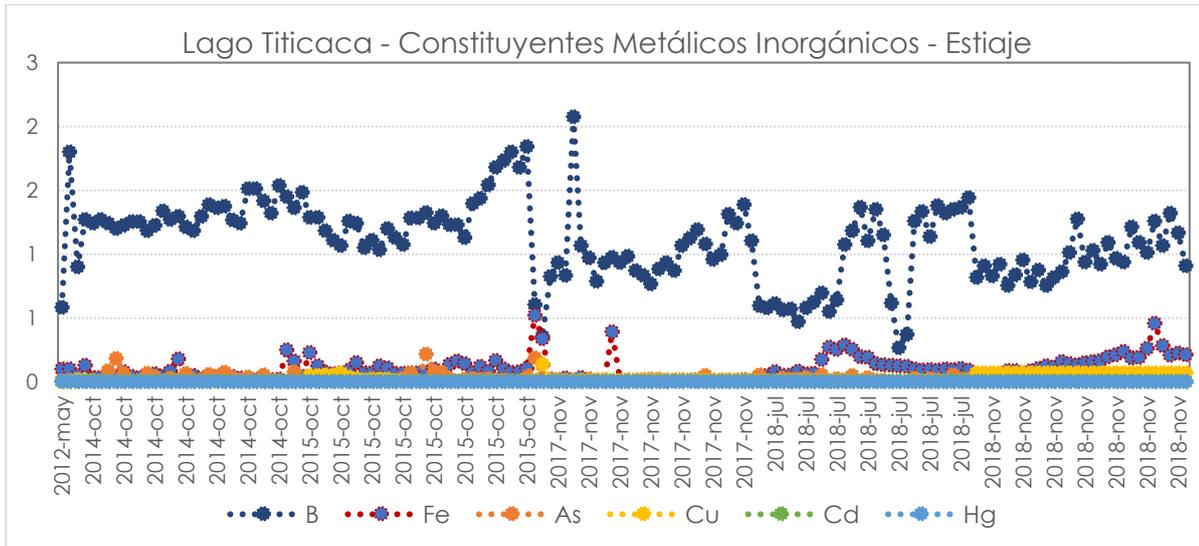


Figura 131. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos – Lago Titicaca – Estiaje.

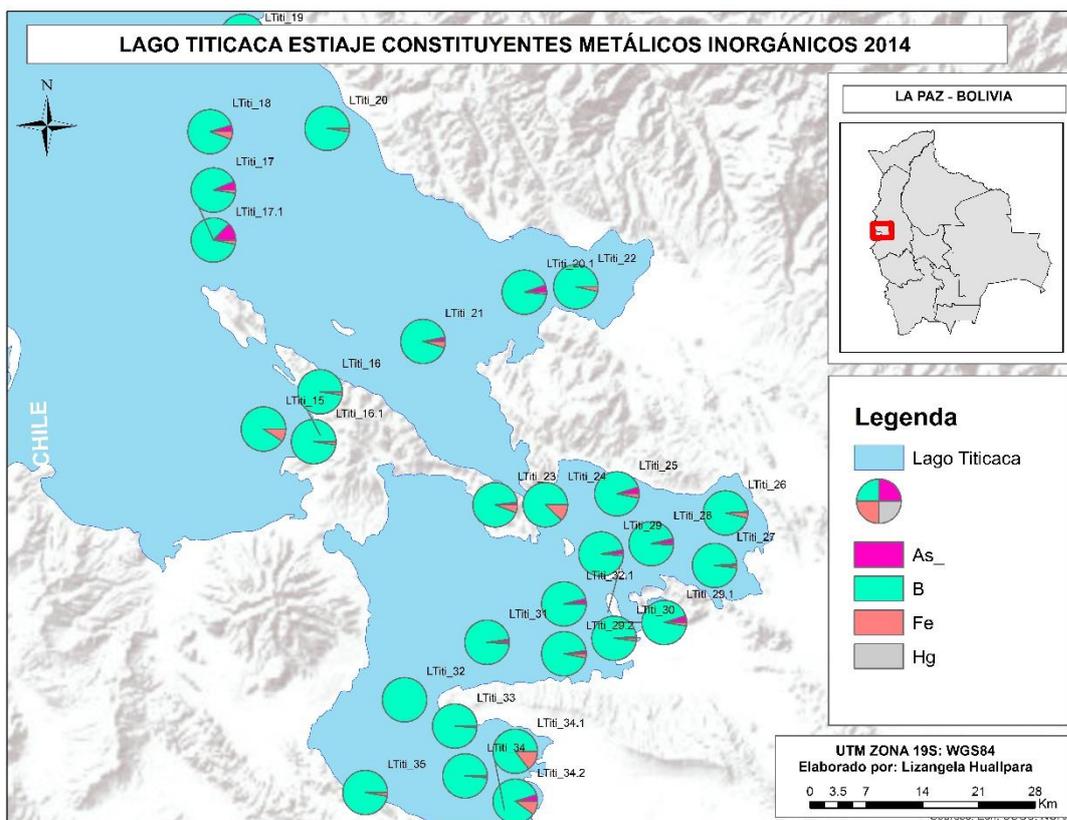


Figura 132. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos del Lago Titicaca – Estiaje, 2011.

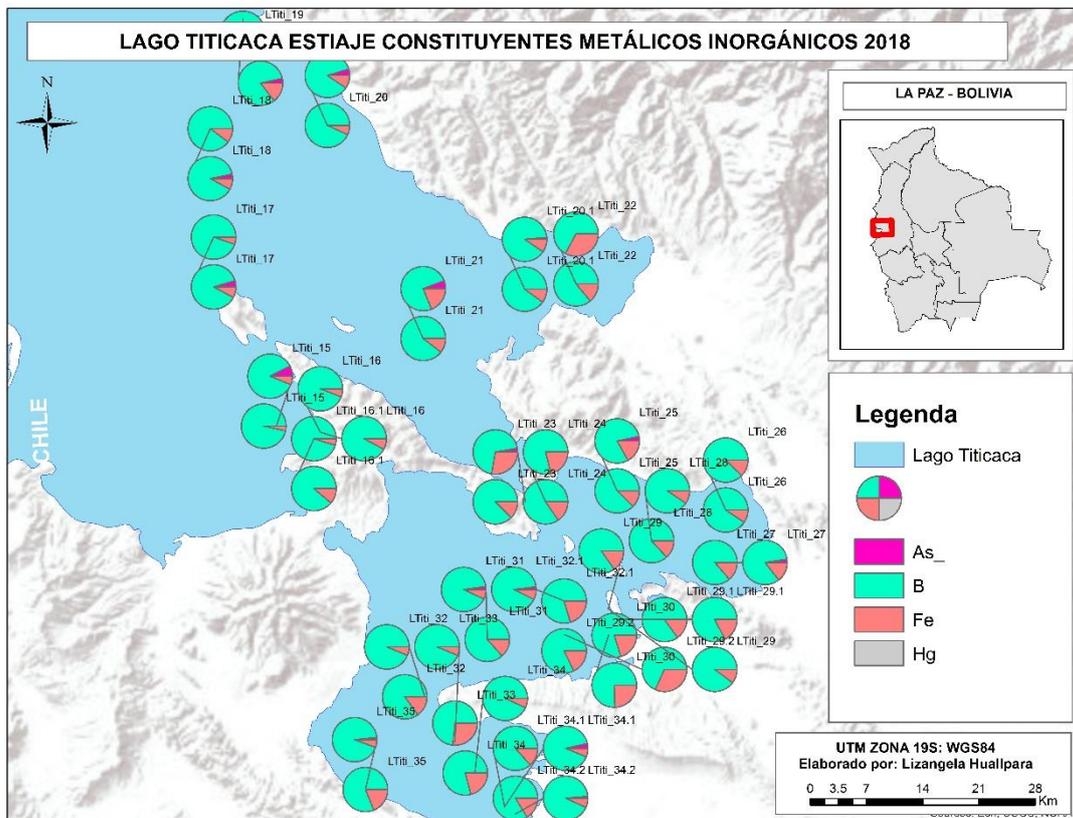


Figura 133. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos del Lago Titicaca – Estiaje, 2019.

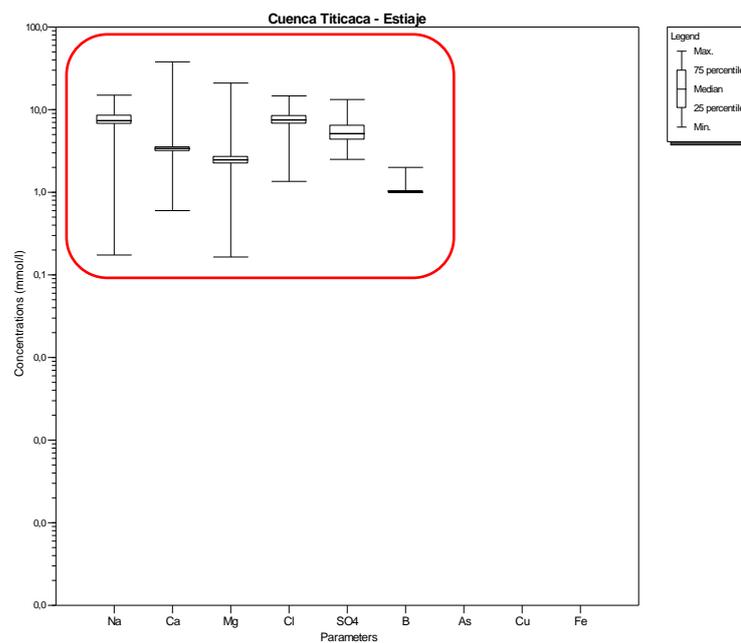


Figura 134. Gráfico estadístico de Composición del agua. Cuenca Titicaca - Estiaje.

El gráfico estadístico de componentes mayoritarios (figura 134) muestra que el tipo de agua característica del Lago Titicaca en estiaje del tipo **Na-Ca-Mg-Cl-B-SO<sub>4</sub>** ya que son los componentes mayoritarios que caracterizan las muestras colectadas.

La concentración de los componentes mayoritarios en el Lago Titicaca se incrementa en época seca esto debido a que el volumen de agua disminuye y se concentran las especies químicas dentro de la misma, se hace evidente en el resumen estadístico de ambas épocas. Los iones mayoritarios presentes en el Lago Titicaca en época seca y húmeda se están incrementando paulatinamente hasta el 2019.

Los constituyentes metálicos inorgánicos específicamente los componentes traza: B, Fe y Hg, presentan concentraciones que se encuentran sobre los valores críticos según el RMCH. Estudios anteriores mencionan que las fuentes de contaminación son las descargas orgánicas, actividad minera e industrial que se originan en las ciudades de El Alto, Viacha y otras poblaciones que se desarrollan aceleradamente en esta región ((PNUMA), 2011).

.

## 2.8. CUENCA COIPASA

La Cuenca Coipasa conocida como la cuenca del río Lauca, río principal que nace el Chile y después de su recorrido ingresa a territorio boliviano. En la figura 135 se puede observar la delimitación geográfica de la Cuenca Coipasa a nivel 3, UH 012, y la red de puntos de Monitoreo de calidad del agua.

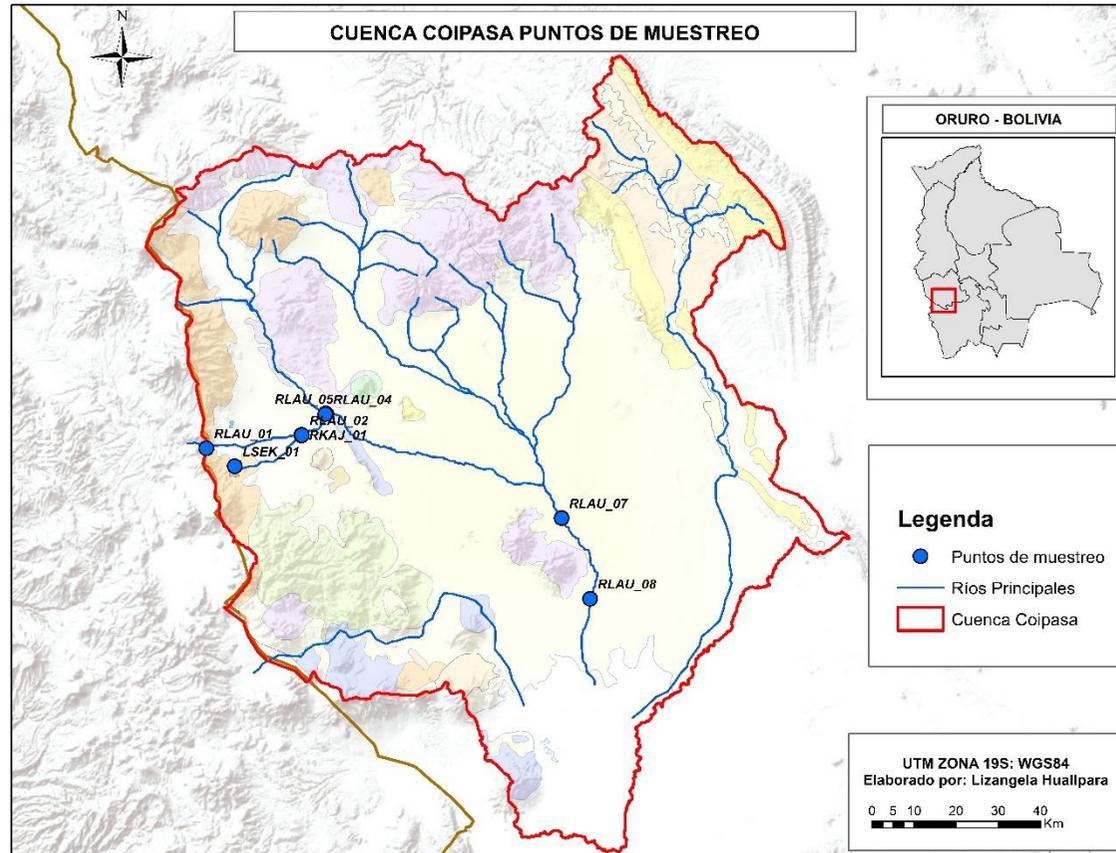


Figura 135. Lago Titicaca – Puntos de Muestreo – Bolivia

### 2.8.1. CUENCA COIPASA – ESTIAJE

Se consideró 9 estaciones de monitoreo sobre la Cuenca Coipasa, 8 sobre los ríos principales y 1 laguna (Tabla 20).

Tabla 20. Estaciones de monitoreo – Cuenca Coipasa (Bolivia)

Código	Punto de Muestreo	Cuerpo de agua	X	Y
LSEK_01	Laguna Sekewa	Laguna	506111	7939045
RKAJ_01	Río Kajachi antes río Lauca	Río	521944	7946395
RLAU_01	Río Lauca en Hito 20	Río	499352	7943329
RLAU_03	Río Lauca después río Kajachi	Río	521968	7946562
RLAU_04	Río Lauca antes río Sajama	Río	527627	7951528
RLAU_05	Río Lauca después río Sajama	Río	527890	7951595
RLAU_07	Río Lauca puente Huachacalla	Río	583764	7926588
RLAU_08	Río Lauca en Chipaya	Río	590540	7907199
RSAJ_01	Río Sajama antes río Lauca	Río	527736	7951737

Se registró en una base de datos la información de 4 campañas de monitoreo en estiaje:

- 1° Campaña – agosto 2017
- 2° Campaña – julio 2018
- 3° Campaña – agosto 2018
- 4° Campaña – agosto 2019

Tabla 21. Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos. Cuenca Coipasa - Estiaje.

Parámetro	Máximo	Mínimo	Mediana	Valor crítico RMCH
pH	9	7	8	< 6 y > 9
Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$	83500,0	690,0	1251,0	>1600
Cloruros, mg/L	49696,0	83,0	204,0	>500
Sulfatos, mg/L	238,0	119,0	150,0	>400
Fosfatos, mg/L	5,0	0,1	1,0	>1,0
Calcio, mg/L	1400,0	4,0	52,0	>400
Magnesio, mg/L	2530,0	16,0	32,0	>150
Sodio, mg/L	29196,0	82,0	163,0	>200
Arsénico, mg/L	4,4	0,1	0,3	>0,1
Boro, mg/L	594,0	1,9	3,7	>1,0
Cadmio, mg/L	0,5	0,0001	0,0002	>0,005
Litio, mg/L	146,0	0,2	0,6	>5
Níquel, mg/L	3,2	0,001	0,01	>0,5

En la tabla 21 se presenta un resumen estadístico de la base de datos consolidada de la Cuenca Coipasa en época seca, donde se puede evidenciar las principales características fisicoquímicas de 29 muestras de agua que corresponden a 9 puntos de muestreo en los años 2017, 2018 y 2019.

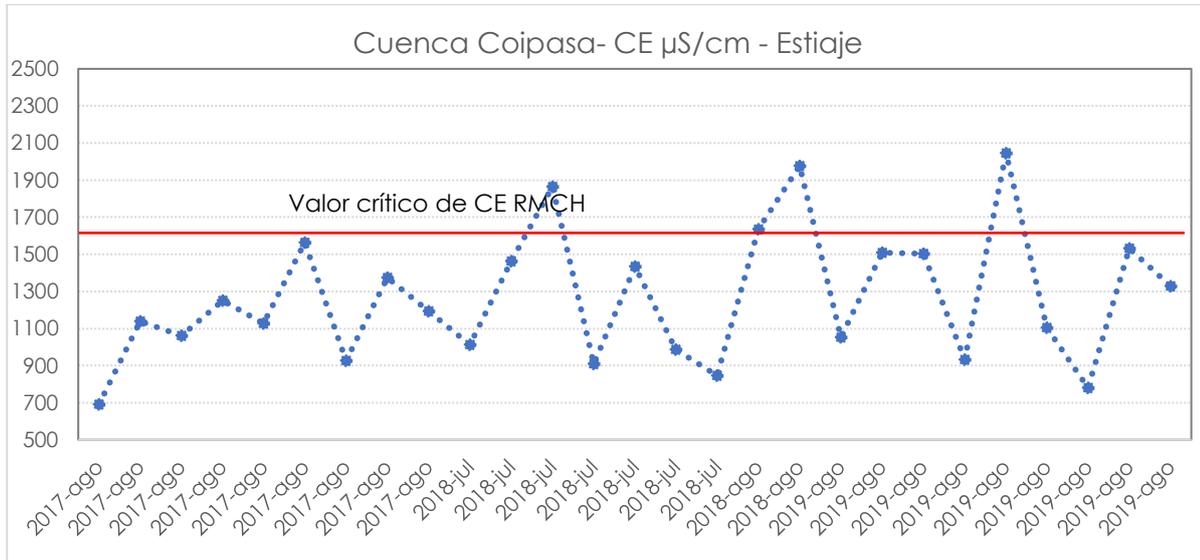


Figura 136. Gráfico de tendencias de la CE- Cuenca Lauca – Estiaje.

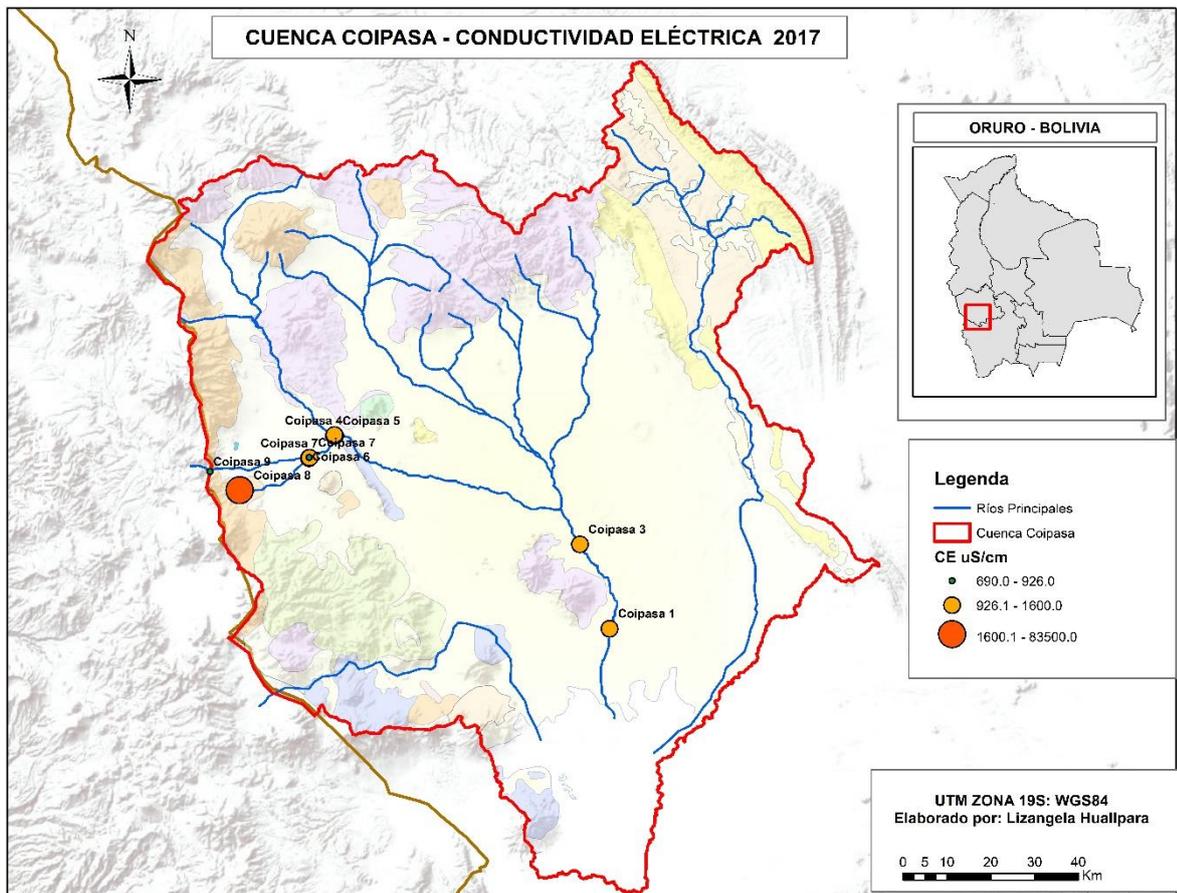


Figura 137. Mapa de variación de la CE de Cuenca Coipasa – Estiaje, 2017.

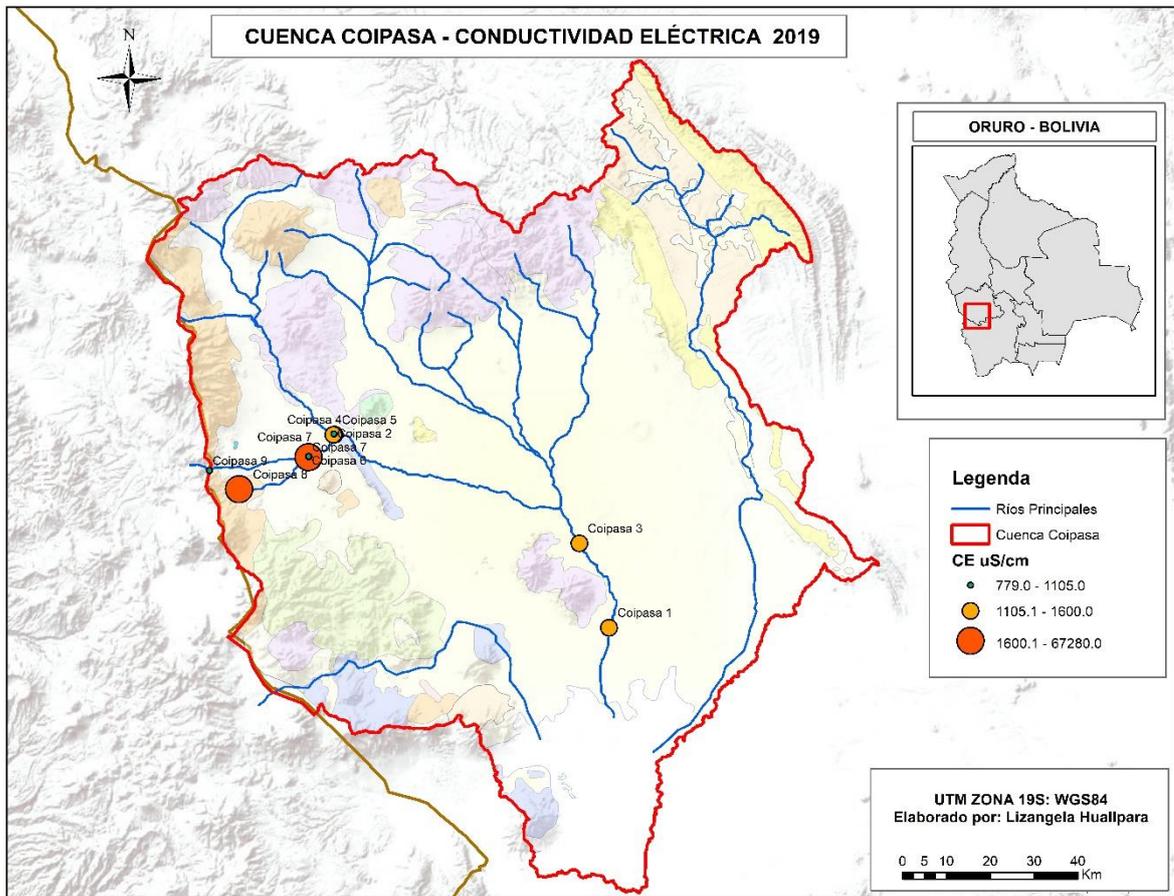


Figura 138. Mapa de variación de la CE de Cuenca Coipasa – Estiaje, 2019.

La conductividad eléctrica varía desde los 690 hasta los 83500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con una mediana igual a 203,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , la muestra LSEK\_01 supera el valor crítico de 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  según el RMCH (figuras 136), esto se debe porque corresponde al agua de la Laguna Sekewa, figuras 137 y 138, esta laguna sufre procesos de evaporación y poca recarga en época seca. En todos los gráficos de tendencias se retiró esta muestra (LSEK\_01) ya que, al presentar una CE tan elevada y por lo tanto elevadas concentraciones de componentes mayoritarios, no se lograba visualizar los parámetros medidos de las otras estaciones de monitoreo que no presentan incrementos significativos de los mismos hasta el año 2019.

En la figura 139 se observa un incremento paulatino al año 2019 en cuanto a las concentraciones de los iones mayoritarios. Los iones sodio, calcio, magnesio, cloruro y fosfatos superan los valores permitidos para clase A, B, C y D según el RMCH. Específicamente en las muestras LSEK\_01, RLAU\_04, RLAU\_05, RKAJ\_01, RLAU\_08 y LSEK\_01.

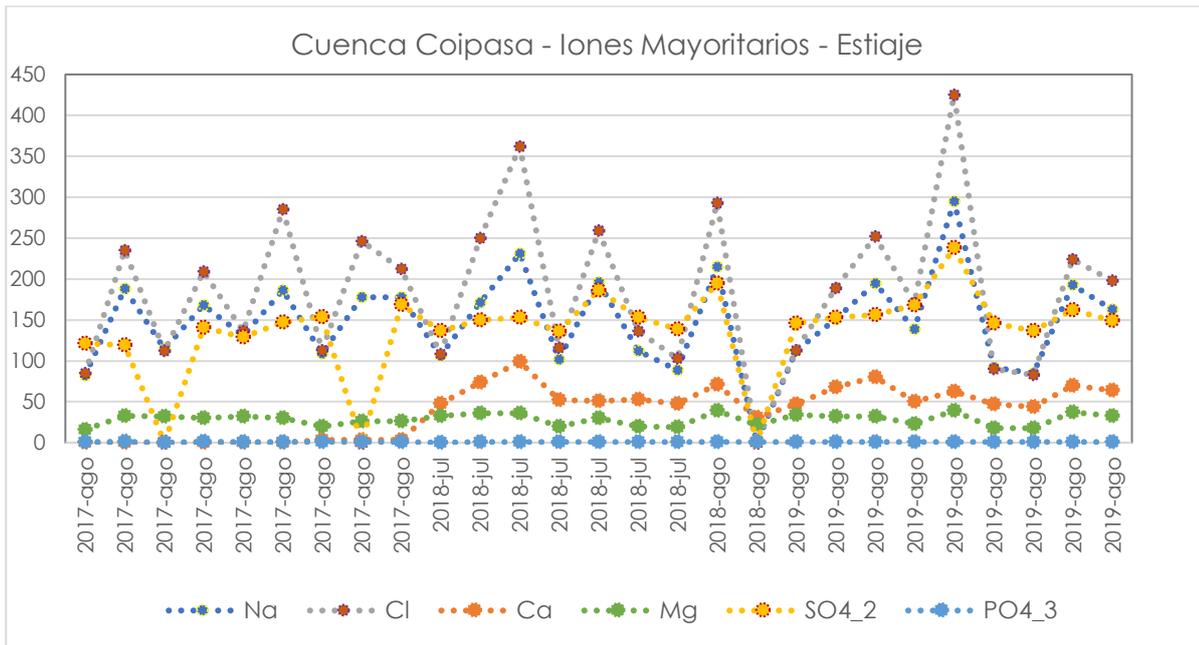


Figura 139. Gráfico de tendencias de Iones Mayoritarios - Cuenca Coipasa – Estiaje.

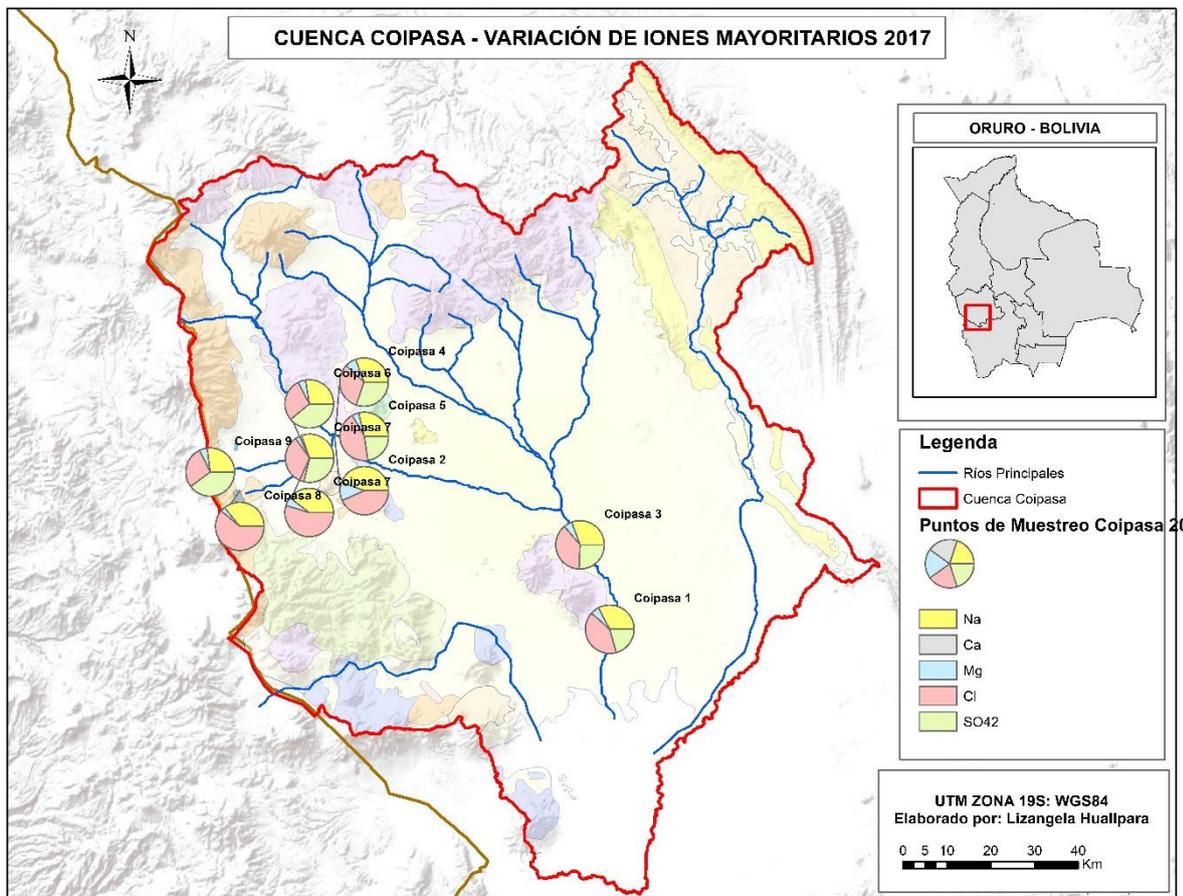


Figura 140. Mapas de variación de Iones Mayoritarios – Cuenca Coipasa – Estiaje. 2017.

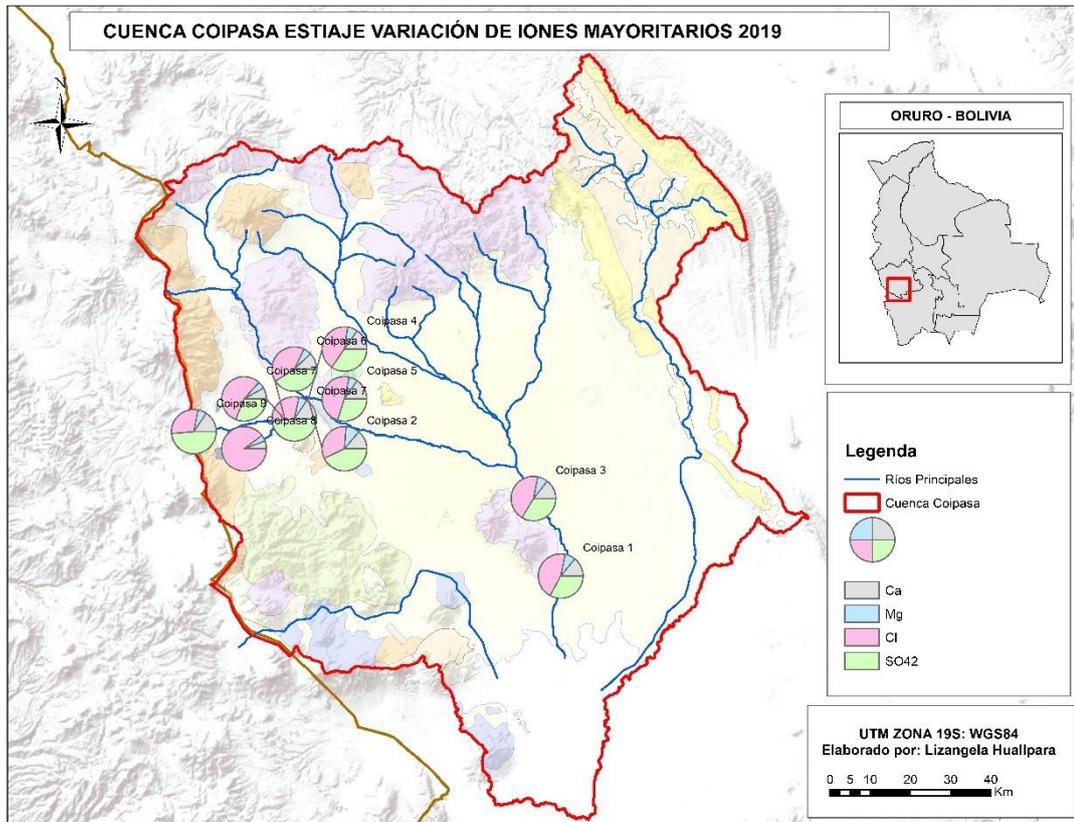


Figura 141. Mapas de variación de Iones Mayoritarios – Cuenca Coipasa – Estiaje. 2019.

Los constituyentes metálicos inorgánicos específicamente los componentes traza: As, B, Cd, Li y Ni, presentan valores que se encuentran sobre el valor crítico según el RMCH, estos niveles altos están asociados a la interacción agua roca y la geología del sector (figuras 142, 143 y 144).

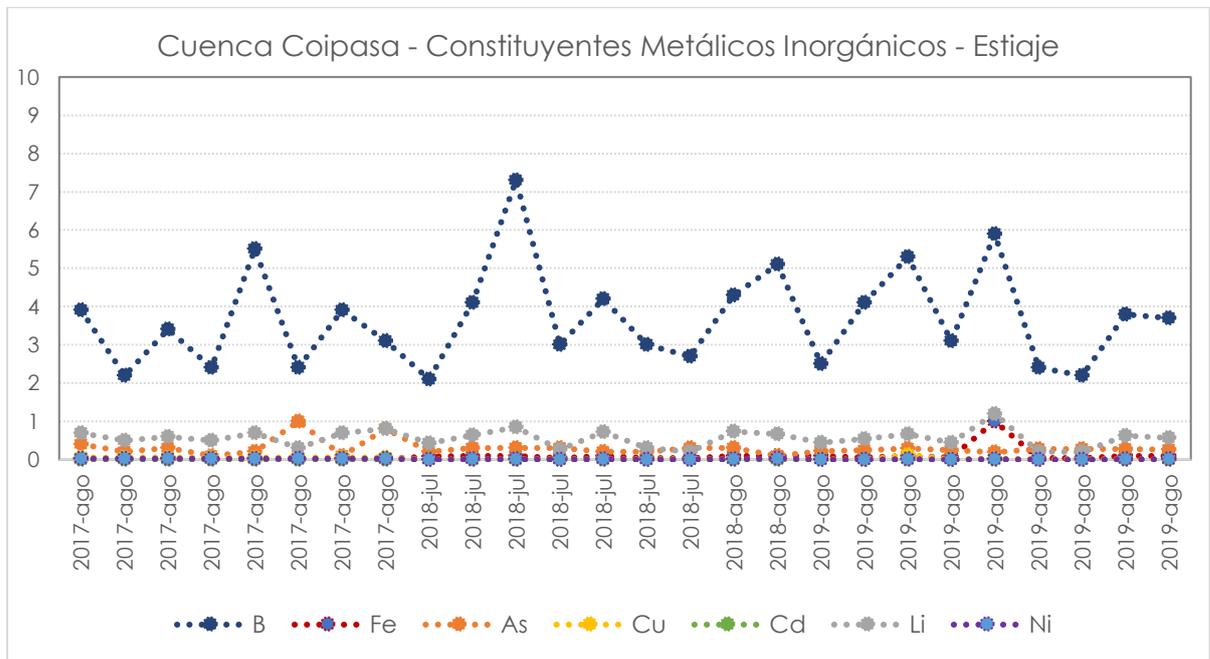


Figura 142. Gráfico de tendencias de Constituyentes Metálicos Inorgánicos – Cuenca Coipasa – Estiaje.

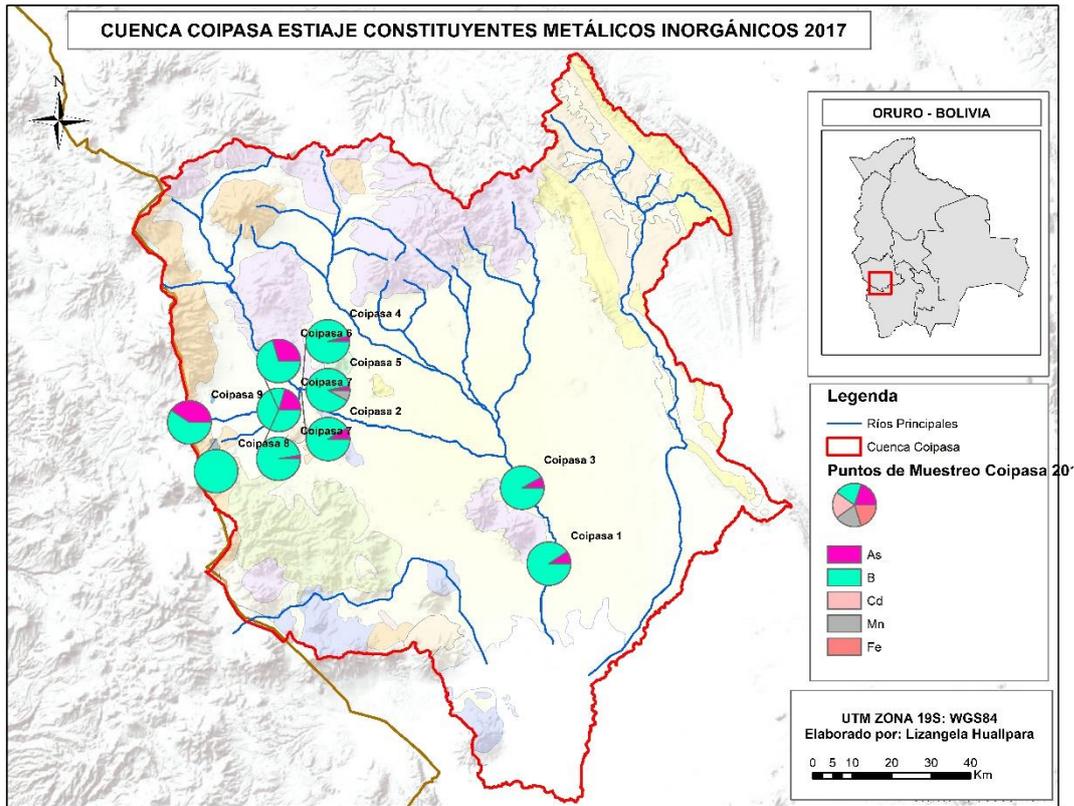


Figura 143. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos – Cuenca Coipasa – Estiaje, 2017.

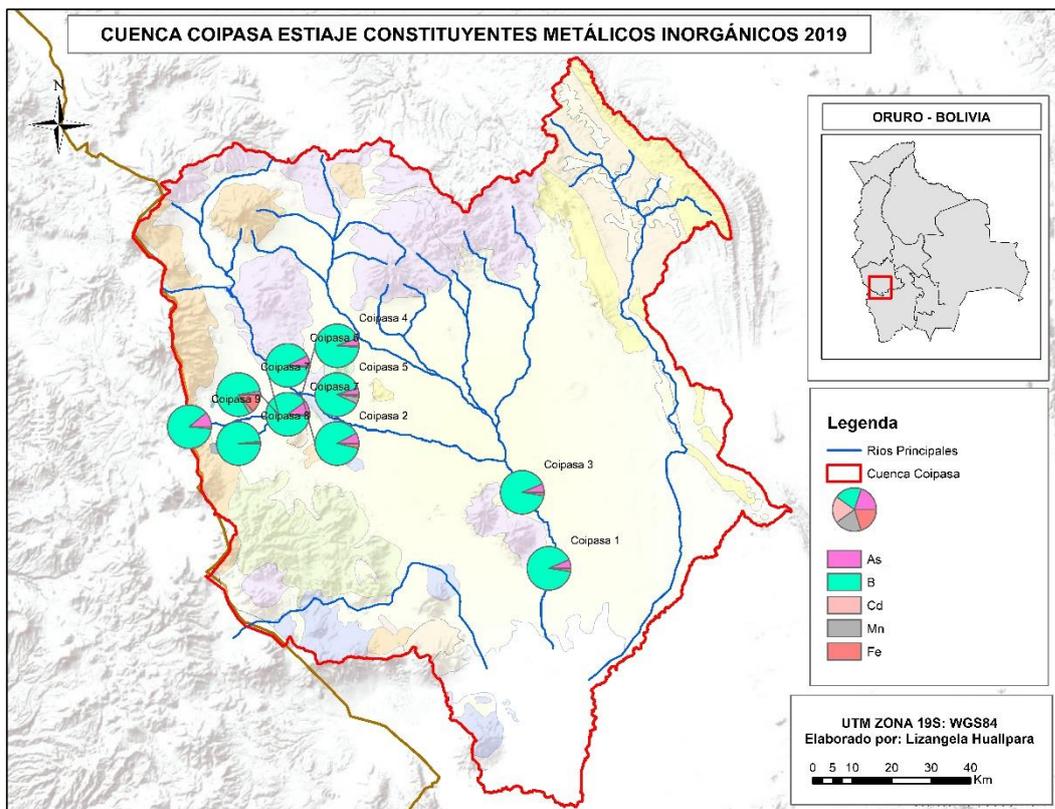


Figura 144. Mapa de variación de Constituyentes Metálicos – Cuenca Coipasa – Estiaje, 2019.

El gráfico estadístico de componentes mayoritarios figura 145, muestra que el tipo de agua característica de la Cuenca Coipasa en estiaje es del tipo **Na-Ca-Mg-Cl-B-SO4** ya que son los componentes mayoritarios que caracterizan las muestras colectadas en estiaje.

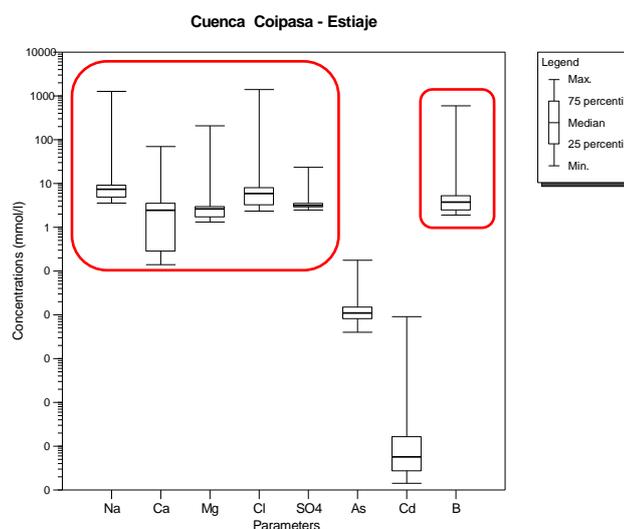


Figura 145. Gráfico estadístico de Composición del agua- Cuenca Coipasa - Estiaje.

Las elevadas concentraciones de boro se presentan porque en la parte alta de la cuenca se encuentran suelos salados que constituyen evaporitas con alto contenido de bórax y ácido bórico, los cuales hacen aportes importantes de boro al río Lauca y sus tributarios

La presencia de elevadas concentraciones de arsénico se debe a la litología asociada a esta cuenca es de roca volcánica fracturadas, con ignimbritas andesitas de período cuaternario, la cual origina filones mineralizados con contenido de arsénico típico de depósitos porfídicos. Por otra parte, las lagunas Cotacotani (naciente del río Lauca lado chileno), debido a la alta evaporación tienden a concentrar el arsénico que al desaguarse y formar el Lauca aportan una cantidad apreciable de arsénico, la cual se ve acrecentada por el grado de fraccionamiento de las rocas volcánicas (CADE-IDEPE, 2004)

### **3. ANEXOS**

### **3.1. PARÁMETROS CLAVE DE EVALUACIÓN**

#### **3.1.1. ÉPOCA**

Es importante considerar que, en la mayoría de los casos, las fuentes de agua no presentan una total homogeneidad, de manera que la obtención de una muestra representativa requiere de una buena técnica, además de un número y tamaño de muestras adecuada.

La frecuencia del muestreo también afecta el grado de representatividad de la muestra de agua puesto que un intervalo de tiempo mal seleccionado, así como una mala elección de sitios de muestreo, no permitirá la detección de cambios importantes en las características del cuerpo de agua.

Se han desarrollado diferentes estudios que buscan relacionar las variaciones temporales y espaciales con la calidad de agua de diferentes cuerpos de aguas (Pérez y Rodríguez, 2008); (López y Serna, 1999); (Sampaio et al., 2002). El efecto de las precipitaciones características en cada estudio hace evidente la baja de la salinidad, Conductividad Eléctrica (CE), por un periodo intenso de lluvias y su ascenso en periodo seco.

Debido a la importancia, se hace necesario desarrollar la clasificación de los cuerpos de agua en época seca – estiaje y época húmeda – avenida porque se hace evidente la variación de muchos de los parámetros medidos en campo y laboratorio por el incremento o disminución de la cantidad de agua (Severiche Sierra et al., 2013)

#### **3.1.2. PARÁMETROS DE CAMPO**

Otros factores que inciden en la calidad de los datos son las alteraciones causadas por efectos sobre el uso de equipos y/o instrumentos de medición calibración de equipos multiparamétricos, por lo que se hace necesario establecer controles que detecten estas alteraciones potenciales que se encuentran relacionadas con la temperatura natural de la muestra y la calibración de los equipos utilizados en campo.

Una medición estándar de parámetros de campo en muestras de agua necesita incluir como mínimo valores de temperatura, Conductividad Eléctrica CE y pH (Appelo & Postma, 2005).

La causa más común de error en las mediciones de pH y CE es la temperatura. Las variaciones de temperatura pueden influir por las siguientes razones.

La pendiente del electrodo cambiará con variaciones en temperatura

Los valores de pH del tampón y de la muestra cambiarán con la temperatura

La desviación de la medición puede ocurrir cuando los elementos internos de los electrodos de pH y de referencia alcanzan la temperatura equilibrio después de un cambio de temperatura (Thermo Scientific, 1991).

Muchas de las muestras que se encuentran en la base de datos no poseen datos de temperatura y hora de muestreo lo que es un problema en la depuración de datos anómalos.

Tabla 22. Valores de pH con relación a las variaciones de temperatura

Nominal pH Value at 25 °C	0°C	5°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
1.68	1.67	1.67	1.67	1.68	1.68	1.69	1.71	1.72	1.74	1.77	1.79
4.01	4.00	4.00	4.00	4.00	4.02	4.03	4.06	4.09	4.12	4.16	4.21
6.86	6.98	6.95	6.92	6.87	6.85	6.84	6.83	6.84	6.85	6.86	6.88
7.00	7.11	7.08	7.06	7.01	6.98	6.97	6.96	6.97	7.00	7.03	7.08
9.18	9.46	9.40	9.33	9.23	9.14	9.07	9.01	8.96	8.92	8.89	8.85
10.01	10.32	10.25	10.18	10.06	9.97	9.89	9.83	9.79	9.78	9.78	9.80
12.46	13.47	13.24	13.03	12.64	12.29	11.99	11.73	11.50	11.30	11.13	10.98

También se podrían adicionar otros parámetros de campo como: el potencial óxido reducción ORP, Oxígeno Disuelto OD, alcalinidad, sólidos totales disueltos (SDT).

### 3.1.3. IONES MAYORITARIOS

Un análisis químico estándar de agua incluirá como mínimo valores de cuatro cationes principales ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ) y los cuatro aniones principales ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), en otras palabras, ocho iones mayoritarios presentes en aguas naturales.

Es importante determinar estos parámetros del agua porque la precisión del análisis se obtiene a partir de los mismos por medio del cálculo del balance iónico (BI) ya que la suma de cargas positivas y negativas en cuerpos de agua debe ser igual a:

$$BI = (\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}) / (\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}) * 100$$

donde los cationes y aniones se expresan como meq/L y se insertan con su signo de carga. Las sumas de los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Ca}^{+2}$ , y los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{NO}_3^-$  no debe superar el 10% de discrepancia en un muestreo completo. Los resultados analíticos fueron evaluados mediante el cálculo del balance iónico (BI) de las muestras, basándose en la propiedad de electroneutralidad (La ley de la electro neutralidad establece que en cualquier solución iónica única el equilibrio, la suma de cargas eléctricas negativas, aniones atrae una suma igual de cargas eléctricas positivas, cationes del agua (Li, Zhang & Song, 2015).

### 3.1.4. ELEMENTOS TRAZA (ET)

Es muy importante recalcar que los elementos traza tales como el Cd, As, Hg, Pb entre otros al estar presentes en bajas concentraciones deben ser analizados por equipos altamente sensibles con Límites de Detección (LD) bajos así como también realizar una adecuada toma de muestras para evitar la contaminación de las mismas.

Para la evaluación de los resultados de los elementos traza de la base de datos facilitada por el VRHR se tomó la tarea de encontrar las hojas de resultados del laboratorio en el que se evidencia que existen 2 diferentes técnicas analíticas utilizadas para la deteminación de elementos traza.

- AR-MS
- ICP – MS

Report: A19 14984 **spectro lab** Final R  
**INFORME**  
 Servicios Analíticos - Laboratorio Químico  
 Unidad Descentralizada - Universidad Técnica de Oruro

Procedencia: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA  
 SEDIMENTOS DE RIO SUCHES

Analyte Symbol	Ba	La	Ce	Cd
Unit Symbol	ppm	ppm	ppm	ppm
Detection Limit	0,5	0,5	0,01	0,01
Analysis Method	AR-MS	AR-MS	AR-MS	AR-MS
RSUCH-01	66,2	35,1	79	0,01
RSUCH-02	64,2	52,5	118	< 0-01
RSUCH-03	126	22,6	51,1	0,18
RSUCH-04	153	22,8	51,9	0,13
RSUCH-05	152	19,6	42,8	0,1
RSUCH-06	152	14,7	33,4	0,09
RSUCH-07	239	14,7	33,2	0,09
RSUCH-08	200	13,1	30	0,05
RSUCH-09	113	12,5	28,3	0,07
RSUCH-10	111	13,3	30	0,03
RSUCH-11	153	16,4	36,9	0,07

Figura 146. Determinación de Elementos Traza por AR -MS Fuente: VRHR.

Report: A19 14990 **spectro lab** INF  
 Servicios Analíticos - Laboratorio Químico  
 Unidad Descentralizada - Universidad Técnica de Oruro

Procedencia: MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUAS

Analyte Symbol	Mo	Ag	Cd
Unit Symbol	mg/L	mg/L	mg/L
Detection Limit	0,0001	0,0002	0,00001
Analysis Method	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
RSUCH-01	-0,0001	-0,0002	0,00002
RSUCH-02	-0,0001	-0,0002	0,00005
RSUCH-03	0,0002	-0,0004	0,00094
RSUCH-04	0,0002	-0,0002	0,00002
RSUCH-05	0,0003	-0,0002	0,00001
RSUCH-06	0,0003	-0,0002	0,00002
RSUCH-07	0,0003	-0,0002	0,00002
RSUCH-08	0,0010	-0,0004	0,00006
RSUCH-09	0,0004	-0,0002	0,00002
RSUCH-10	0,0005	-0,0002	-0,00001
RSUCH-11	0,0004	-0,0002	0,00001

Dirección: Ciudadela Universitaria  
 Zona Sud: Final Av. Dehene, Bloque Metalurgia  
 Casilla 252

e-mail: gen  
 Página Web: http://www  
 www

Figura 147. Determinación de Elementos Traza por ICP -MS Fuente: VRHR

La técnica analítica ICP – MS es más sensible para la determinación de los elementos traza presenta LD bajos a comparación de la AR-MS.

Tabla 23. Límites de detección LD evaluados de las hojas de resultados de laboratorio.

PARÁMETRO	LD AR-MS	UNIT	LD ICP-MS	UNIT
As	0.1 mg/L		0.00003 mg/L	
Al	0.01 %		0.002 mg/L	
Sb	0.02 mg/L		0.00001 mg/L	
Ba	0.5 mg/L		0.0001 mg/L	
Cd	0.01 mg/L		0.00001 mg/L	
Cu	0.2 mg/L		0.0002 mg/L	
Cr	1 mg/L		0.0005 mg/L	

Tomando en cuenta como ejemplo del parámetro Cd se evidencia que el valor máximo admisible para cuerpos receptores es de 0.005 mg/L según el RMCH. También es claro que si se utiliza la técnica AR-MS para su determinación el LD no es lo suficientemente el recomendado por lo que no se puede obtener resultados confiables con la sensibilidad necesaria para la determinación de elementos traza. Por lo que es de suma importancia reportar los LD y diferenciarlos en cada uno de los parámetros en la base de datos para no confundirlos con valores medidos que denoten contaminación cuando no la existe.

Tabla 24. Valores máximos admisibles de Elementos traza en cuerpos receptores- RMCH Fuente: VRHR

VALORES MAXIMOS ADMISIBLES DE PARAMETROS EN CUERPOS RECEPTORES												
No	Parámetros	Unidad	Carácter	Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Clase "E"	Clase "F"	Clase "G"	Clase "H"	Clase "I"
Constituyentes inorgánicos metálicos												
11	Aluminio (c/Al)	mg/L		0	0.2	>0,2	0.5	>0,5	1.0	-	-	>1
12	Antimonio (c/Sb)	mg/L	No	0	0.01	-	-	-	-	-	-	>0,01
13	Arsenico total (c/A)	mg/L	Si	0	0.05	-	-	-	-	>0,05	0.1	>0,1
14	Bario (c/Ba)	mg/L	No	0	1.0	-	-	>1,0	2.0	>2,0	5.0	>5,0
15	Berilio (c/Be)	mg/L	Si	0	0.001	-	-	-	-	-	-	>0,001
16	Boro (c/B)	mg/L		0	1.0	-	-	-	-	-	-	>1,0
17	Caleio (c/Cd)	mg/L	No	0	200	>200	300	-	-	>300	400	>400
18	Cadmio (c/Cd)	mg/L	No	0	0.005	-	-	-	-	-	-	>0,005
19	Cobre (c/Cu)	mg/L	No	0	0.05	>0,05	1.0	-	-	-	-	>1,0
20	Cobalto (c/Co)	mg/L		0	0.1	>0,1	0.2	-	-	-	-	>0,2
21	Cromo Hexavalent	mg/L	Si	0	0.05	-	-	-	-	-	-	>0,05
22	Cromo Trivalente (c)	mg/L	No	0	0.12	>0,12	0.6	-	-	>0,6	1.1	>1,1
23	Estaño (c/Sn)	mg/L	No	0	2.0	-	-	-	-	-	-	>2,0
24	Hierro Soluble (c/Fe)	mg/L	No	0	0.3	-	-	>0,3	1.0	-	-	>1,0
25	Litio (c/Li)	mg/L		0	2.5	-	-	-	-	>2,5	5	>5
26	Magnesio (c/Mg)	mg/L	No	0	100	-	-	>100	150	-	-	>150
27	Manganeso (c/Mn)	mg/L	No	0	0.5	>0,5	1.0	-	-	-	-	>1,0
28	Mercurio (c/Hg)	mg/L	No	0	0.001	-	-	-	-	-	-	>0,001

## 4. PROTOCOLO PARA LA IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE DATOS ANORMALES, ANÓMALOS Y ATÍPICOS

Diseñar y administrar una base de datos de calidad de agua es una tarea ardua. Invertir tiempo en diseñar una base y arreglar los datos se traduce en una significativa ganancia de tiempo al momento de analizarlos.

Una base de datos bien diseñada es información valiosa que puede ser compartida internacionalmente. A continuación se presenta cada uno de los criterios que se siguieron para realizar la evaluación, depuración y complementación de información de calidad de agua del sistema hídrico TDPS – Lado BOLIVIA.

### 4.1. CLASIFICACIÓN DE VARIABLES EN EXCEL.

Las variables se clasifican siguiendo una secuencia jerárquica que inicia con los dos grupos generales:

- Época húmeda (AVENIDA según SINCA)
- Época seca (ESTIAJE según SINCA )

Una vez clasificadas por épocas y se ordenan por fechas, estos datos son ordenados temporalmente según las coordenadas geográficas, puntos de muestreo, códigos definidos en las campañas de muestreo y códigos asignados para un mejor análisis.

Se codificó provisionalmente cada una de las muestras de acuerdo con sus coordenadas geográficas porque existían puntos de muestreo con códigos diferentes pero las misma ubicación y descripción geográfica, así como también por fechas de muestreo, esto con el fin de evaluar la variación espacial y temporal de cada una de las cuencas del sistema TDPS.

Todas las variables numéricas parámetros fisicoquímicos medidos en campo y laboratorio se ordenarán simultáneamente.

### 4.2. CATEGORIZACIÓN DE LAS VARIABLES CUANTITATIVAS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE CUERPOS DE AGUA

Es esencial entender la inclusión y exclusión de categorías en las variables, en este caso cada una de las variables es un parámetro físicoquímico medido del cuerpo de agua en una determinada época, el cual es categorizado con un diferente formato de acuerdo a los valores maximos admisibles en cuerpos receptores según el RMCH.

Tabla 25. Formato utilizado para la inclusión y exclusión de los parámetros según el RMCH.

fuelle	Cuerpo receptor fuertemente contaminado ( Clase D y crítica)
fuelle	Cuerpo receptor contaminado ( Clase B y C)
fuelle	Cuerpo receptor de buena calidad ( Clase A)

### 4.3. GRÁFICOS DE TENDENCIA Y GRÁFICOS DE CORRELACIÓN

#### 4.3.1. GRÁFICOS DE TENDENCIA

Muestran una serie de valores de una o varias variables por medio de puntos que se conectan a través de una o varias líneas. Sirven para resumir una cantidad de información en un período de tiempo determinado (Vinci, 2019).

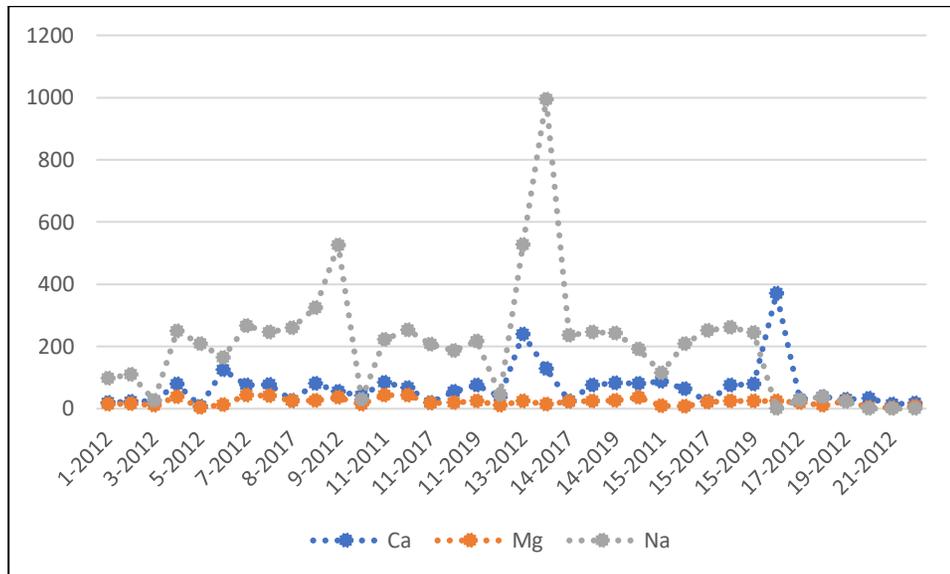


Figura 148. Ejemplo gráfico de tendencia entre Ca, Mg y Na.

#### 4.3.2. GRÁFICOS DE CORRELACIÓN

Es una herramienta gráfica que permite demostrar la relación existente entre dos clases de datos y cuantificar la intensidad de dicha relación. Se utiliza para conocer si efectivamente existe una correlación entre dos magnitudes o parámetros de un problema y, en caso positivo, de qué tipo es la correlación (ROLDÁN, 2022).

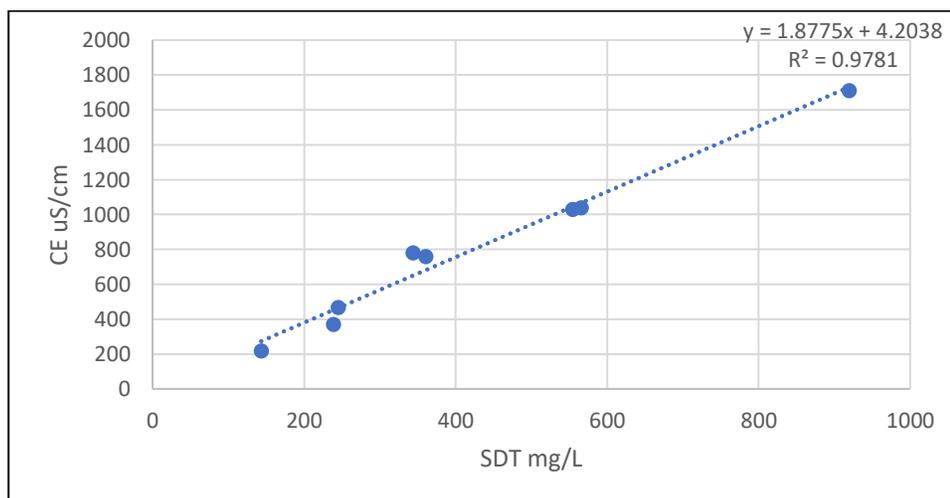


Figura 149. Ejemplo gráfico de correlación entre CE y SDT.

## 5. MAPAS TEMÁTICOS

## 2.1. CUENCA SÚCHEZ

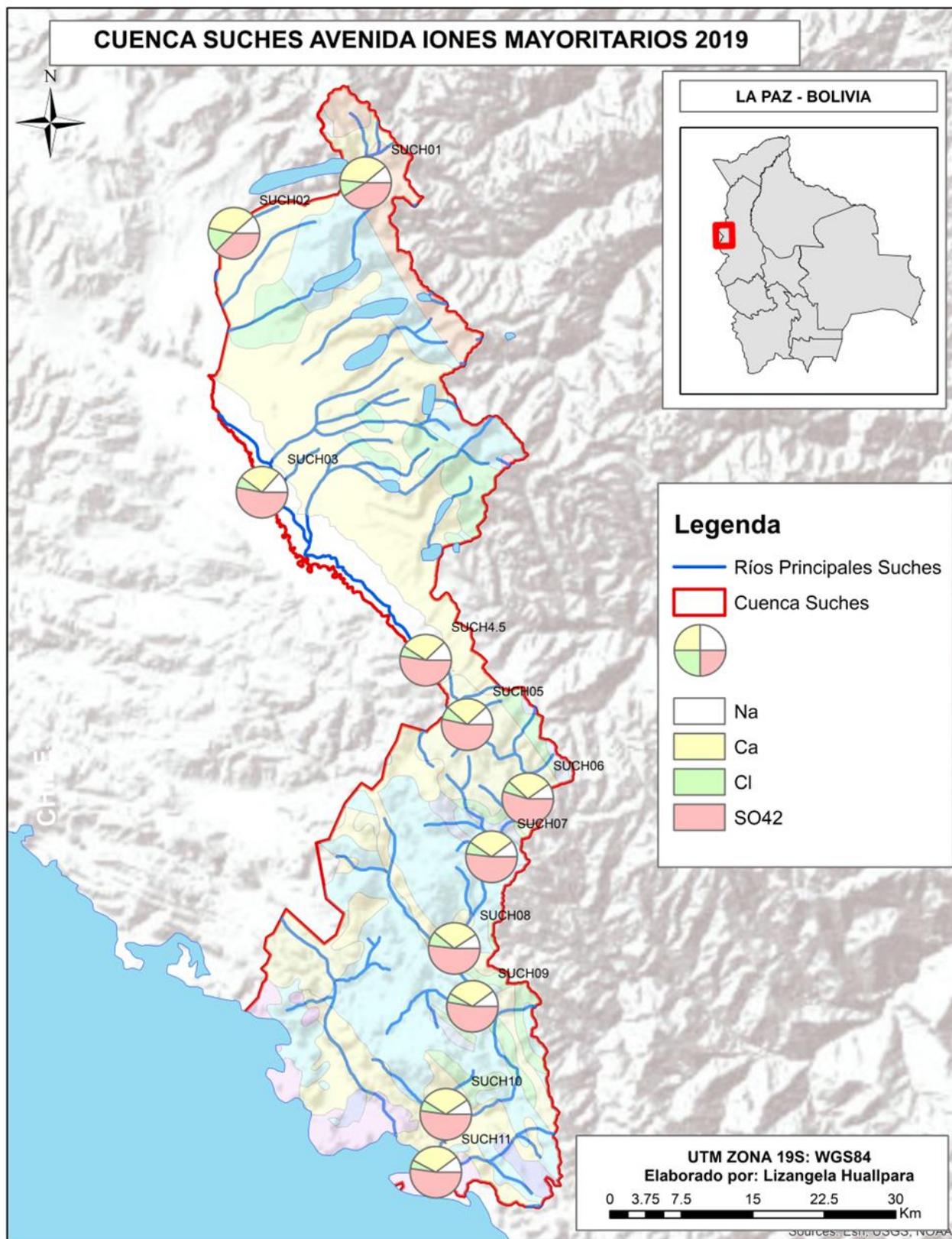


Figura 150. Variación de Iones Mayoritarios de la Cuenca Súchez – Avenida, 2019.

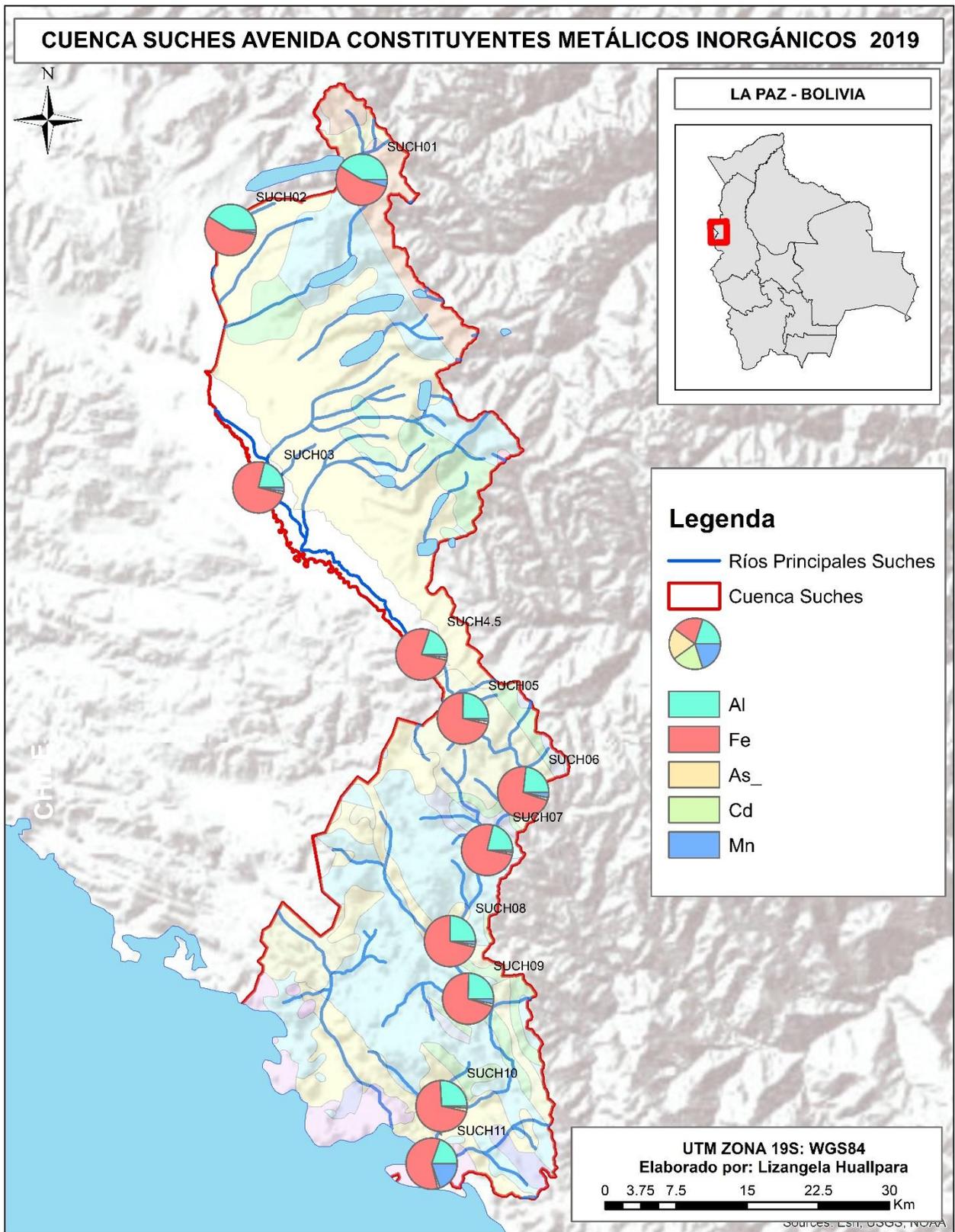


Figura 151.. Variación Variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca Súchez – Avenida, 2019.

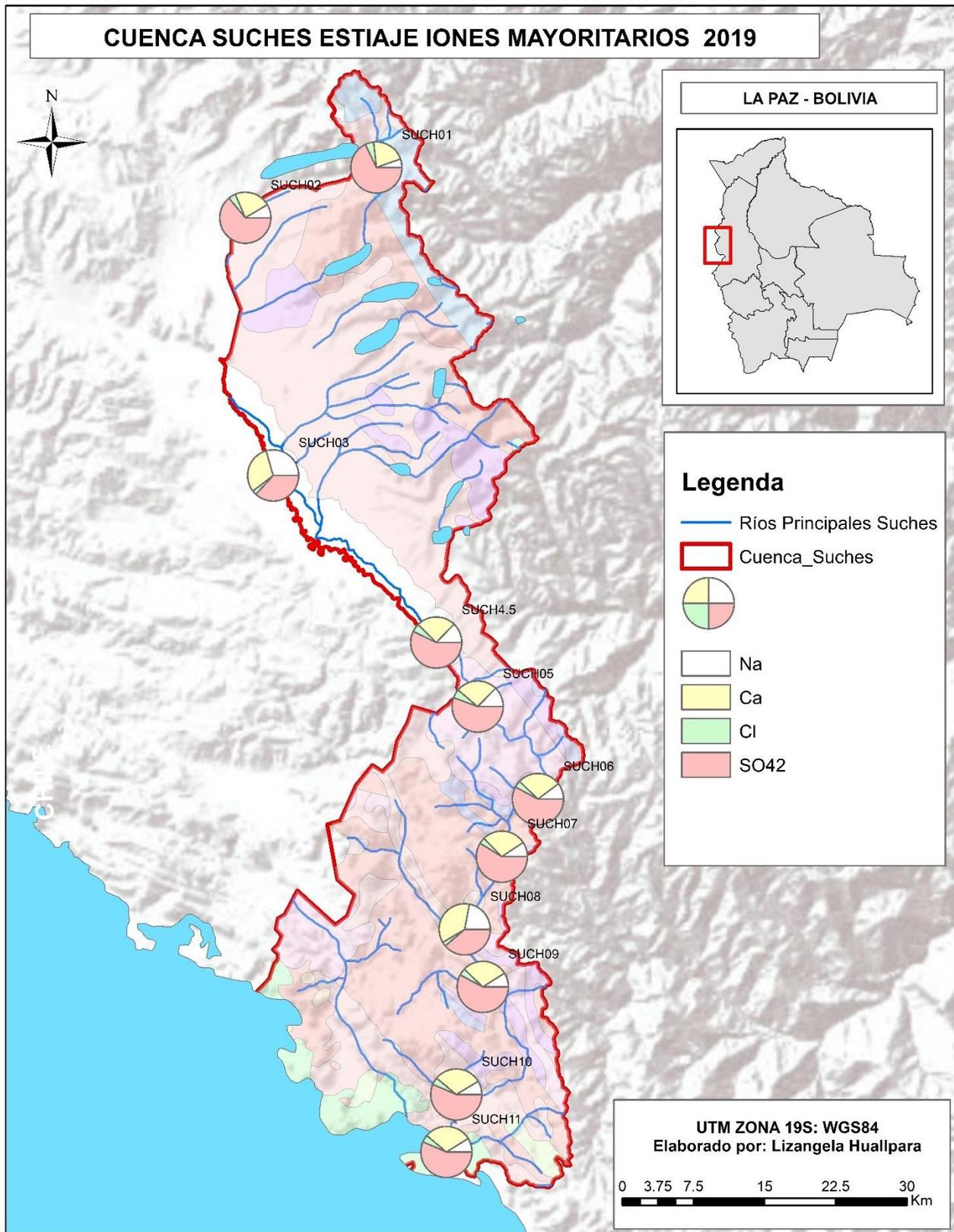


Figura 152. Variación de Iones Mayoritarios de la Cuenca Súchez – Estiaje, 2019.

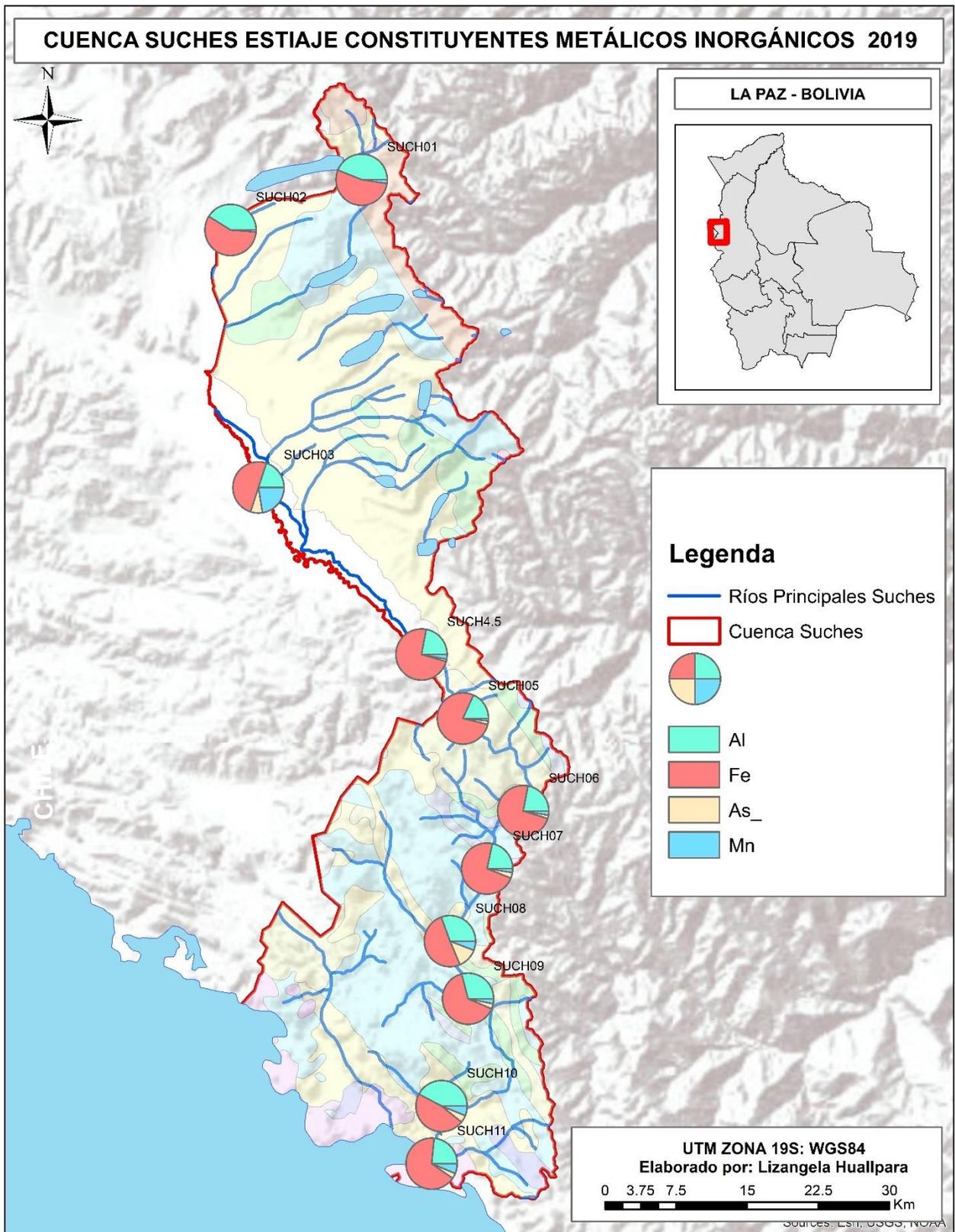


Figura 153. Variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca Súdez – Estiaje, 2019.

## 5.2. CUENCA MAURI

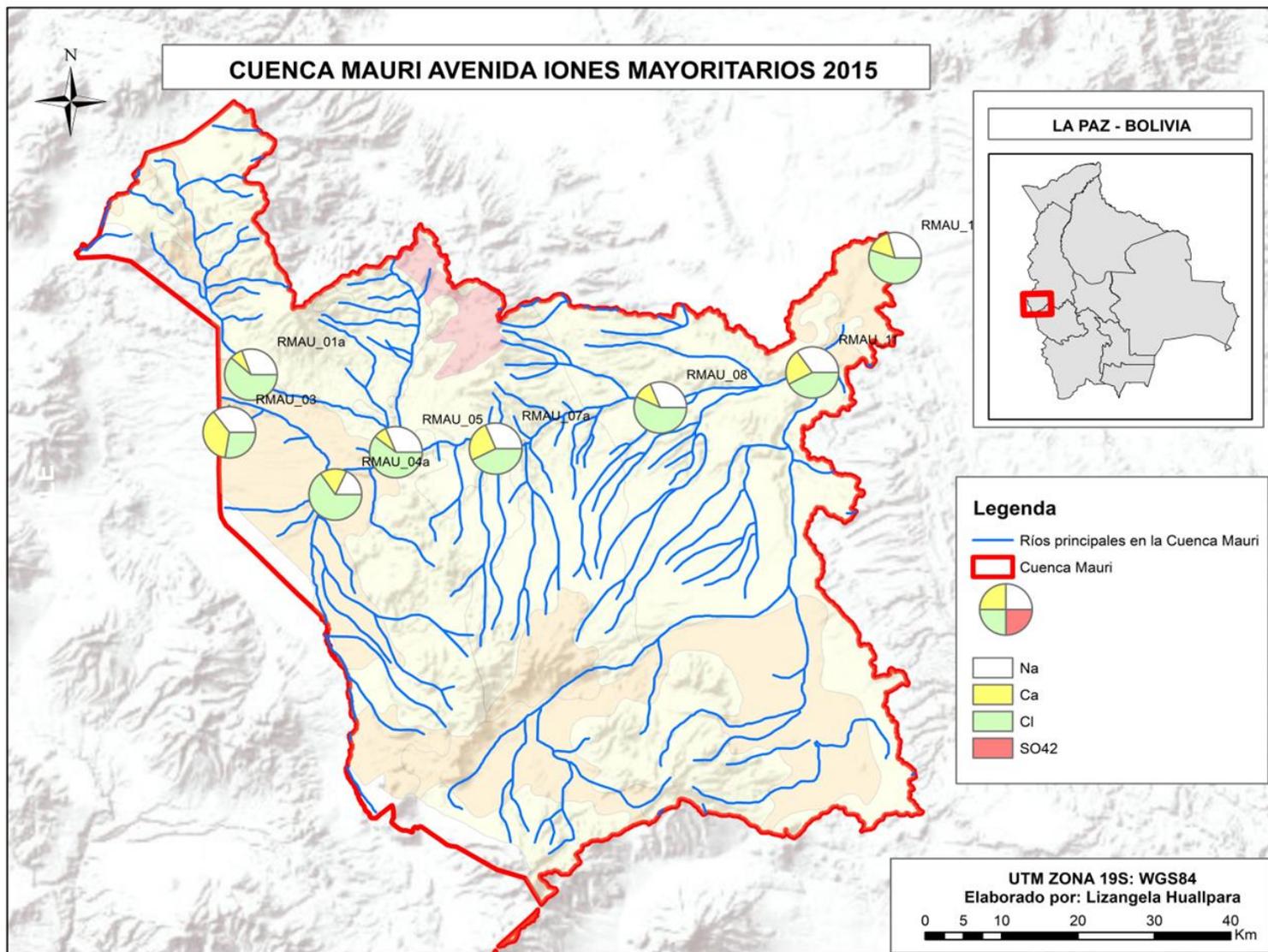


Figura 154. Variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca Mauri – Avenida, 2015.

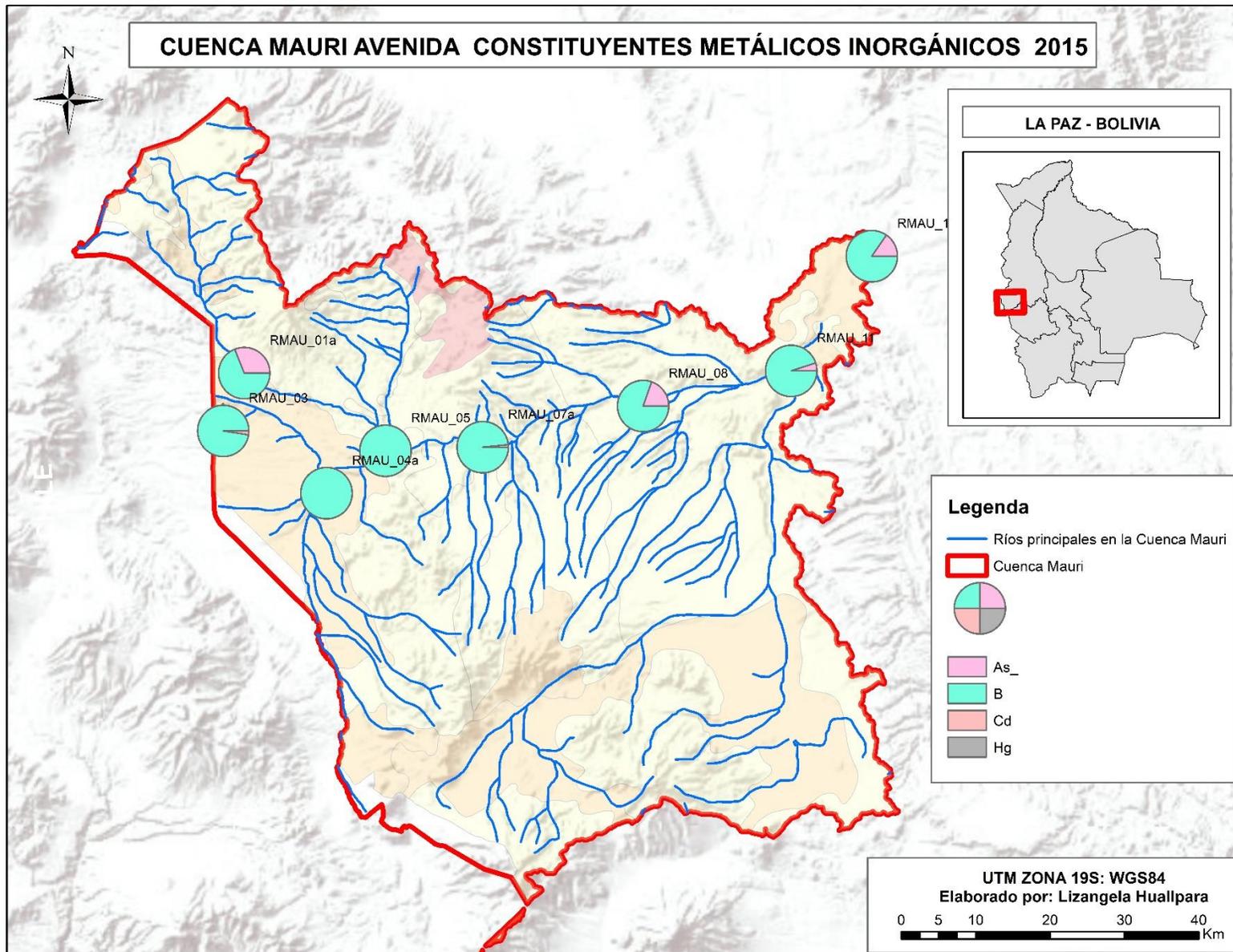


Figura 155. Variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca Mauri – Avenida, 2015.

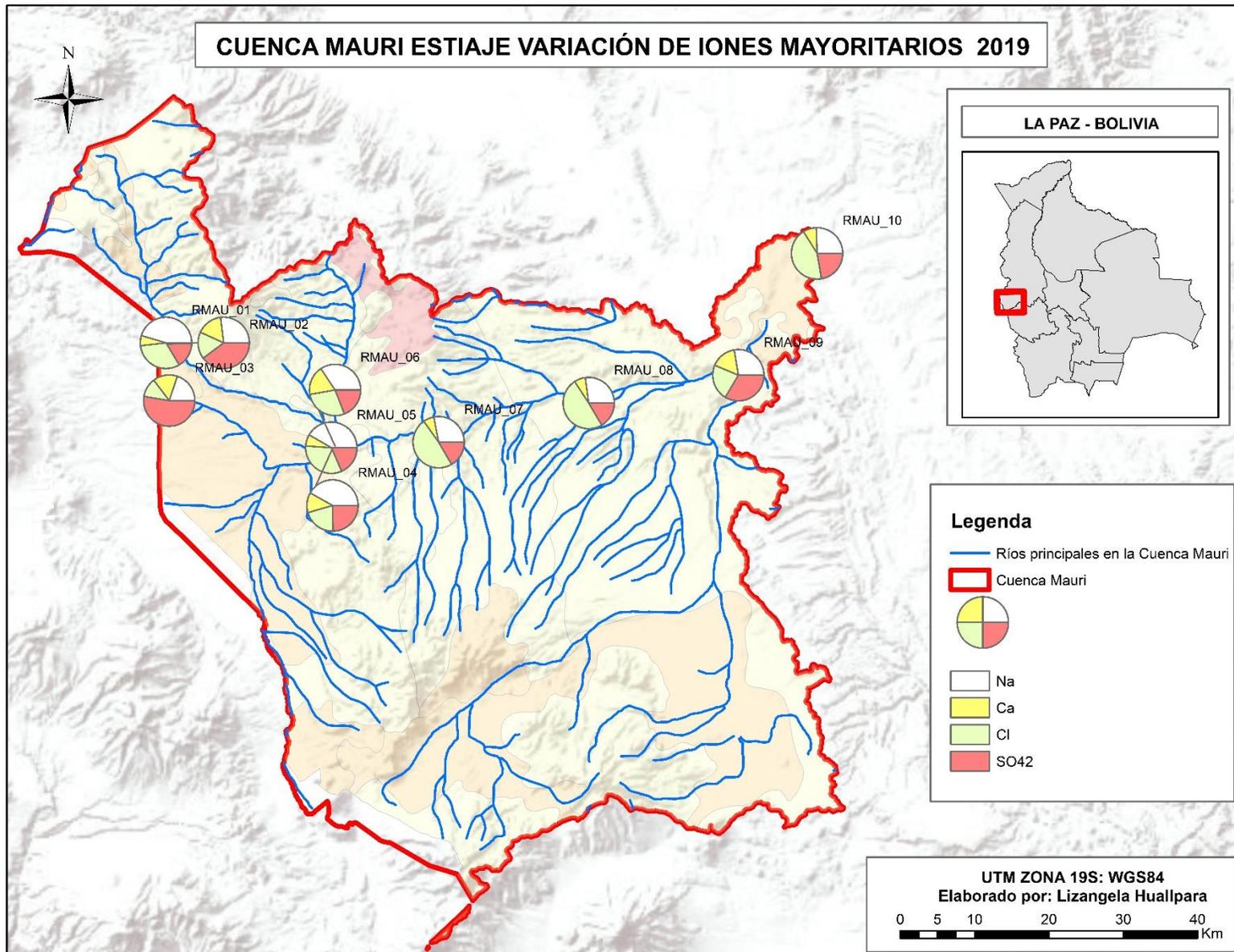


Figura 156. Variación de Iones Mayoritarios de la Cuenca Mauri – Estiaje, 2019.

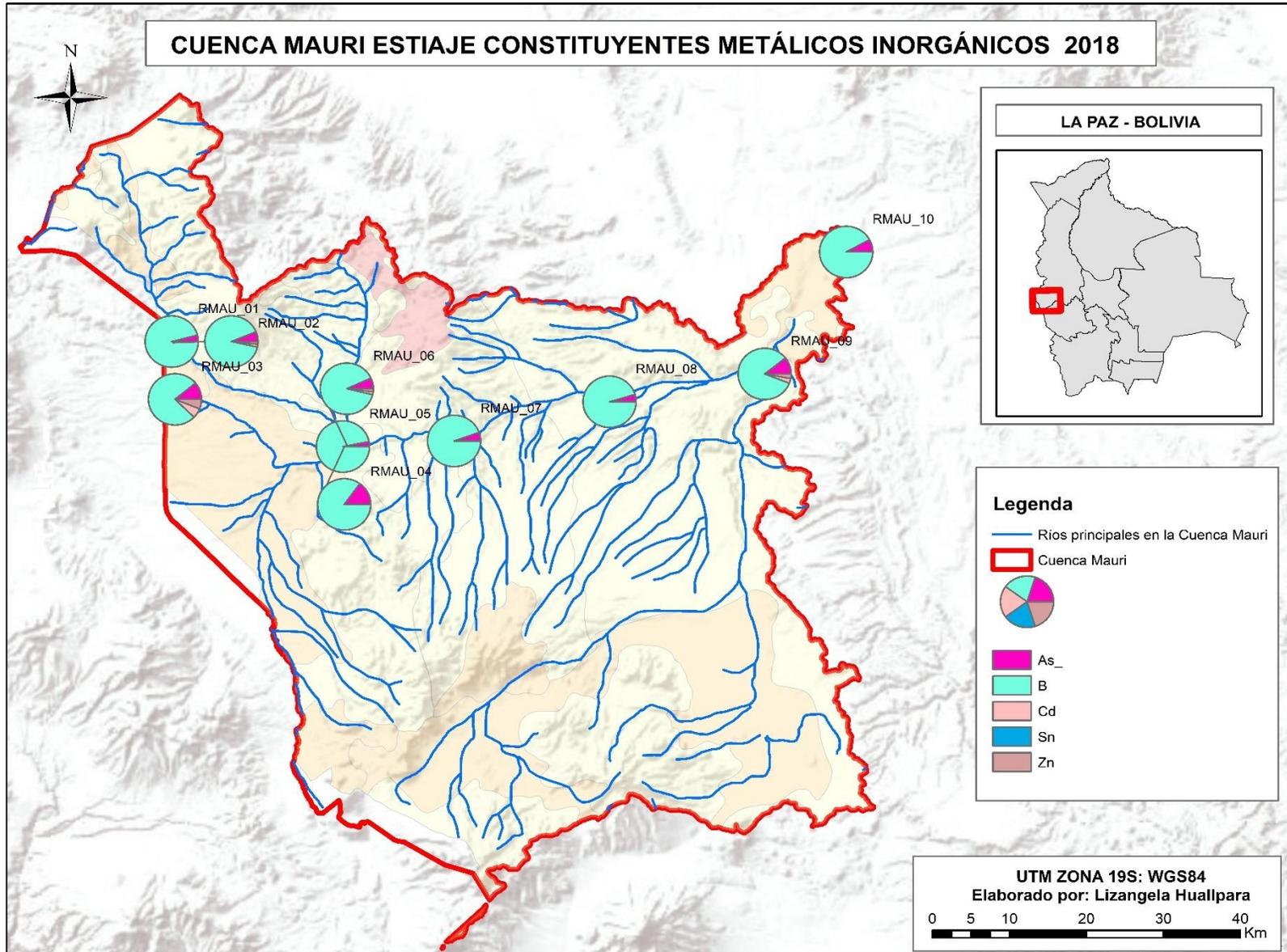


Figura 157. Variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca Mauri – Estiaje, 2018.

### 5.3. CUENCA POOPÓ

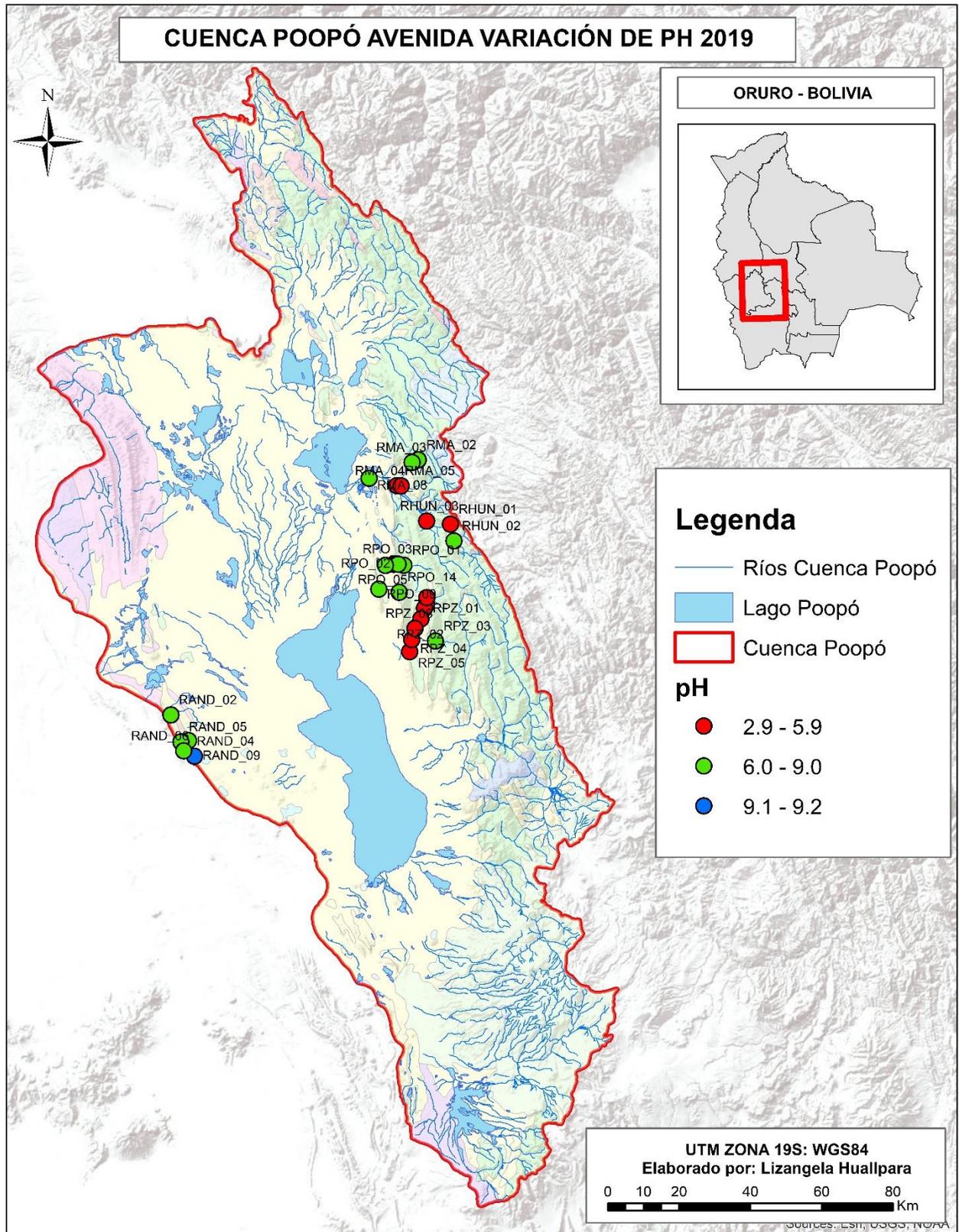


Figura 158. Variación de pH de la Cuenca Poopó – Avenida, 2019.

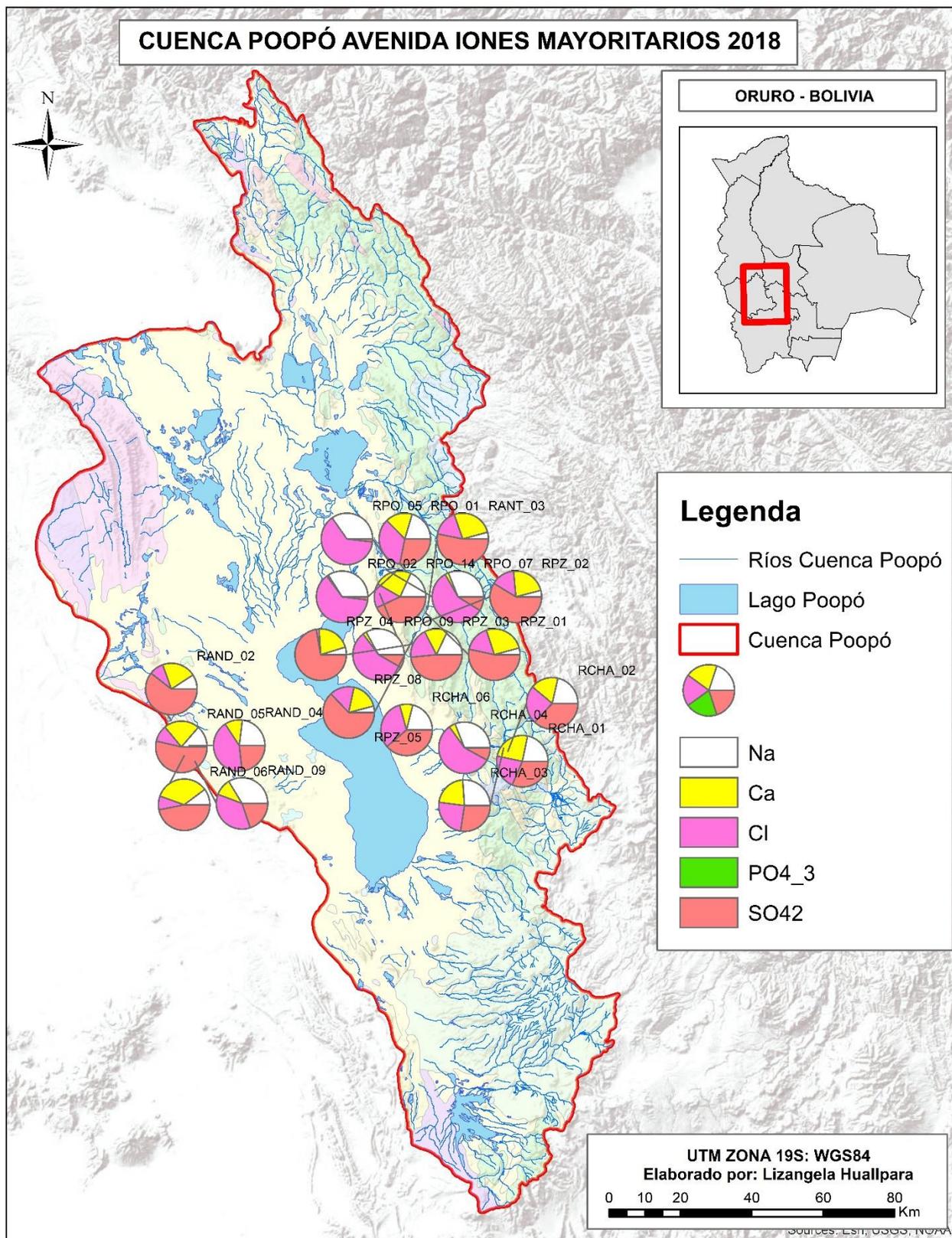


Figura 159. Variación de Iones Mayoritarios de la Cuenca Poopó–Avenida, 2018.

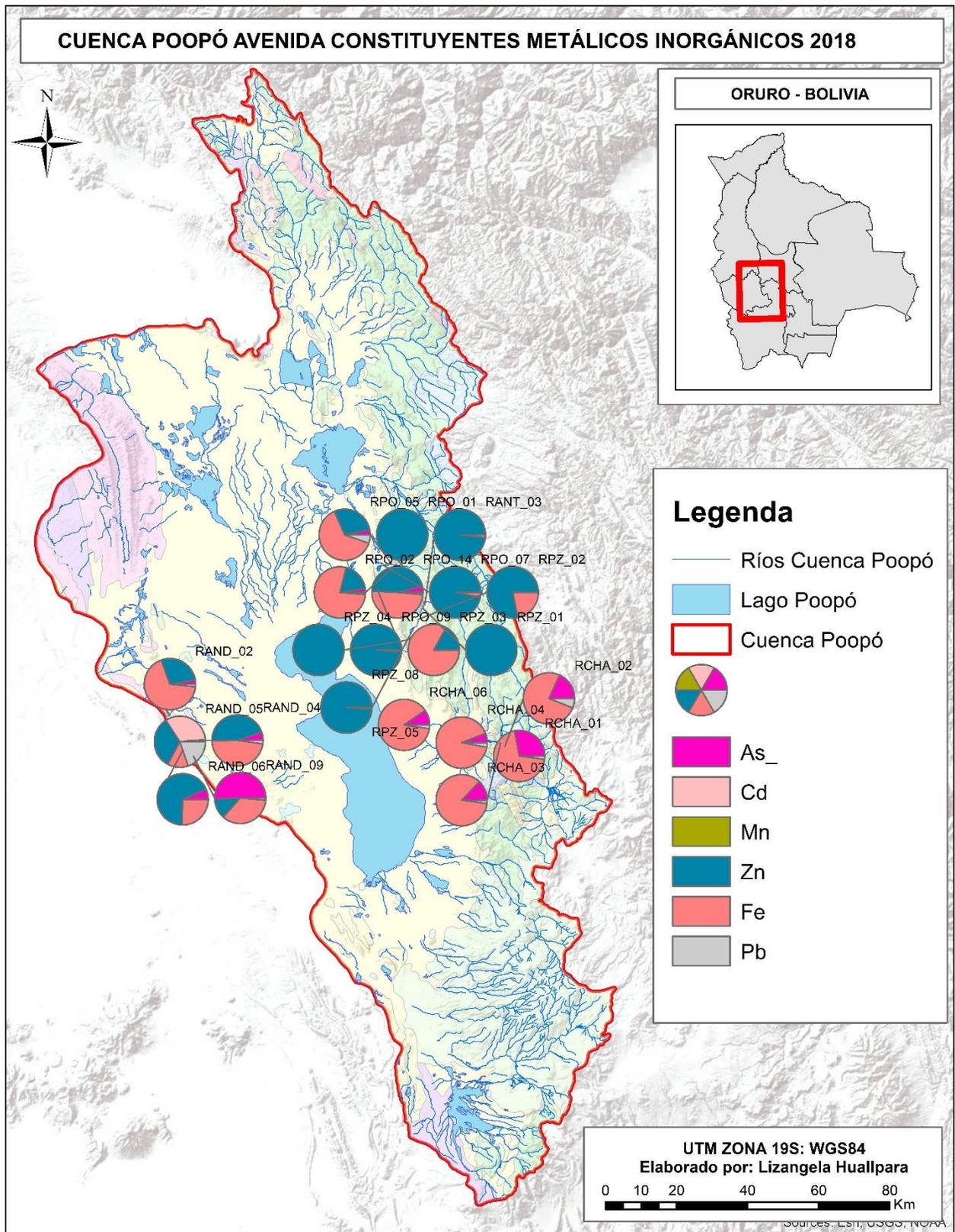


Figura 160. Variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca Poopó – Avenida, 2018.

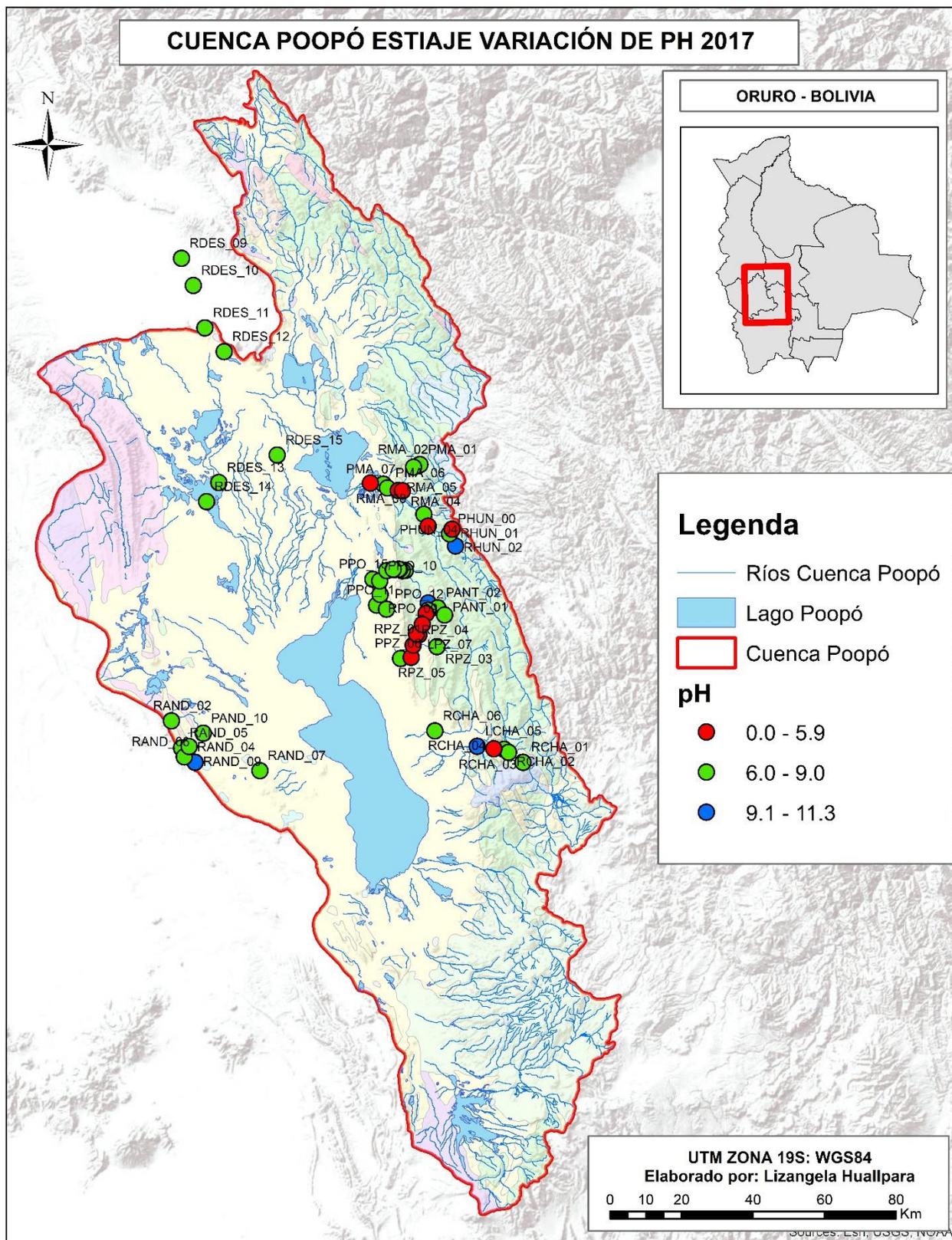


Figura 161. Variación de pH de la Cuenca Poopó – Estiaje, 2017.

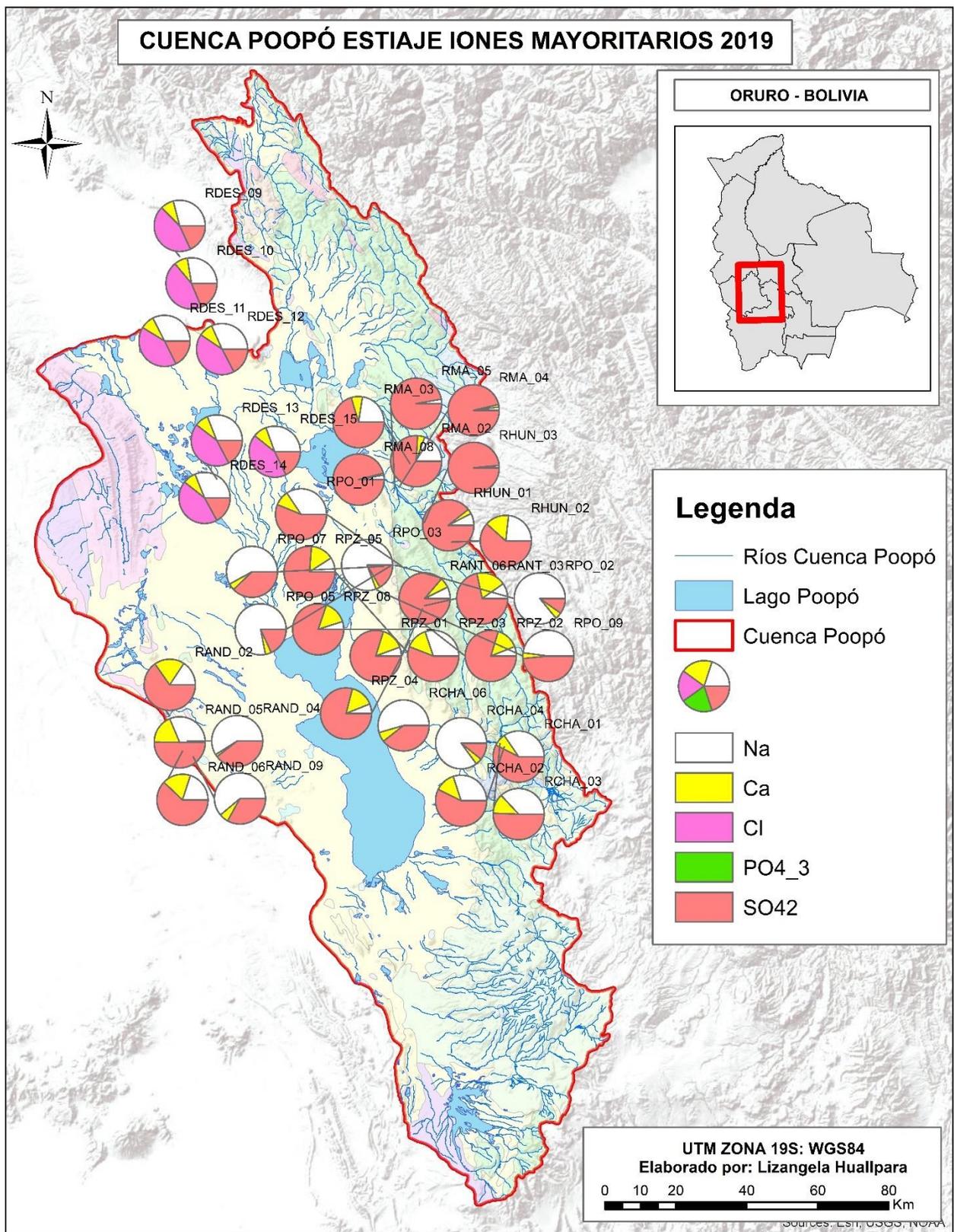


Figura 162. Variación de Iones Mayoritarios de la Cuenca Poopó– Estiaje, 2019.

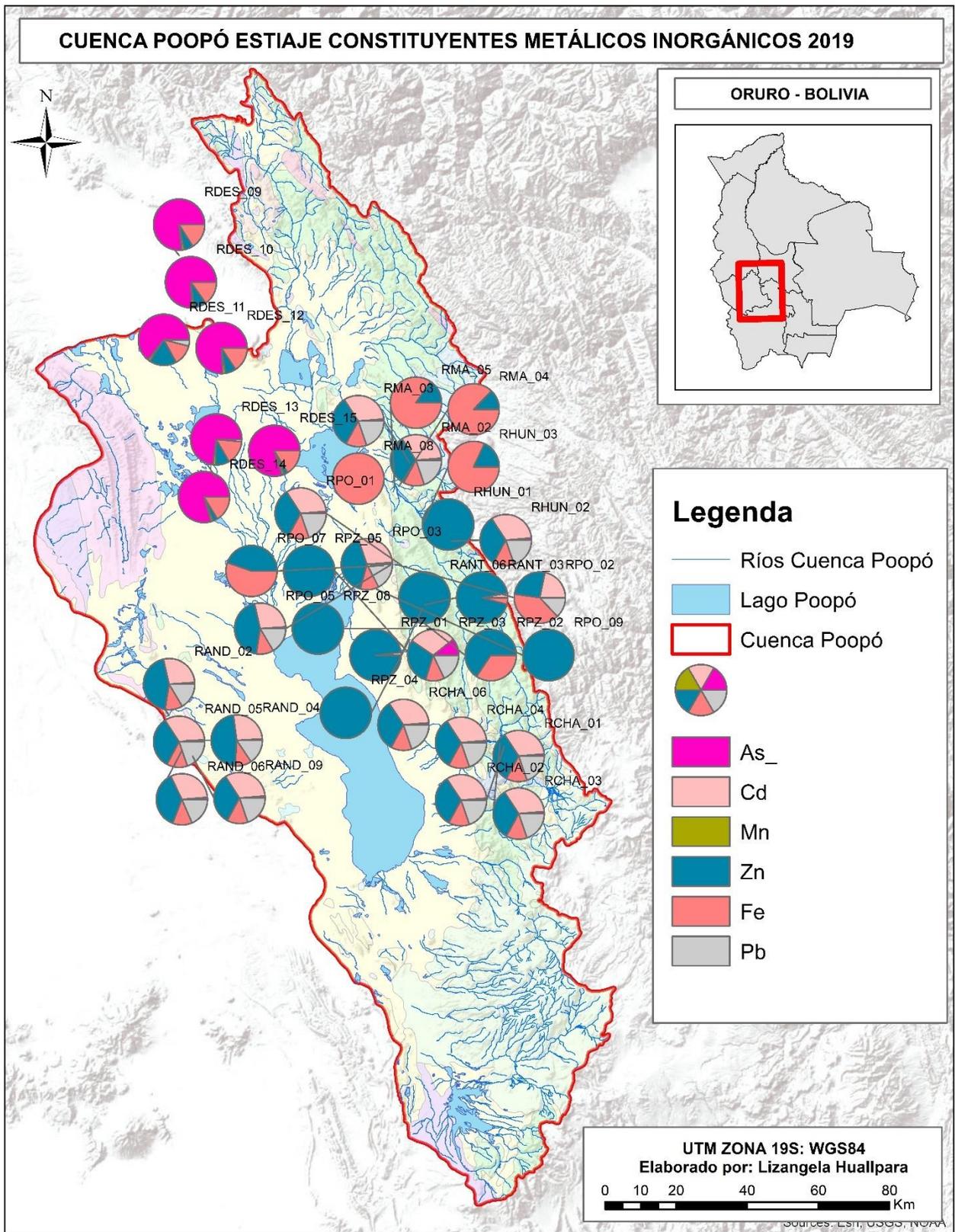


Figura 163. Variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca Poopó – Estiaje, 2019.

## 5.4. CUENCA ALTO DESAGUADERO

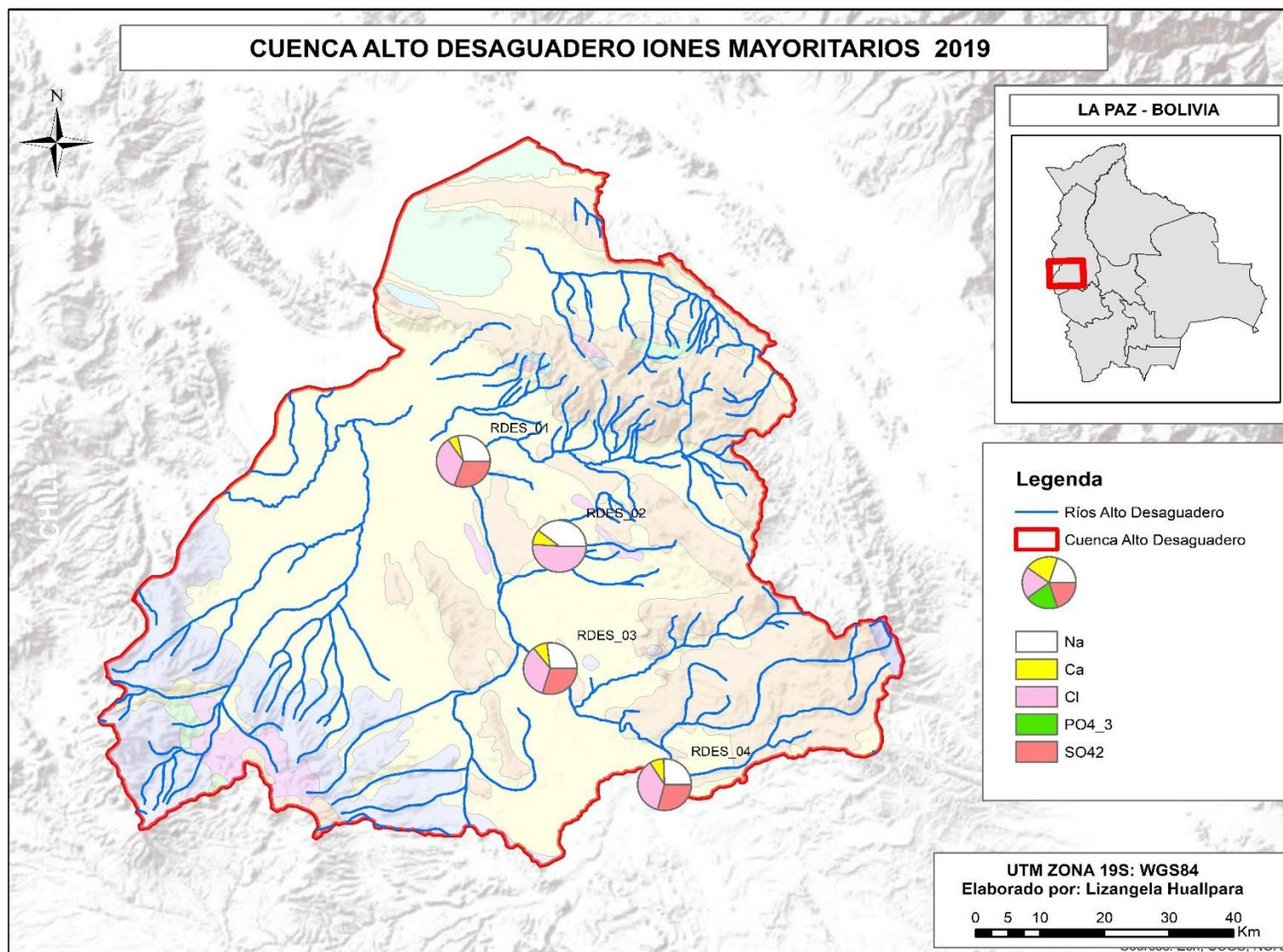


Figura 164. Variación de Iones Mayoritarios de la Cuenca Alto Desaguadero– Estiaje, 2019.

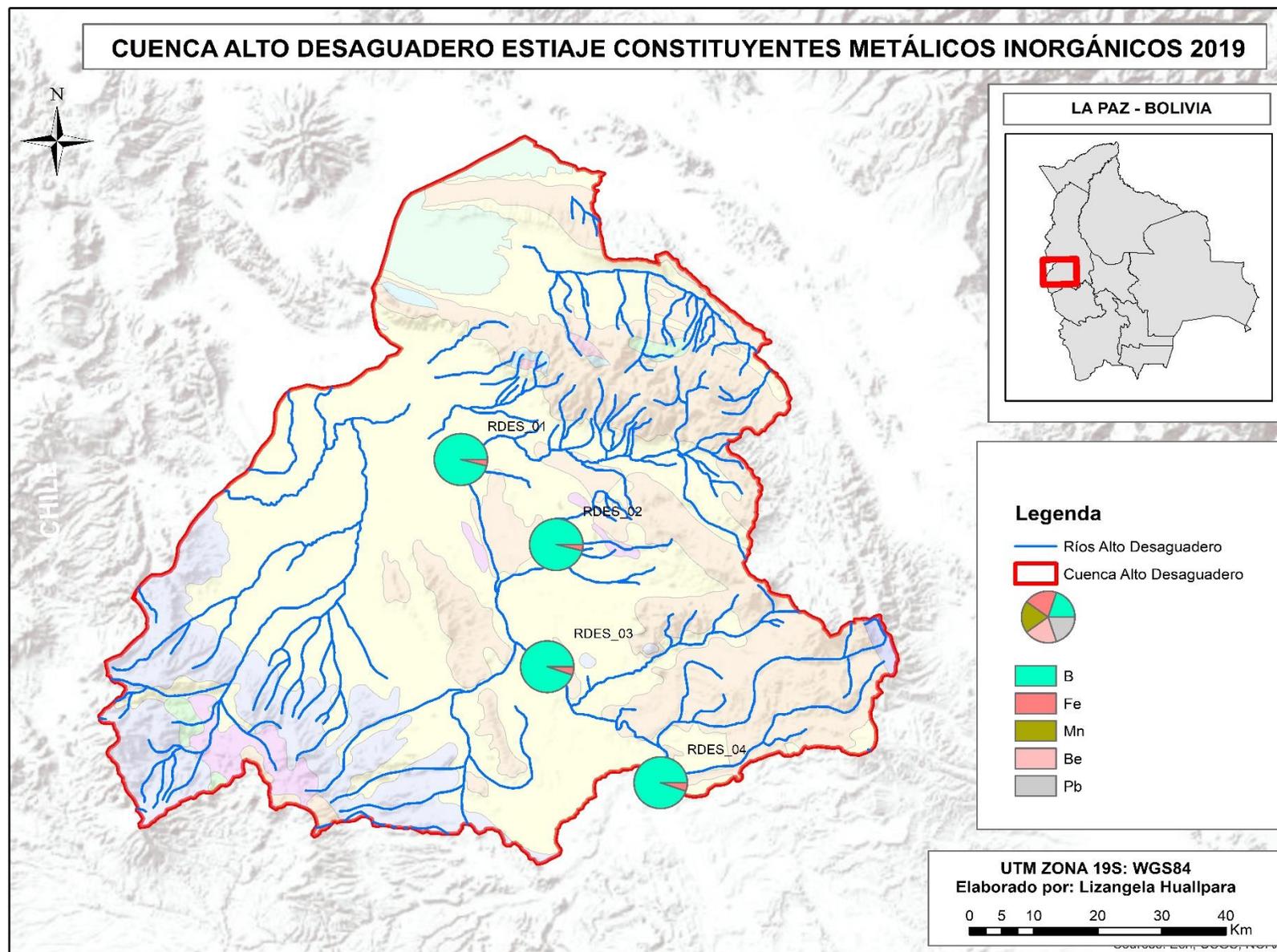


Figura 165. Variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca Alto Desaguadero – Estiaje, 2019.

## 5.5. CUENCA MEDIO DESAGUADERO

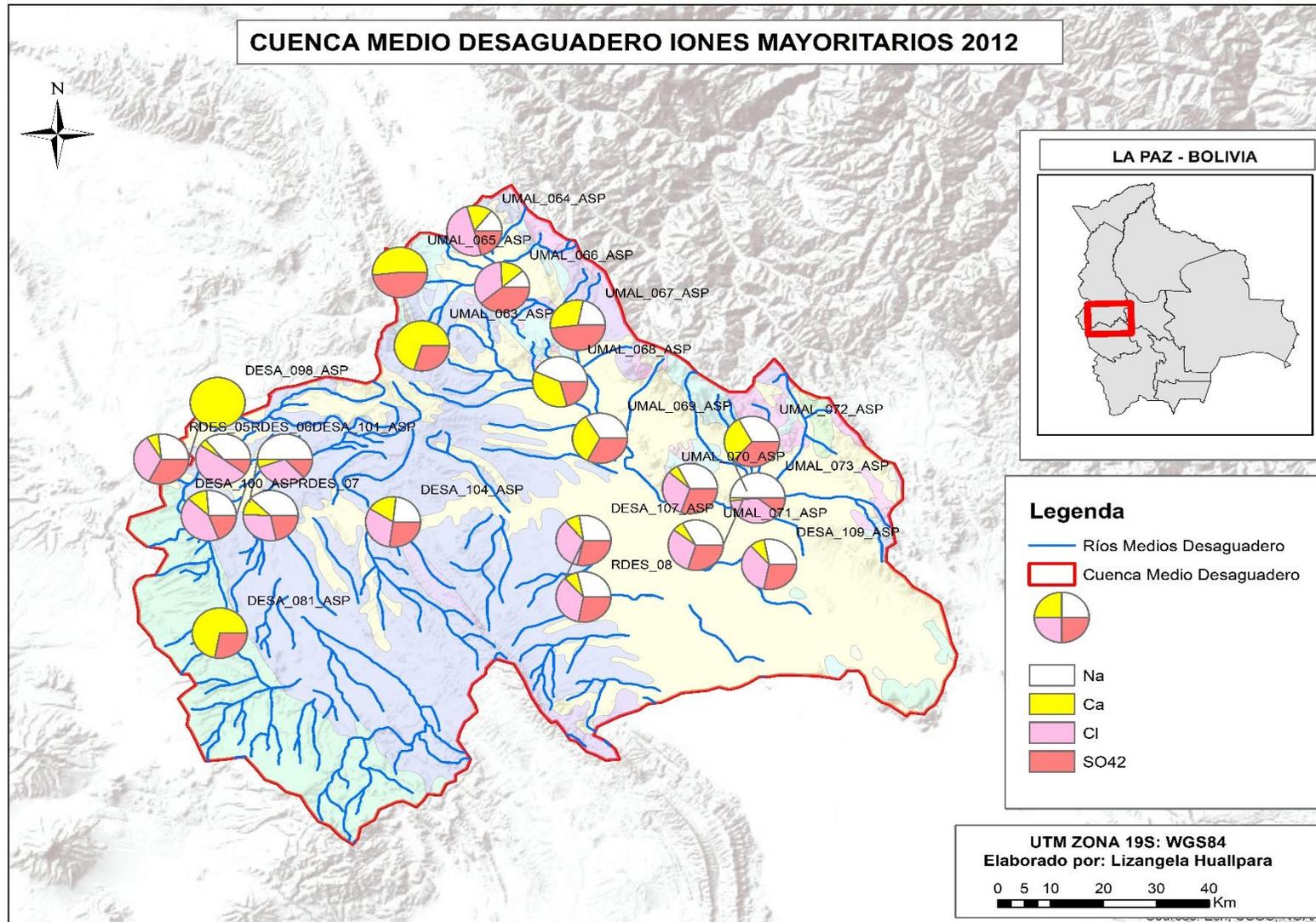


Figura 166. Variación de Iones Mayoritarios de la Cuenca Medio Desaguadero– Estiaje, 2012.

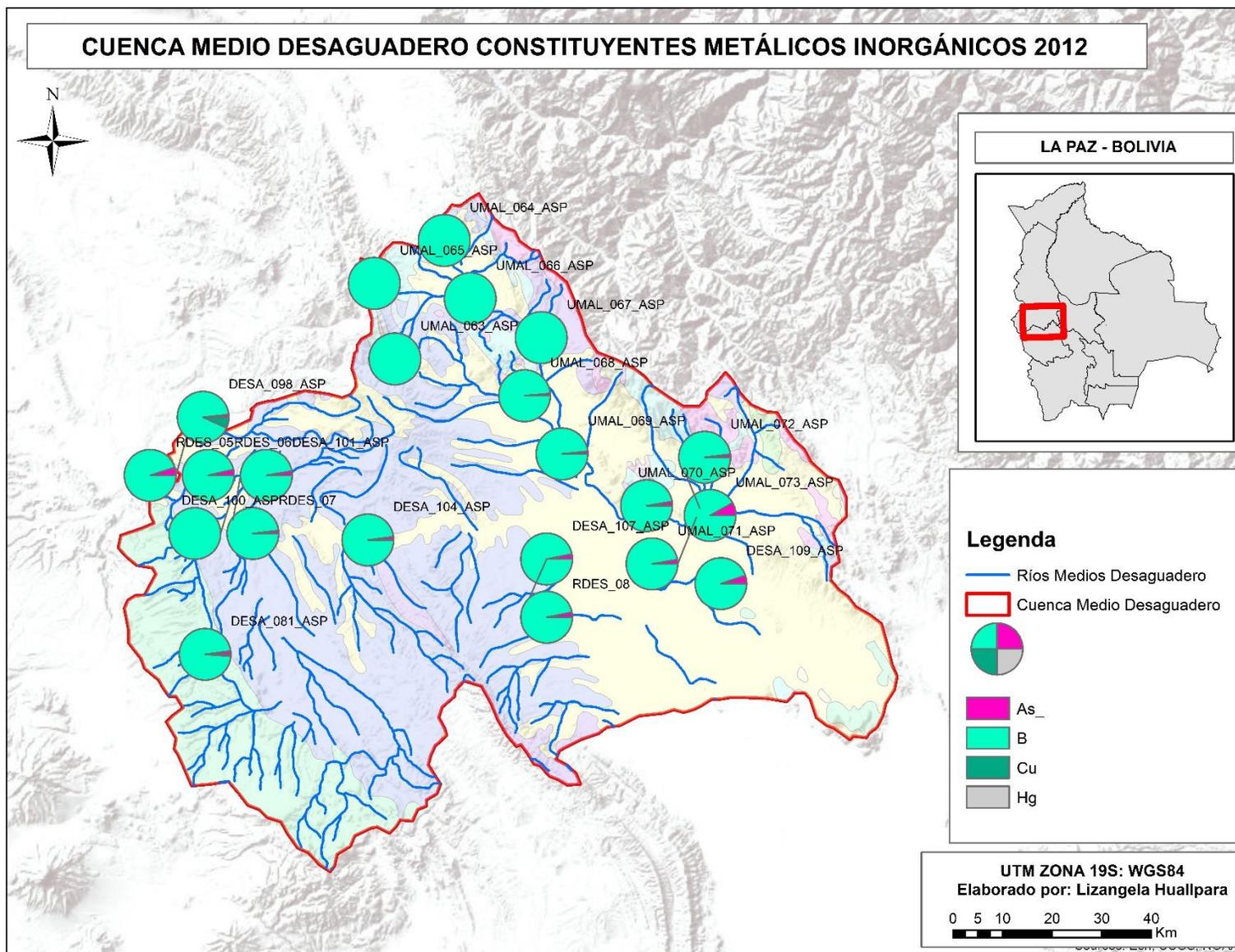


Figura 167. Variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca Medio Desaguadero – Estiaje, 2012.

## 5.6. CUENCA KATARI

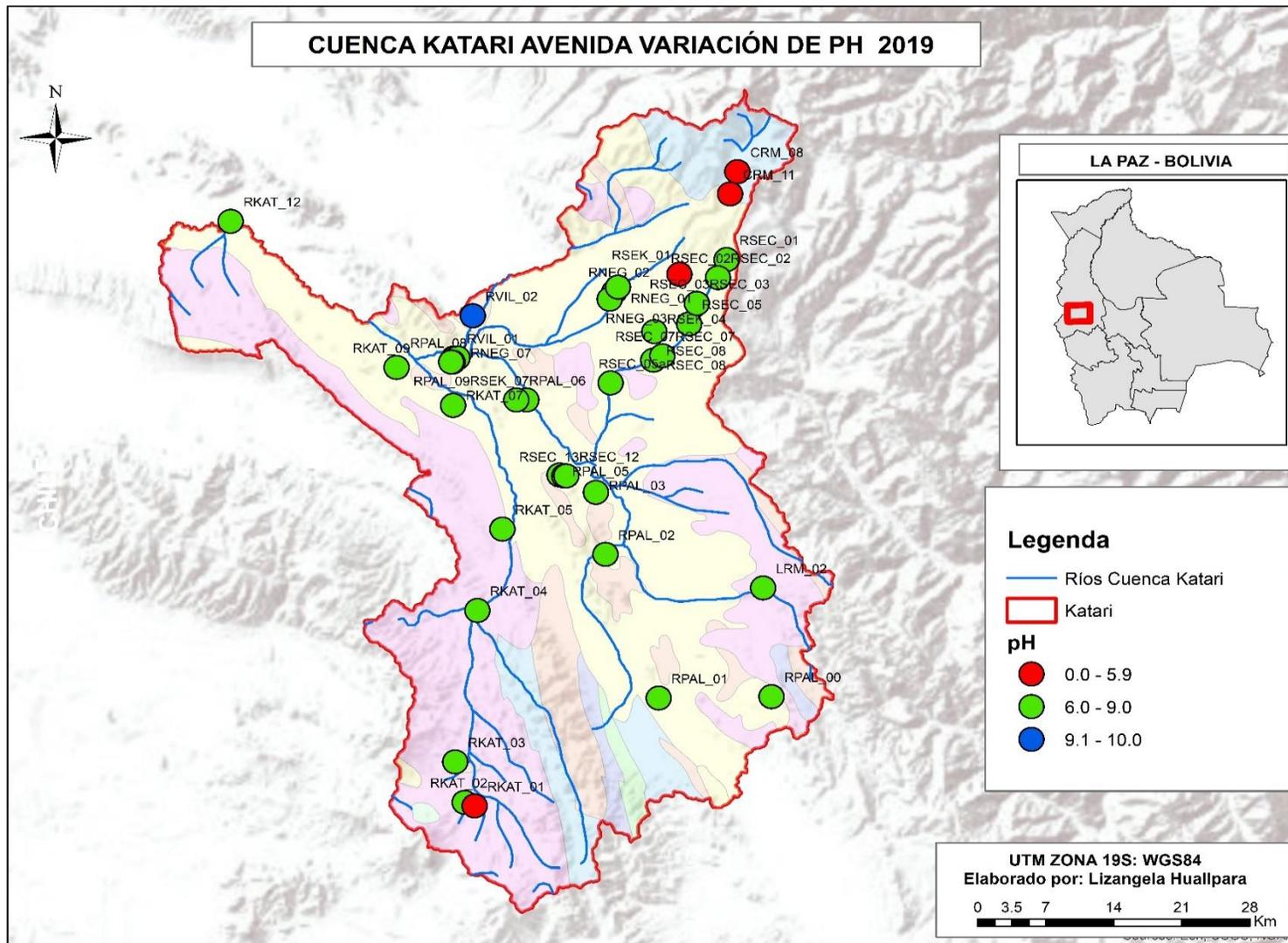


Figura 168. Variación de pH de la Cuenca Katari – Avenida, 2019.

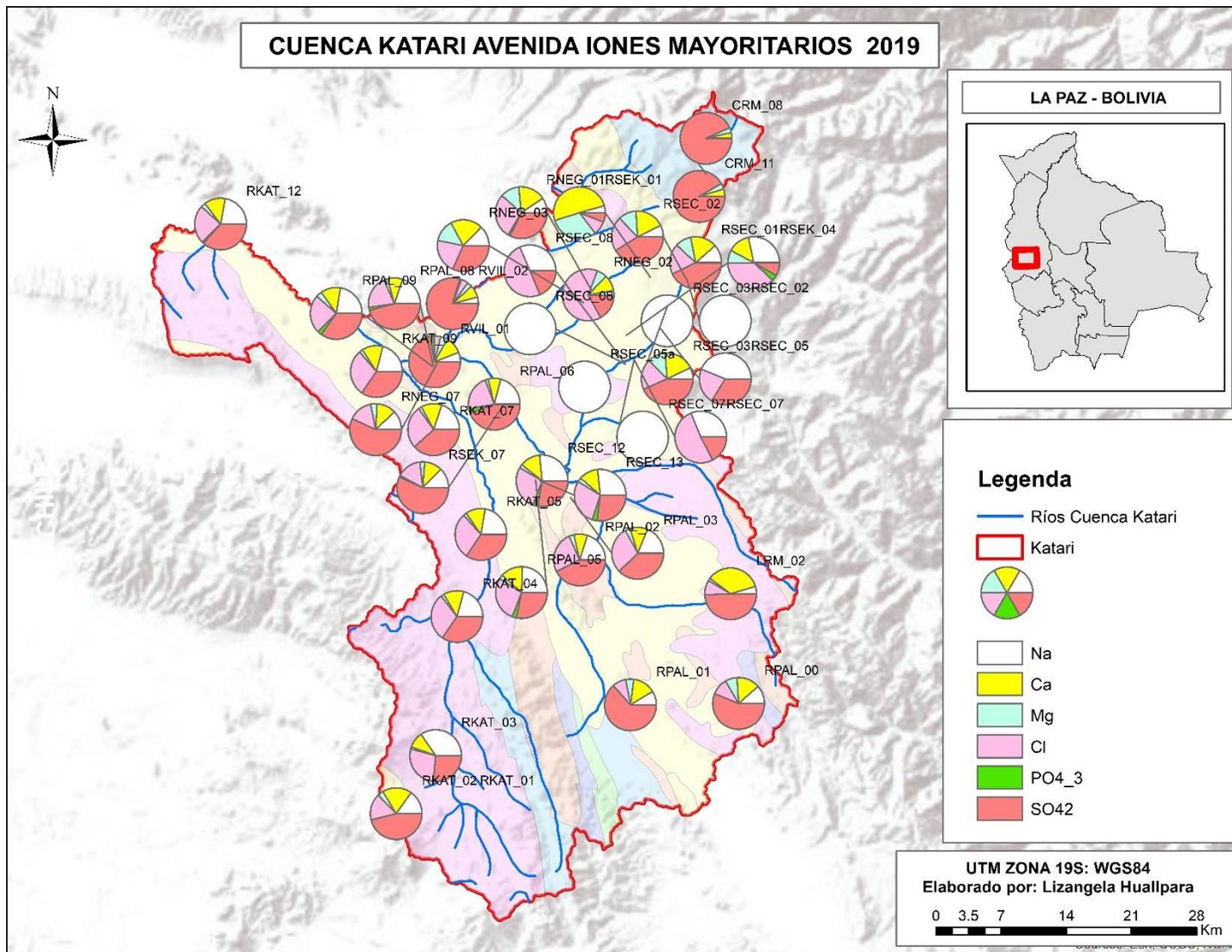


Figura 169. Variación de Iones Mayoritarios de la Cuenca Katari– Avenida, 2019.

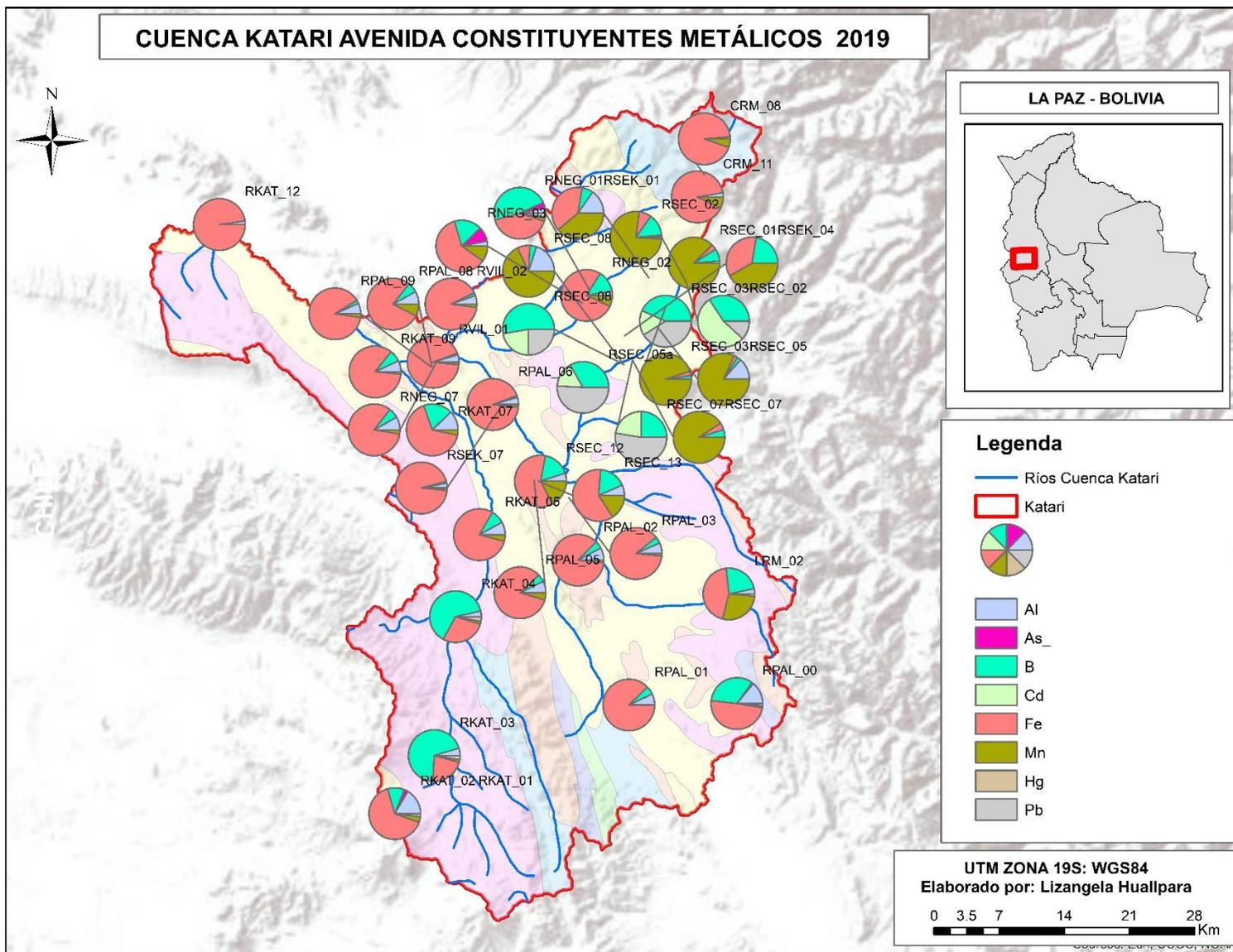


Figura 170. Variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca Katari – Avenida, 2019.

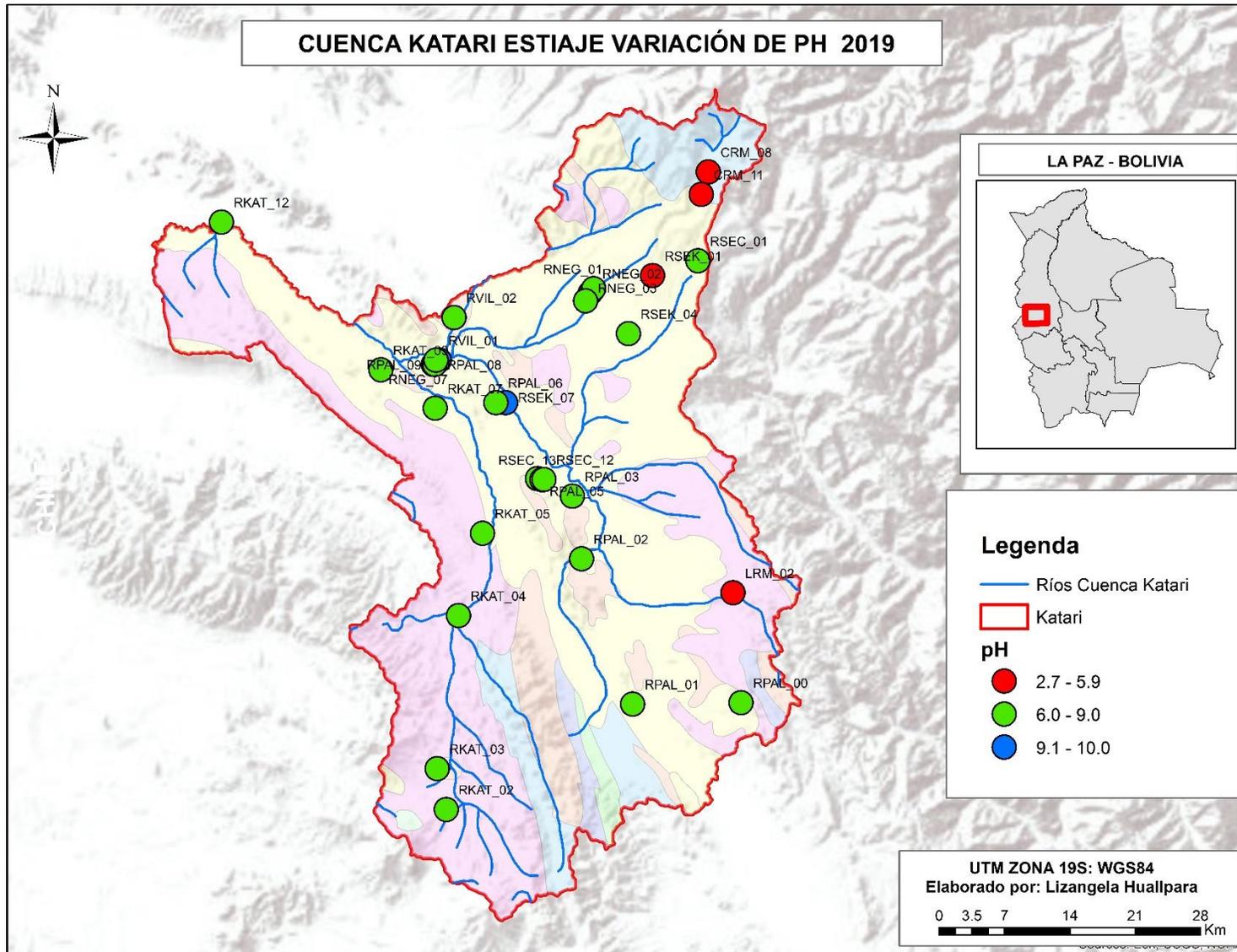


Figura 171. Variación de pH de la Cuenca Katari – Estiaje, 2019.

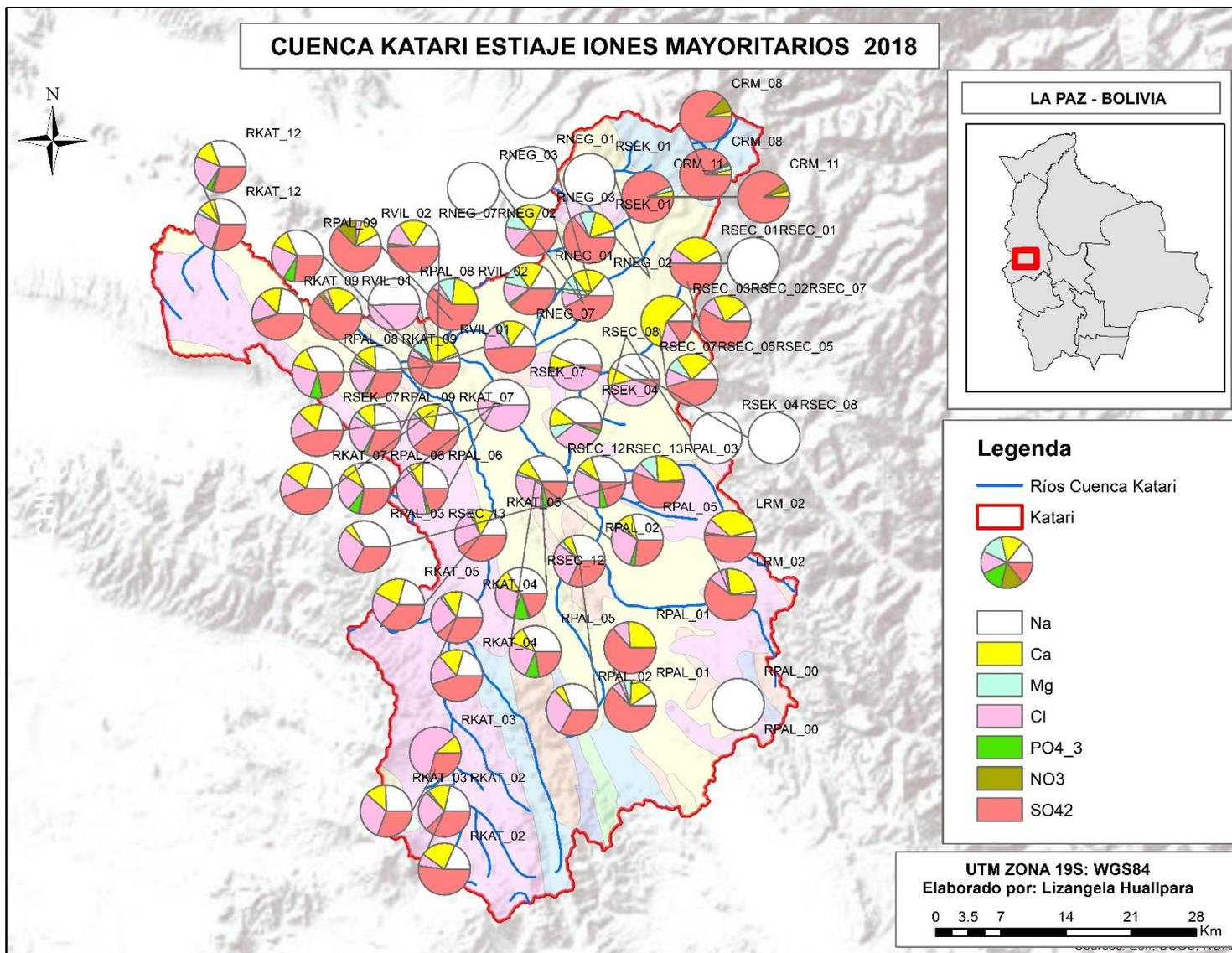


Figura 172. Variación de Iones Mayoritarios de la Cuenca Katari- Estiaje, 2018.

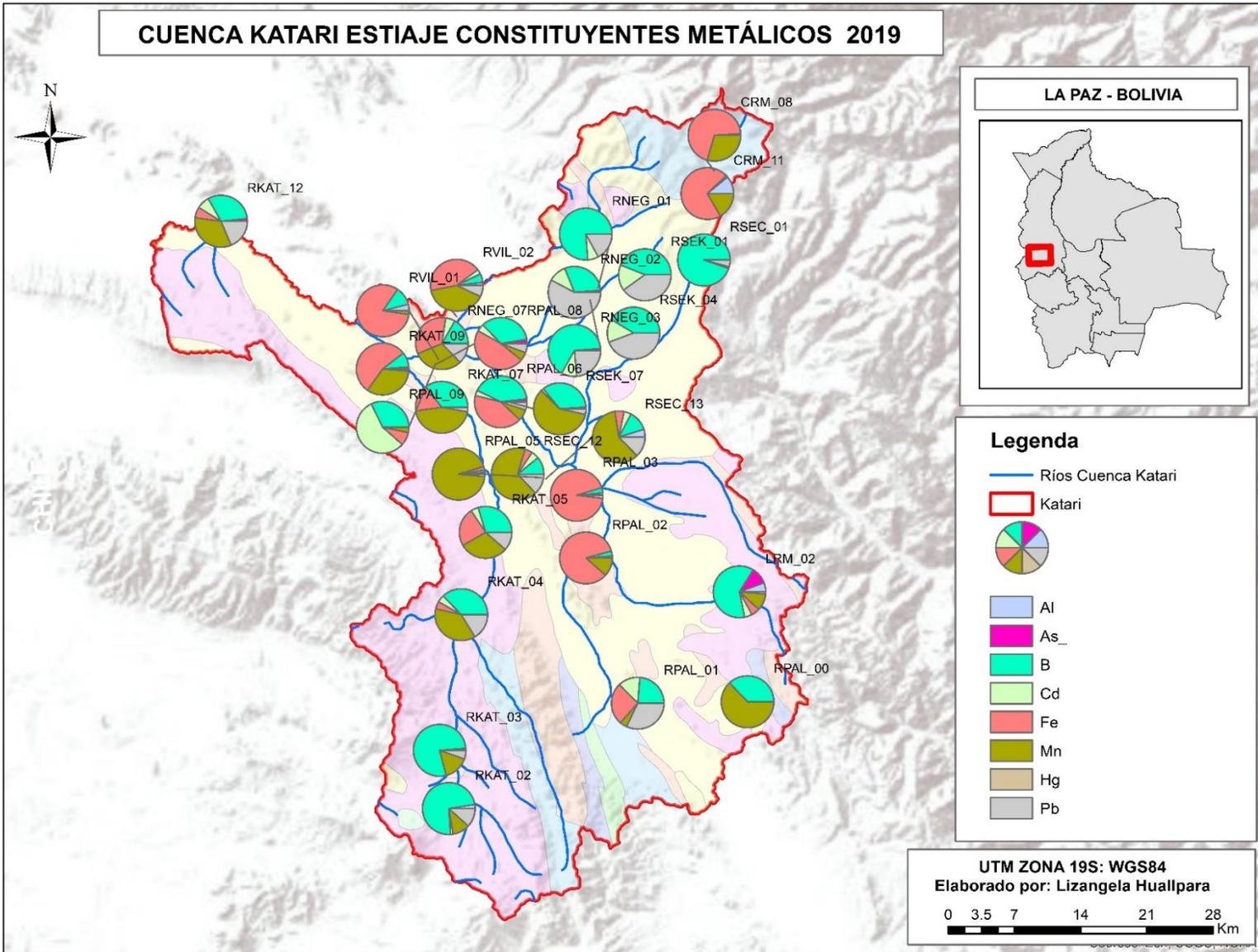


Figura 173. Variación de Constituyentes Metálicos de la Cuenca Katari – Estiaje, 2019.

## 5.7. LAGO TITICACA

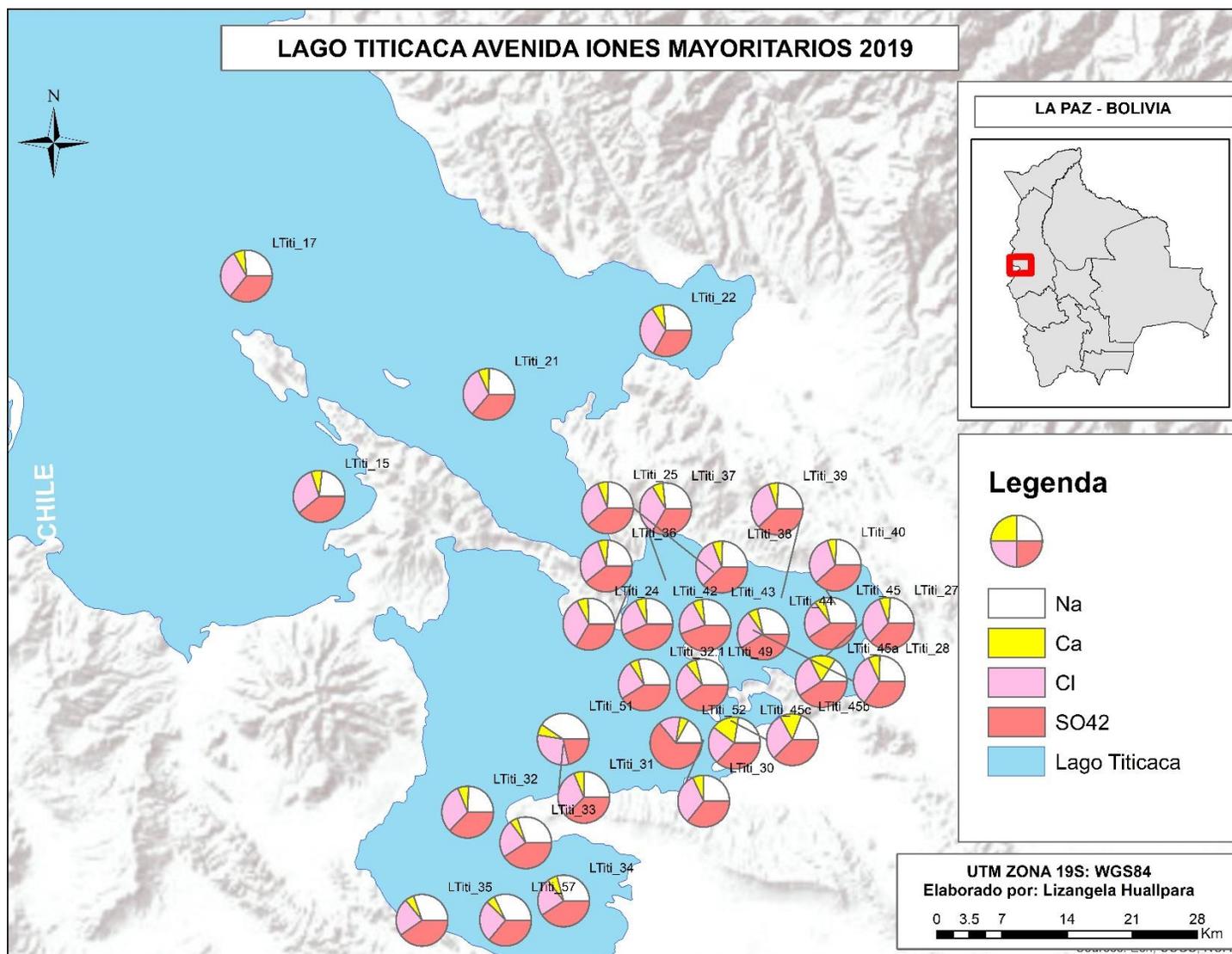


Figura 174. Variación de Iones Mayoritarios del Lago Titicaca– Avenida, 2019.

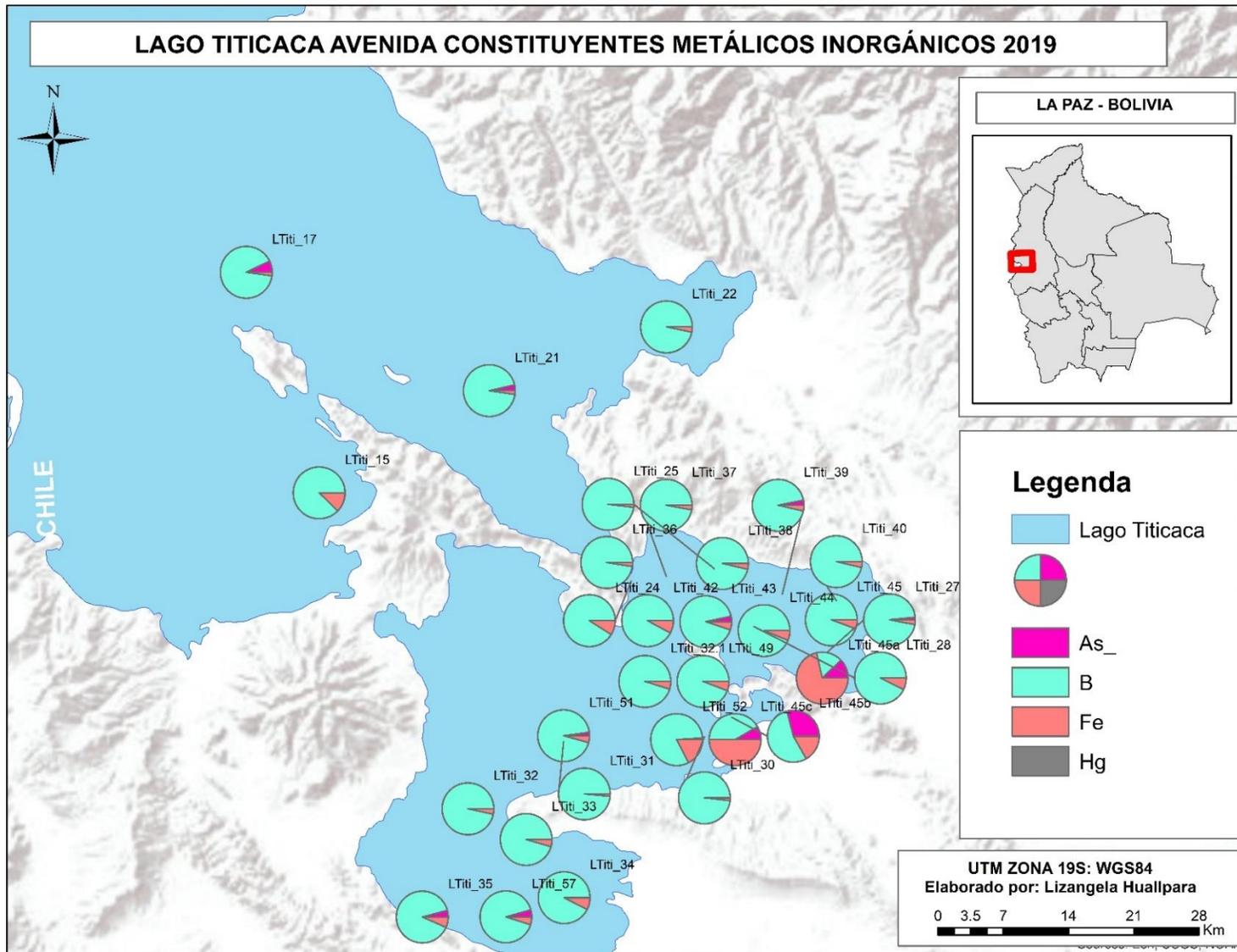


Figura 175. Variación de Constituyentes Metálicos del Lago Titicaca – Avenida, 2019.

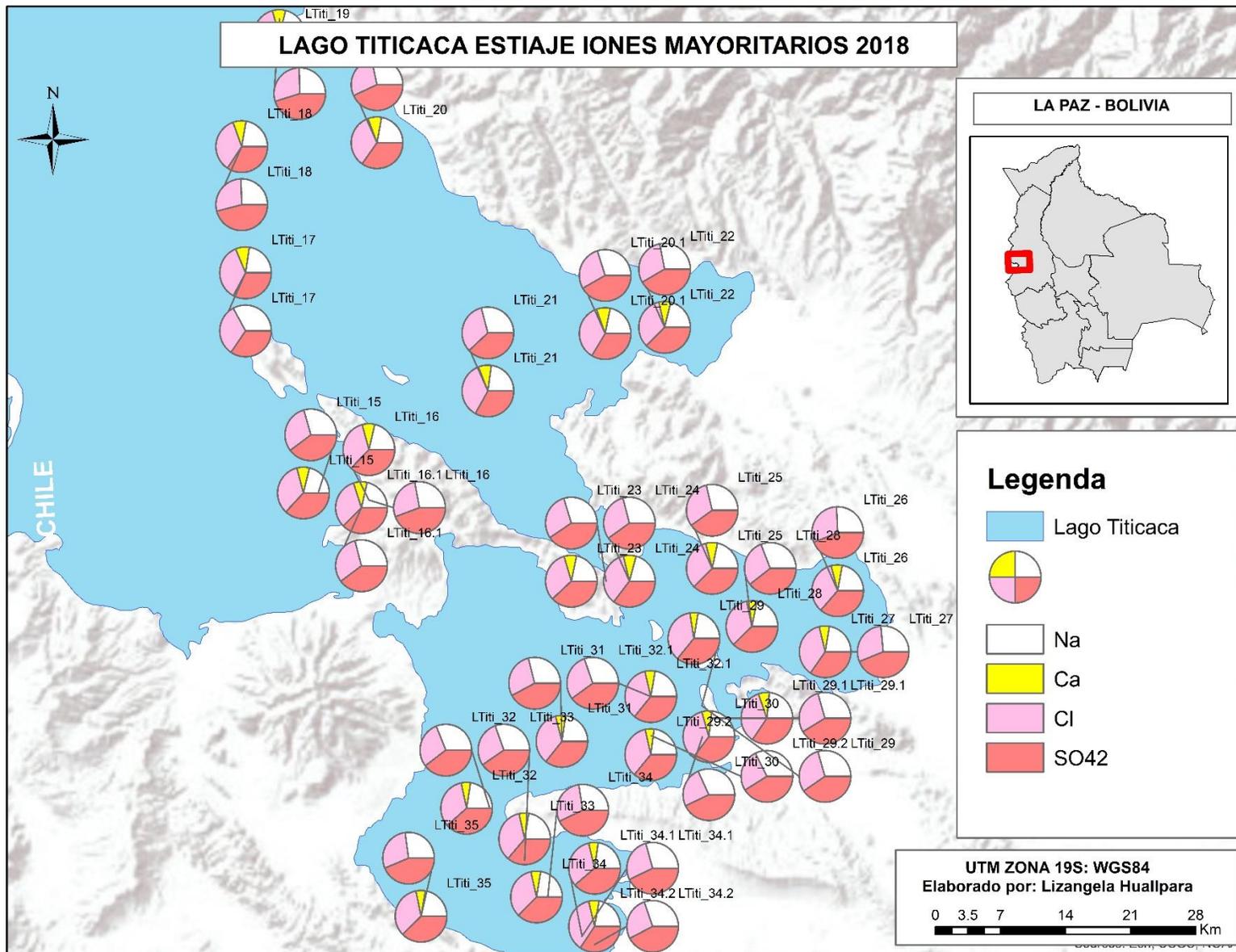


Figura 176. Variación de Iones Mayoritarios del Lago Titicaca– Estiaje, 2018.

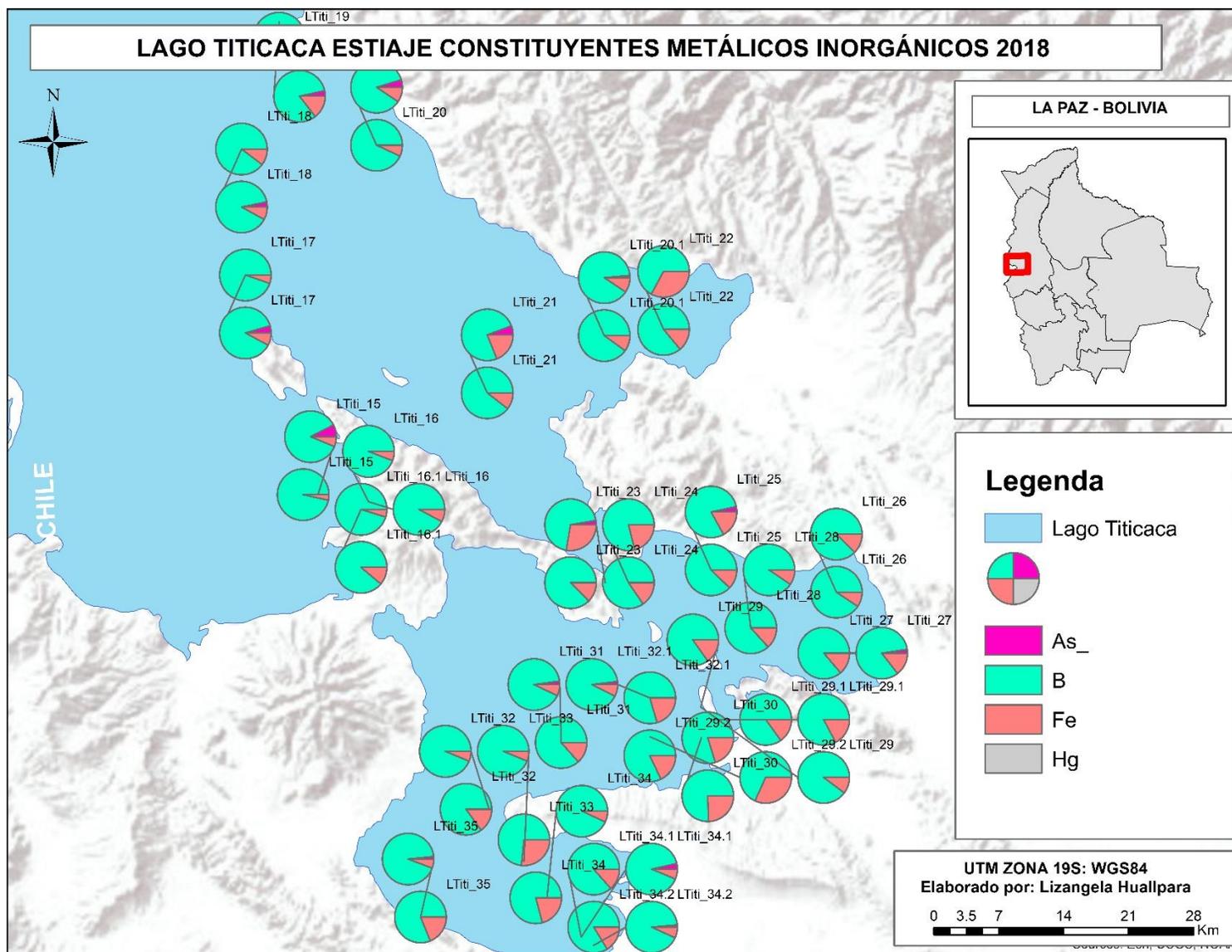


Figura 177. Variación de Constituyentes Metálicos del Lago Titicaca – Estiaje, 2018.

## 5.8. CUENCA COIPASA

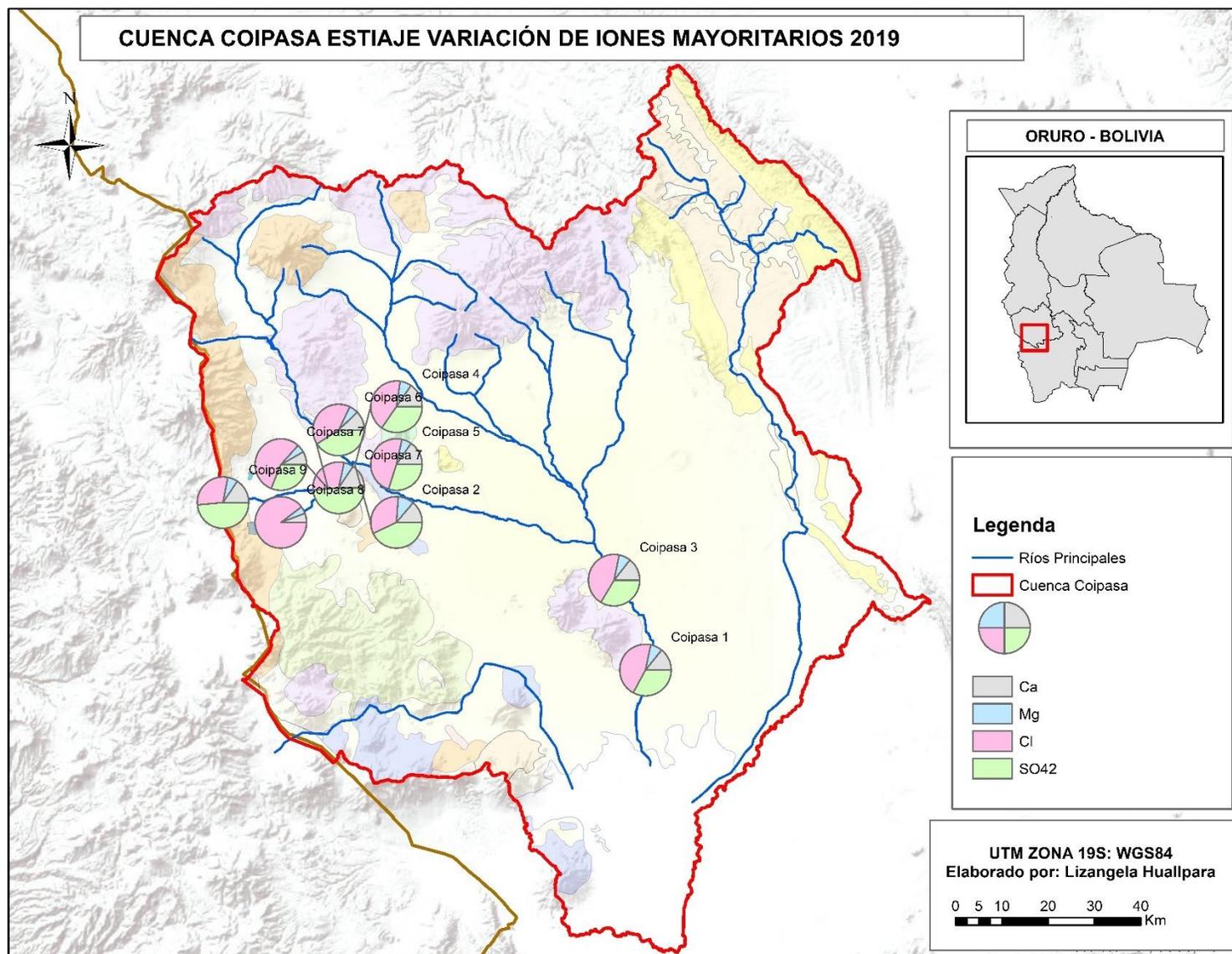


Figura 178. Variación de Iones Mayoritarios de la Cuenca Coipasa– Estiaje, 2019.

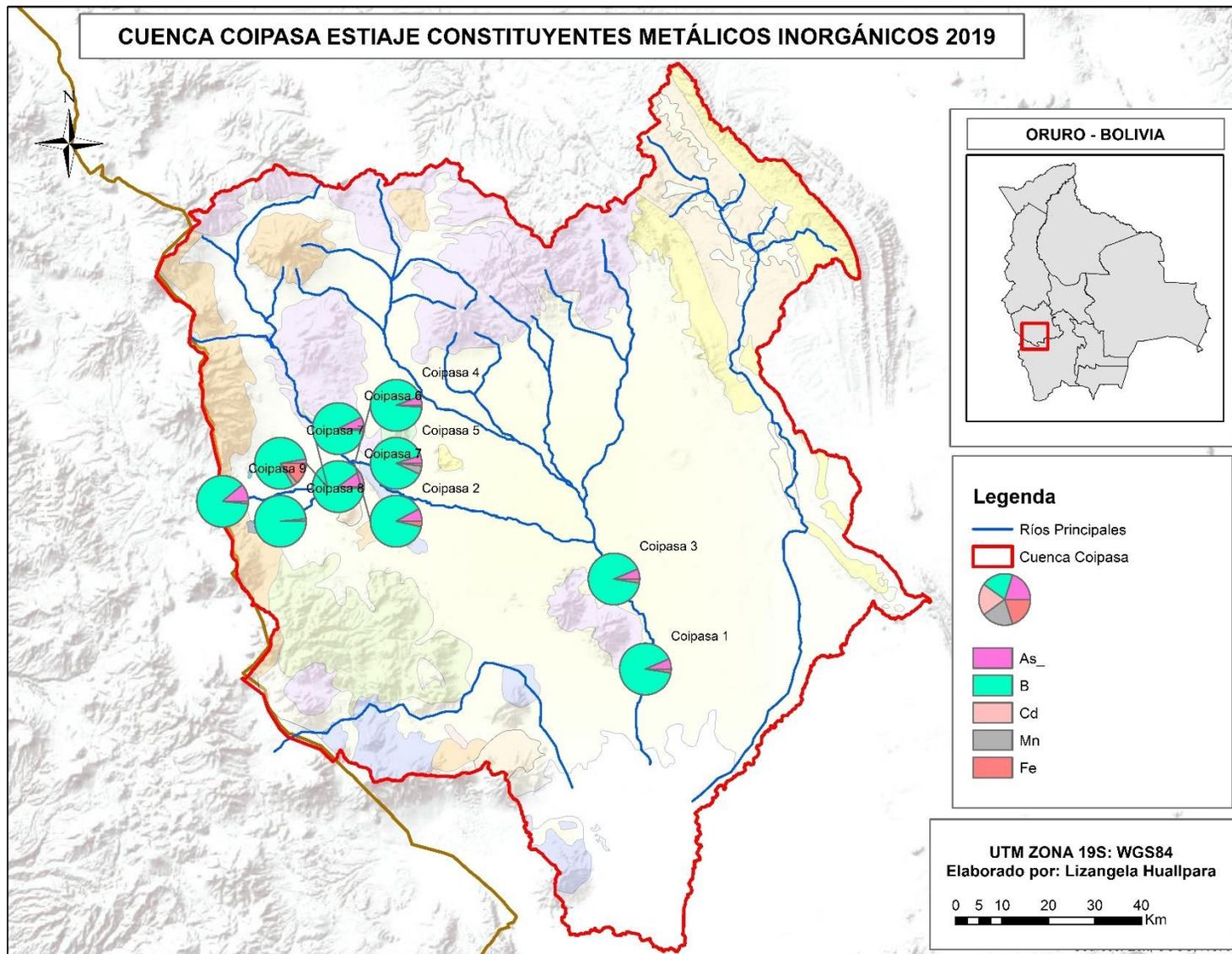


Figura 179. Variación de Constituyentes Málcos de la Cuenca Coipasa – Estiaje, 2018



## 6. REFERENCIAS

- Garcia, C. C. (1996). Áreas de aplicación medioambiental de los "SIG" Modelización y avances recientes. *Papeles de Geografía*, 101:115.
- Gobierno de Perú, & Gobierno de Bolivia. (1996). Diagnostico Ambiental del Sistema Titicaca-Desaguadero-Poopo-Salar de Coipasa (Sistema TDPS) Bolivia-Perú, 223. Retrieved from <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea31s/begin.htm>
- Niura A, Ram, E., Quintanilla, J. E., G, M. E., & Blanco, E. J. (2015). Evaluación Regional De Los Recursos Subsuperficiales De La Subcuenca Del Lago Poopó. *Revista Boliviana de Química*, 28(2), 63–72.
- William, M. (2011). A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *International Journal of Remote Sensing*, 6855-6899.
- Salas-Ávila, D., Chaiña-Chura, F. F., Belizario-Quispe, G., Quispe-Mamani, E., Huanqui-Pérez, R., Velarde-Coaquira, E., & Hermoza-Gutiérrez, M. (2021). Evaluación de metales pesados y comportamiento social asociados con la calidad del agua en el río Súcchez, Puno, Perú. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(6), 145-195.
- Appelo, C., & Postma, D. (2005). Introduction to Groundwater Geochemistry. *Geochemistry, Groundwater and Pollution, Second Edition*, 1–22. <https://doi.org/10.1201/9781439833544.ch1>
- Gobierno de Perú, & Gobierno de Bolivia. (1996). Diagnostico Ambiental del Sistema Titicaca-Desaguadero-Poopo-Salar de Coipasa (Sistema TDPS) Bolivia-Perú, 223. Retrieved from <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea31s/begin.htm>
- Li, B. D., Zhang, X. H., Xu, C. Y., Zhang, H., & Song, J. X. (2015). Water balance between surfacewater and groundwater in the withdrawal process: A case study of the Osceola watershed. *Hydrology Research*, 46(6), 943–953. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.137>
- PRODOC. (2016). PRODOC - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Países: Bolivia y Perú, 1–155.
- Niura A, Ram, E., Quintanilla, J. E., G, M. E., & Blanco, E. J. (2015). Evaluación Regional De Los Recursos Subsuperficiales De La Subcuenca Del Lago Poopó. *Revista Boliviana de Química*, 28(2), 63–72.

William, M. (2011). A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *International Journal of Remote Sensing*, 6855-6899.

Salas-Ávila, D., Chaiña-Chura, F. F., Belizario-Quispe, G., Quispe-Mamani, E., Huanqui-Pérez, R., Velarde-Coaquira, E., & Hermoza-Gutiérrez, M. (2021). Evaluación de metales pesados y comportamiento social asociados con la calidad del agua en el río Súchez, Puno, Perú. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(6), 145-195.

Sanchez, J. (2012). Evolución geoquímica de las aguas subterráneas, 9.

Severiche Sierra, C. A., Barreto Lezama, A. J., & Acevedo Barrios, R. L. (2013). Efecto de las Lluvias sobre la Calidad del Agua en La Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *AVANCES Investigación En Ingeniería*, 10(1), 58-67. Retrieved from [http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances101/Tema\\_07\\_Cienaga\\_Grande\\_Santa\\_Marta.pdf](http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances101/Tema_07_Cienaga_Grande_Santa_Marta.pdf)