

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“INFLUENCIA DEL AGUA DEL RÍO TÍTIRE SOBRE LA CALIDAD  
DEL AGUA SUPERFICIAL DEL RÍO CORALAUQUE”**

Presentada por:

**KIARA MEDALITH TELLO VERGARAY**

Tesis para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERA AMBIENTAL**

Lima – Perú

**2024**

---

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación  
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)**

# NFLUENCIA DEL AGUA DEL RÍO TÍTIRE SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL DEL RÍO CORALAAQUE

## INFORME DE ORIGINALIDAD

Ph.D. Lizardo Visitation Figueroa

<b>11</b> %	<b>8</b> %	<b>8</b> %	<b>0</b> %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

<b>1</b>	<b>hdl.handle.net</b> Fuente de Internet	<b>2</b> %
<b>2</b>	<b>es.scribd.com</b> Fuente de Internet	<b>1</b> %
<b>3</b>	<b>repositorio.udh.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>4</b>	<b>www.oefa.gob.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>5</b>	<b>repositorio.utea.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>6</b>	<b>repositorio.unap.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>7</b>	<b>repositorio.uandina.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %
<b>8</b>	<b>repositorio.unah.edu.pe</b> Fuente de Internet	<b>&lt;1</b> %

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**“INFLUENCIA DEL AGUA DEL RÍO TÍTIRE SOBRE LA CALIDAD  
DEL AGUA SUPERFICIAL DEL RÍO CORALAJUE”**

Presentada por:

**KIARA MEDALITH TELLO VERGARAY**

Tesis para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERA AMBIENTAL**

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

---

Dr. Víctor Augusto Caro Sánchez Benites  
PRESIDENTE

---

Ing. Lawrence Enrique Quipuzco Ushñahua  
MIEMBRO

---

Ph.D. Mary Flor Césare Coral  
MIEMBRO

---

Ph.D. Lizardo Visitación Figueroa  
ASESOR

---

Ing. Gladys Soledad Gaspar de la Cruz  
CO ASESORA

## **DEDICATORIA**

A mis padres porque gracias a su esfuerzo tuve la oportunidad de llegar hasta donde estoy. A mis abuelos por darme su apoyo incondicional desde lejos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Lizardo Visitación, por su dedicación, gran paciencia y por haberme guiado durante todo el proceso de la elaboración de la tesis.

A Anglo American Quellaveco S.A. y OEFA, por brindarme la información de los resultados de los monitoreos ambientales, para el desarrollo de la presente investigación.

A mis padres, mis abuelos, mi hermana y Molly por alentarme a seguir adelante a pesar de las dificultades y darme apoyo.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xii
ABSTRACT .....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Antecedentes.....	3
2.1.1. Estudios previos nacionales.....	3
2.1.2. Estudios previos locales .....	4
2.1.3. Proyecto minero Quellaveco .....	5
2.2. Descripción del área de estudio .....	5
2.2.1. Hidrología.....	5
2.2.2. Geología .....	9
2.2.3. Hidrogeología .....	11
2.2.4. Clasificación de cuerpos de agua superficiales .....	11
2.2.5. Suelo.....	12
2.3. Calidad de agua.....	12
2.4. Evaluación espacial y temporal de la calidad del agua .....	14
2.4.1. Índice canadiense de calidad de agua (CCME WQI) .....	14
2.4.2. Índice de calidad de agua ICARHS .....	14
2.4.3. Índice de metal (IM) .....	19
2.5. Evaluación de la hidroquímica del agua .....	19
2.5.1. Diagrama de Piper .....	19
2.5.2. Diagrama de Stiff.....	20
2.5.3. Diagrama de Schoeller - Berkloff .....	21
2.5.4. Diagrama de Stabler.....	22
2.5.5. Diagrama de Wilcox - Riverside .....	23
2.6. Evaluación de la fuente de generación.....	24

2.6.1. Diagrama de Gibbs .....	24
2.6.2. Relaciones de $Mg^{2+}/Na^{+}$ vs $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ .....	26
2.7. Modelamiento de la dispersión de parámetros de calidad de agua con software CORMIX .....	27
2.8. Evaluación del riesgo ecotoxicológico.....	28
2.8.1. Identificación del peligro .....	28
2.8.2. Evaluación de efectos (relación dosis-respuesta) .....	28
2.8.3. Evaluación de la exposición .....	29
2.8.4. Caracterización del riesgo .....	30
2.9. Análisis estadístico.....	31
2.9.1. Coeficiente de correlación de Pearson .....	31
2.9.2. Análisis de Componentes Principales (ACP) .....	31
2.9.3. Análisis Factorial (AF).....	32
III. METODOLOGÍA.....	34
3.1. Descripción del área de estudio .....	34
3.2. Materiales .....	36
3.2.1. Fuente de información .....	36
3.2.2. Equipos.....	36
3.2.3. Otros.....	36
3.3. Metodología.....	36
3.3.1. Evaluación espacial y temporal de la calidad de agua .....	37
3.3.2. Evaluación hidroquímica.....	41
3.3.3. Evaluación de la fuente de generación.....	43
3.3.4. Modelamiento de la zona de mezcla y de la dispersión de los parámetros de calidad de agua.....	44
3.3.5. Evaluación del riesgo ecotoxicológico .....	47
3.3.6. Análisis estadístico.....	47
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	50
4.1. Evaluación espacial y temporal de la calidad de agua .....	50

4.1.1. Índice de calidad de agua ICARHS .....	56
4.1.2. Índice de metal IM .....	57
4.2. Evaluación hidroquímica.....	59
4.2.1. Diagrama de Piper .....	59
4.2.2. Diagrama de Schoeller-Berkaloff .....	61
4.2.3. Diagrama de Stiff.....	62
4.2.4. Diagrama de Stabler.....	63
4.2.5. Diagrama de Wilcox-Riverside .....	65
4.3. Evaluación de la fuente de generación.....	68
4.4. Modelamiento de la zona de mezcla y de la dispersión de los parámetros de calidad de agua .....	71
4.4.1. Selección de Parámetros para Modelar .....	71
4.4.2. Modelamiento .....	72
4.4.3. Interpretación y Análisis de Datos.....	75
4.5. Evaluación del riesgo ecotoxicológico.....	82
4.6. Análisis estadístico.....	85
V. CONCLUSIONES.....	93
VI. RECOMENDACIONES .....	95
VII. BIBLIOGRAFÍA .....	96
VIII. ANEXOS.....	104



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cuerpos de agua clasificados .....	12
Tabla 2: Parámetros a evaluar en el ICARHS .....	15
Tabla 3: Valoración del ICARHS .....	18
Tabla 4: Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad de agua superficial .....	34
Tabla 5: Parámetros evaluados .....	37
Tabla 6: Datos de entrada del programa CORMIX .....	45
Tabla 7: Parámetros que superan el ECA Agua .....	50
Tabla 8: Valores de ICARHS en los puntos de monitoreo en estudio .....	56
Tabla 9: Valores de índice de metal (IM) en los puntos de monitoreo en estudio .....	58
Tabla 10: Información recopilada de la zona de confluencia para el modelamiento .....	71
Tabla 11: Descripción del proyecto de simulación en CORMIX.....	73
Tabla 12: Descripción de las características del río Títire .....	73
Tabla 13: Descripción de las condiciones ambientales del río Vizcachas .....	74
Tabla 14: Descripción de las características de la confluencia .....	74
Tabla 15: Descripción de la zona de mezcla .....	75
Tabla 16: Comparación de las concentraciones simuladas con el modelamiento CORMIX y las concentraciones monitoreadas en la estación QE-36 .....	75
Tabla 17: Representación tridimensional y vista en perfil de la simulación de la dispersión de los parámetros en época seca (julio-2017).....	78
Tabla 18: Representación tridimensional y vista en perfil de la simulación de la dispersión de los parámetros en época seca (noviembre-2019) .....	79
Tabla 19: Representación tridimensional y vista en perfil de la simulación de la dispersión de los parámetros en época húmeda (febrero-2016) .....	80
Tabla 20: Representación tridimensional y vista en perfil de la simulación de la dispersión de los parámetros en época húmeda (diciembre-2020).....	81
Tabla 21: Concentración letal media (CL50) .....	82
Tabla 22: Concentración umbral sin efecto (PNEC) .....	83

Tabla 23: Valores propios del análisis de componentes principales (ACP) .....	86
Tabla 24: Correlación entre los parámetros y los factores en la estación TIT-1 .....	86
Tabla 25: Correlación entre los parámetros y los factores en la estación VIZ-2.....	88
Tabla 26: Correlación entre los parámetros y los factores en la estación QE-36.....	90
Tabla 27: Resultados de monitoreo de calidad de agua superficial (parámetros físicoquímicos, orgánicos, inorgánicos y microbiológicos) de la estación TIT-1 .....	105
Tabla 28: Resultados de monitoreo de calidad de agua superficial (metales totales) de la estación TIT-1 .....	107
Tabla 29: Resultados de monitoreo de calidad de agua superficial (parámetros físicoquímicos, orgánicos, inorgánicos y microbiológicos) de la estación VIZ-2.....	109
Tabla 30: Resultados de monitoreo de calidad de agua superficial (metales totales) de la estación VIZ-2.....	111
Tabla 31: Resultados de monitoreo de calidad de agua superficial (parámetros físicoquímicos, orgánicos, inorgánicos y microbiológicos) de la estación QE-36 .....	113
Tabla 32: Resultados de monitoreo de calidad de agua superficial (metales totales) de la estación QE-36 .....	115
Tabla 33: Resultados de la concentración simulada de los parámetros aluminio, arsénico, boro y manganeso en época seca (julio- 2017).....	117
Tabla 34: Resultados de la concentración simulada de los parámetros aluminio, arsénico, boro y manganeso en época seca (noviembre- 2019) .....	121
Tabla 35: Resultados de la concentración simulada de los parámetros aluminio, arsénico, boro y manganeso en época húmeda (febrero-2016).....	125
Tabla 36: Resultados de la concentración simulada de los parámetros aluminio, arsénico, boro y manganeso en época húmeda (diciembre-2020).....	129
Tabla 37: Riesgo ecotoxicológico con información del modelamiento CORMIX para el parámetro aluminio .....	133

Tabla 38: Riesgo ecotoxicológico con información del modelamiento CORMIX para el parámetro arsénico.....	134
Tabla 39: Riesgo ecotoxicológico con información del modelamiento CORMIX para el parámetro boro .....	135
Tabla 40: Riesgo ecotoxicológico con información del modelamiento CORMIX para el parámetro manganeso .....	136

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Subcuencas de la cuenca del río Tambo.....	7
Figura 2. Determinación de subíndices del ICARHS .....	18
Figura 3. Diagrama de Piper.....	20
Figura 4. Diagrama de Stiff.....	21
Figura 5. Diagrama de Schoeller- Berkaloff .....	22
Figura 6. Diagrama de Stabler .....	23
Figura 7. Diagrama de Wilcox - Riverside .....	23
Figura 8. Diagrama de Gibbs.....	25
Figura 9. Gráfico de la relación $Mg^{2+}/Na^{+}$ vs $Mg^{2+}/Ca^{2}$ .....	26
Figura 10. Mapa de ubicación de las estaciones de monitoreo .....	35
Figura 11. Importación de la data .....	38
Figura 12. Selección de parámetros.....	39
Figura 13. Cálculo del índice de calidad de agua .....	40
Figura 14. Importación de la data .....	41
Figura 15. Generación de los diagramas hidroquímicos .....	42
Figura 16. Asignación de grupos .....	42
Figura 17. Exportación de diagrama .....	43
Figura 18. Interfaz del programa CORMIX.....	45
Figura 19. Concentraciones estimadas del contaminante a diferentes distancias.....	46
Figura 20. Simulación de la zona de mezcla .....	46
Figura 21. Selección del comando ACP .....	48
Figura 22. Selección de los datos .....	49
Figura 23. Matriz de correlaciones .....	49
Figura 24. Variación de Conductividad Eléctrica.....	51
Figura 25. Variación de pH .....	51
Figura 26. Variación de Cloruro .....	52

Figura 27. Variación de Aluminio .....	53
Figura 28. Variación de Cadmio .....	53
Figura 29. Variación de Cobalto .....	53
Figura 30. Variación de Cobre .....	54
Figura 31. Variación de Hierro .....	54
Figura 32. Variación de Manganeso .....	54
Figura 33. Variación de Arsénico .....	55
Figura 34. Variación de Boro .....	55
Figura 35. Valores de ICARHS a nivel global, época seca y época húmeda.....	56
Figura 36. Diagrama de Piper (nivel global) .....	59
Figura 37. Diagrama de Piper (época seca).....	60
Figura 38. Diagrama de Piper (época húmeda) .....	61
Figura 39. Diagrama de Schoeller-Berkaloff .....	62
Figura 40. Diagrama de Stiff de las estaciones TIT-1 y QE-36 .....	63
Figura 41. Diagrama de Stiff de la estación VIZ-2.....	63
Figura 42. Diagrama de Stabler .....	64
Figura 43. Diagrama de Wilcox-Riverside (nivel global).....	65
Figura 44. Diagrama de Wilcox-Riverside (época seca) .....	66
Figura 45. Diagrama de Wilcox-Riverside (época húmeda).....	67
Figura 46. Diagramas de Gibbs de las estaciones en estudio .....	69
Figura 47. Gráficos de $Mg^{2+}/Na^+$ vs $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ de la estación TIT-1.....	70
Figura 48. Gráficos de $Mg^{2+}/Na^+$ vs $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ de la estación VIZ-2 .....	70
Figura 49. Gráficos de $Mg^{2+}/Na^+$ vs $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ de la estación QE-36 .....	70
Figura 50. Riesgo ecotoxicológico del aluminio y arsénico para el <i>Oncorhynchus</i> <i>mykiss</i> y <i>Daphnia magna</i> en época seca .....	84
Figura 51. Riesgo ecotoxicológico del boro y manganeso para el <i>Oncorhynchus</i> <i>mykiss</i> y <i>Daphnia magna</i> en época seca .....	84
Figura 52. Riesgo ecotoxicológico del aluminio y arsénico para el <i>Oncorhynchus</i> <i>mykiss</i> y <i>Daphnia magna</i> en época húmeda .....	85

Figura 53. Riesgo ecotoxicológico del boro y manganeso para el <i>Oncorhynchus mykiss</i> y <i>Daphnia magna</i> en época húmeda .....	85
Figura 54. Concentración simulada del parámetro aluminio en época seca (julio-2017) respecto a la distancia aguas abajo .....	118
Figura 55. Concentración simulada del parámetro arsénico en época seca (julio-2017) respecto a la distancia aguas abajo .....	119
Figura 56. Concentración simulada del parámetro boro en época seca (julio-2017) respecto a la distancia aguas abajo .....	119
Figura 57. Concentración simulada del parámetro manganeso en época seca (julio-2017) respecto a la distancia aguas abajo .....	120
Figura 58. Concentración simulada del parámetro aluminio en época seca (noviembre-2019) respecto a la distancia aguas abajo .....	122
Figura 59. Concentración simulada del parámetro arsénico en época seca (noviembre-2019) respecto a la distancia aguas abajo .....	123
Figura 60. Concentración simulada del parámetro boro en época seca (noviembre-2019) respecto a la distancia aguas abajo .....	123
Figura 61. Concentración simulada del parámetro manganeso en época seca (noviembre-2019) respecto a la distancia aguas abajo .....	124
Figura 62. Concentración simulada del parámetro aluminio en época húmeda (febrero-2016) respecto a la distancia aguas abajo.....	126
Figura 63. Concentración simulada del parámetro arsénico en época húmeda (febrero-2016) respecto a la distancia aguas abajo.....	127
Figura 64. Concentración simulada del parámetro boro en época húmeda (febrero-2016) respecto a la distancia aguas abajo .....	127
Figura 65. Concentración simulada del parámetro manganeso en época húmeda (febrero-2016) respecto a la distancia aguas abajo.....	128
Figura 66. Concentración simulada del parámetro aluminio en época húmeda (diciembre-2020) respecto a la distancia aguas abajo .....	130
Figura 67. Concentración simulada del parámetro arsénico en época húmeda (diciembre-2020) respecto a la distancia aguas abajo .....	131

Figura 68. Concentración simulada del parámetro boro en época húmeda (diciembre-2020) respecto a la distancia aguas abajo .....	131
Figura 69. Concentración simulada del parámetro manganeso en época húmeda (diciembre-2020) respecto a la distancia aguas abajo .....	132

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Resultados de monitoreo de calidad de agua superficial .....	105
Anexo 2: Modelamiento CORMIX .....	117
Anexo 3: Riesgo ecotoxicológico .....	133



## RESUMEN

La presente investigación evaluó la influencia de la calidad del agua superficial del río Títire (afluente) en las características hidroquímicas del río Coralaque (cuerpo receptor), pertenecientes a la subcuenca del río Coralaque, Moquegua, Perú. Primero, se evaluó la variación temporal y espacial de los ríos mencionados, mediante el uso del índice de calidad del agua (ICARHS) y el índice metálico (IM); donde se determinó que el río Títire presenta elevadas concentraciones aluminio, arsénico, boro, manganeso, conductividad eléctrica y nivel de pH, entre otros; obteniendo una calidad de agua inferior (calidad mala) respecto al río Coralaque (calidad regular). Luego, se desarrolló la evaluación hidroquímica y la fuente de generación, donde se demostró que los procesos que controlan las características hidroquímicas de los ríos Títire y Coralaque son la evaporación y cristalización y meteorización de las rocas (interacción agua-roca), así como el dominio de la lixiviación; por lo que se deduce que influyen tanto procesos naturales como antropogénicos. Asimismo, se determinó que el agua del río Títire no es apta para el riego, mientras que el agua del río Coralaque solo es apta para plantas muy resistentes a la salinidad en general. Para simular la dispersión de los parámetros se empleó el modelamiento con CORMIX, donde se obtuvo que aguas debajo de la zona de mezcla en la mayoría de los casos las concentraciones son superiores a los valores establecidos del ECA-Agua. Asimismo, se determinó que las aguas del río Títire sobre el río Coralaque, representa un riesgo ecotoxicológico en la fauna acuática de la zona. Finalmente, se desarrolló el análisis de componentes principales (ACP) que permitió corroborar los resultados obtenidos. Se concluye que la composición hidroquímica del río Títire si influye en la calidad del agua del río Coralaque.

**Palabras clave:** hidroquímica, calidad del agua, modelamiento CORMIX, riesgo ecotoxicológico

## ABSTRACT

The present investigation evaluated the influence of the quality of the surface water of the Títire River (tributary) on the hydrochemical characteristics of the Coralaque River (receiving body), belonging to the sub-basin of the Coralaque River, Moquegua, Peru. First, the temporal and spatial variation of the mentioned rivers was evaluated, using the water quality index (ICARHS) and the metallic index (IM); where it was determined that the Títire River has high concentrations of aluminum, arsenic, boron, manganese, electrical conductivity and pH level, among others; obtaining a lower quality of water (poor quality) compared to the Coralaque River (fair quality). Then, the hydrochemical evaluation and the generation source were developed, where it was demonstrated that the processes that control the hydrochemical characteristics of the Títire and Coralaque rivers are the evaporation and crystallization and weathering of the rocks (water-rock interaction), as well as the leaching mastery; Therefore, it is deduced that both natural and anthropogenic processes influence. Likewise, it was determined that the water from the Títire River is not suitable for irrigation, while the water from the Coralaque River is only suitable for plants that are very resistant to salinity in general. To simulate the dispersion of the parameters, modeling with CORMIX was used, where it was obtained that downstream of the mixing zone in most cases the concentrations are higher than the established values of the ECA-Water. Likewise, it was determined that the waters of the Títire River on the Coralaque River represent an ecotoxicological risk to the aquatic fauna of the area. Finally, the principal components analysis (PCA) was developed to corroborate the results obtained. It is concluded that the hydrochemical composition of the Títire River does influence the water quality of the Coralaque River.

**Keywords:** hydrochemistry, water quality, CORMIX modeling, ecotoxicological risk

## I. INTRODUCCIÓN

El Perú cuenta con abundantes reservas de agua dulce, sin embargo, su calidad es inadecuada en varias regiones del país debido al acelerado incremento de las actividades antropogénicas (minería, agricultura, industria, etc.) y/o características geológicas y naturales de la zona. Por ende, es de vital importancia asegurar la calidad de los cuerpos de agua para lograr el uso eficiente de dicho recurso.

La cuenca del río Tambo cuenta con un área de 13,361 km<sup>2</sup> y longitud de 276 km. El río Tambo se origina en la Cordillera de los Andes y tiene como mayor tributario al río Coralaque, principal curso del agua de la subcuenca del mismo nombre. En la cabecera de la subcuenca del río Coralaque se encuentran los ríos Títire, Vizcachas y Chilota; siendo el río Títire un importante afluente que drena aproximadamente 590 km<sup>2</sup>. Además, próximamente el proyecto minero a tajo abierto Quellaveco usará este río como la mayor fuente de abastecimiento de agua para su operación (I MEIA Quellaveco, 2008).

De acuerdo con estudios realizados en campo, el agua del río Títire no es apta para el consumo humano ni para la agricultura por su alta concentración de sales minerales, boro, arsénico y otros metales (I MEIA Quellaveco, 2008). Estudios más recientes realizados en la cuenca Tambo y en el área de influencia del proyecto minero Quellaveco mostraron que el agua del río Títire tiene alta concentración de metales (aluminio, hierro, arsénico, etc.), boro, litio y alto grado de acidez debido a la presencia de rocas volcánicas y subvolcánicas en la cabecera del río y el aporte de las actividades mineras que se realizan en la zona (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2015, 2016, 2018). Hasta el momento, todos los estudios se han enfocado en estudiar la calidad del agua de los ríos, más no involucran una evaluación a fondo que permita entender las fuentes que originan los valores de los parámetros de calidad. Tampoco se han llevado a cabo modelamientos para comprender cómo se dispersan los contaminantes, ni la evaluación ecotoxicológica para analizar un posible peligro sobre el ambiente.

El objetivo general del presente estudio de investigación es determinar cuál es la influencia del río Títire sobre la calidad del agua y composición hidroquímica del río Coralaque, pertenecientes a la subcuenca del río Coralaque, Moquegua, Perú; mientras que los objetivos específicos se detallan a continuación:

- Evaluar la variación temporal y espacial de la calidad del agua en los ríos Títire, Vizcachas y Coralaque, mediante el cálculo del índice de calidad del agua (ICARHS) y el índice metálico (IM), en la época seca, húmeda y global.
- Caracterizar la hidroquímica de los ríos Títire, Vizcachas y Coralaque mediante los diagramas de Piper, Stiff, Schoeller- Berkaloff, Stabler y Wilcox-Riverside.
- Determinar la naturaleza de la fuente de generación de las características hidroquímicas de los ríos Títire, Vizcachas y Coralaque, mediante los diagramas de Gibbs y la relación de iones específicos  $Mg^{2+} / Ca^{2+}$  vs  $Mg^{2+} / Na^{+}$ .
- Evaluar la dispersión de parámetros críticos en la confluencia de los ríos Títire y Vizcachas, mediante el modelamiento con CORMIX.
- Evaluar el riesgo ecotoxicológico generado por la influencia de la descarga del río Títire sobre el río Coralaque, utilizando el coeficiente PEC/PNEC.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Estudios previos nacionales

Un trabajo de investigación llevado a cabo en el 2016 buscó determinar en qué medida el agua contaminada del río Mariño influye en la calidad del agua del río Pachachaca, para lo cual se analizaron 11 parámetros: turbidez, sólidos totales disueltos, sólidos suspendidos totales, pH, conductividad, aceites y grasas, DBO, DQO, OD, coliformes fecales y coliformes termotolerantes tomadas entre febrero, junio y setiembre del 2016. El monitoreo se realizó de acuerdo con el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad en Cuerpos Naturales de Agua Superficial. Se seleccionaron tres puntos de monitoreo estratégicos que son: 2 en el río Pachachaca (antes y después de juntarse con el río Mariño) y 1 en el río Mariño (antes de juntarse con el río Pachachaca). Los resultados obtenidos mostraron que valores de los parámetros de turbidez, sólidos disueltos totales y conductividad, aceites y grasas, DQO, coliformes termotolerantes y coliformes totales son menores a los valores de nivel de significancia de 0.05, por ende, con un nivel de confianza del 95% se afirma que las aguas del río Mariño influyen sobre la calidad de agua del río Pachachaca (Triveño, 2016).

Posteriormente, se realizó un estudio similar también enfocado únicamente a la calidad de las aguas. Dicho estudio evaluó la influencia de la descarga del río Mayo en el agua superficial del río Huallaga, para lo cual se tomaron muestras en tres estaciones de muestreo durante 4 monitoreos realizados en el año 2018. Se analizaron 9 parámetros de calidad de agua (pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad, sólidos totales en suspensión, fosforo total, DBO<sub>5</sub>, nitrato y coliformes termotolerantes) y se calculó el índice ICA-PE. Los resultados mostraron que no hay suficiente evidencia para afirmar que el río Mayo influye significativamente sobre calidad del agua del río Huallaga, dado que los valores de los parámetros no muestran variaciones significativas entre las estaciones, además, los ICA-PE presentados en el río Huallaga antes y después de su confluencia con el río Mayo son muy similares (calidad buena) (Puerta, 2019).

### 2.1.2. Estudios previos locales

En abril del 2015 se llevó a cabo una evaluación de la calidad de las aguas superficiales en el río Coralaque y sus afluentes. Se evaluó 9 puntos de monitoreo de agua superficial y se utilizó como norma de comparación el ECA (D.S. N° 002-2008-MINAM) - Categoría 3. Los resultados mostraron que los ríos Títire y Coralaque presentan pH de moderadamente ácido a neutro y altas concentraciones de As, debido a la influencia de afloramientos de agua subterránea en la zona (OEFA, 2015).

Posteriormente, el OEFA (2016) realizó un estudio que buscaba determinar el estado actual de la calidad ambiental de la cuenca Tambo. Se seleccionaron puntos de monitoreo en los ríos dentro de zonas de influencia de proyectos mineros, así como afluentes de principales ríos y quebradas de la cuenca. En la zona de estudio II, correspondiente a la unidad hidrográfica Coralaque, se tomaron muestras en los ríos Títire, Coralaque, Tambo, entre otros. Se analizaron los parámetros establecidos por el ECA (D.S. N° 015-2015-MINAM)-Categoría 3. Los resultados mostraron valores bajos de pH y alta concentración de metales (As, B, Cd, Co, Cu, Fe y Mn) en el río Títire, mientras que el río Coralaque presentó altas concentraciones de metales (B, Cu y Mn). Se concluyó que, la acidez en las aguas del río Títire y sus afluentes podría deberse a la naturaleza hidrogeológica y mineralizada de la zona como a las actividades mineras que se llevan a cabo en el entorno.

Otro estudio realizado durante el periodo 2017-2018 evaluó la calidad ambiental en el área de influencia del proyecto Quellaveco, que comprende el área de operaciones (río Asana, río Charaque, río Capillune y quebrada Cortadera) y el área de abastecimiento de agua (río Títire, río Chilota y río Vizcachas). Se tomaron muestras tanto en época seca como en húmeda, posteriormente se analizó la calidad del agua superficial y se evaluó los aspectos hidrogeoquímicos a través de diversos diagramas (Stiff y Piper) e índices hidroquímicos. Respecto a la calidad del agua, los valores obtenidos en el río Títire mostraron valores de pH ácido, valores altos de CE y concentraciones de Al, As, Cd, Co, Cu, Fe y Mn mayores a lo establecido por la norma, tanto en época seca como en época húmeda, y valores altos de boro y litio en época seca. Los resultados de arsénico, boro, litio, conductividad eléctrica y pH ácido se relacionaron a la naturaleza hidrogeológica de la zona, que presenta manifestaciones termales en la zona geotermal Títire- Puente Bello; mientras que los valores de los demás metales se debieron a la posible aportación de efluentes con presencia de lixiviados. Por otro lado, en el río Vizcachas, en época húmeda los valores de los parámetros (a excepción del Fe) cumplen la norma y en época seca los valores de pH, Mn y As

incumplen los estándares. La alta concentración de hierro en el río Vizcachas en época húmeda se vinculó a la influencia de la Formación Vizcachas, unidad volcánica compuesta tobas constituidas principalmente por biotita y cuarzo, mientras que la alta concentración de arsénico durante época seca se relaciona a las bajas precipitaciones y al aporte del río Chilota, principal aportante de este metal. Por otro lado, los diagramas de Stiff y Piper en época seca mostraron que el río Vizcacha presenta aguas bicarbonatadas-sulfatadas sódicas y en su nacimiento aguas sulfatadas sódicas-cálcicas, mientras que el río Títire presenta aguas cloruradas sódicas. En época húmeda, el río Vizcachas presenta aguas bicarbonatadas sódicas y el río Títire aguas sulfatadas sódicas (OEFA, 2018).

Como se pudo observar, hasta el momento la mayoría de los estudios se han enfocado en la calidad del agua de los ríos, más no involucran una evaluación a fondo que permita entender las fuentes de contaminación. Tampoco se han realizado modelamientos para explicar la dispersión de los contaminantes ni la determinación del riesgo ecotoxicológico.

### 2.1.3. Proyecto minero Quellaveco

El proyecto Quellaveco está ubicado en la región de Moquegua, y está bajo la titularidad de la empresa Anglo American. Consistirá en un proceso minero a tajo abierto y flotación de cobre, molibdeno y plata, con una vida útil de 32 años. El área de operaciones pertenece a la cuenca Moquegua- río Osmore, mientras que el área de abastecimiento a la cuenca del río Tambo. Además, el proyecto utilizará agua de los ríos río Títire y Vizcachas, esta última a través de la construcción de la presa Vizcachas. En el 2018 comenzó la fase de construcción y se espera que en el 2022 inició la etapa de producción (Anglo American, 2019).

## 2.2. Descripción del área de estudio

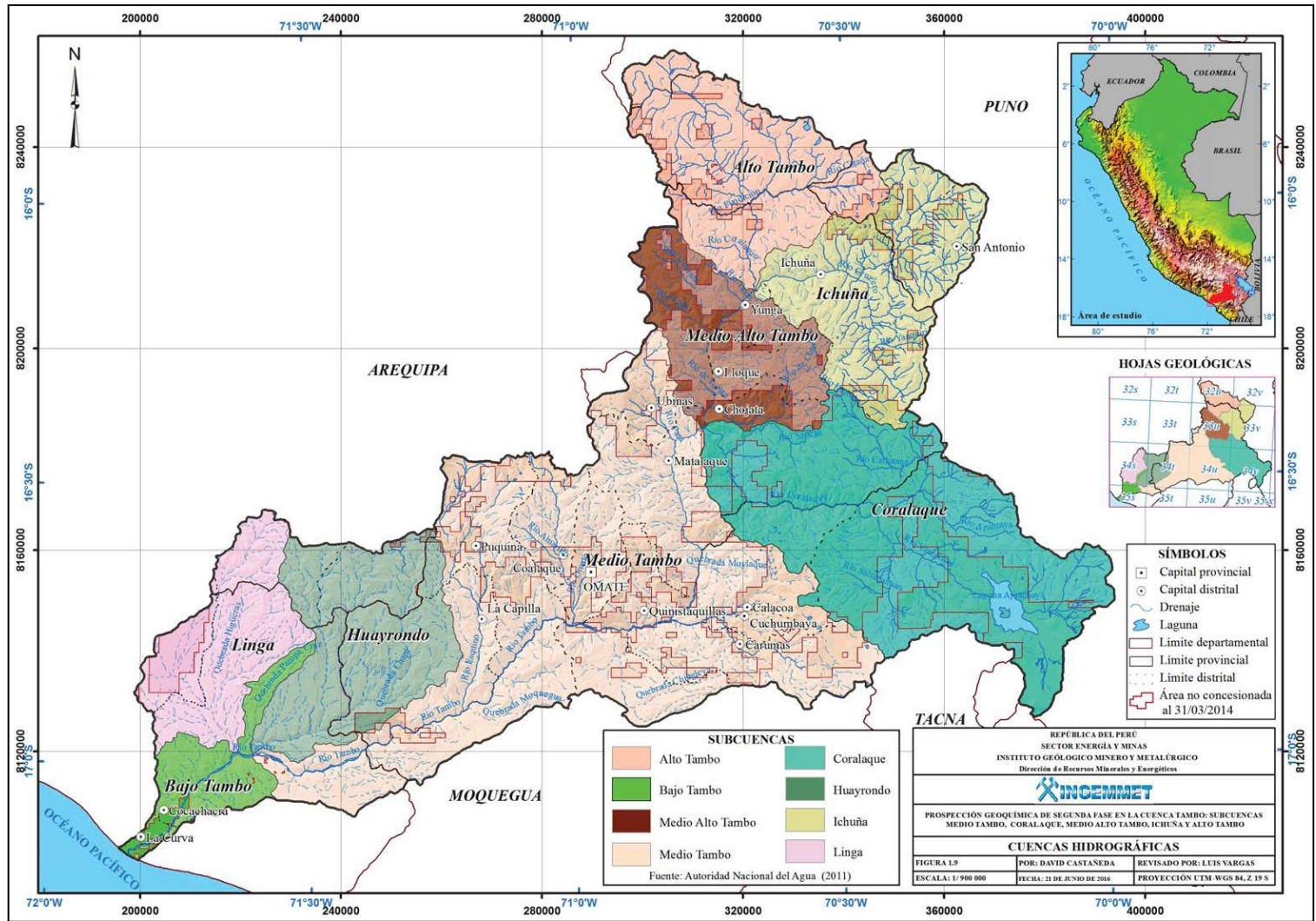
### 2.2.1. Hidrología

La presente sección describe las características de las subcuencas y microcuencas de los ríos de interés para el presente estudio. Cabe señalar que, todos los ríos de interés se encuentran dentro de la cuenca del río Tambo.

La cuenca hidrográfica del río Tambo se encuentra en el sur occidental del país, dentro de la zona 19 sur. Abarca los departamentos de Arequipa, Moquegua y Puno. Tiene un área total de 13073.4 km<sup>2</sup>, longitud de 215 km y una pendiente promedio de 28.61%. Además, la mayor parte de la cuenca (53.77%) se encuentra entre los 4000 m.s.n.m y 5000 m.s.n.m (Carpio & Peña, 2020).

Se caracteriza por tener carácter estacional y régimen irregular, cuyas máximas avenidas se dan en épocas de verano (diciembre a marzo). Además, la cuenca se divide en 8 subcuencas, que son: Alto Tambo, Ichuña, Medio y Alto Tambo, Coralaque, Huayrondo, Linga, Medio y Bajo Tambo (Vargas et al., 2017).





**Figura 1.** Subcuencas de la cuenca del río Tambo  
**FUENTE:** Vargas et al. (2017)

Tiene como curso principal al río Tambo, el cual se origina por la confluencia de los ríos Paltutire e Ichuña, además a 27 km aguas abajo de esta confluencia desemboca el río Coralaque en el río Tambo. Cabe mencionar que este río es la principal oferta del agua para el valle del Tambo, la cual tiene una gran importancia agrícola para el sur del país (I MEIA Quellaveco, 2008; Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2013).

a. Subcuenca del río Coralaque

Esta subcuenca se encuentra en el lado izquierdo del río Tambo. Tiene como curso principal al río Coralaque, importante tributario del río Tambo. El río Coralaque se forma por la confluencia de los Vizcachas y Títire a 4100 m.s.n.m, y sus aguas se usan para fines pecuarios, en especial para el consumo de los animales. Se caracteriza por presentar un cauce poco profundo y estable, con presencia de cantos rodados y sedimentos en el lecho (I MEIA Quellaveco, 2008; ANA, 2013).

b. Microcuenca del río Títire

Esta microcuenca se ubica en la cabecera de la subcuenca del río Coralaque, y su principal curso es el río del mismo nombre. Las dimensiones de la microcuenca son 5 km de norte a sur y 10km de este a oeste. El río Títire nace por los aportes de los ríos Pacchani y Aruntaya, y su altitud varía desde los 4400 m hasta los 5350 m. Además, este río tiene un área de drenaje de 590 km<sup>2</sup>. El río Pacchani se origina a partir de diferentes pequeños cauces y bofedales existentes a 5000 m de altitud (I MEIA Quellaveco, 2008; ANA, 2013, Octavo ITS, 2021).

Por otro lado, en la parte baja de la microcuenca del río Títire se encuentra un gran manantial termal (geiser), ubicada en Puente Bello, que descarga directamente al río, con gran cantidad de depósitos mineralizados (I MEIA Quellaveco, 2008).

c. Microcuenca del río Vizcachas

Esta microcuenca presenta una altitud que varía desde los 4085 (en la confluencia con el río Títire) y 5491 m (altura máxima de la cuenca), y una pendiente promedio cerca al 18%. Tiene un área total de 1294 km<sup>2</sup>, forma alargada (factor de forma = 0.38 unidades), densidad media de drenaje (0.65 km/km<sup>2</sup>). El río Vizcachas tiene como principal afluente al río Chilota, el cual se origina en un sistema de humedales altoandinos en la pampa Chilota al sureste de la microcuenca. Otros tributarios del río Vizcachas son el río Chincune por la

margen derecha y los ríos Chila y Calasaya por la margen izquierda (I MEIA Quellaveco, 2008; IV MEIA Quellaveco, 2012).

En la parte medio- alto de la microcuenca del río Vizcachas, se ubica el embalse de Pasto Grande, el cual tiene un almacenamiento útil de 185 MMC y una superficie de 40 km<sup>2</sup>. Además, tiene un uso piscícola y agrícola. Dicho embalse modifica significativamente la hidrología de la microcuenca del río Vizcachas, alterando el régimen estacional del mismo río y laminando las avenidas de la época húmeda (IV MEIA Quellaveco, 2012).

### 2.2.2. Geología

En esta sección se describe la geología regional y local del área de interés, la subcuenca del río Coralque.

#### a. Geología regional

La zona de estudio se caracteriza por la presencia de unidades volcánicas (formaciones Pichu, Huaylillas y Grupo Barroso), volcánicas-sedimentarias (Formación Matalaque y Grupo Maure) y sedimentarias (Formación Arcuquina y Grupo Puno). También, existen afloramientos restringidos de dioritas y tonalitas del Cretáceo superior – Paleógeno. La presencia de diversas unidades es debido a los múltiples procesos tectónicos ocurridos en el sur del país, lo cual generó la superposición de acontecimientos geológicos, en especial procesos volcánicos, clásticos y denudatorios (Vargas et al., 2017).

Uno de los principales acontecimientos geológicos ocurridos fue el vulcanismo de la era del Cenozoica, que originó elevaciones con presencia de materiales de denudación y acumulación de clastos continentales y etapas de vulcanismo, lo cual se puede observar en las formaciones Huaylillas y Pichu. Luego, este acontecimiento geológico generó una intensa era de reactivación volcánica, a razón del proceso de subducción de la placa de Nazca con la placa Sudamericana, originando la aparición de numerosos centros volcánicos y unidades litoestratigráficas que contienen rocas volcanoclásticas, tobas, piroclastos, ignimbritas, lavas, brechas y aglomerados volcánicos. Cabe mencionar que los eventos volcánicos y tectónicos que siguen desarrollando hasta la actualidad (I MEIA Quellaveco, 2008; IV MEIA Quellaveco, 2012).

#### b. Geología local

De acuerdo con la evaluación ambiental realizada por el OEFA (2018), que incluía la caracterización geológica mediante trabajo en campo, la zona está conformada por rocas

desde el periodo Neógeno a Cuaternario, comprendido en secuencias volcánicas (Grupo Barroso y formaciones Vizcachas y Sencca), volcano-sedimentarias (Formación Capillune y Grupo Maure) y depósitos superficiales cuaternarios (volcánico, glaciario, aluvial, biogénico y residual). A continuación, se describe las principales características de las unidades litoestratigráficas presentes.

- i. Grupo Maure: Este grupo está conformado por las secuencias sedimentaria, proclástica y lávica. La primera aflora en ambos márgenes del río Títire, río Aruntaya y en el río Coralaque. Los tipos de roca presentes en el río Títire son principalmente lutitas verdes, areniscas, calizas, óxidos de hierro y carbonatos. La segunda aflora en la naciente del río Coralaque, parte baja del río Vizcachas y río Chilota; y está compuesta por tobas blancas que contienen cenizas volcánicas, andesitas y areniscas. La tercera está presente en la confluencia del río Chilota y el río Vizcacha, y está constituida por flujos de lavas afaníticas.
- ii. Formación Vizcachas: Es una unidad volcánica y se encuentra en el área de la presa Vizcachas. Respecto a la litología, consiste en tobas de cristales masivos que contienen principalmente cuarzo y biotita.
- iii. Formación Sencca: Aflora en la naciente del río Aruntaya, embalse Pasto Grande, entre otros, y está conformado por fragmentos líticos de pómez y andesita, cristales de cuarzo y biotita, etc.
- iv. Formación Capillune: Se presenta en el lado oeste del embalse Vizcachas y en la naciente del río Vizcachas, y está conformado por areniscas con conglomerados amarillos y lavas andesíticas.
- v. Grupo Barroso: Es un grupo volcánico amplio que aflora en la naciente de los ríos Aruntaya y Chilota, alrededores del embalse Pasto Grande, entre otros. Está conformado principalmente por andesitas, lavas andesíticas y tobas de composición dacítica.
- vi. Depósitos cuaternarios: Está conformado por material volcánico (cenizas, arenas y bloques), residual, glaciario, biogénico y aluvial. Los depósitos glaciares se encuentran en la naciente del río Chilota, y está constituido por fragmentos de rocas volcánicas englobados en matriz arenosa. Mientras que los depósitos aluviales se ubican mayormente en la parte media del río Chilota y los ríos Aruntaya y Títire, está conformado por areniscas, gravas de fragmentos volcánicos, flujos piroclásticos, entre otros.

### 2.2.3. Hidrogeología

De acuerdo con el estudio de Hidrogeología de la cuenca del río Tambo (1318) regiones Arequipa, Moquegua y Puno (2020), la subcuenca del río Coralaque presenta las siguientes unidades hidrogeológicas:

- a. Acuífero poroso no consolidado: Esta conformado por materiales detríticos no consolidados, permeables y porosos. Su composición litológica es principalmente gravas y arenas, los cuales presentan una gran cantidad de poros interconectados, que permiten el almacenamiento y circulación de aguas subterráneas. Se encuentran presentes las unidades geológicas de depósito aluvial y depósito fluvioglacial.
- b. Acuífero volcánico sedimentario: Unidad hidrogeológica presente en una gran parte de la subcuenca, y está conformada por la intercalación de material volcánico y sedimentario retrabajado que favorece su recarga y de acuíferos cercanos. Se encuentran presentes las unidades geológicas de los grupos Maure y Barroso.
- c. Acuífero fisurado volcánico: Tiene su origen en la gran actividad volcánica y tectónica producida en la Cordillera de los Andes. El Grupo Maure presenta niveles tobaceos que favorecen su recarga y la de otros acuíferos; mientras que el Grupo Barroso con una gran extensión, facilita la recarga de acuíferos.
- d. Acuitardo volcánico: Unidad hidrogeológica que presenta una gran área en la subcuenca, y está conformada por rocas volcánicas, tales como, piroclastos, brecha piroclástica soldada, ceniza, domos de lava dacítica o riolítica, entre otros. Presentan permeabilidad prácticamente nula, ya que no tienen poros conectados entre sí. Se encuentra presente la unidad geológica del grupo Barroso.
- e. Acuitardo sub-volcánico: Esta compuesta por domos con materiales alterados o compactos, impermeables que imposibilitan el flujo de agua. Se encuentra presente la unidad geológica del grupo Barroso.

### 2.2.4. Clasificación de cuerpos de agua superficiales

La Resolución Jefatural 202-2010-ANA aprobó la clasificación de los cuerpos de agua superficiales y marino- costeros, tomando en consideración los usos a los que se le aplica y las propiedades naturales. Posteriormente, mediante la Resolución Jefatural N°56-2018-ANA se aprobó la nueva clasificación de los cuerpos de agua continentales superficiales, la cual fue utilizada para el presente estudio.

**Tabla 1:** Cuerpos de agua clasificados

Código del curso de agua	Nombre	Categoría	Longitud (km)	Unidad Hidrográfica	
				Código UH	Nombre
13186	Río Coralaque	Categoría 3	86.18	1318	Cuenca Tambo
		Categoría 4	31.45		

**FUENTE:** Resolución Jefatural 202-2010-ANA.

El río Coralaque está clasificado en la categoría 3 (Riego de vegetales y bebida de animales) y categoría 4 (Conservación del ambiente acuático) (ver Tabla 1), siendo la primera categoría de mayor relevancia debido a su extensión. Cabe precisar que, los ríos Vizcachas y Tírre no presentan clasificación según su uso, por lo que se aplica la categoría al que estos tributan (río Coralaque). Sin perjuicio a ello, de acuerdo con el Plan de Monitoreo Ambiental aprobado del Proyecto Quellaveco, los resultados de los monitoreos de calidad de agua superficial en los ríos mencionados son comparados con el ECA- Agua para la Categoría 3; lo cual se empleó como base para el presente estudio.

#### 2.2.5. Suelo

La subcuenca del río Coralaque tiene suelos de rocas volcánicas poco desarrolladas, con la clasificación de Andosoles. Se caracterizan por ser ácidos, tener perfiles AC y/o ABC, de color pardo a pardo oscuro. En sus límites inferiores se encuentra material volcánico en diferentes niveles de descomposición. Son suelos hidromórficos ya que reciben filtraciones de la parte alta. Además, tiene un paisaje fluvioglacial conformado por depósitos en bancos irregulares y materiales poco consolidados (I MEIA Quellaveco, 2008).

De acuerdo con el tipo de suelo según su origen, el área presente principalmente suelos derivados de materiales residuales. Estos se han desarrollado a partir de la meteorización de rocas de naturaleza volcánica de tufos y brechas, en especial andesitas (I MEIA Quellaveco, 2008).

### 2.3. Calidad de agua

La calidad del agua es la condición de esta, es decir el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que tiene. Depende del uso que se le va dar, por ejemplo: consumo humano, uso agrícola, etc. Además, la calidad puede verse modificada tanto por factores externos como por causas naturales.

La primera está constituida principalmente por la descarga de efluentes industriales y domésticas, que ha incrementado en los últimos años debido al crecimiento poblacional. Por otro lado, están los procesos naturales tales como las condiciones geológicas, características del suelo, lluvia, litología, erosión natural, entre otros (ANA, 2018). Estas son capaces de incorporar grandes cantidades de sustancias a los cuerpos de agua, por ejemplo: el agua de un río puede ser cálcica debido a la presencia de rocas calizas y dolomita en la parte alta de la cuenca (Carpio & Peña, 2020; Peña, Cotrina, & Acosta, 2009).

a. Parámetros de calidad de agua

En la presente sección se describen algunos de los parámetros tomados en cuenta para la evaluación de la calidad del agua. La ANA (2018) define los siguientes parámetros.

b. Parámetros fisicoquímicos

- Oxígeno disuelto: Este parámetro explica la cantidad de oxígeno que está disuelto en el agua, producto de la contribución del oxígeno de la atmósfera y de la fotosíntesis en el cuerpo de agua.
- Demanda química de oxígeno (DQO): Este parámetro permite medir el oxígeno equivalente del contenido de materia orgánica. Además, sirve para determinar el nivel de contaminación del cuerpo de agua superficial.
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): Mide la cantidad de oxígeno consumida por los microorganismos para degradar la materia orgánica.
- pH: Es un parámetro que depende de la presencia de actividades antrópicas y de la geología de la cuenca hidrográfica. Permite evaluar la acidez o alcalinidad del agua. Además, el pH determina la solubilidad y la biodisponibilidad de muchos metales.
- Boro: Es un elemento que se encuentra en el agua debido a la geología natural de la zona y/o al vertimiento de aguas residuales tratadas y no tratadas. Además, su presencia en el agua puede generar problemas en la salud de las personas y graves efectos sobre los productos agrícolas.
- Manganeso: Es un metal común que se encuentra como óxidos e hidróxidos, en las rocas y suelos. Su medición es importante para controlar las concentraciones de diferentes metales trazas presentes en el cuerpo de agua.

- Arsénico: Metal pesado muy tóxico que se presenta en el agua natural como arseniato y arsenito. Su presencia puede deberse a la descarga de efluentes industriales o mineros, uso de insecticidas o a la litología de la zona.
- c. Parámetros microbiológicos
- Coliformes termotolerantes: Determinar la contaminación fecal en el cuerpo de agua, lo cual puede deberse al vertimiento de aguas servidas u otras causas, como la inadecuada disposición de los residuos sólidos que se arrojan en el cauce del río.

## **2.4. Evaluación espacial y temporal de la calidad del agua**

### 2.4.1. Índice canadiense de calidad de agua (CCME WQI)

De acuerdo al manual canadiense Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente [CCME] (2017), este índice permite simplificar un complejo número de datos de calidad y facilitar su interpretación a la población en general. Para ello, el índice usa tres elementos: alcance (número de parámetros que no cumplen el estándar de calidad del agua), frecuencia (número de veces que incumplen dichos estándares) y la amplitud (la cantidad por la que no se cumplen los estándares). Es importante saber que, los parámetros, los estándares y el periodo de tiempo no son especificados, pues estos dependen de la localidad y los problemas de calidad de agua existentes. Esta herramienta es la base del Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS), desarrollado por la ANA.

### 2.4.2. Índice de calidad de agua ICARHS

La ANA (2020) aprobó una metodología para determinar el Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS), mediante la Resolución Jefatural N°084-2020-ANA. Esta tiene como fin resumir una gran cantidad de datos de calidad de agua, y representar de forma comprensible el estado de la calidad del agua acorde a la realidad del país. La metodología consta de tres etapas, que se explican a continuación:

#### a. Definición de la zona de estudio

Se deberá definir la zona de estudio, ya sea una cuenca, río o un curso de agua. Asimismo, es necesario conocer la ubicación política y geográfica, características hidrográficas (como el río principal y afluentes) y las principales actividades productivas y /o poblacionales presentes.



b. Recopilación de información

- Resultados de los monitoreos de calidad de agua

Es necesario contar con la data suficiente de calidad de agua de la cuenca o parte de un curso de agua, y la comparación de dichos resultados con el ECA-Agua vigente. Cumpliendo el Protocolo Nacional de Monitoreo vigente, se debe tener 1 o varios puntos de muestreo ubicados a lo largo del cuerpo de agua. Asimismo, se debe ordenar toda la información histórica de monitoreos realizados de calidad de agua de al menos 4 monitoreos por cada punto de muestreo. Es recomendable contar con 2 muestreos en época de lluvia y 2 en época seca.

- Parámetros

La metodología señala 20 parámetros, los cuales están agrupados en función a la naturaleza, categoría de los cuerpos naturales de agua y clasificación de los cuerpos de agua continentales superficiales. Los parámetros que consideramos como mínimo están marcados en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Parámetros a evaluar en el ICARHS

Tipo	Parámetro	Categoría 1	Categoría 3	Categoría 4
		Subcategoría A2		Subcategoría E2
		1/	2/	3/
Materia orgánica	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	x	x	x
	Demanda química de oxígeno (DQO)	x	x	
	Oxígeno disuelto (valor mínimo)	x	x	x
	Coliformes termotolerantes	x	x	x
	Fósforo total	x		x
	Amoniaco - N	x		
	Nitratos (NO <sub>3</sub> -)			x
	Hidrocarburos totales de petróleo 4/			x
Fisicoquímico Metal	Potencial de hidrógeno (pH)	x	x	
	Arsénico	x	x	
	Aluminio	x	x	
	Manganeso	x	x	
	Hierro	x	x	
	Cadmio	x	x	

Continuación ...

Tipo	Parámetro	Categoría 1	Categoría 3	Categoría 4
		Subcategoría A2		Subcategoría E2
		1/	2/	3/
	Plomo	x	x	x
	Boro <b>5/</b>	x	x	
	Cobre		x	x
	Mercurio			x
	Zinc			x
	Sólidos suspendidos totales			x

*Nota:* **1/** Poblacional y recreacional: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional. **2/** Riego de vegetales y bebida de animales. **3/** Conservación del ambiente acuático (Ríos de la Costa, Sierra y Selva), **4/** Aplica para la vertiente del Amazonas con categoría E2 ríos de la selva. **5/** Aplica para la vertiente del Pacífico (zona sur).

**FUENTE:** ANA (2020).

### c. Cálculo del ICARHS

#### – Fórmula del ICARHS

El cálculo aplica el mismo método que el índice canadiense CCME WQI. La fórmula está comprendida por tres factores, que se describen a continuación:

**Alcance (F1):** Es el número de parámetros de calidad que sobrepasan los valores del ECA-Agua vigente, respecto al total de parámetros a evaluar.

$$F_1 = \frac{\text{Número de parámetros incumplen los ECA Agua}}{\text{Número total de parámetros a evaluar}}$$

**Frecuencia (F2):** Es el número de datos que incumplen con el ECA-Agua respecto al total de datos de los parámetros a evaluar. Los datos son los resultados de los monitoreos.

$$F_2 = \frac{\text{Número de datos que incumplen el ECA Agua}}{\text{Número total de datos evaluados}}$$

**Amplitud (F3):** Mide la desviación que existe en los datos, definida por la suma normalizada de excedentes respecto al número total de datos.

$$F_3 = \left( \frac{\text{Suma Normalizada de excedentes}}{\text{Suma normalizada de excedentes} + 1} \right) \times 100$$

Donde la suma normalizada de excedentes (SNE) se obtiene de la siguiente manera:

$$SNE = \frac{\sum_{i=1} Excedente_i}{Total\ de\ datos}$$

Cabe señalar, que la excedente es la diferencia del valor ECA y el valor del dato respecto al valor del ECA para agua, además el cálculo se realiza para cada parámetro.

**Caso 1:** Se da cuando el valor de la concentración del parámetro es mayor al valor establecido en el ECA-Agua, el cálculo del excedente es de la siguiente forma:

$$Excedente_i = \frac{Valor\ del\ parámetro\ que\ inclumple\ el\ ECA\ Agua}{Valor\ establecido\ del\ parámetro\ en\ el\ ECA\ Agua} - 1$$

**Caso 2:** Se da cuando el valor de la concentración del parámetro es menor al valor establecido en el ECA-Agua, el cálculo del excedente es de la siguiente forma:

$$Excedente_i = \frac{Valor\ establecido\ del\ parámetro\ en\ el\ ECA\ Agua}{Valor\ del\ parámetro\ que\ inclumple\ el\ ECA\ Agua} - 1$$

Cuando se haya obtenido el valor de los tres factores se procede a realizar el cálculo del índice, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$CCME\ WQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732}$$

– Escalas de valoración

El valor del ICARHS se presenta como un número adimensional, que estará en un rango del 0 al 100. El rango está dividido en 5 escalas que permiten calificar el estado de la calidad del agua, que son: pésimo, malo, regular, bueno y excelente; tal como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3:** Valoración del ICARHS

ICARHS	Calificación	Color (RGB)	Interpretación
94-100	Excelente	0 112 255	La calidad del agua está protegida con ausencia de amenazas o daños. Las condiciones son muy cercanas a niveles naturales o deseados.
80-94	Bueno	0 197 255	La calidad del agua se aleja un poco de la calidad natural del agua. Sin embargo, las condiciones deseables pueden estar con algunas amenazas o daños de poca magnitud.
65-79	Regular	85 255 0	La calidad del agua natural ocasionalmente es amenazada o dada. La calidad del agua a menudo se aleja de los valores deseables. Muchos de los usos necesitan tratamiento
45-64	Malo	255 170 0	La calidad del agua no cumple con los objetivos de calidad, frecuentemente las condiciones deseables están amenazadas o dañadas. Muchos de los usos necesitan tratamiento.
0-44	Pésimo	255 0 0	La calidad de agua no cumple con los objetivos de calidad, casi siempre está amenazada o dañada. Todos los usos necesitan previo tratamiento

*Nota:* Para la visualización gráfica usar los colores RGB “Modelo Cromático establecido para rojo (Red), verde (Green) y azul (Blue)”.

**FUENTE:** ANA (2020).

– Determinación de subíndices

Consiste en el cálculo de los 2 subíndices ( $S_1$  y  $S_2$ ), los cuales están en función de ciertos parámetros que se relacionan entre sí, y la calificación final será el resultado de menor valor y calificación crítica, tal como se muestra en la Figura 2.

$$ICARHS = \text{mín.} (S_1, S_2)$$

$S_1$ : subíndice 1,  $S_2$ : subíndice 2, *mín.*: mínimo



**Figura 2.** Determinación de subíndices del ICARHS  
**FUENTE:** ANA (2020)

## – Representación gráfica

Finalmente, se tiene que contar con la ubicación espacial, calificación de los subíndices 1 y 2, y el resultado del ICARHS para la representación gráfica de los resultados del ICARHS. La metodología recomienda usar ciertos símbolos/iconos para visualizar adecuadamente el resultado en un mapa temático.

### 2.4.3. Índice de metal (IM)

Es una herramienta que permite estimar la contaminación por metales de un cuerpo de agua. Cuanto mayor es la concentración de un metal respecto a su máxima concentración permitida (MAC), peor es la calidad de agua. El valor del índice de metal (IM) mayor a 1 es el umbral de advertencia. Se calcula de la siguiente manera (Goher, Hassan, Abdel-Moniem, Fahmy, & El-sayed, 2014):

$$MI = \sum_{i=1}^n \frac{Ci}{(MAC)_i}$$

Ci: Concentración de cada elemento, MAC: Concentración máxima permitida.

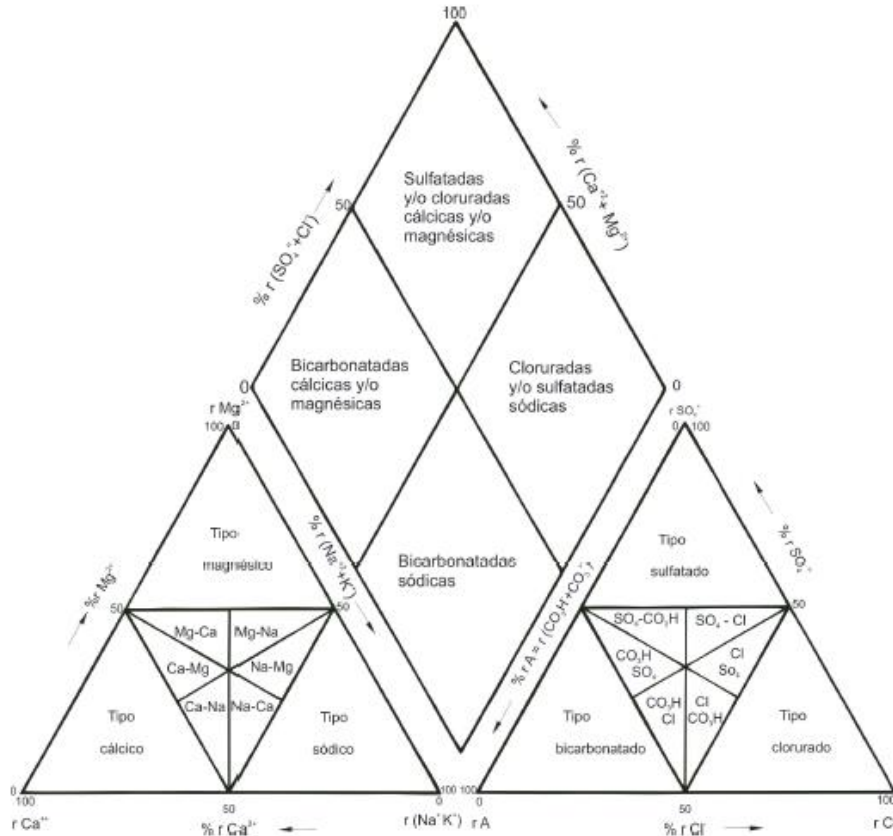
## 2.5. Evaluación de la hidroquímica del agua

El análisis hidroquímico del agua superficial proporcionar información crucial sobre los cambios ambientales, orígenes de las características químicas y la relación con la geografía de la zona (Jiang, Yao, Liu, Wang, & Wu, 2015). Esto permite lograr una gestión eficaz de los recursos hídricos y el desarrollo sostenible (Hua, Xiao, Li, & Li, 2020).

### 2.5.1. Diagrama de Piper

También conocido como diagrama triangular, es una representación gráfica conformada por tres componentes, que son: dos triángulos equiláteros y un rombo. Los dos triángulos equiláteros representan la composición aniónica ( $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$  y  $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ ) y catiónica ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ ), mientras que el campo central romboidal resume la información de ambos triángulos. Cabe señalar, que las concentraciones de los iones en meq/L se expresan como porcentaje. Cada triángulo está compuesto por tres aniones o tres cationes, en donde a cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión (Bustamante, 2017; García, Balmaseda, & Vargas, 2012; Carpio & Peña, 2020; Ocampo, 2017).

Este tipo de diagramas permite representar la composición química del agua y seleccionarla por familias hidrogeoquímicas, con ello se puede deducir reacciones o procesos químicos que se llevan a cabo en el recurso agua (Árcega, 2010; Jiang et al., 2015). Las principales familias de agua se muestran a continuación:

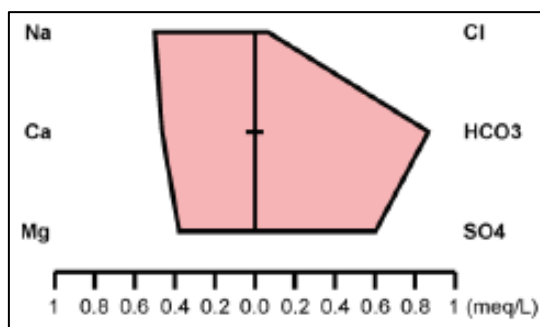


**Figura 3.** Diagrama de Piper  
**FUENTE:** Carpio & Peña (2020)

### 2.5.2. Diagrama de Stiff

Representación compuesta por tres ejes horizontales cortados perpendicularmente por un cuarto que forman seis escalas en donde se grafican las concentraciones de cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Ca}^{+2}$ ) en el lado izquierdo y aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ ) en el lado derecho (Árcega, 2010; Carpio & Peña, 2020). Se colocan las concentraciones en cada ion en meq/L y se unen formando un polígono representativo (Ocampo, 2017). La forma del polígono permite determinar el tipo de agua (García, Balmaseda, & Vargas, 2012). Originalmente, este tipo de diagrama fue diseñado para su uso en el campo petrolero, pero actualmente se emplea para el análisis de agua en general (Fernández, 2008). Cabe señalar, que muchos estudios sitúan estos diagramas en mapa para evaluar la evolución hidroquímica y la variación espacial de los tipos de agua (García, Balmaseda, & Vargas, 2012; Ocampo, 2017).

A continuación, en la Figura 4 se muestra un ejemplo a escala 1 meq/L. Se observa que los elementos predominantes en el agua son  $\text{HCO}_3^-$  (0.9 meq/L) y  $\text{Na}^+$  (0.5 meq/L), por ende, recibe la clasificación hidroquímica de bicarbonatada sódica.

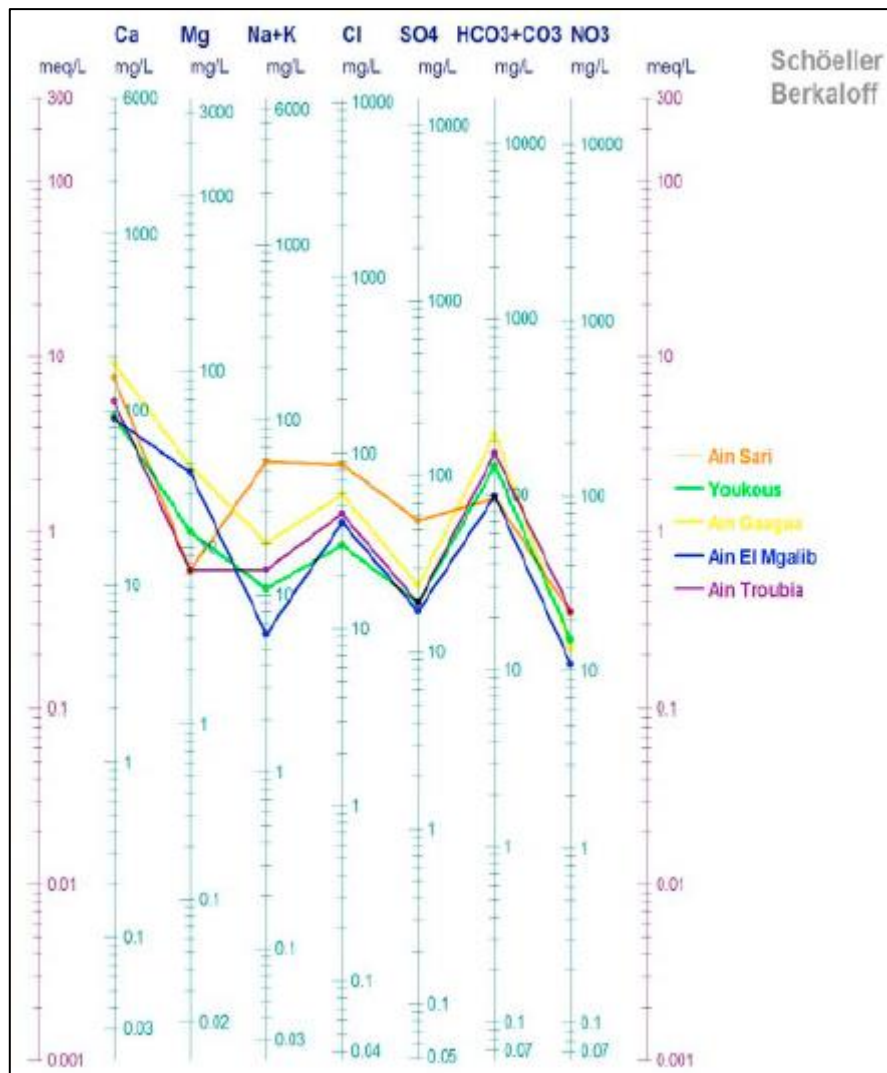


**Figura 4.** Diagrama de Stiff  
**FUENTE:** Carpio & Peña (2020)

### 2.5.3. Diagrama de Schoeller - Berkaloff

También llamado diagrama semilogarítmico, está conformado por varias líneas verticales paralelas entre sí, donde cada una de las líneas y a escala logarítmica representa la concentración de un ion en meq/L (Fernández, Los hidrogramas y otros sistemas de representación del quimismo de las aguas, 2008; García, Balmaseda, & Vargas, 2012). Al unir los puntos se define la concentración de los iones ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ ), formando una línea quebrada que permiten identificar las características del agua (Árcega, 2010; Martínez, Martínez, & Castaño, 2006). Asimismo, la pendiente de la línea que une dos iones contiguos permite definir la relación entre ambos, además de poder comparar diferentes muestras simultáneamente (Fernández, Los hidrogramas y otros sistemas de representación del quimismo de las aguas, 2008; García, Balmaseda, & Vargas, 2012). Otra ventaja es que este tipo de diagramas proporciona una visualización rápida de los máximos y mínimos de los iones (Árcega, 2010).

En la Figura 5 se aprecia el diagrama obtenido de un estudio realizado en 5 fuentes de agua subterránea (Legrioui, Baali, Hamad, Abdeslam, & Redha, 2017). Se observa que las familias hidroquímicas predominantes son la bicarbonatada cálcica en 4 fuentes (Youkous, Ain Gaagaa, Ain El Mgalib y Ain Troubia) y clorurada cálcica en la fuente de Ain Sari.

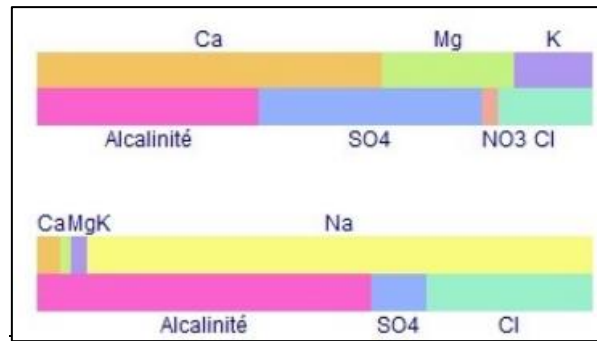


**Figura 5.** Diagrama de Schoeller- Berkaloff  
**FUENTE:** Legrioui et al. (2017)

#### 2.5.4. Diagrama de Stabler

Este diagrama permite comparar las concentraciones de cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ), usando dos rectángulos yuxtapuestos, donde la barra superior representa los cationes y la inferior para aniones; y cuya área es proporcional a la concentración de cada uno de los elementos, tal como se muestra en la Figura 6.

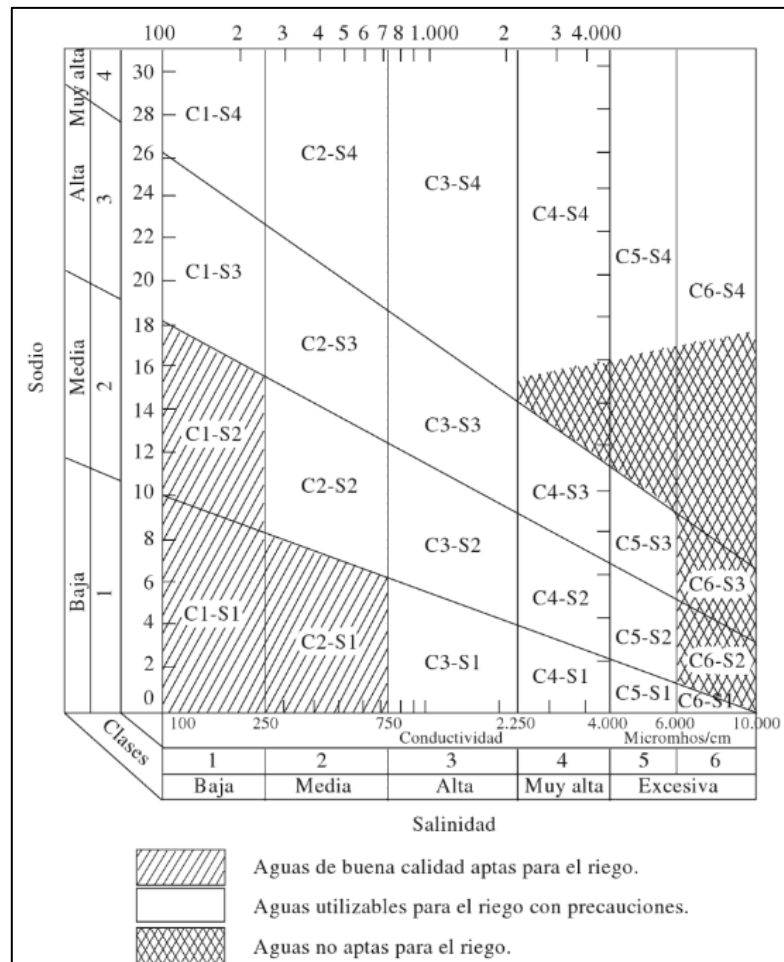




**Figura 6.** Diagrama de Stabler  
**FUENTE:** Giraldo, V. (2021)

### 2.5.5. Diagrama de Wilcox - Riverside

Los diagramas de Wilcox – Riverside permiten clasificar las aguas en función al peligro de salinización del suelo, donde se combina el índice C (conductividad eléctrica) y el índice S (contenido en sodio) (Martínez, Martínez, & Castaño, 2006).



**Figura 7.** Diagrama de Wilcox - Riverside  
**FUENTE:** Blasco y De La Rubia (1973)

La clasificación de acuerdo con Thorne y Peterson se expresan en los siguientes grupos, según el contenido de salinidad (C) y sodio (S), tal como se muestra a continuación (Cadahía, 2005; Fernández, García, & García, 2008):

- Grupo C1: Son válidas para todo cultivo con cualquier tipo de suelo.
- Grupo C2: Son válidas con moderado grado de lavado del suelo. Se pueden cultivar en la mayoría de los casos, plantas moderadamente tolerantes.
- Grupo C3: Solo para plantas muy resistentes a la salinidad. No pueden usarse en suelos con drenaje deficiente.
- Grupo C4: Aguas de salinidad muy alta en muchos casos no es apta para el riego. Solo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje.
- Grupo C5: Agua de salinidad excesiva, que solo debe emplearse en casos muy contados, con precauciones.
- Grupo C6: Aguas de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.
- Grupo S1: Pueden usarse en todos los suelos con pocas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiable.
- Grupo S2: Puede presentar un peligro en condiciones de lavado deficientes, en terrenos de textura fina con elevada capacidad de cambio catiónico, si no contienen yeso.
- Grupo S3: Para la mayoría de los suelos puede alcanzarse el límite de sodio intercambiable. En suelos yesíferos el riesgo es inferior.
- Grupo S4: Es inadecuada para el riego salvo para salinidades bajas añadiendo al suelo yeso.

## **2.6. Evaluación de la fuente de generación**

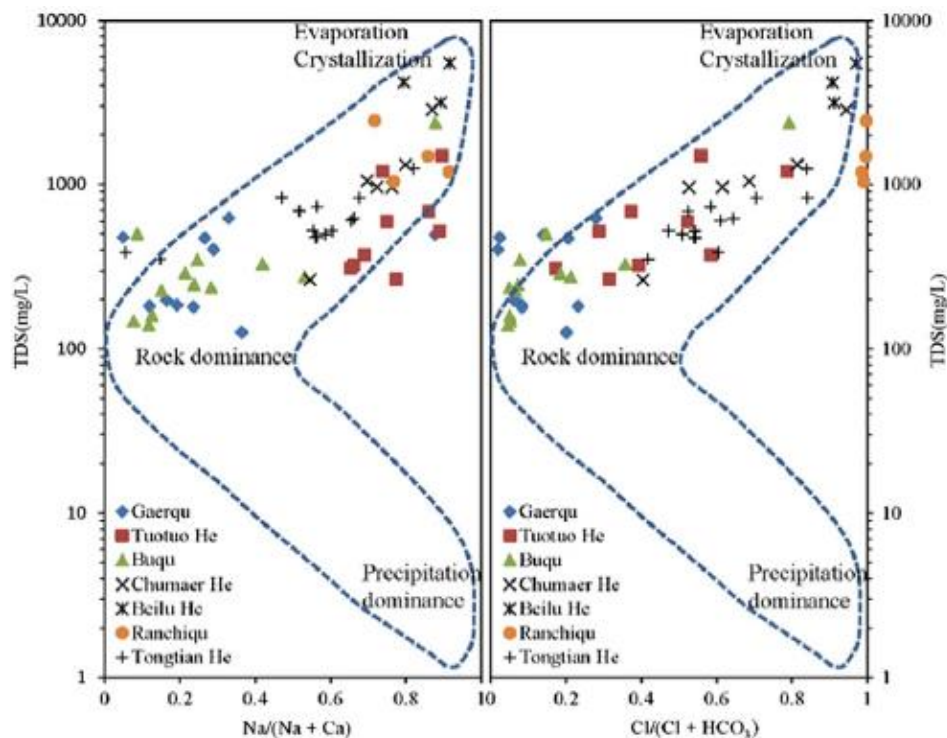
Las relaciones de los iones mayoritarios sirven para clasificar los tipos de agua y definir su origen, sin embargo, suelen ser ambiguos en entornos donde las sales del suelo son comunes. Por ello, para comprender del todo la química del agua superficial, es necesario definir los procesos claves y condiciones que generan una variedad de transformaciones de los solutos dentro cuerpo de agua (Webster, Brown, & Vincent, 1994; Zhu et al., 2011).

### **2.6.1. Diagrama de Gibbs**

Este diagrama se usa para determinar los mecanismos que controlan la hidroquímica de las aguas superficiales, los cuales incluyen la precipitación atmosférica, dominio de las rocas y el proceso de evaporación y cristalización. Se grafica las relaciones ponderadas de  $\text{Na}^+$

( $\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$ ) vs TDS y  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  vs TDS, y en base a las posiciones en el diagrama se evalúa (Gao et al., 2017; Gibbs, 1970). La premisa de este modelo precisa que la relación  $\text{Ca}/\text{Na}$  del agua será mayor cuando exista interacción con la roca, por el contrario, esta relación será menor cuando el factor de control sea el proceso de evaporación a medida que se precipita la calcita. Sin embargo, la primera proporción no se cumple en entornos desérticos; ya que sus suelos tienen gran contenido de sales de Na, lo que aumentaría el Na en relación con el Ca. Por ende, la relación  $\text{Ca} / \text{Na}$  no puede usarse en tales casos para distinguir entre la interacción con roca o suelo y la evaporación (Webster et al., 1994; Zhu et al., 2011).

A continuación (Figura 8), se muestran los resultados de un estudio hidroquímico realizado en China. El diagrama muestra que las aguas de los ríos Gaerqu y Buqu tienen bajas proporciones de  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  y  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  y concentraciones moderadas de TDS, por ende, los ríos se encuentran dominados por las rocas. Los ríos Beilu He, Chumaer He y Ranchiqu están controlados por los procesos de evaporación-cristalización, ya que presentan altas concentraciones de TDS y altas proporciones de  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  y  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ . Por otro lado, los ríos Tuotuo He y Tongtian He están en un estado intermedio, controlados tanto por la meteorización de las rocas como por los procesos de evaporación-cristalización (Jiang et al., 2015).

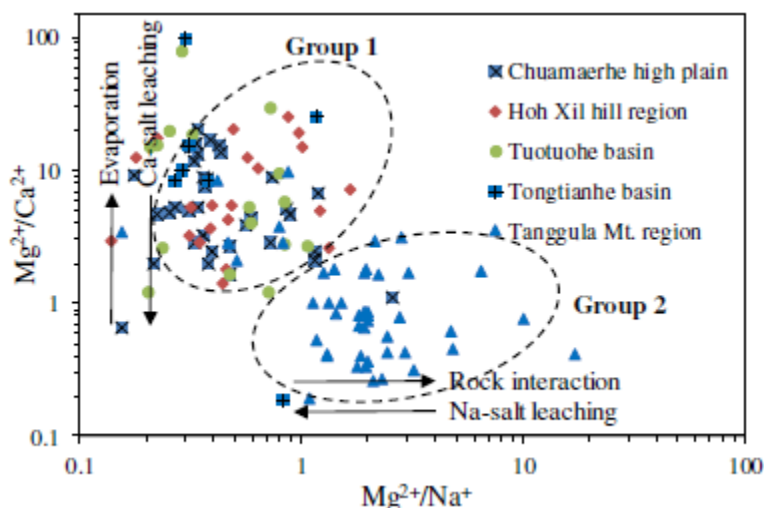


**Figura 8.** Diagrama de Gibbs  
**FUENTE:** Jiang et al. (2015)

## 2.6.2. Relaciones de $Mg^{2+}/Na^+$ vs $Mg^{2+}/Ca^{2+}$

Estas relaciones de Mg/cationes sirven para definir la influencia de los procesos de lixiviación de sales del suelo ( $Mg^{2+}/Na^+$ ) y evaporación ( $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ ), ya que el Mg es un componente minoritario de las sales del suelo y que no precipita en las etapas iniciales de evaporación de un agua con bajo contenido de sílice. Por ende, las concentraciones de Mg no aumentarán por la lixiviación de la sal del suelo ni disminuirán por la precipitación de la sal en las primeras etapas de la evaporación del suelo. Además, los niveles de Mg en el agua solo incrementan cuando se libera de los minerales de ferromagnesio de las rocas durante la meteorización química (Webster et al., 1994; Zhu et al., 2011).

En la Figura 9, se muestra los resultados obtenidos en el estudio hidroquímico en lagos de regiones de permafrost. Se observa que los lagos se dividen en dos grupos: el primero conformado por muestras de agua de CHP, HXHR, TuB y ToB, y el segundo conformado por muestras de agua de MTR. El primer grupo tiene altas las relaciones de  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  y bajas relaciones de  $Mg^{2+}/Na^+$ , lo que indica que el control de los procesos de evaporación en las características hidroquímicas en dichas regiones. Por otro lado, el segundo grupo tiene relaciones contrarias respecto al primer grupo, lo que refleja que las interacciones de las rocas regulan las características hidroquímicas en el MTR (Gao et al., 2017).



**Figura 9.** Gráfico de la relación  $Mg^{2+}/Na^+$  vs  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$   
**FUENTE:** Gao et al. (2017)

## **2.7. Modelamiento de la dispersión de parámetros de calidad de agua con software CORMIX**

El software de modelamiento CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System) es uno de los modelos de simulación aprobados por el Centro de Modelamiento para la Evaluación de la Exposición (CEAM) de la USEPA. Además, se basa en los criterios y metodologías de los estudios “Dispersion in Hydrologic and Coastal Environments” de Norman H. Brooks y el estudio “Dilution Models for Effluent Discharges” de D. J. Baumgartner, W. E. Frick y P. J. W. Roberts (ANA, 2017; Doneker & Jirka, 2007).

Este modelo numérico permite analizar, predecir y diseñar las descargas de efluentes en diferentes cuerpos de agua, incluidas ríos, lagos, embalses, estuarios, aguas costeras y pequeñas corrientes. El énfasis fundamental es la predicción de la geometría y las características de dilución de la zona de mezcla inicial, así como las regulaciones de calidad de agua. También predice el comportamiento de la pluma de descarga a largas distancias (Callo & Vigo, 2014; Doneker & Jirka, 2007). Comprende cuatro modelos de simulación hidrodinámica y dos modelos de simulación post-procesamiento (Callo & Vigo, 2014), que son:

- CORMIX1: Modelo de simulación para descargas simples.
- CORMIX2: Modelo de simulación para varios difusores sumergidos.
- CORMIX3: Modelo de simulación para descargas en superficie flotantes.
- DHYDRO: Modelo de simulación para densidades muy altas y/o descargas de sedimento de un solo puerto, multidifusores sumergidos, o descargas de superficie dentro de ambientes costeros no limitados.
- CORJET: Modelo de simulación de Post-procesamiento para mayor detalle de la zona de mezcla cercana para un solo difusor sumergido y difusores múltiples en entornos no limitados.
- FFL: Modelo de simulación de Post-procesamiento para análisis de la pluma a grandes distancias.

El procedimiento para modelar con CORMIX está comprendido de cuatro etapas. La primera consiste en la data a ingresar. El programa solicita 6 formularios de entrada de datos sobre seis temas, en el siguiente orden: descripción del sitio o caso, características del efluente,

condiciones ambientales, propiedades de la descarga, regulaciones en la zona de mezcla y el control de salida del modelo. Dichos datos deberán estar en unidades SI. Posteriormente, el modelo realiza un análisis complejo para clasificar el flujo, basándose en las relaciones entre los patrones de flujo y determinados parámetros físicos. La tercera etapa desarrolla una serie de simulaciones que permite predecir la trayectoria y las características de dilución del flujo. Finalmente, el modelo señala varias herramientas de diseño y análisis, una de estas es CorVue. Esta herramienta interactiva de visualización muestra los procesos de zona de mezcla y el comportamiento de la pluma en 3D y la distribución de la concentración (Doneker & Jirka, 2007).

## **2.8. Evaluación del riesgo ecotoxicológico**

El riesgo ecotoxicológico se define como la probabilidad de que ocurran efectos adversos sobre el ecosistema debido a la aplicación o emisión de una sustancia química. La evaluación del riesgo es un procedimiento donde se debe obtener información disponible sobre la magnitud de los impactos de una sustancia química, que luego se la analiza para definir el nivel de riesgo posible en relación con la exposición. Dicho proceso está conformado de cuatro etapas, que son: identificación del riesgo, evaluación de efectos, evaluación de la exposición y caracterización del riesgo (Sogorb, Estévez, & Vilanova, 2018; Instituto Nacional de Ecología, 2010).

### **2.8.1. Identificación del peligro**

En esta primera etapa se debe determinar si una sustancia es tóxica, y conocer qué efectos adversos es capaz de causar. Para ello, se debe recabar información disponible de ensayos ecotoxicológicos. La peligrosidad de una sustancia química se define a través de sus propiedades (como la toxicidad para los organismos), su capacidad de bioacumulación y su capacidad de degradarse (Sogorb et al., 2018; De la Torre, Nuñez, & Carballo, 2004).

### **2.8.2. Evaluación de efectos (relación dosis-respuesta)**

La segunda etapa estudia la relación dosis-respuesta, en otras palabras, la correlación cuantitativamente de la severidad del efecto negativo con la intensidad de la exposición. El objetivo es determinar la dosis de referencia que se considere segura, es decir, la concentración esperada sin efectos ambientales (PNEC). Esta dosis umbral separa la concentración que no origina efectos (contaminación aceptable) de la concentración inaceptable desde la perspectiva ecotoxicológica (De la Torre et al., 2004; Sogorb et al.,

2018). La evaluación se basa en el uso de diversas metodologías biológicas, que se detallan en seguida (Instituto Nacional de Ecología, 2010; De la Torre et al., 2004):

- Los bioensayos, métodos más usados, permiten conocer los efectos producidos por una sustancia, mediante la medición y observación de la manifestación de efectos en los organismos de ensayo (generalmente de una sola especie) a condiciones de laboratorio. Evalúan los efectos agudos y subagudos, hasta los efectos crónicos que pueden llevar a la mortalidad de la especie en estudio.
- El cálculo de índices de toxicidad, tales como concentración letal media (CL<sub>50</sub>), concentración efectiva media (CE<sub>50</sub>) y concentración inhibitoria media (CI<sub>50</sub>). La primera hace referencia a la concentración que causa la muerte del 50% del grupo de organismos, bajo condiciones determinadas; mientras que la segunda es la concentración que causa un efecto adverso en 50% del grupo de organismos, bajo condiciones específicas. La última corresponde a la concentración de la sustancia que puede producir una reducción del 50% de una respuesta biológica en un grupo de organismos.
- Para cuantificar un efecto en ensayos crónicos, se utilizan parámetros como: NOEC, LOEC y CE<sub>10</sub>. El primero corresponde a la concentración máxima que no genera efectos y que se sitúa de la LOEC o concentración mínima que produce efectos. Sin embargo, muchos estudios recientes evalúan la CE<sub>10</sub> en lugar de la NOEC; pues la última es más exacta dado que se obtiene mediante la curva concentración/ efecto y no experimentalmente.
- El cálculo de la PNEC (concentración prevista sin efecto) se realiza para cada uno de los diferentes grupos de organismos, representativos del medio; de los cuales se selecciona el valor de toxicidad más sensible. A dicho dato se le aplica un Factor de Seguridad o Factor de Valoración, de tal manera que se asegure la protección de otros organismos más sensibles. Se determina con la siguiente expresión:

$$PNEC = \frac{\text{Dato de toxicidad más sensible}}{\text{Factor de Valoración}}$$

### 2.8.3. Evaluación de la exposición

Consiste en determinar la concentración de la sustancia química a la que se exponen los organismos o ecosistema, y se conoce como PEC (concentración esperada en el medio). La

exposición abarca desde la liberación de la sustancia, a partir de la fuente, hasta su captación o interacción con el ambiente o con algún componente de este. Para ello, se deberá realizar diversos análisis, que incluyen cantidad de producción o uso de la sustancia, propiedades fisicoquímicas y, si es posible, estudios en campo (De la Torre et al., 2004; Instituto Nacional de Ecología, 2010; Sogorb et al., 2018).

De acuerdo con De la Torre, Ñuñoz y Carballo (2004), las principales propiedades a conocer de la sustancia son las siguientes:

- Tasa de degradación media en agua en función del pH (DT<sub>50</sub>), en condiciones de laboratorio
- Tasa de degradación media por acción fotolítica (DT<sub>50</sub>), en condiciones de laboratorio
- Tasa de degradación media por acción biológica en organismos aerobios (DT<sub>50</sub>), en condiciones de laboratorio
- Tasa de degradación media por acción biológica en organismos anaerobios (DT<sub>50</sub>), en condiciones de laboratorio
- Volatilización
- Bioacumulación
- Absorción/ desorción en suelos
- Otros.

#### 2.8.4. Caracterización del riesgo

La etapa final integra la información sobre la exposición y los efectos, mediante la relación entre PNEC y PEC, llamada razón de caracterización del riesgo (RCR). Cuando la RCR es mayor que 1, o sea, cuando la dosis que se considera segura es mayor que la dosis real se define que no hay riesgo. Sin embargo, cuando la RCR es mayor que 1, existe un riesgo que incrementa conforme dicho valor va siendo más alto (De la Torre et al., 2004; Instituto Nacional de Ecología, 2010; Sogorb et al., 2018). A continuación, se muestra las comparaciones entre ambos parámetros (De la Torre et al., 2004).

$$\frac{PEC\ agua}{PNEC\ organismos\ acuáticos} \quad \frac{PEC\ suelo}{PNEC\ organismos\ del\ suelo} \quad \frac{PEC\ sedimento}{PNEC\ organismos\ en\ sedimentos}$$



## 2.9. Análisis estadístico

### 2.9.1. Coeficiente de correlación de Pearson

De acuerdo con Hernández (2012), el coeficiente de correlación lineal de Pearson ( $r$ ) se utiliza para medir el grado de asociación lineal entre dos variables ( $X$  y  $Y$ ), tomando valores entre  $-1$  a  $1$ . Cuanto más se acerca a  $1$  o  $-1$ , mayor será la relación lineal entre las variables, por lo contrario, no existirá ninguna relación lineal cuando el valor del coeficiente sea cero ( $r=0$ ). El signo del coeficiente o signo de covarianza indica si la relación es directa (positivo) o inversa entre las variables (negativo). En el primer caso ( $r=+$ ), cuando los valores de  $X$  aumentan, los valores de  $Y$  también lo hace y viceversa; en cambio, en el segundo caso ( $r=-$ ), cuando los valores de  $X$  aumentan, los valores de  $Y$  disminuyen y viceversa. Cabe señalar, que este coeficiente no excluye la posibilidad de que exista otra forma de correlación no lineal. Se calcula de la siguiente manera:

$$r = \frac{S(XY)}{S(XX)S(YY)}, -1 \leq r \leq 1$$

Donde:

$S(XY)$ : Covarianza de ( $X$ ,  $Y$ )

$S(XX)$  : Desviación de la variable  $X$

$S(YY)$  : Desviación de la variable  $Y$

La prueba de hipótesis mide la significancia de la correlación:  $H_0: \rho = 0$  versus  $H_a: \rho \neq 0$  (Helsel & Hirsch, citados por Flores, 2017).

### 2.9.2. Análisis de Componentes Principales (ACP)

Es una técnica de análisis multivariante que permite describir la variación de un conjunto de datos (observaciones) en relación de un conjunto de variables no correlacionadas, llamadas componentes principales, lo cual son combinaciones lineales de las variables originales (relacionadas). Donde un número pequeño de componentes explica la mayor parte de la variación de todas las variables originales, mientras que los últimos componentes explican menos la variación y pueden ser eliminados (González & Barreiro, 2006; Rodríguez-Alvarez, Moraña, Salusso, & Seghezzi, 2017).

De acuerdo con Sánchez (2012), este método descriptivo reduce la gran cantidad de datos de entrada manteniendo la mayor cantidad de información posible para poder analizarlo de

forma más sencilla. El ACP se basa en la aplicación del álgebra lineal, específicamente, la técnica algebraica de la descomposición en valores singulares (SVD). Se fundamenta en dos propiedades, que son:

- Los componentes principales son ortogonales entre sí, permitiendo así su tratamiento independiente.
- Se logra de manera secuencial la máxima variabilidad de  $X$ , por ello se garantiza la pérdida mínima de información.

El componente principal (CP) puede ser expresado de la siguiente forma (Flores, 2017):

$$Z_{ij} = a_{i1} x_{1n} + a_{i2} x_{2n} + a_{i3} x_{3n} + \dots + a_{ip} x_{pn}$$

Donde:

$Z$ : Puntaje del componente

$a$ : Carga o peso del componente

$x$ : Valor medido de la variable

$i$ : Número del componente

$n$ : Número de muestra

$p$ : Número total de variables

### 2.9.3. Análisis Factorial (AF)

Esta es una herramienta estadística similar al ACP y estudia fenómenos donde las variables dependen de un factor común (implícito). Usa un modelo lineal para expresar las variables en función de los factores comunes, a través de coeficientes resultantes de los coeficientes de correlación de las variables. Así, el análisis factorial proporciona factores que explican la variabilidad de las variables. Los factores correspondientes a las variables son independientes entre sí (Álvarez, 1995; González & Barreiro, 2006).

El AF se diferencia del ACP en el modelo que relaciona variables y factores. Es decir, si la matriz de correlaciones existe, los componentes principales también existen; en cambio, solo un test estadístico puede aceptar o no el modelo factorial (Cuadras, 2019). Es decir, el análisis factorial considera que la variabilidad de cada variable posee una parte explicable por factores comunes y otra independiente de las demás variables (Álvarez, 1995).

El análisis factorial se expresa de la siguiente manera (Álvarez, 1995):

$$X_{ij} = a_{1j}F_{i1} + a_{2j}F_{i2} + \dots + a_{kj}F_{ik} + U_j$$

Donde:

$X_{ij}$ : Valor de la jésima variable correspondiente al iésimo caso

$F_{ij}$ : Coeficientes factoriales correspondientes al iésimo caso

$a_{ij}$ : Puntuaciones factoriales

$U_j$ : Factor único correspondiente la jésima variable

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio se ubica en los distritos San Cristóbal y Carumas, pertenecientes a la provincia Mariscal Nieto; y el distrito Chojata, perteneciente a la provincia General Sánchez Cerro, departamento de Moquegua. Hidrográficamente, está localizado en la subcuenca Coralaque, que se encuentra en la parte alta de la cuenca Tambo. Los ríos de interés son los ríos Títire y Vizcachas, cuya confluencia forman al río Coralaque. Los puntos de monitoreo se ubican en los ríos de interés, tal como se detalla en la Tabla 4.

**Tabla 4:** Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad de agua superficial

Estación	Ubicación	Coordenadas UTM WGS 84 (19S)		Altitud (msnm)
		Norte	Este	
TIT-1	Río Títire	8168730	350230	4347
VIZ-2	Río Vizcachas	8161304	349750	4292
QE-36	Río Coralaque	8178084	316551	3581

**FUENTE:** Octavo ITS del Proyecto Quellaveco, 2021.

Asimismo, en la Figura 10 se muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad de agua superficial (2 puntos aguas arriba antes de la confluencia y un punto después de la confluencia).

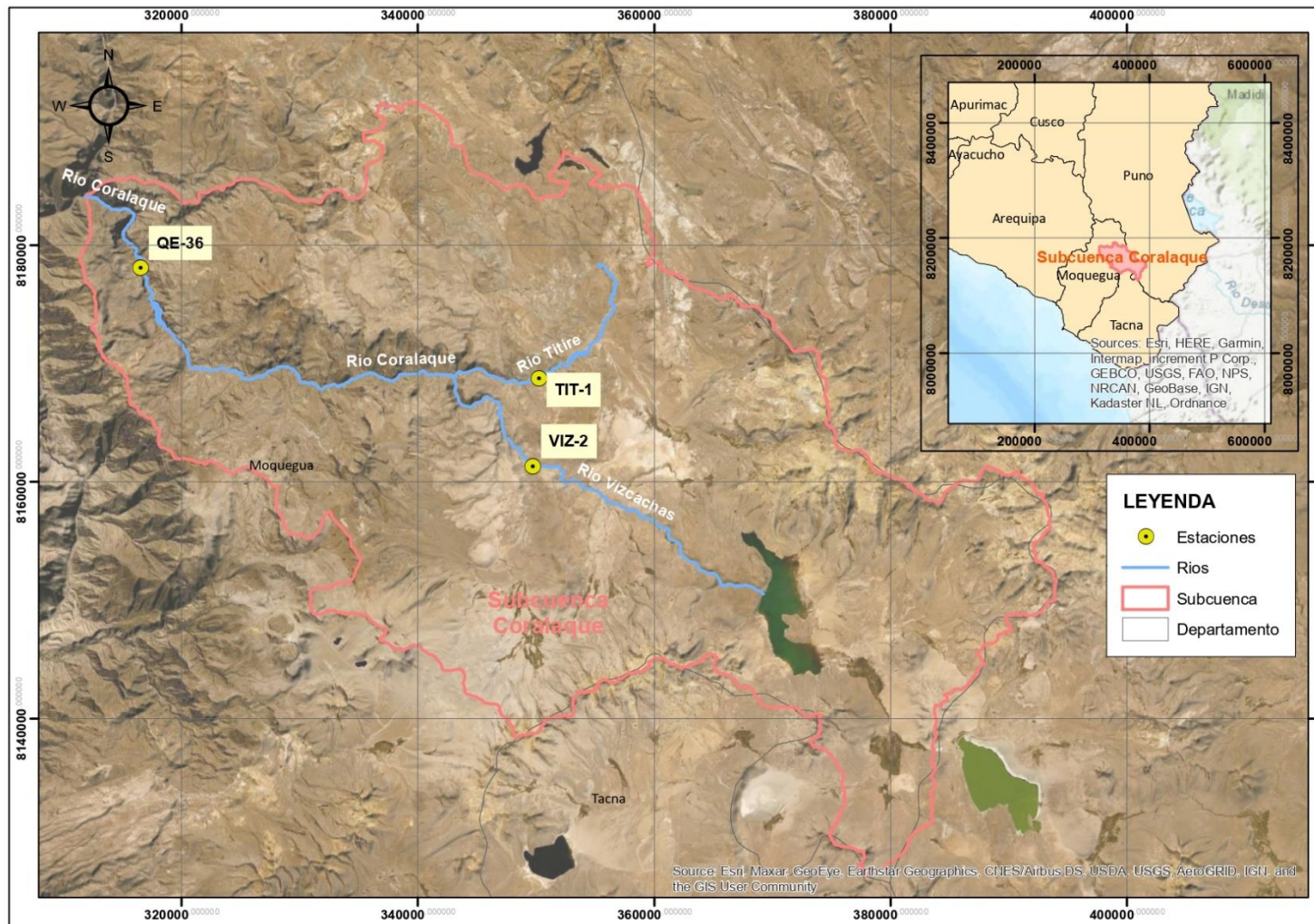


Figura 10. Mapa de ubicación de las estaciones de monitoreo

Cabe precisar que, en la zona de estudio, durante la época húmeda (diciembre a marzo) precipita el 93% de la lluvia anual, mientras que durante la época seca (mayo a octubre) y de transición (abril y noviembre) precipita el 7% restante (IV MEIA Quellaveco, 2015). En ese sentido, para el presente estudio se consideró únicamente 2 temporadas al año, que comprenden la temporada húmeda (diciembre a marzo) y temporada seca (abril a noviembre). Además, se utilizó de la data disponible de las estaciones de interés (TIT-1, VIZ-2 y QE-36), que abarca el periodo comprendido a partir del año 2016 hasta el segundo trimestre del 2021, con una frecuencia de monitoreo mensual.

### **3.2. Materiales**

A continuación, se detallan los materiales de trabajo utilizados para la presente investigación:

#### **3.2.1. Fuente de información**

La data obtenida de los monitoreos de calidad de agua superficial realizados como parte del programa de monitoreo ambiental aprobado del proyecto Quellaveco de Anglo American, durante el periodo 2016 hasta el segundo trimestre del 2021.

#### **3.2.2. Equipos**

- Laptop

#### **3.2.3. Otros**

- Los softwares CCME WQI, Diagrammes, ArcGIS y XLSTAT y Cormix para la generación de los resultados a analizar.
- Las plantillas de cálculo de Excel para la realización de cálculos, tablas y gráficos.

### **3.3. Metodología**

En esta sección se detalla las 6 etapas que se desarrollaron para el presente estudio. La primera etapa consistió en el análisis espacial y temporal de los 03 puntos de monitoreo, mediante el cálculo del índice de calidad de agua (ICARHS) y el índice de metal (IM). La segunda etapa permitió conocer la composición hidroquímica (aniones y cationes) del agua. La tercera etapa consistió en determinar los procesos hidrogeológicos influyentes en la hidroquímica del agua. La cuarta etapa se enfocó en conocer la dispersión de algunos parámetros de concentración en la zona de mezcla y aguas abajo después de la confluencia.

La quinta etapa comprendió la evaluación del riesgo ambiental debido a la influencia del río Títire sobre el río Coralaque. Finalmente, la sexta etapa estuvo orientada en la evaluación estadística de los datos mediante el método de Análisis de Componentes Principales (ACP).

### 3.3.1. Evaluación espacial y temporal de la calidad de agua

Para la evaluación espacial y temporal de calidad de agua se utilizó el índice de calidad ambiental de los recursos hídricos superficiales (ICARHS) e índice de metal (IM). A continuación, se detalla el cálculo de los indicadores:

#### a. Determinación del índice de calidad de agua ICARHS

El cálculo del ICARHS para las tres estaciones de monitoreo se realizó a través de la calculadora CCME WQI. Esta es una calculadora creada por el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente, que al igual que la metodología “Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS)” (2020), comprende tres factores (alcance, frecuencia y amplitud).

Es importante precisar que, para la determinación del ICARH se consideraron los valores de los parámetros establecidos del ECA Agua - Categoría 3: D1 y D2 (riego de vegetales y bebida de animales), aprobado mediante el D.S. 004-2017-MINAM. En la Tabla 5 se detalla los parámetros evaluados:

**Tabla 5:** Parámetros evaluados

Tipo de parámetros	Parámetros
Parámetros de Campo	Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto y pH
Parámetro Fisicoquímicos	Color
Parámetros Inorgánicos No metálicos	Cloruros, Fluoruro, Nitritos, Nitratos + Nitritos, Sulfatos y Cianuros WAD
Parámetros Inorgánicos Metálicos	Aluminio, Arsénico, Bario, Berilio, Boro, Cadmio, Cobalto, Cobre, Cromo, Hierro, Litio, Magnesio, Manganeso, Mercurio, Níquel, Plomo, Selenio y Zinc.
Parámetros Orgánicos	Aceites y Grasas, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Detergentes (SAAM) y Bifenilos Policlorados (PCB)
Parámetros Microbiológicos	Coliformes Termotolerantes, <i>Escherichia coli</i> , huevos de helmintos

**FUENTE:** Adaptado de ECA para Agua, mediante el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, 2017.

A continuación, se describe cada uno de los pasos realizados mediante calculadora CCME WQI:

### 1. Importar la data

Se introdujo a la calculadora los datos obtenidos de los monitoreos de calidad de agua en una plantilla de Excel y con un formato adecuado. El archivo de datos se carga una vez se visualice en la ventana de la derecha de la calculadora, tal como se muestra en la Figura 11.

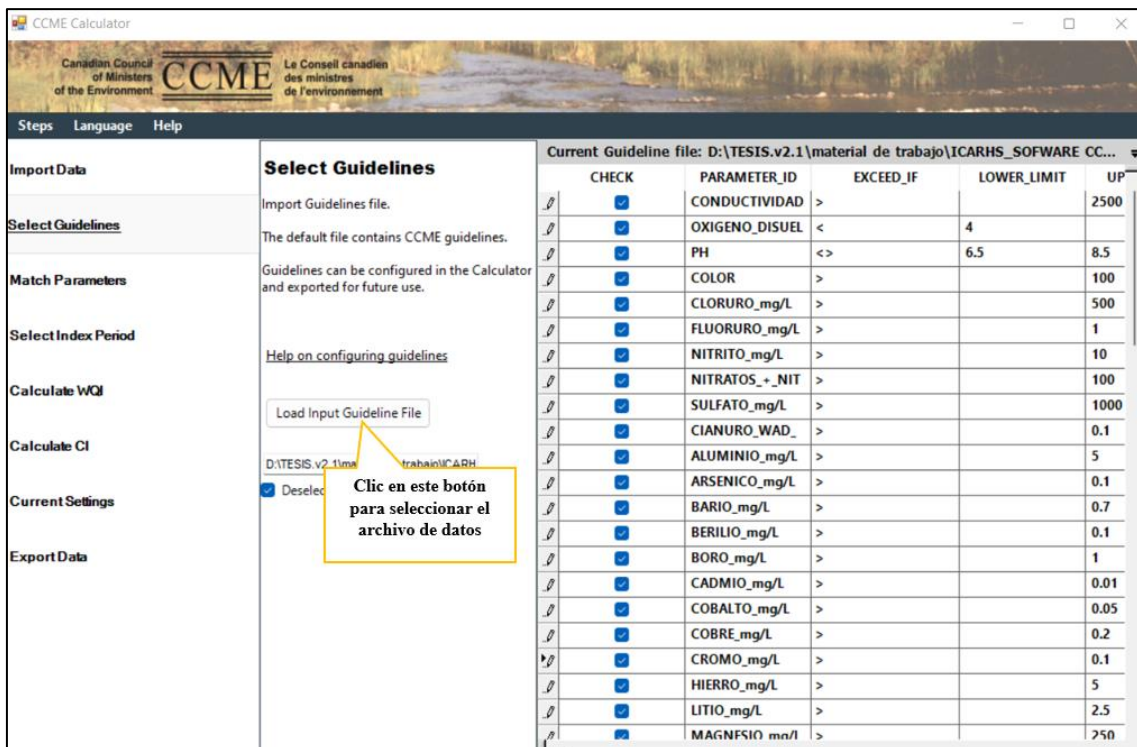


Figura 11. Importación de la data



## 2. Selección de parámetros

Se importa el archivo de los valores de los parámetros de calidad de agua, en una plantilla de Excel y con un formato adecuado. Luego, se selecciona todos los parámetros para su inclusión en el cálculo del indicador.

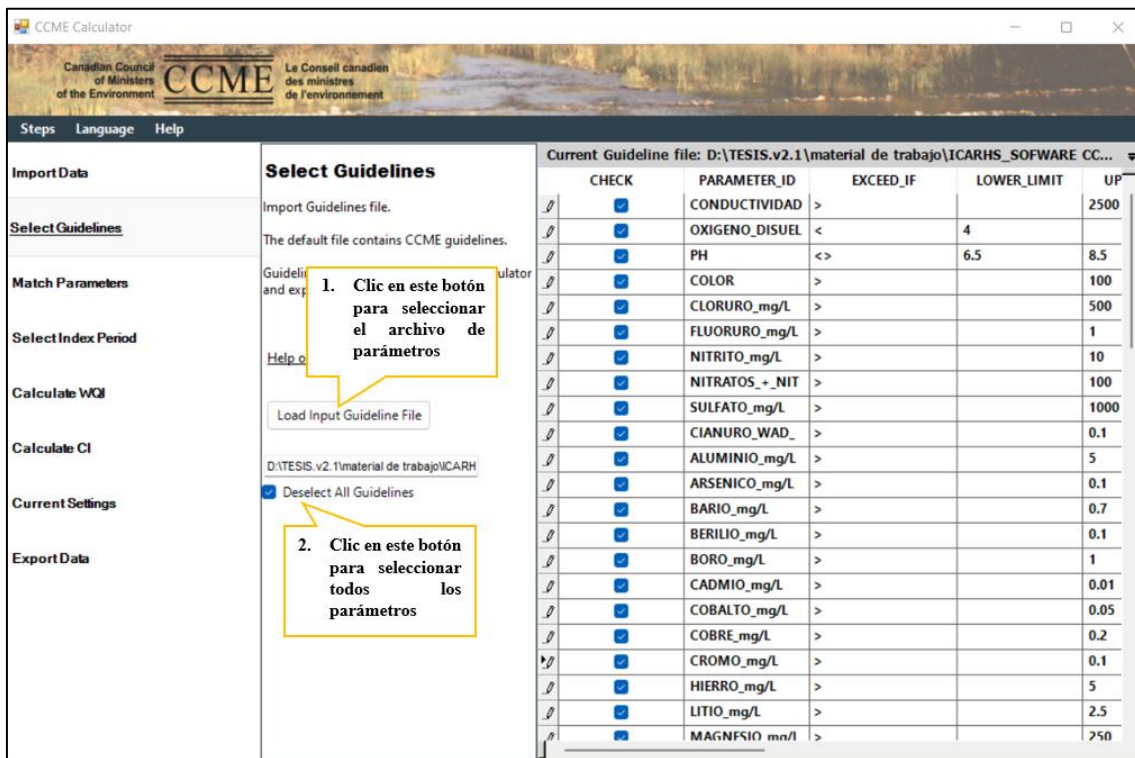
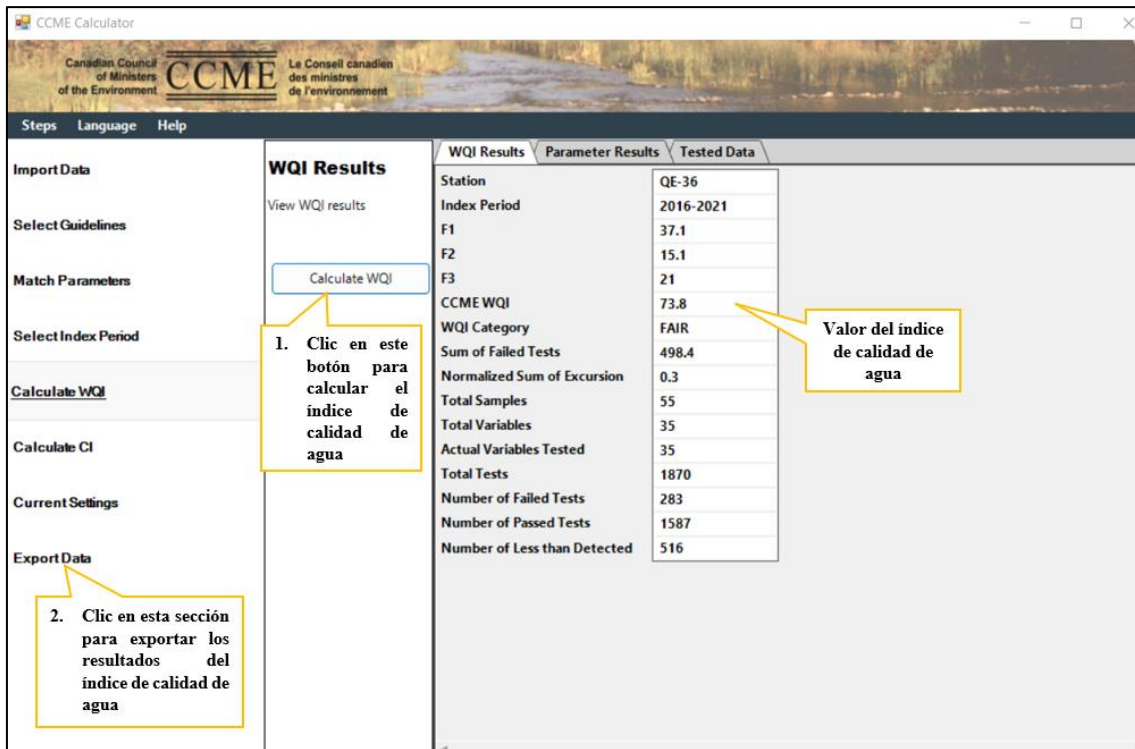


Figura 12. Selección de parámetros

## 3. Cálculo del índice de calidad de agua

Por último, se procede usar la herramienta Calculate WQI para la generación de los resultados del índice de calidad de agua, luego se procede a exportar toda la data usada y generada por la calculadora en una plantilla de Excel.



**Figura 13.** Cálculo del índice de calidad de agua

Es importante precisar que, se calculó el índice de calidad de agua a nivel global, en época seca (abril-noviembre) y en época húmeda (diciembre a marzo) para cada uno de los puntos de monitoreo, con el fin de dar un valor numérico al grado de calidad del agua de cada estación en estudio y establecer comparaciones entre ellos.

b. Determinación del índice de metal (IM)

Se utilizó una plantilla de Excel, para realizar el cálculo del IM a nivel global, en época seca y en época húmeda para los tres puntos de monitoreo de calidad de agua, considerando los metales analizados dentro de los monitoreos, que son todos los exigidos de acuerdo con el D.S. 004-2017-MINAM. Para ello, se usa la siguiente ecuación:

$$MI = \sum_{i=1}^n \frac{Ci}{(MAC)_i}$$

Donde Ci corresponde a la concentración del metal, mientras que MAC es la concentración máxima permitida, es decir el valor establecido en la normativa ambiental (ECA-Agua). Cuando el valor del IM es mayor a 1 corresponde al umbral de advertencia.

### 3.3.2. Evaluación hidroquímica

Se realizó la caracterización hidroquímica del agua de los ríos Títire, Vizcachas y Coralaque en temporada seca, húmeda y a nivel total, utilizando para ello los diagramas de Piper, Stiff, Schoeller-Berkaloff y Stabler; que permitirán determinar el predominio de aniones y cationes mayores presentes en el agua, así como, el origen del contenido iónico. Asimismo, se usó el diagrama de Wilcox-Riverside para determinar si la calidad del agua es adecuada para el riego. Para la generación de los diagramas mencionados se usó el software de análisis de agua Diagrammes.

#### 1. Importar la data

En el programa se ingresó los datos de las concentraciones (mg/L) de los principales cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y aniones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ) disueltos, mediante la opción “treat Excel files”. Mientras que para la generación del diagrama de Wilcox-Riverside, se ingresó los datos de la concentración de sodio (mg/L) y conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Es importante precisar que, los datos se compilaron en una plantilla de Excel con un formato específico que exige el programa, el cual se descarga dando clic en “Creation of a standar file Excel”.

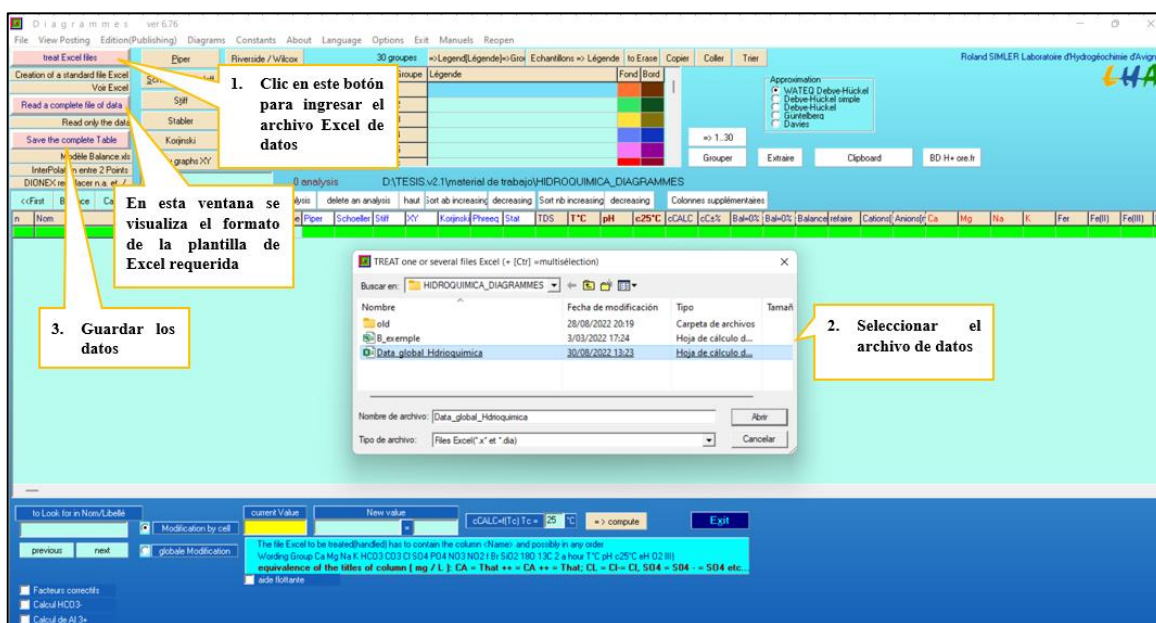


Figura 14. Importación de la data

Luego, se selecciona “Save the complete Table” para guardar los datos.

## 2. Generación de los diagramas hidroquímicos

El siguiente paso es realizar cada uno de los diagramas hidroquímicos, cuyas opciones se muestran en la parte superior de la interface del programa; tal como se muestra en la Figura 15.

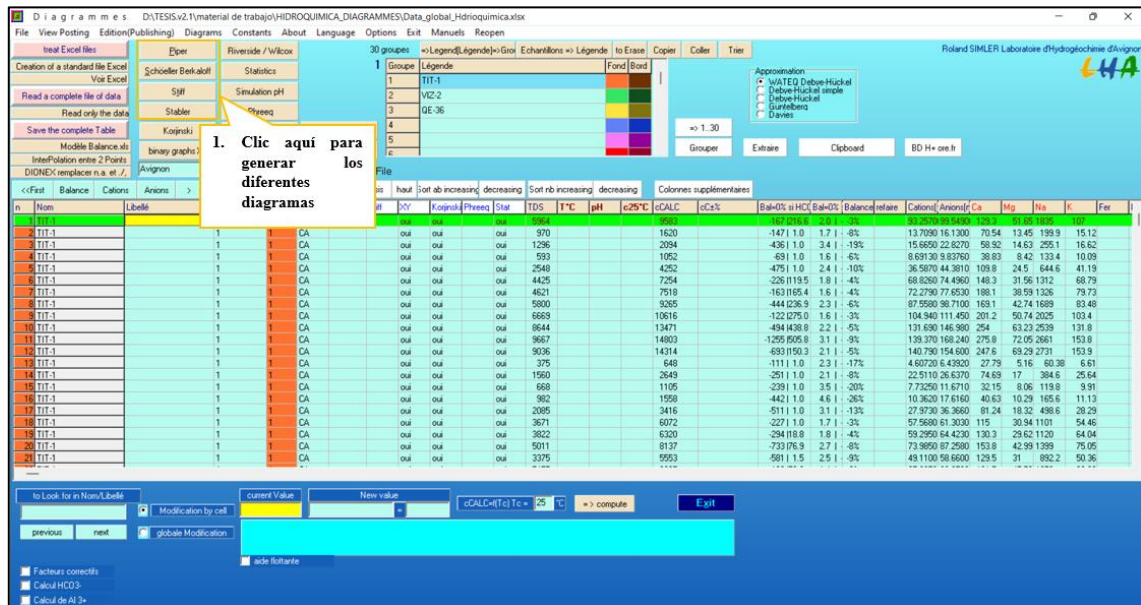


Figura 15. Generación de los diagramas hidroquímicos

Se debe tener en cuenta lo siguiente para generar los diferentes diagramas:

- Diagrama de Piper: El programa si permite mostrar el total de datos de cada estación en un solo diagrama. Se debe diferenciar la data de cada estación, para lo cual se asigna los grupos en el cuadro que está en la parte central superior de la interfaz del programa, donde cada grupo corresponde a cada estación (grupo 1 = TIT-1, grupo 2 = VIZ-2 y grupo 3 = QE-36); tal como se muestra en la Figura 16. Se generó tres diagramas (a nivel global, época húmeda y época seca).

Groupe	Légende	Fond	Bord
1	TIT-1	Orange	Brown
2	VIZ-2	Green	Dark Green
3	QE-36	Yellow	Olive Green
4		Light Blue	Dark Blue
5		Pink	Purple
6		Red	Dark Red

Figura 16. Asignación de grupos

- Diagrama de Stiff, Schoeller- Berkaloff y Stabler: Se genera un diagrama por cada dato, además el programa solo permite visualizar 14 diagramas. En ese sentido, a fin de que el análisis sea representativo, se muestra la data promedio total, promedio en época seca y promedio en época húmeda para cada estación; por lo tanto, se graficaron en total 9 datos. Para diferenciar los datos, se puso dentro de la denominación de la estación en paréntesis “h” (temporada húmeda) o “s” (temporada seca).
- Diagrama de Wilcox-Riverside: El programa si permite mostrar el total de datos de cada estación en un solo diagrama, similar a lo que se realizó para el Diagrama de Piper.

Finalmente, se procede a exportar el diagrama correspondiente haciendo clic en “Enregistrer Image”.

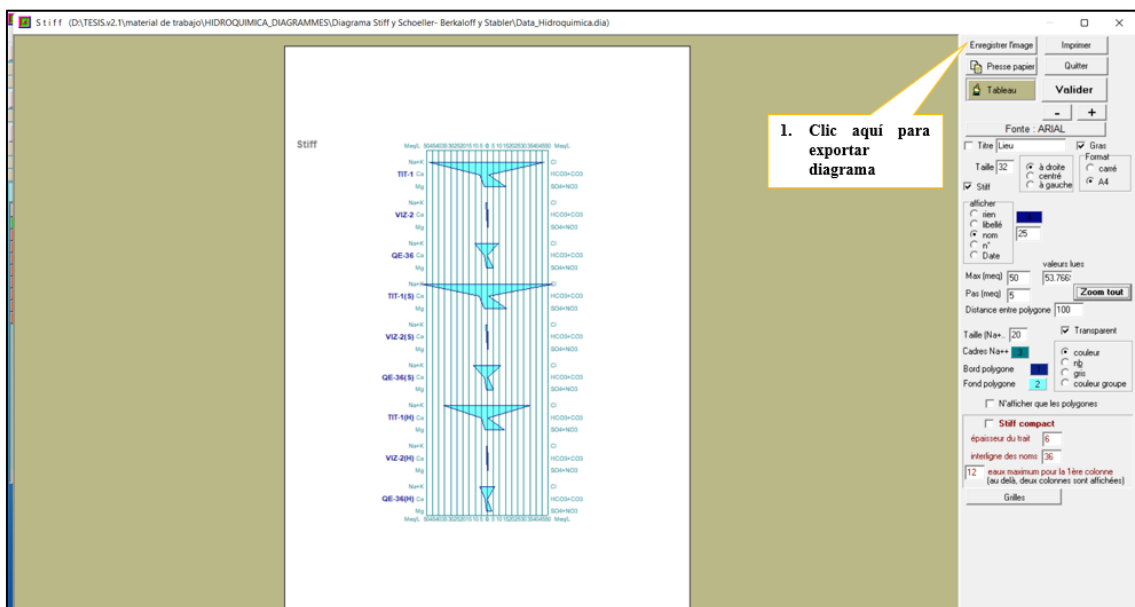


Figura 17. Exportación de diagrama

### 3.3.3. Evaluación de la fuente de generación

La determinación de la naturaleza de la fuente de generación de las características hidroquímicas de los ríos de interés (Títire, Vizcachas y Coralaque) se realizó mediante los diagramas de Gibbs y la relación de iones específicos  $Mg^{2+} / Ca^{2+}$  vs  $Mg^{2+} / Na^{+}$ . Para ello, se realizaron los siguientes pasos que se detallan a continuación:

a. Diagrama de Gibbs

i. Selección de data

Se utilizó las concentraciones obtenidas (mg/L) de los parámetros del anión cloruro, anión bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y sólidos totales disueltos (TDS) de las estaciones de interés TIT-1, VIZ-2 y QE-36. Cabe señalar que, en los casos en donde no se contaron con los valores del anión bicarbonato, se utilizó en su reemplazo los valores de alcalinidad total.

ii. Elaboración del diagrama

Usando una plantilla de Excel, para el primer diagrama se graficó la relación del eje x,  $x = \frac{\text{Na}^+}{\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}}$ , y su relación respecto al eje y,  $y = \text{TDS}$ ; mientras que para el segundo diagrama se graficó la relación del eje x,  $x = \frac{\text{Cl}^-}{\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-}$ , y su relación respecto al eje y,  $y = \text{TDS}$ . Posterior a ello, se realizó el análisis respectivo.

b. Relaciones de iones  $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$  vs  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$

Se graficó la relación del eje x,  $x = \frac{\text{Mg}^{2+}}{\text{Na}^+}$ , y su relación respecto al eje y,  $y = \frac{\text{Mg}^{2+}}{\text{Ca}^{2+}}$ , usando una plantilla de Excel. Posterior a ello, se realizó el análisis respectivo.

3.3.4. Modelamiento de la zona de mezcla y de la dispersión de los parámetros de calidad de agua

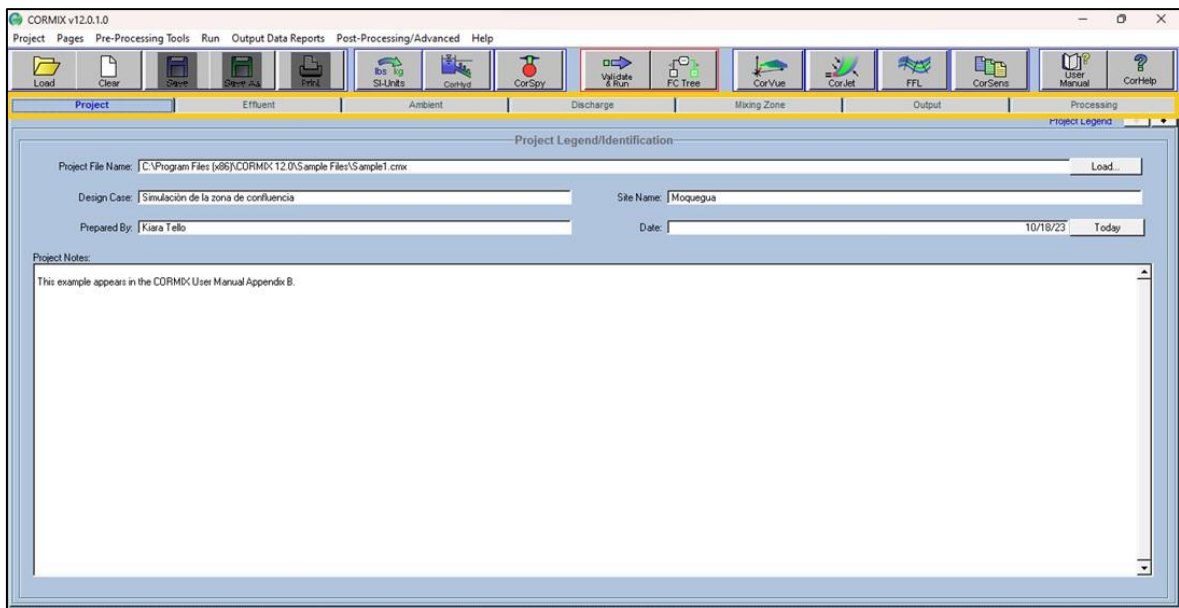
Se utiliza el programa CORMIX para la simulación de la mezcla y la evaluación de la dispersión de los contaminantes, considerando al río Títire como el afluente y al río Vizcachas como el cuerpo receptor. Para ello, se siguió el siguiente procedimiento:

a. Selección de Parámetros para Modelar

Se seleccionó los parámetros críticos y relevantes que presentan altas concentraciones en el afluente, para cuatro fechas específicas (dos en época húmeda y dos en época seca). Los puntos de monitoreo que se analizaron fueron TIT-1 (río Títire), VIZ-2 (río Vizcachas, aguas arriba de la confluencia) y QE-36 (río Coralaque, aguas debajo de la confluencia).

b. Modelamiento

Para ejecutar el modelamiento de manera exploratorio, se ingresó los datos de entrada en cada una de las ventanas del programa CORMIX, las cuales se muestran en la Figura 18.



**Figura 18.** Interfaz del programa CORMIX

Los datos de entrada necesarios para cada una de las ventanas del programa CORMIX se detallan en la Tabla 6.

**Tabla 6:** Datos de entrada del programa CORMIX

Sección del programa	Data requerida
Proyecto	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Nombre del proyecto</li> <li>2. Nombre del evaluador</li> <li>3. Ubicación</li> <li>4. Fecha</li> </ol>
Efluente	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tipo de contaminante (contaminante conservador, contaminante no conservador, descarga caliente, entre otros)</li> <li>2. Densidad o temperatura</li> <li>3. Caudal de descarga</li> <li>4. Concentración del contaminante (exceso)</li> </ol>
Ambiente	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Características hidráulicas</li> <li>2. Coeficiente de Manning</li> <li>3. Velocidad del viento</li> <li>4. Caudal del cuerpo receptor</li> <li>5. Densidad</li> </ol>
Descarga	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Caso de diseño (CORMIX 1, CORMIX 2 y CORMIX 3)</li> <li>2. Geometría de la descarga</li> </ol>
Zona de mezcla	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Toxicidad del efluente (estándar medioambiental)</li> <li>2. Región de interés (especificar zona de mezcla)</li> </ol>



Una vez ingresado los datos, la simulación generará como resultado las concentraciones estimadas del contaminante a diferentes distancias aguas abajo de la zona de mezcla (ver Figura 19). Asimismo, el programa permite graficar la pluma de dilución del contaminante; tal como se muestra en la Figura 20.

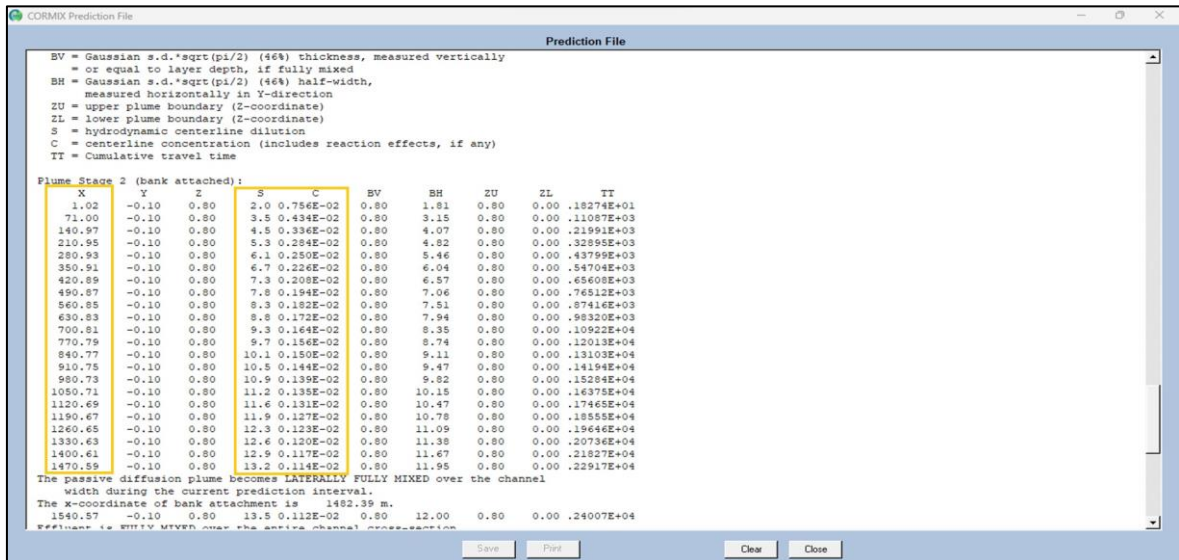


Figura 19. Concentraciones estimadas del contaminante a diferentes distancias

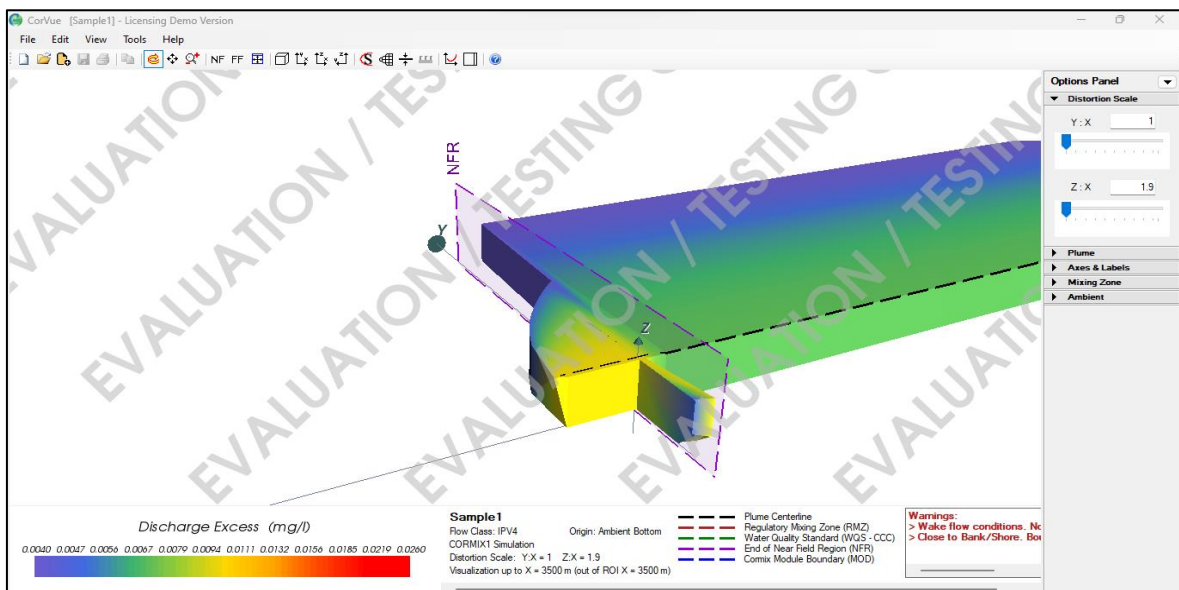


Figura 20. Simulación de la zona de mezcla

### c. Interpretación de los datos obtenidos

Finalmente, se realizó la interpretación y comparación de las concentraciones obtenidos mediante la simulación en el programa CORMIX y las concentraciones medidas en campo en el punto de monitoreo QE-36, la cual se ubica aguas abajo después de la confluencia entre los ríos Títire y Vizcachas.



### 3.3.5. Evaluación del riesgo ecotoxicológico

Se determinó el riesgo ecotoxicológico del agua después de la confluencia del río Títire con el río Vizcachas, para lo cual se siguió una serie de etapas que se detallan a continuación:

#### a. Evaluación de efectos (PNEC)

Esta etapa consistió en determinar la concentración esperada sin efectos adversos, tomando como referencia especies locales. Primero, en función a la información presentada en la línea base hidrobiológica del Octavo ITS y Noveno ITS del proyecto Quellaveco, se seleccionó a las especies de *Daphnia magna* (microcrustáceo) y *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris), las cuales que encuentran presentes en la subcuenca Coralaque. Luego, se recopiló información de ensayos toxicológicos de estas especies para obtener los valores de concentración letal media (CL50) con los parámetros de aluminio, arsénico, boro y manganeso, los cuales son representativos debido a que superan continuamente los valores del ECA Agua Categoría 3: D1 y D2 en el río Títire.

Posteriormente, se usó la siguiente ecuación para calcula el PNEC; teniendo en cuenta un factor de valoración.

$$PNEC = \frac{\text{Dato de toxicidad más sensible}}{\text{Factor de Valoración}}$$

#### b. Evaluación de la exposición (PEC)

Consistió en determinar las concentraciones de aluminio, arsénico, boro y manganeso a la que están expuestos los organismos después de la del río Títire con el río Vizcachas, para lo cual se empleó las concentraciones obtenidas mediante el modelamiento CORMIX.

#### c. Cuantificación del riesgo

La etapa final estimó el riesgo mediante la relación entre PNEC y PEC, los cuales fueron calculados anteriormente. Solo si la exposición (PEC) es superior a la concentración sin efecto (PNEC) existe riesgo ambiental ( $PEC/PNEC > 1$ ).

$$\text{Riesgo} = \frac{PEC \text{ agua}}{PNEC \text{ organismos acuáticos}}$$

### 3.3.6. Análisis estadístico

El análisis estadístico de la data de monitoreo de las estaciones en estudio se realizó usando el método de análisis de componentes principales (ACP), que incluye la matriz de

correlación de Pearson. El análisis de componentes principales permitirá identificar cuáles son los factores primordiales que explican la mayor parte de la variación total de los parámetros en estudio (Guisande, 2006).

Para ello, se empleó el software estadístico XLSTAT, el cual funciona como complemento de análisis de datos de Microsoft Excel. A continuación, se describe cada uno de los pasos llevados a cabo en el software:

a. Tratamiento y limpieza de la data

Previo a la ejecución del método estadístico, se realizó el tratamiento de los datos de monitoreo de las estaciones en estudio, que tomo en cuenta las siguientes recomendaciones: las concentraciones por debajo de límite de detección fueron reemplazados por el valor limite entero, se consideran únicamente aquellos parámetros que cuentan con el 70% o más del total de los datos en cada estación de monitoreo, se reemplaza los datos faltantes por el promedio total de los datos vecinos, se excluye los parámetros que presentan datos invariables o por debajo del límite de detección en todos los monitoreos.

b. Uso del software estadístico XLSTAT

Primero, se seleccionó el comando de Análisis de componentes principales (ACP), tal como se muestra en la Figura 21.

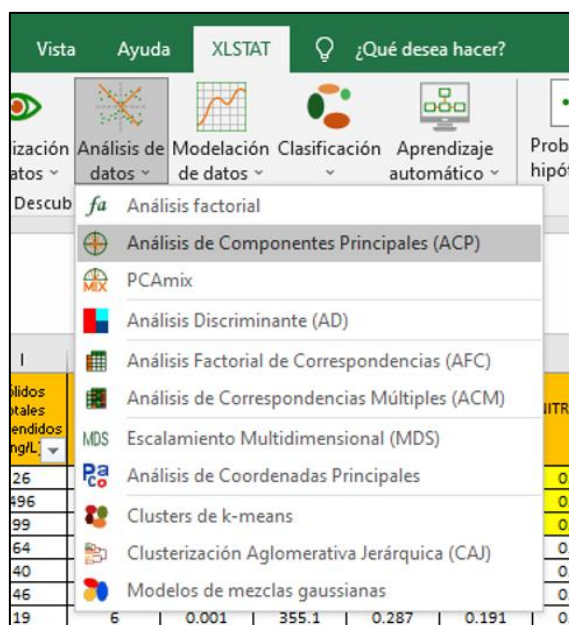


Figura 21. Selección del comando ACP

Luego, se seleccionó los datos en la hoja Excel, así como el tipo de análisis de componentes principales que corresponde a la matriz de correlación de Pearson; tal como se muestra en la Figura 22.

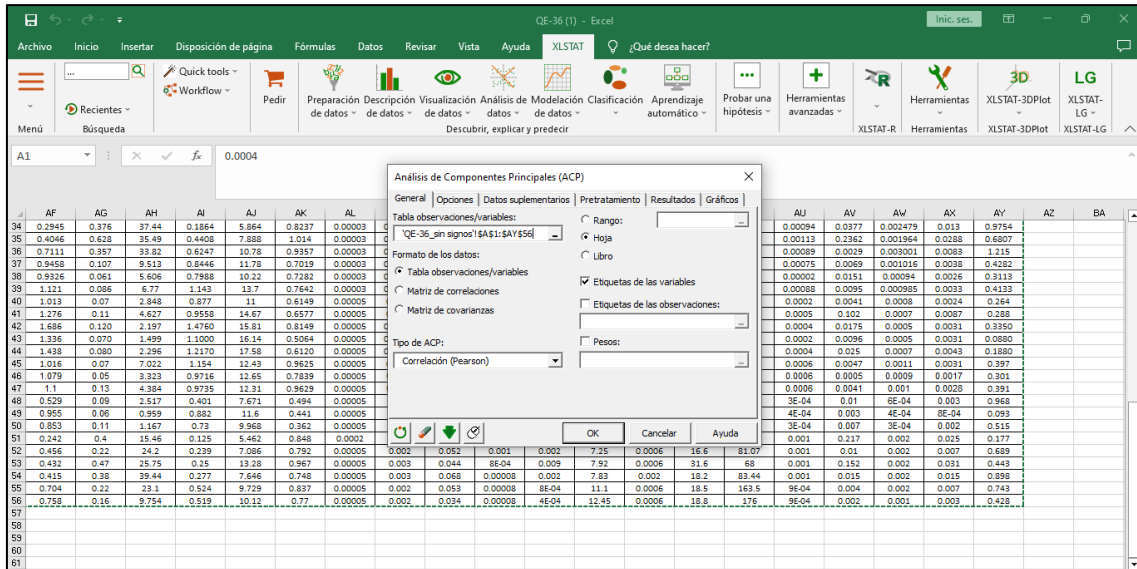


Figura 22. Selección de los datos

c. Interpretación y análisis de los datos

Por último, se realizó la interpretación de los resultados obtenidos de la matriz de correlaciones y la tabla de los valores propios.

	F1	F2	F3	F4	F5
CAUDAL	-0.457	-0.239	-0.231	-0.068	-0.231
CONDUCTIVIDAD_ELECTRICA	0.563	0.272	0.192	0.074	0.256
OXIGENO_DISUELTO_mg/L	-0.656	-0.281	0.148	-0.025	0.139
PH	0.886	-0.009	0.123	0.081	0.039
TEMPERATURA	0.670	0.385	-0.213	0.012	-0.181
ALCALINIDAD TOTAL	0.792	0.114	-0.048	0.059	-0.469
Dureza Total	0.946	0.261	0.074	0.087	-0.028
Sólidos Totales Disueltos	0.869	0.362	0.069	0.060	-0.087
Sólidos Totales Suspendidos	-0.298	-0.072	-0.549	0.636	0.321
COLOR	-0.495	0.690	0.000	0.213	-0.299
BROMURO	0.295	-0.022	0.326	0.264	-0.215
CLORURO_mg/L	0.948	0.257	0.073	0.070	-0.075
FLUORURO_mg/L	-0.071	0.765	-0.012	0.003	-0.171
FOSFATOS	0.036	-0.052	0.427	0.355	0.012
NITRATOS	0.246	0.554	-0.075	-0.029	0.440
NITRITO_mg/L	-0.176	-0.070	-0.060	-0.119	-0.070
NITRATOS+_NITRITOS_reducidos	0.355	0.410	-0.048	-0.104	0.478
SULFATO_mg/L	0.460	0.826	0.108	0.122	-0.033
Cianuro Total	-0.071	-0.137	0.533	0.289	0.114

Figura 23. Matriz de correlaciones

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Evaluación espacial y temporal de la calidad de agua

A continuación, se muestra el análisis de la calidad de agua de los puntos de monitoreo en estudio, haciendo énfasis a los valores obtenidos del índice de calidad de agua (ICARHS) e índice de metal (IM) durante el periodo evaluado (2016 - segundo trimestre del 2021).

En el Anexo 1 se presentan los resultados de calidad de agua superficial de los puntos de monitoreo en estudio, mientras que en la Tabla 7 se presenta los parámetros que superaron el ECA Agua.

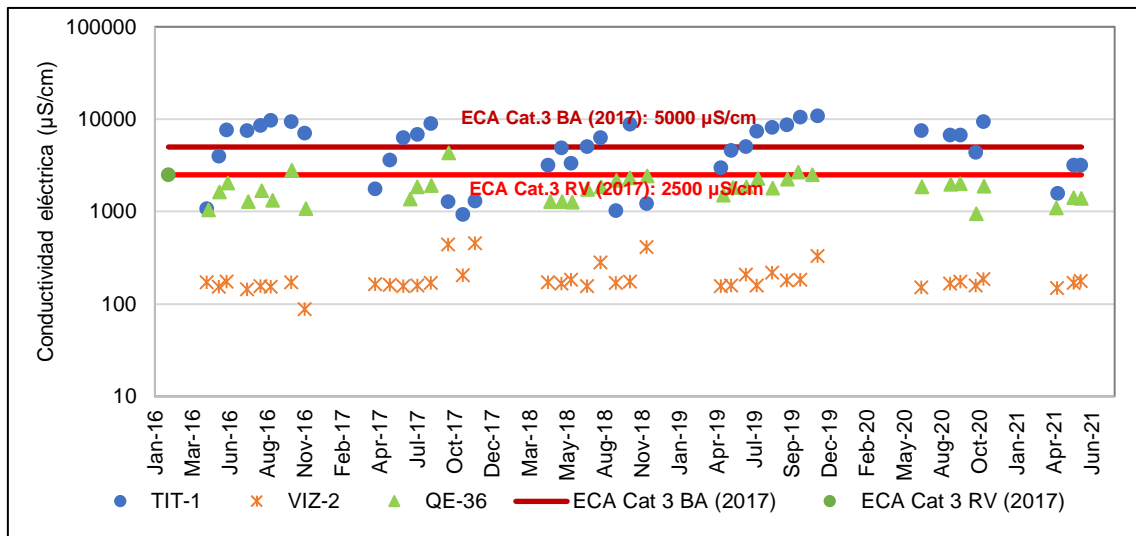
**Tabla 7:** Parámetros que superan el ECA Agua

Estación	Ubicación	Parámetros que exceden el ECA Agua
TIT-1	Río Títire	Conductividad eléctrica (40), pH (37), color (1), cloruro (45), fluoruro (6), sulfato (11), aluminio (53), arsénico (56), boro (60), cadmio (41), cobalto (51), cobre (54), cromo (4), hierro (45), litio (29), manganeso (60), mercurio (3), níquel (1), selenio (5), zinc (5), aceites y grasas (1), demanda química de oxígeno (DQO) (2) y Bifenilos policlorados (PCB) (3)
VIZ-2	Río Vizcachas	pH (12), color (1), aluminio (1), arsénico (7), boro (1), cadmio (1), hierro (1), litio (1), manganeso (5), coliformes termotolerantes (2), <i>Escherichia coli</i> (1) y Bifenilos Policlorados (PCB) (3)
QE-36	Río Coralaque	Conductividad eléctrica (5), pH (22), cloruro (11), aluminio (38), arsénico (38), boro (49), cadmio (1), cobalto (7), cobre (33), hierro (24), manganeso (52), coliformes termotolerantes (2), <i>Escherichia coli</i> (1) y Bifenilos policlorados (PCB) (3)

Nota:

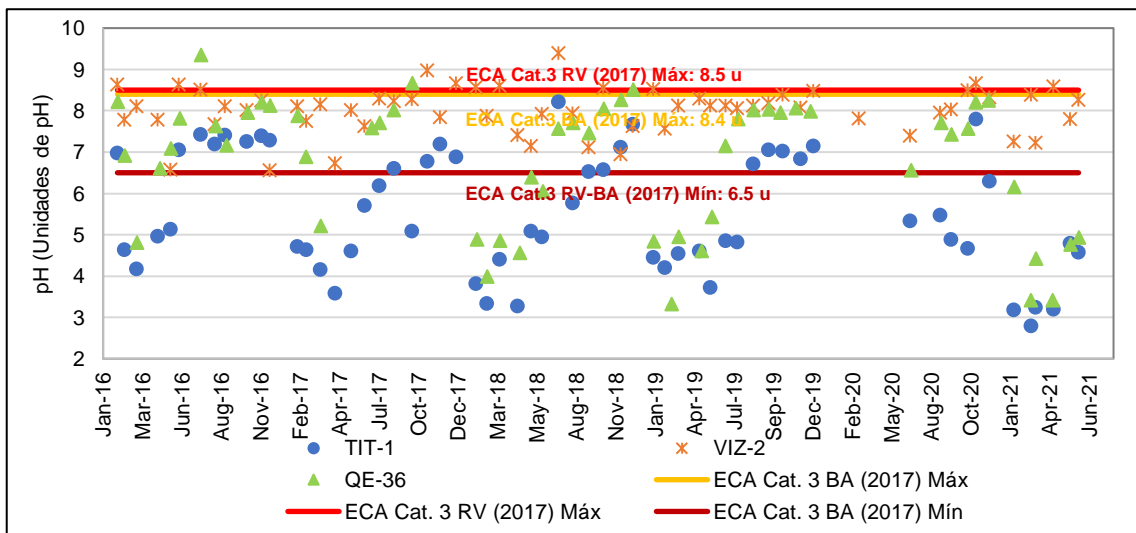
- Entre paréntesis se indica el número de valores que exceden el ECA-Agua, respecto al total de registros.
- El número total de resultados registrados en las estaciones TIT-1, VIZ-2 y QE-36 son 60, 61 y 55, respectivamente.

A continuación, se describe las principales excedencias registradas en los puntos de monitoreo en estudio:



**Figura 24.** Variación de Conductividad Eléctrica

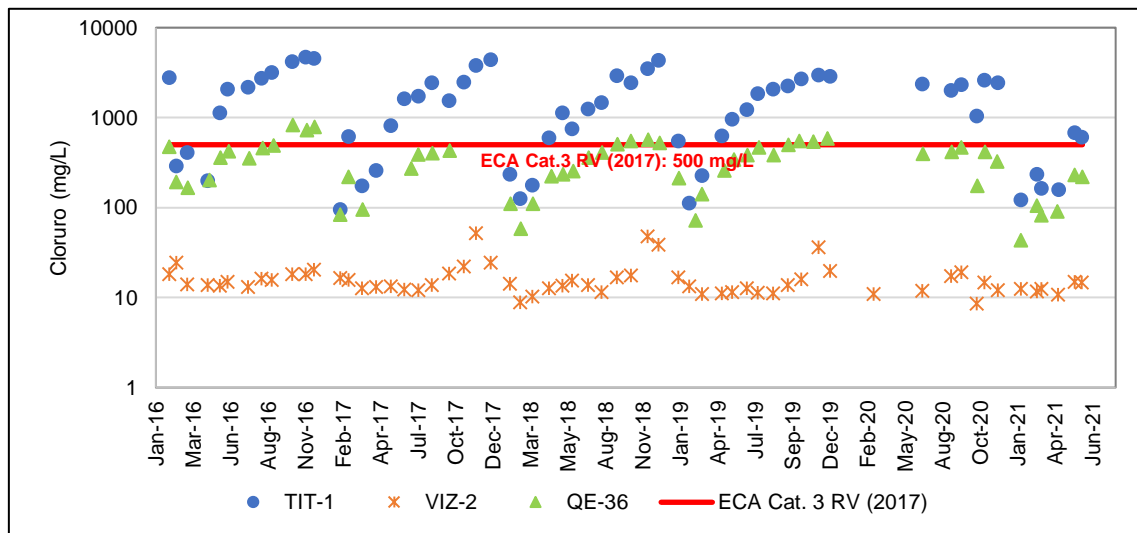
En la Figura 24 se observa que la mayoría de los valores registrados de conductividad eléctrica en el río Títire (TIT-1) superan el ECA Agua, mientras que en el caso del río Coralaque (QE-36) solo presenta excedencias puntuales. Las excedencias registradas en el río Títire pueden deberse a las altas concentraciones de sales características, como consecuencia de las aportaciones de las aguas subterráneas en el área.



**Figura 25.** Variación de pH

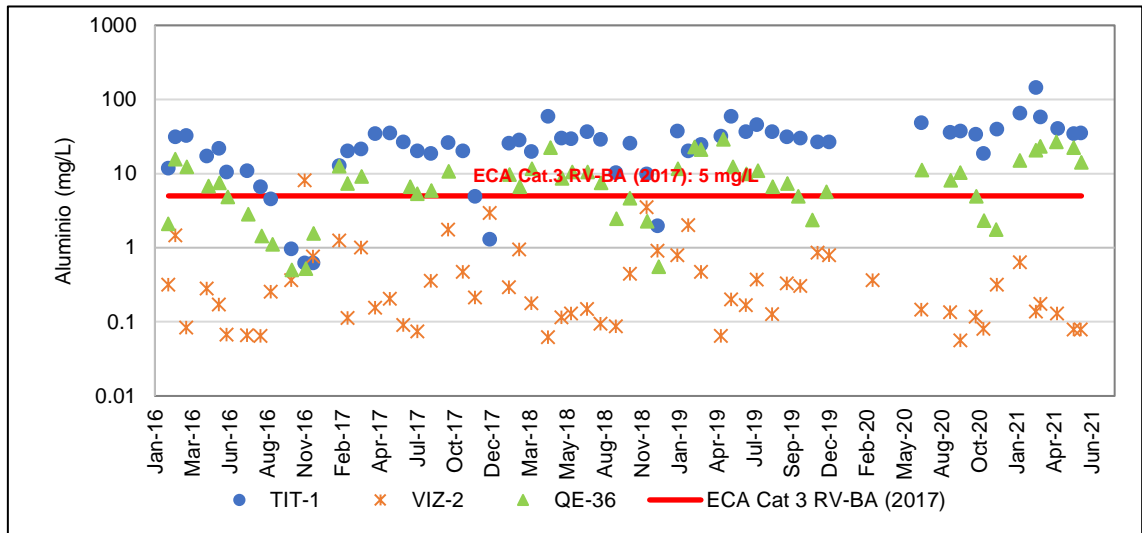
En la Figura 25 se observa que los valores de pH registrados en las estaciones TIT-1 y QE-36 no se encuentran dentro del rango establecido en el ECA-Agua. En la estación TIT-1, los valores de pH disminuyen en el periodo húmedo, lo cual puede deberse al mayor ingreso de

drenaje ácido de mina o lixiviados de metales provenientes de las actividades mineras próximas a la cabera del río Aruntaya, ubicada aguas arriba del río Títire. Luego, aguas abajo, resto de este ácido queda en el río Coralaque, ya que desde el año 2016 las fuentes termales del río Títire ya no logran completamente neutralizar el incremento de drenaje ácido de mina que se da en época húmeda; tal como se precisa en el informe de monitoreo de calidad y cantidad de agua superficial del proyecto Quellaveco (2021).

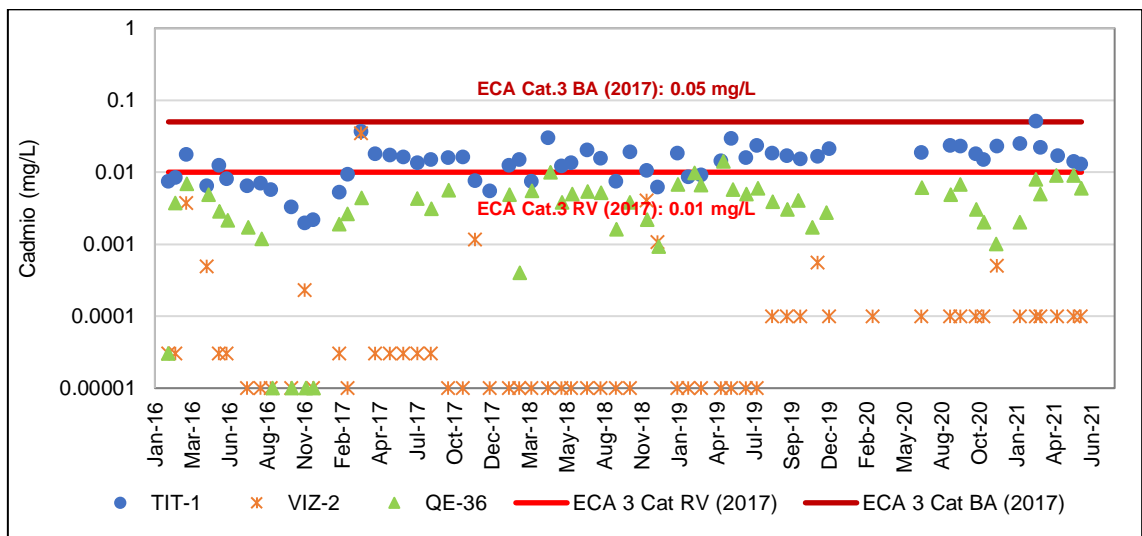


**Figura 26.** Variación de Cloruro

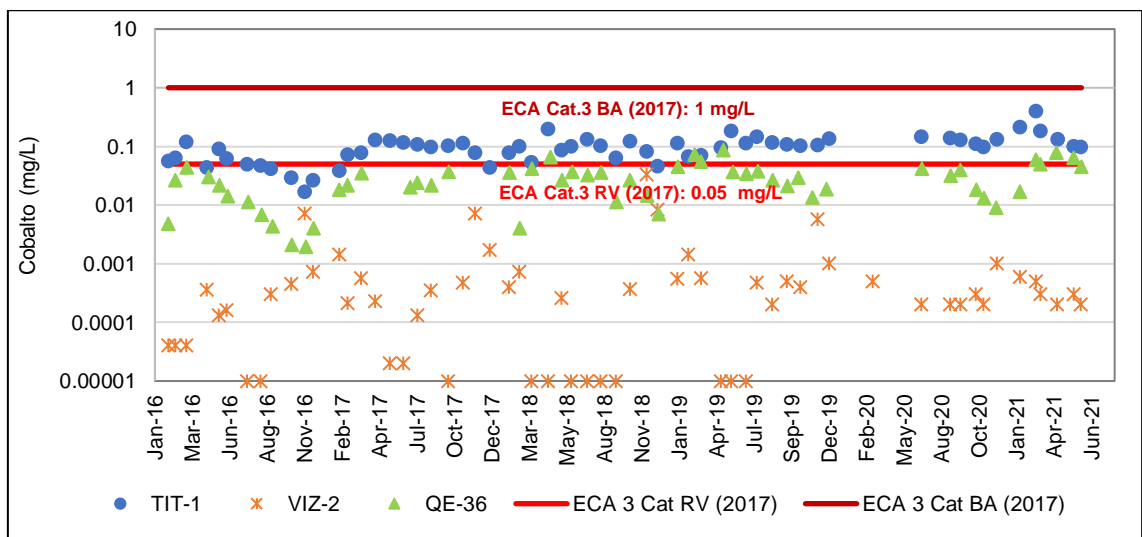
En la Figura 26 se observa que la mayoría de los valores registrados de cloruro en el río Títire (TIT-1) superan el ECA Agua, debido a los aportes de las abundantes fuentes naturales termales en el río Títire. Además, se presentó los mayores valores de cloruro durante la temporada seca (abril a noviembre), debido al menor caudal durante este periodo. Por otro lado, en el río Coralaque (QE-36) solo presenta excedencias puntuales, debido al aporte del río Títire.



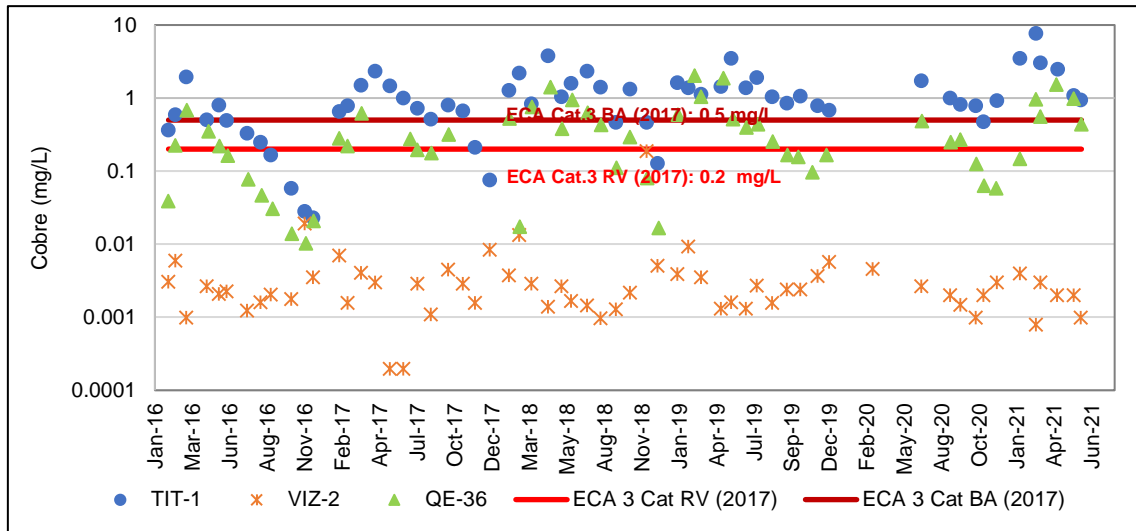
**Figura 27.** Variación de Aluminio



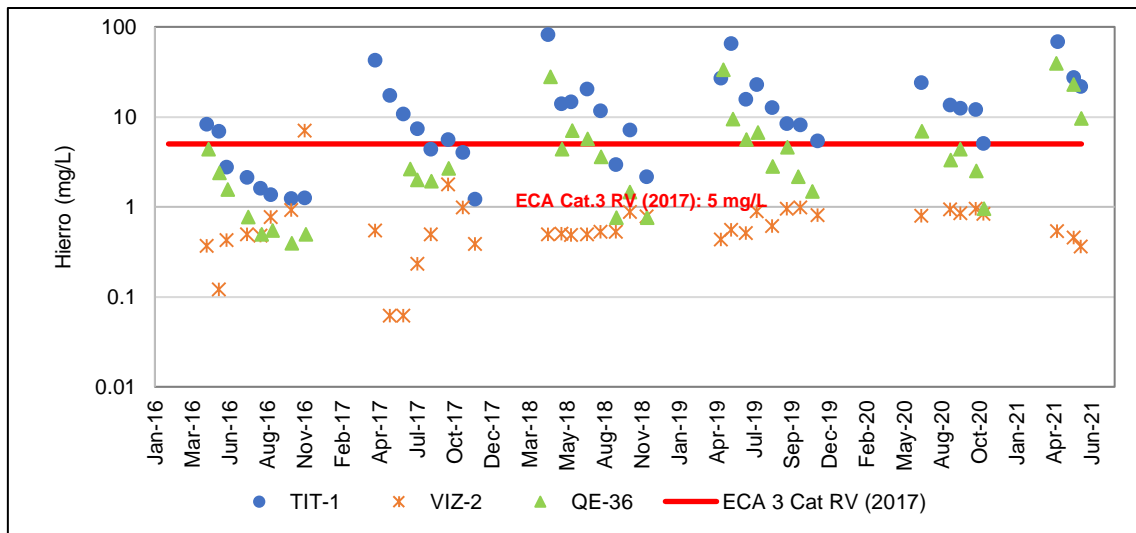
**Figura 28.** Variación de Cadmio



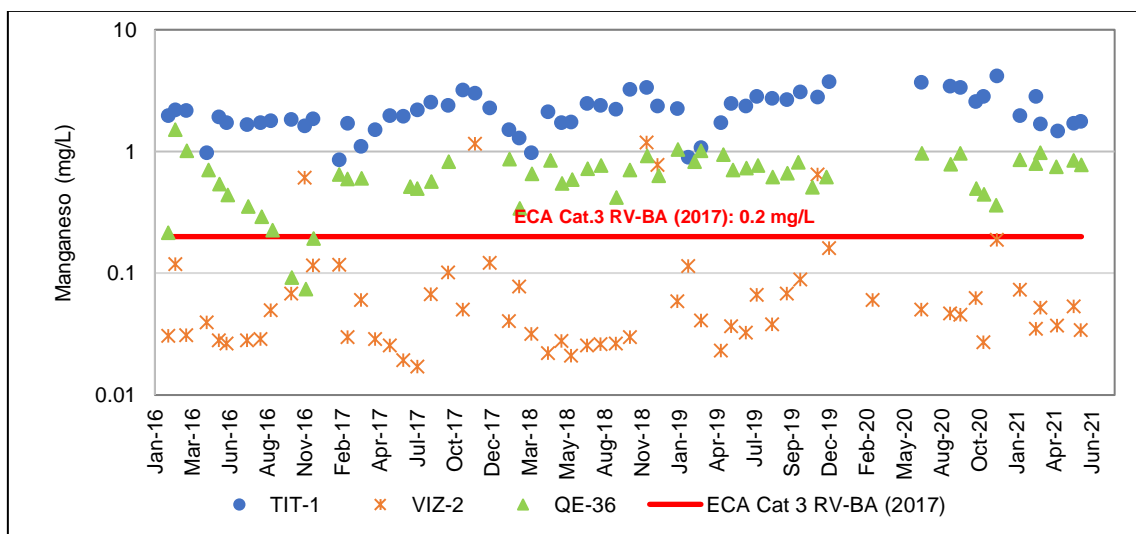
**Figura 29.** Variación de Cobalto



**Figura 30.** Variación de Cobre



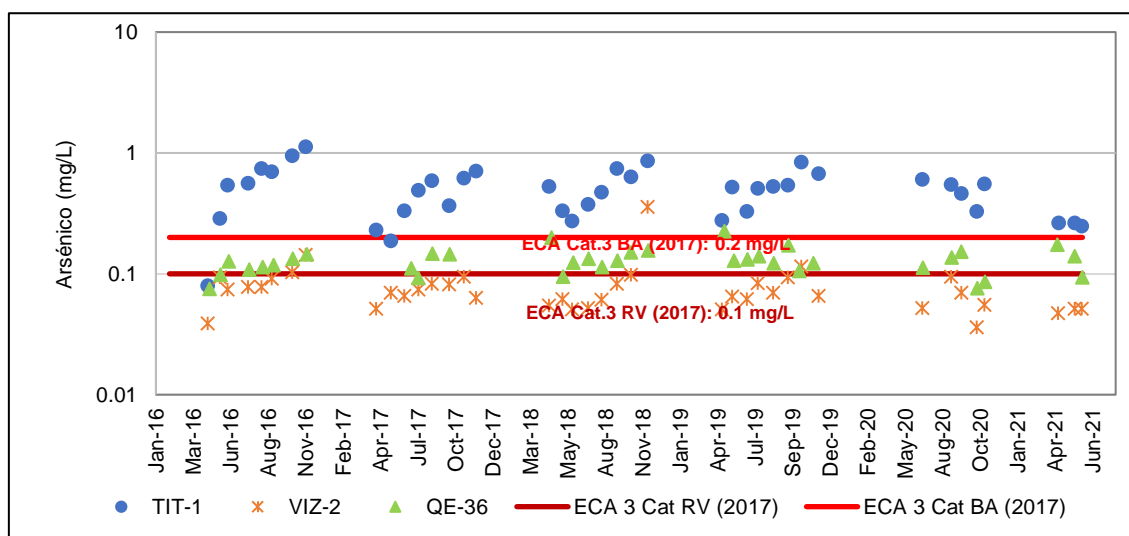
**Figura 31.** Variación de Hierro



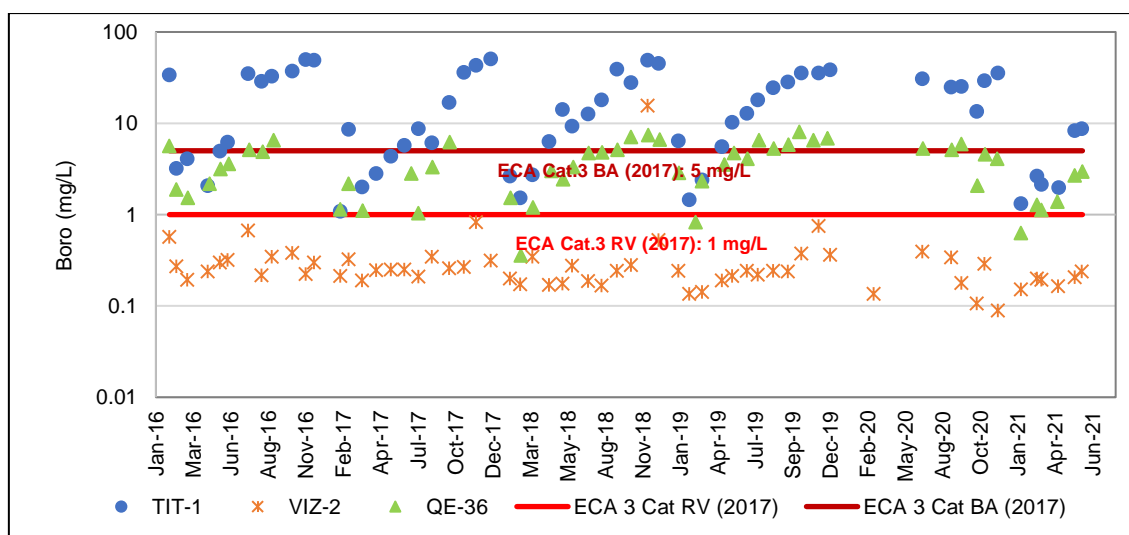
**Figura 32.** Variación de Manganeso



En la Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31 y Figura 32 se observa que la mayoría de los valores registrados de aluminio, cadmio, cobalto, cobre, hierro y manganeso en los ríos Títire (TIT-1) y Coralaque (QE-36) superan el ECA Agua; en especial en el río Títire. Las excedencias en este último pueden deberse a los aportes de drenaje ácido de mina o lixiviados en las quebradas Mararitani y Apostoni en la cabecera del río Aruntaya; tal como se señala en el informe de monitoreo de calidad y cantidad de agua superficial del proyecto Quellaveco (2021), los cuales se intensifican en la época húmeda por las lluvias. Luego, las excedencias en el río Coralaque se deben a los aportes del río Títire.



**Figura 33.** Variación de Arsénico



**Figura 34.** Variación de Boro

En la Figura 33 y Figura 34 se observa las excedencias de arsénico y boro en los ríos Títire y Coralaque, logrando mayores valores en el río Títire. Esto puede deberse a los aportes de las abundantes fuentes termales en el río Títire.

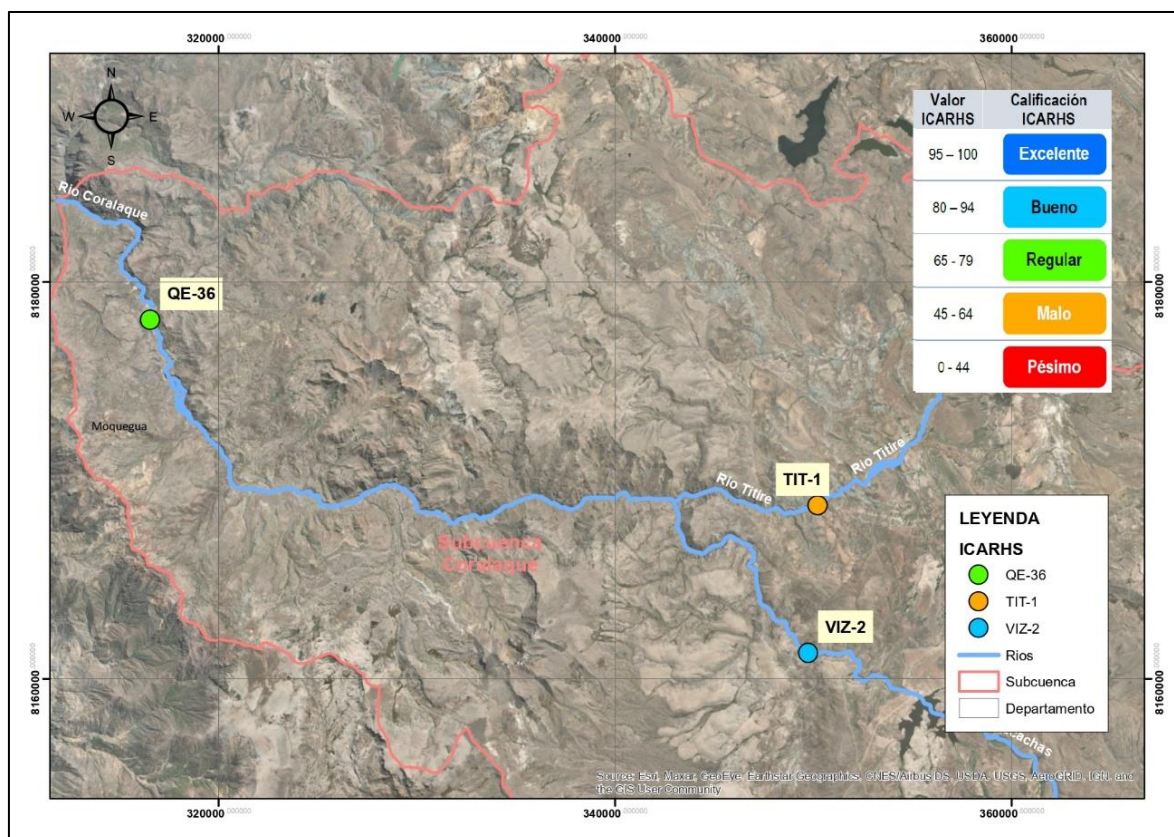
#### 4.1.1. Índice de calidad de agua ICARHS

La Tabla 8 muestra los valores obtenidos de ICARHS a nivel global, época seca (abril-noviembre) y época humedad (diciembre-marzo) para los tres puntos de monitoreo de interés.

**Tabla 8:** Valores de ICARHS en los puntos de monitoreo en estudio

Estación	Ubicación	ICARHS		
		Global	Temporada húmeda	Temporada seca
TIT-1	Río Títire	47.1 Malo	50.9 Malo	51.1 Malo
VIZ-2	Río Vizcachas	81.8 Bueno	88.4 Bueno	86.7 Bueno
QE-36	Río Coralaque	73.8 Regular	74.8 Regular	75.4 Regular

Asimismo, en la Figura 35 se muestra los puntos de monitoreo con la clasificación ICARHS respectiva.



**Figura 35.** Valores de ICARHS a nivel global, época seca y época húmeda

Se observa que los ríos afluentes Títire y Vizcachas presentan una calidad de agua MALA (ICARHS= 47.1) y BUENA (ICARHS= 81.8), respectivamente. La calidad del agua desfavorable del río Títire se debe a los altos valores de conductibilidad eléctrica, cloruro, metales (aluminio, arsénico, boro, cadmio, cobalto, cobre, hierro y manganeso) y valores de pH muy ácidos (<6.5 unidad pH), que no cumplen con los valores establecidos en el ECA para Agua- Categoría 3: D1 y D2 (riego de vegetales y bebida de animales); mientras que el río Vizcachas solo presenta excedencias puntuales en los valores de pH y metales (arsénico, manganeso, entre otros). Después de la confluencia, el río Coralaque presenta una calidad de agua REGULAR. Esto se debe a que los ríos afluentes presentan caudales similares, es así como el río Títire presenta un caudal promedio anual de 2196.94 L/s y el río Vizcachas 2115.78 L/s; lo que genera que después de la confluencia el río Vizcachas tienda a atenuar las excedencias de los valores de los parámetros de río Títire, pero no al nivel de diluirlas por completo. Por lo tanto, la calidad del agua de los ríos Títire y Vizcachas tienen influencia equitativa sobre el río Coralaque, lo que se evidencia en la mejora de la calidad del agua del río Coralaque respecto al río Títire.

#### 4.1.2. Índice de metal IM

El índice de metal para todos los parámetros metálicos; a excepción del berilio en todas las estaciones y cromo, magnesio, níquel y plomo en la estación VIZ-2, presentan valores superiores al umbral de advertencia ( $IM > 1$ ), incluso llegando a un valor máximo de 1101.95, registrado en la estación TIT-1 (ver Tabla 9). Cabe precisar que, los valores extremadamente altos de IM se deben a que el cálculo del índice es de naturaleza acumulativa, es así que el gran número de datos usados (2016 – segundo trimestre del 2021) genera que el resultado final sobrepasa fácilmente el umbral de advertencia. Sin perjuicio a ello, se debe aclarar que el río Títire (TIT-1) presenta los mayores valores de IM respecto a las estaciones VIZ-2 (río Vizcachas) y QE-36 (después de la confluencia de los ríos Títire y Vizcachas), por lo que se puede inferir que el río Títire influye de manera desfavorable en la concentración de metales en el río Coralaque.

Asimismo, se observa que en general durante la temporada seca los valores del IM son superiores respecto a la temporada húmeda, debido al efecto de la dilución que genera una reducción en las concentraciones de los metales durante la temporada húmeda.

**Tabla 9:** Valores de índice de metal (IM) en los puntos de monitoreo en estudio

Índice de Metal (IM)		Aluminio	Arsénico	Bario	Berilio	Boro	Cadmio	Cobalto	Cobre	Cromo	Hierro	Litio	Magnesio	Manganeso	Mercurio	Níquel	Plomo	Selenio	Zinc
TIT-1	Temporada Seca	<b>214.42</b>	<b>201.46</b>	<b>3.72</b>	0.42	<b>807.86</b>	<b>59.26</b>	<b>81.23</b>	<b>222.04</b>	<b>7.98</b>	<b>125.83</b>	<b>59.19</b>	<b>5.77</b>	<b>461.95</b>	<b>9.42</b>	<b>15.41</b>	0.87	<b>17.89</b>	<b>20.10</b>
	Temporada húmeda	<b>124.39</b>	<b>79.60</b>	<b>2.25</b>	0.23	<b>294.10</b>	<b>31.13</b>	<b>41.79</b>	<b>152.78</b>	<b>1.47</b>	<b>161.30</b>	<b>21.15</b>	<b>2.19</b>	<b>193.81</b>	<b>1.05</b>	<b>8.57</b>	<b>1.82</b>	<b>2.41</b>	<b>11.90</b>
	Global	<b>338.81</b>	<b>281.07</b>	<b>5.98</b>	0.65	<b>1101.95</b>	<b>90.39</b>	<b>123.02</b>	<b>374.82</b>	<b>9.45</b>	<b>287.13</b>	<b>80.33</b>	<b>7.96</b>	<b>655.77</b>	<b>10.47</b>	<b>23.98</b>	<b>2.69</b>	<b>20.30</b>	<b>32.00</b>
VIZ-2	Temporada Seca	<b>4.10</b>	<b>31.54</b>	<b>1.32</b>	0.04	<b>26.62</b>	0.79	<b>1.20</b>	<b>1.40</b>	0.32	<b>6.32</b>	<b>1.66</b>	0.53	<b>25.29</b>	<b>1.98</b>	0.32	0.40	1.00	0.82
	Temporada húmeda	<b>3.17</b>	<b>13.66</b>	<b>1.11</b>	0.02	<b>5.25</b>	<b>4.05</b>	0.41	0.49	0.14	<b>5.53</b>	0.28	0.27	<b>11.62</b>	0.95	0.16	0.29	0.43	0.25
	Global	<b>7.27</b>	<b>45.20</b>	<b>2.43</b>	0.05	<b>31.87</b>	<b>4.84</b>	<b>1.61</b>	<b>1.89</b>	0.46	<b>11.84</b>	<b>1.94</b>	0.79	<b>36.91</b>	<b>2.93</b>	0.48	0.69	<b>1.43</b>	<b>1.07</b>
QE-36	Temporada Seca	<b>61.22</b>	<b>46.14</b>	<b>1.76</b>	0.10	<b>150.88</b>	<b>15.25</b>	<b>21.17</b>	<b>71.49</b>	<b>1.83</b>	<b>45.92</b>	<b>11.94</b>	<b>1.74</b>	<b>111.47</b>	<b>1.64</b>	<b>4.31</b>	0.43	<b>4.69</b>	<b>6.15</b>
	Temporada húmeda	<b>42.12</b>	<b>21.01</b>	<b>2.37</b>	0.07	<b>43.03</b>	<b>7.30</b>	<b>11.35</b>	<b>45.07</b>	0.73	<b>46.83</b>	<b>3.98</b>	0.75	<b>68.41</b>	<b>1.02</b>	<b>2.44</b>	<b>1.90</b>	0.59	<b>3.27</b>
	Global	<b>103.34</b>	<b>67.15</b>	<b>4.12</b>	0.17	<b>193.90</b>	<b>22.54</b>	<b>32.51</b>	<b>116.56</b>	<b>2.56</b>	<b>92.76</b>	<b>15.92</b>	<b>2.49</b>	<b>179.88</b>	<b>2.66</b>	<b>6.75</b>	<b>2.33</b>	<b>5.28</b>	<b>9.43</b>

Nota: Los resultados en negrita corresponden a los valores de IM superiores a 1.

## 4.2. Evaluación hidroquímica

En esta sección se analiza la hidroquímica del agua en las estaciones de monitoreo en estudio, mediante los diagramas de Piper, Stiff, Schoeller- Berkaloff, Stabler y Wilcox-Riverside obtenidos en el programa Diagrammes.

### 4.2.1. Diagrama de Piper

En la Figura 36 se muestra los tipos hidroquímicos del agua de las tres estaciones en estudio (TIT-1, VIZ-2 y QE-36) a nivel global. Las estaciones TIT-1 (aguas arriba de la confluencia) y QE-36 (aguas debajo de la confluencia) presentan una condición predominante clorurada sódica ( $\text{Cl}^- > \text{Na}^+$ ) y sulfatada clorurada sódica ( $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+$ ), respectivamente. La estación VIZ-2 (aguas arriba de la confluencia) presenta condiciones ligeramente bicarbonatadas sódicas ( $\text{HCO}_3^- > \text{Na}^+$ ). Asimismo, se aprecia que las estaciones presentan una composición catiónica similar, resaltando las altas concentraciones de los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ; mientras que, en el caso de los aniones, las variaciones son más notorias. Las estaciones TIT-1 y QE-36 presentan altas concentraciones de los aniones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  (entre 90 y ~100 por ciento), mientras que la estación VIZ-2 presenta neutralidad en su carga aniónica con una pequeña predominancia de los aniones  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  (entre 30 y 50 por ciento).

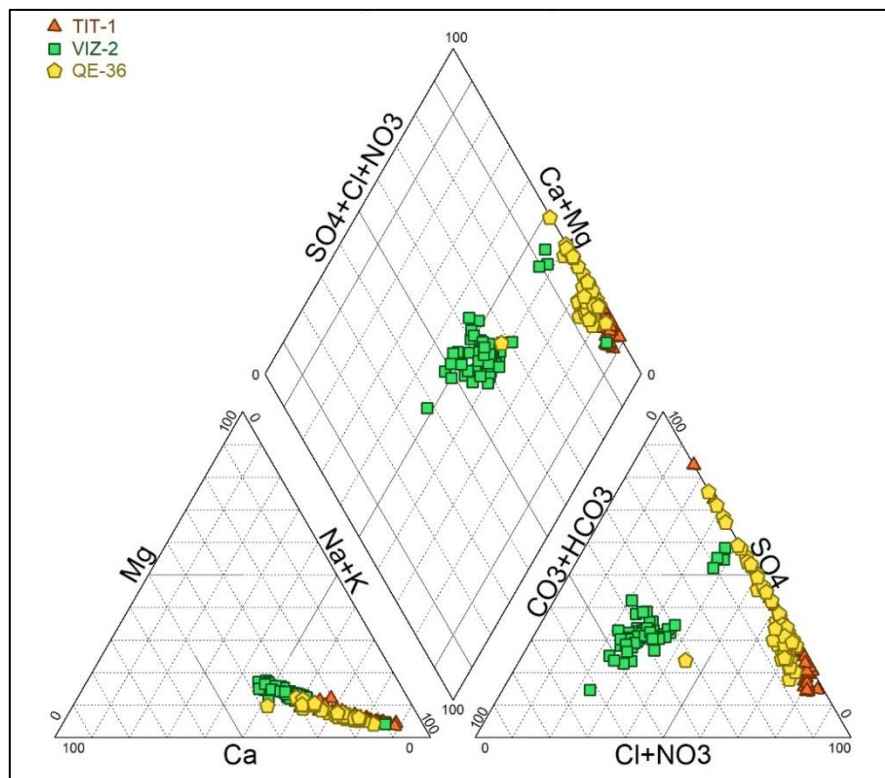
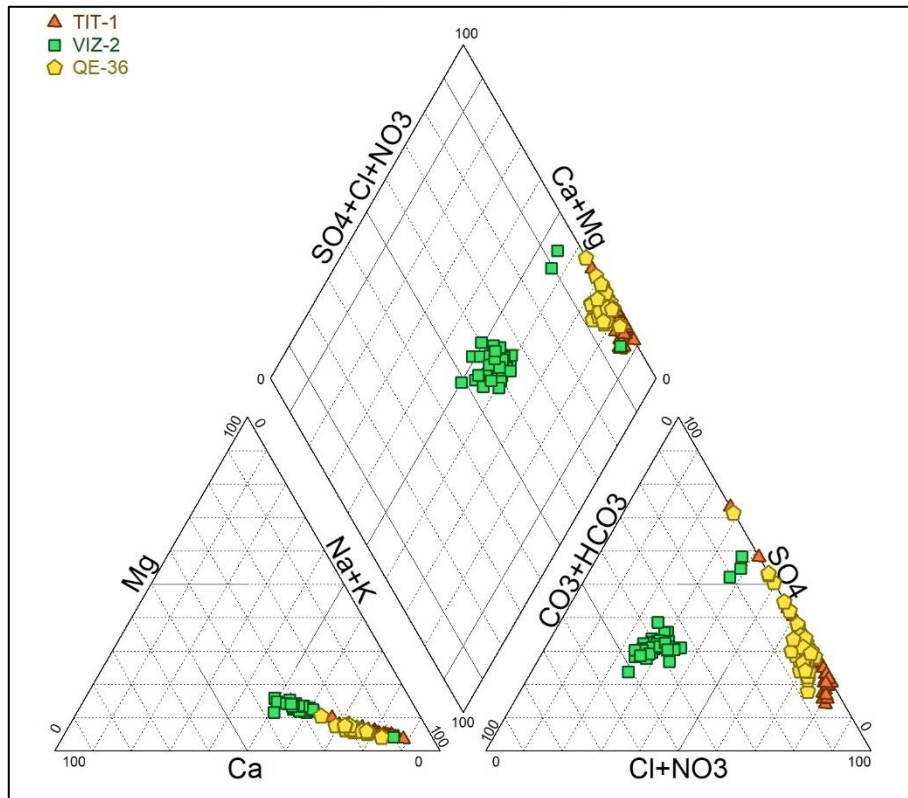


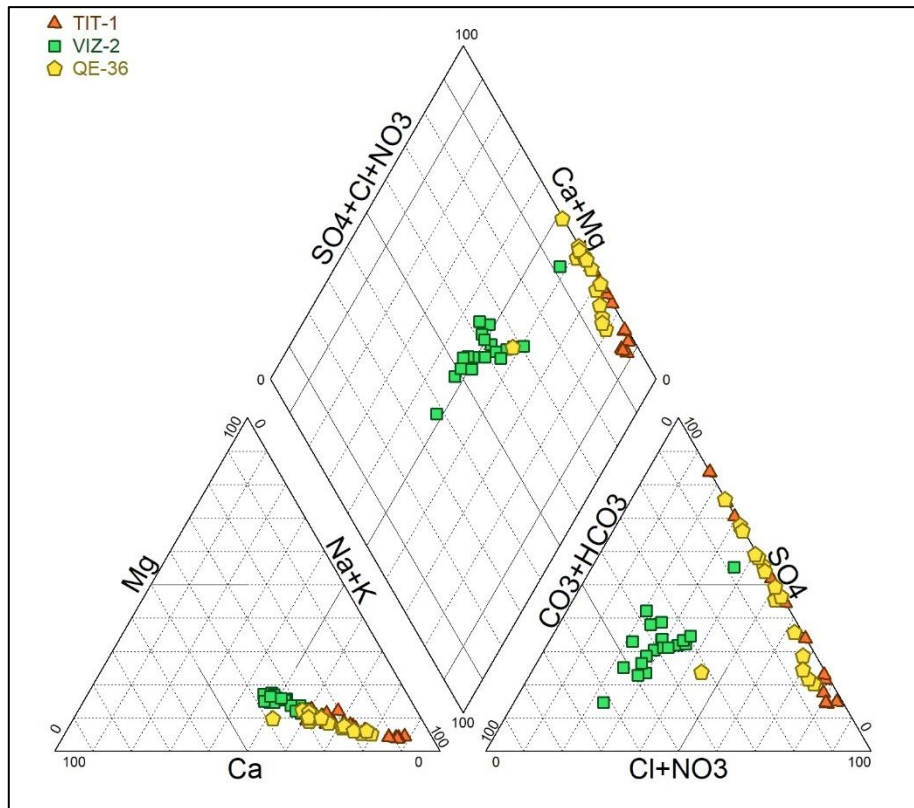
Figura 36. Diagrama de Piper (nivel global)

Por otro lado, en la Figura 37 y Figura 38 se muestra los tipos hidroquímicos del agua en época seca y húmeda, respectivamente. Se observa que la composición iónica no tiene una variación notoria en ambas épocas; sin embargo, en las estaciones TIT-1 y QE-36 la concentración de Cl<sup>-</sup> es ligeramente más marcada en la época seca (abril a noviembre) respecto a la época húmeda (diciembre a marzo), debido a la variación del caudal por las precipitaciones.



**Figura 37.** Diagrama de Piper (época seca)



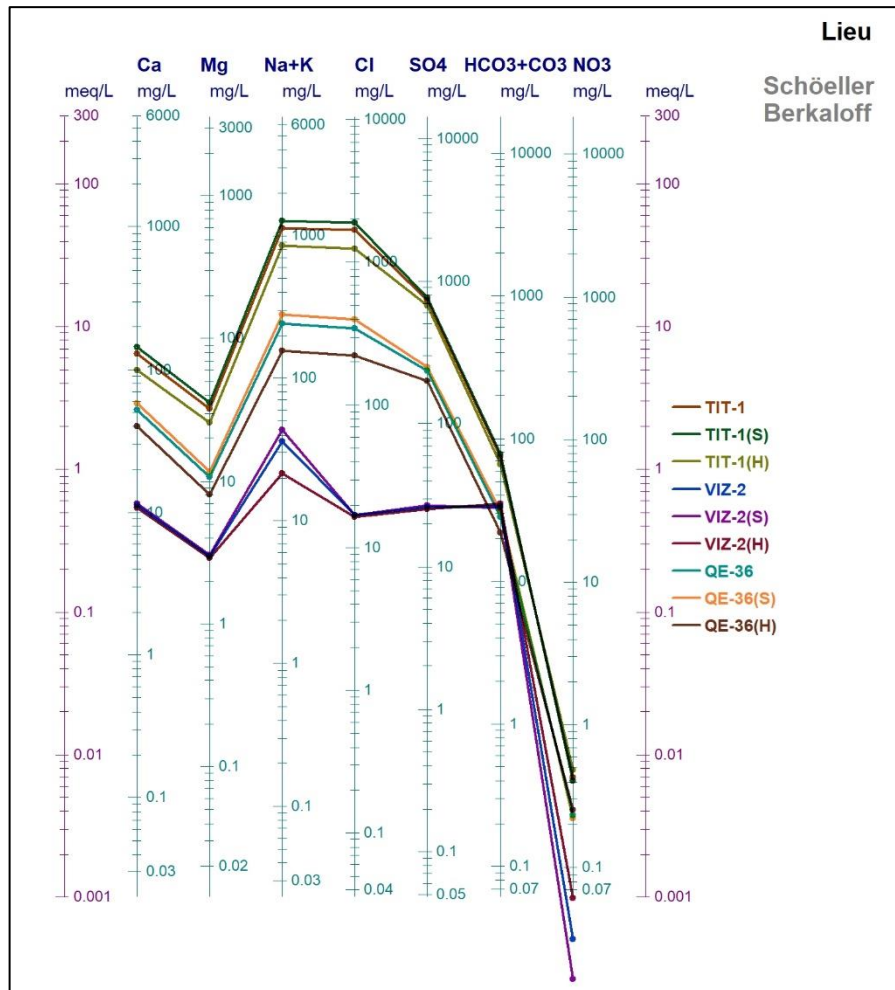


**Figura 38.** Diagrama de Piper (época húmeda)

#### 4.2.2. Diagrama de Schoeller-Berkaloff

El diagrama de Schoeller-Berkaloff muestra que las estaciones TIT-1 y VIZ-2 presentan las concentraciones más altas y bajas de los iones analizados, respectivamente. Además, las estaciones TIT-1 y QE-36 presentan altas concentraciones del ion  $\text{Cl}^-$  respecto a la estación VIZ-2, esto se debe a que las altas concentraciones de este anión en la estación TIT-1 tiene una influencia significativa agua abajo. Además, la estación VIZ-2 presenta altas concentraciones de los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ .

Adicionalmente, se observa que la concentración de los iones mayoritarios no presenta una diferencia notoria entre la época seca y húmeda; tal como se muestra en la Figura 39.

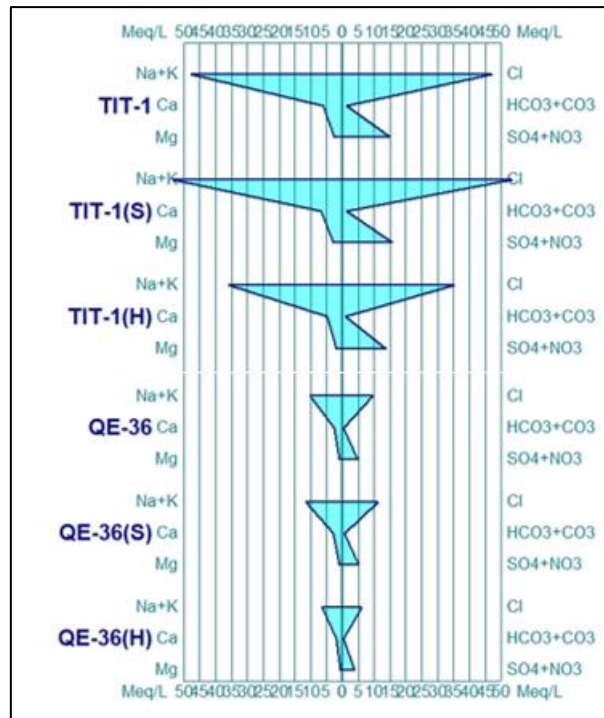


**Figura 39.** Diagrama de Schoeller-Berkaloff

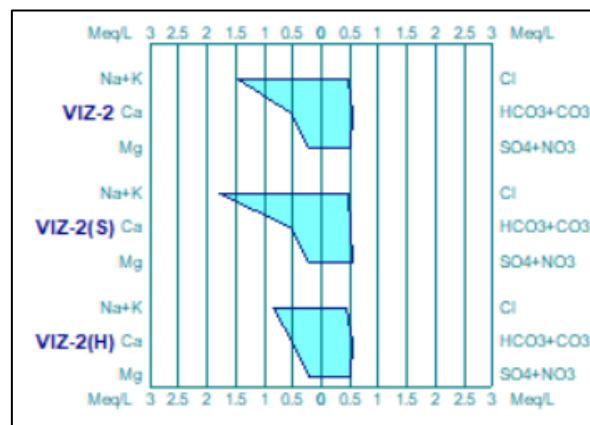
#### 4.2.3. Diagrama de Stiff

En los diagramas de Stiff, durante la temporada húmeda y seca se puede observar el predominio de los aniones cloruro y sulfato y cationes de sodio y potasio en las estaciones TIT-1 y QE-36, siendo más marcada en la primera estación; tal como se muestra en la Figura 40. Mientras que en la estación VIZ-2, mostrada en la Figura 41, se observa neutralidad en su carga aniónica con una ligera tendencia del anión bicarbonato, y una pequeña predominancia de los cationes de sodio, potasio y calcio. Asimismo, se muestra que la estacionalidad no modifica de manera notoria el comportamiento hidroquímico del agua en las estaciones en estudio, tal como se mencionó anteriormente.





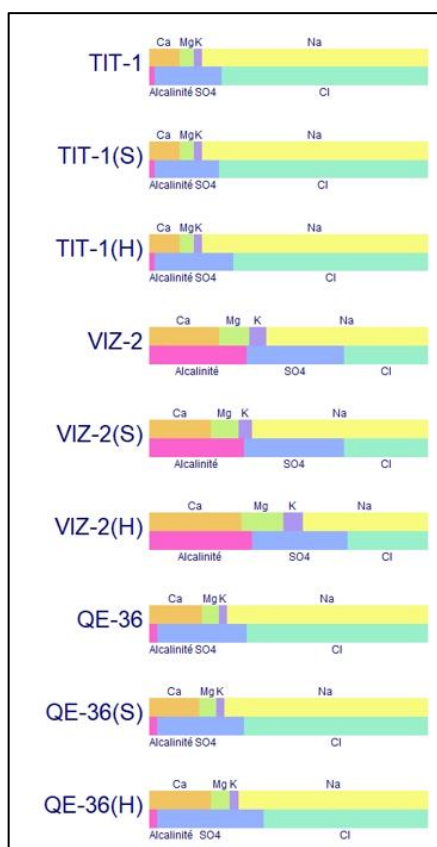
**Figura 40.** Diagrama de Stiff de las estaciones TIT-1 y QE-36



**Figura 41.** Diagrama de Stiff de la estación VIZ-2

#### 4.2.4. Diagrama de Stabler

El diagrama de Stabler muestra mediante barras que el catión  $\text{Na}^+$  y los aniones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  son los iones predominantes en las estaciones TIT-1 y QE-36, siendo más marcada la tendencia del anión  $\text{Cl}^-$  y catión  $\text{Na}^+$  en la primera estación. Esto evidencia la influencia del río Títire sobre las características hidroquímica aguas abajo después de la confluencia (río Coralaque). Por otro lado, en la estación VIZ-2 se observa una ligera predominancia del catión  $\text{Na}^+$  frente al  $\text{Ca}^{2+}$ , mientras que la carga aniónica presenta neutralidad con una pequeña tendencia de la alcalinidad.



**Figura 42.** Diagrama de Stabler

De acuerdo con los diagramas hidroquímicos mostrados, en los puntos de monitoreo aguas arriba antes de la confluencia, en la estación VIZ-2 (rio Vizcachas) predomina ligeramente los iones bicarbonato y sodio, lo cual indica que son aguas jóvenes y poco evolucionadas, en función a la secuencia de Chebotarev. Mientras que, la estación TIT-1 presenta aguas cloruradas sódicas, lo cual evidencia que son más evolucionadas y mineralizadas que las primeras. Además, esto último se debe a que aguas arriba del río Títire se presentan fuentes termales asociadas a la zona geotermal de Títire- Puente Bello, siendo característico de las aguas termales la elevada concentración del ion cloruro y sodio.

En el caso de la estación QE-36 (después de la confluencia), las aguas son sulfatadas cloruradas sódicas por lo que corresponderían a aguas intermedias. Asimismo, esto evidencia que el río Títire influye de manera notable en las características hidroquímicas del río Coralaque.

#### 4.2.5. Diagrama de Wilcox-Riverside

En la Figura 43 se muestra el diagrama de Wilcox-Riverside a nivel global. La estación TIT-1 presenta valores elevados de conductividad eléctrica y valores elevados del índice SAR (relación de absorción de sodio), clasificándose dentro de las categorías C5-S4 y C6-S4, siendo aguas de excesiva salinidad y muy alto contenido de sodio, por lo que no son aconsejables para ningún riego en general. Respecto a la estación VIZ-2, sus aguas presentan valores bajos de conductividad eléctrica y valores bajos del índice SAR, clasificándose dentro de la categoría C1-S1, siendo aguas de baja salinidad y bajo contenido de sodio, por lo que son aptas para todo tipo de cultivo en cualquier suelo. Mientras que la estación QE-36 presenta valores elevados de conductividad eléctrica y valores bajos a medios del índice SAR, clasificándose dentro de las categorías C3-S1 y C3-S2, siendo aguas de alta salinidad y contenido bajo a medio de sodio, por lo que son aptas solo para plantas muy resistentes a la salinidad y con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo. En general, el río Coralaque presenta una condición intermedia respecto a sus afluentes (ríos Títire y Vizcachas).

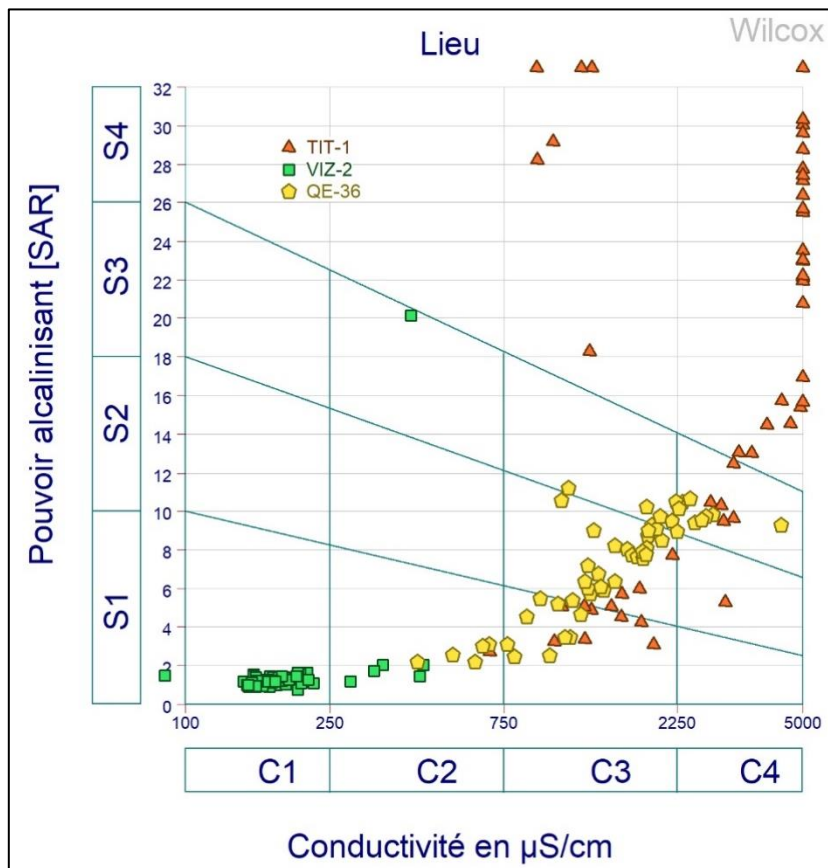
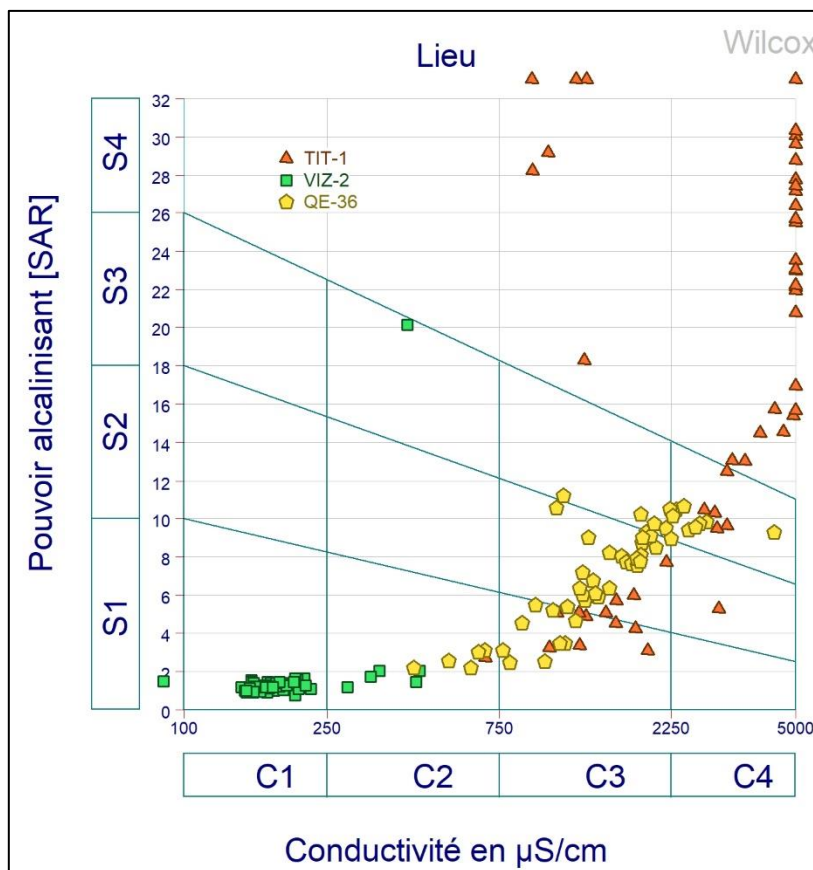


Figura 43. Diagrama de Wilcox-Riverside (nivel global)

En la Figura 44 se muestra el diagrama de Wilcox-Riverside en época seca. La estación TIT-1 presenta valores elevados de conductividad eléctrica y valores elevados del índice SAR (relación de absorción de sodio), clasificándose dentro de las categorías C5-S4 y C6-S4, siendo aguas de excesiva salinidad y muy alto contenido de sodio, por lo que no son aconsejables para ningún riego en general. Respecto a la estación VIZ-2, sus aguas presentan valores bajos de conductividad eléctrica y valores bajos del índice SAR, clasificándose dentro de la categoría C1-S1, siendo aguas de baja salinidad y bajo contenido de sodio, por lo que son aptas para todo tipo de cultivo en cualquier suelo. Mientras que la estación QE-36 se clasifica dentro de las categorías C3-S2 y C3-S3, siendo aguas de alta salinidad y contenido medio a alto de sodio, por lo que son aptas solo para plantas muy resistentes a la salinidad y pueden presentar un gran peligro de acumulación de sodio en el suelo.



**Figura 44.** Diagrama de Wilcox-Riverside (época seca)

En la Figura 49 se muestra el diagrama de Wilcox-Riverside en época húmeda. La estación TIT-1 presenta valores elevados de conductividad eléctrica y valores bajos del índice SAR (relación de absorción de sodio), clasificándose dentro de las categorías C3-S1 y C3-S2, siendo aguas de alta salinidad y contenido bajo a medio de sodio, por lo que son aguas aptas

solo para plantas muy resistente a la salinidad y con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo especialmente en suelos de textura fina y de baja permeabilidad. Respecto a la estación VIZ-2, sus aguas presentan valores bajos de conductividad eléctrica y valores bajos del índice SAR, clasificándose dentro de la categoría C1-S1, siendo aguas de baja salinidad y bajo contenido de sodio, por lo que son aptas para todo tipo de cultivo en cualquier suelo. Mientras que la estación QE-36 presenta valores medios a elevados de conductividad eléctrica y valores bajos del índice SAR, clasificándose dentro de las categorías C2-S1 y C3-S1, siendo aguas de media a alta salinidad y bajo contenido de sodio, por lo que son aptas solo para plantas moderadamente a muy resistentes a la salinidad, y con pocas posibilidades de lograr elevadas concentraciones de sodio intercambiable.

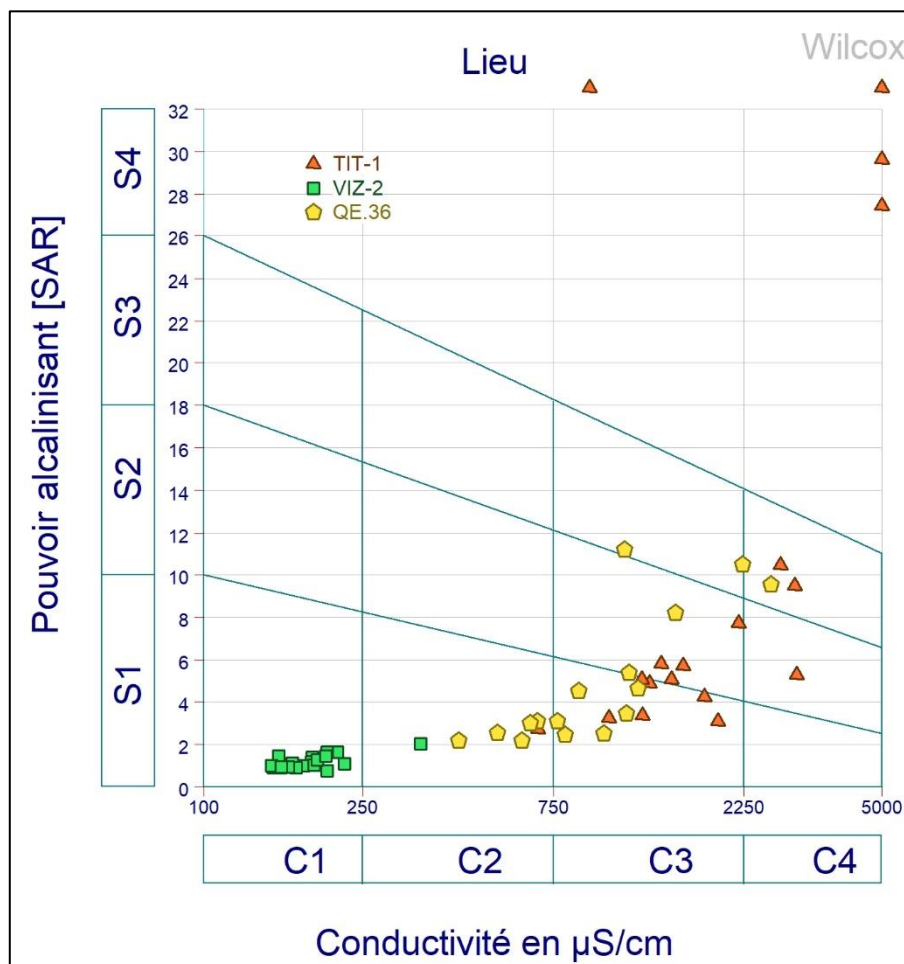


Figura 45. Diagrama de Wilcox-Riverside (época húmeda)

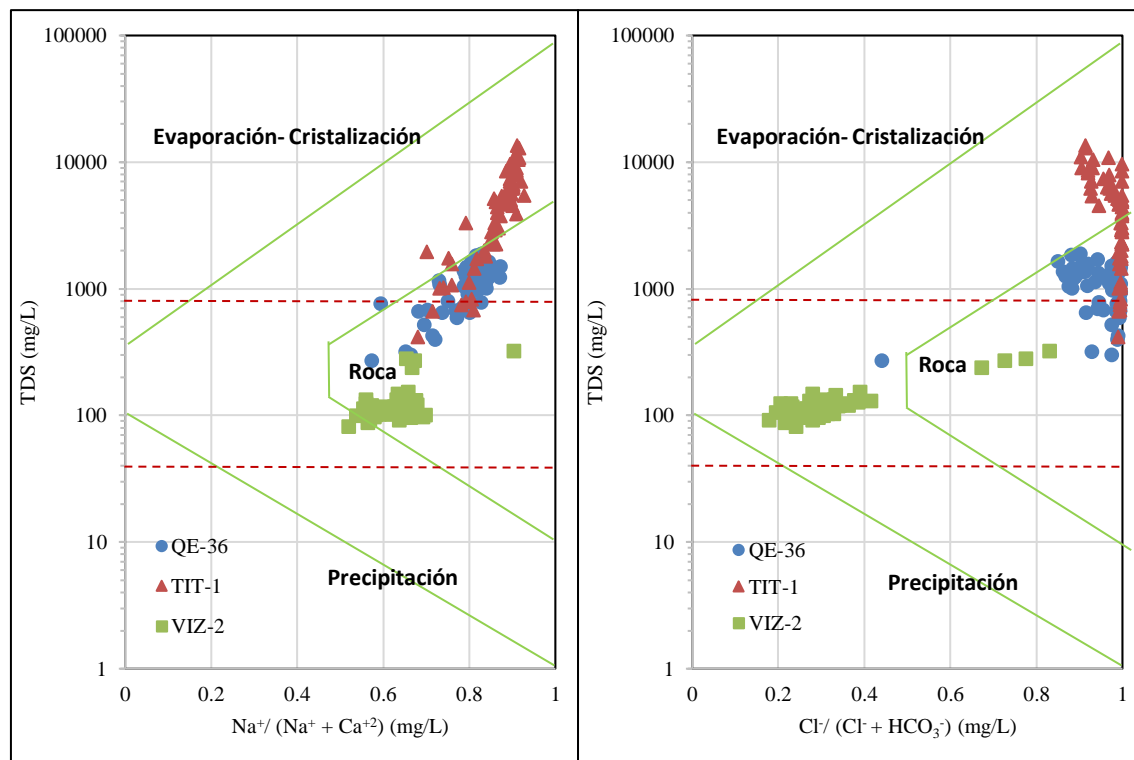
### 4.3. Evaluación de la fuente de generación

La sección permitirá conocer los mecanismos que controlan la composición hidroquímica de los ríos en estudio que se evaluaron en el ítem anterior. Para ello, se generó los diagramas de Gibbs y la relación de iones  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  vs  $Mg^{2+}/Na^{+}$ .

En la Figura 46 se presenta el diagrama de Gibbs de las estaciones en estudio, que permite identificar los procesos naturales predominantes en la hidroquímica del agua. En la estación TIT-1, se observa concentraciones moderadas a altas de TDS y proporciones moderadas a altas de  $Na^{+}$  ( $Na^{+} + Ca^{2+}$ ) y  $Cl^{-}$  ( $Cl^{-} + HCO_3^{-}$ ), lo que indica que los procesos de evaporación y cristalización y meteorización de las rocas (interacción agua-roca) controlan las características hidroquímicas en el río Títire, presentando una ligera predominancia del proceso de evaporación y cristalización. El dominio de estos procesos se debe a la presencia de la zona geotermal de Títire - Puente Bello que surge en el curso del río Títire a una altitud de 4400 msnm, y que está rodeado por una cadena de montañas conformadas por rocas de naturaleza volcánicas-sedimentarias (como andesitas y tobas volcánicas) de la formación Maure. Las aguas geotermales de la zona de Títire - Puente Bello presentan temperatura elevadas y elevadas concentraciones del ion cloruro y sodio, que luego se mezclan con las aguas superficiales del río Títire. Además, la interacción con las rocas se evidencia en la coloración blanco-verdosa de las aguas del río Títire, debido al contenido de sales disueltas (Carpio & Peña, 2020; Vargas, y otros, 2017; Cruz, Vargas, & Cacya, 2014).

Mientras que, la estación VIZ-2 se caracteriza por concentraciones moderadas de TDS y proporciones moderadas de  $Na^{+}$  ( $Na^{+} + Ca^{2+}$ ) y  $Cl^{-}$  ( $Cl^{-} + HCO_3^{-}$ ), lo que indica el dominio del proceso de meteorización de las rocas (interacción agua-roca). El material geológico presente en la zona está conformado principalmente por tobas y brechas riolíticas de color pardo amarillento (Quispesivana y Zapata, 2000 como se citó en Vargas, y otros, 2017).

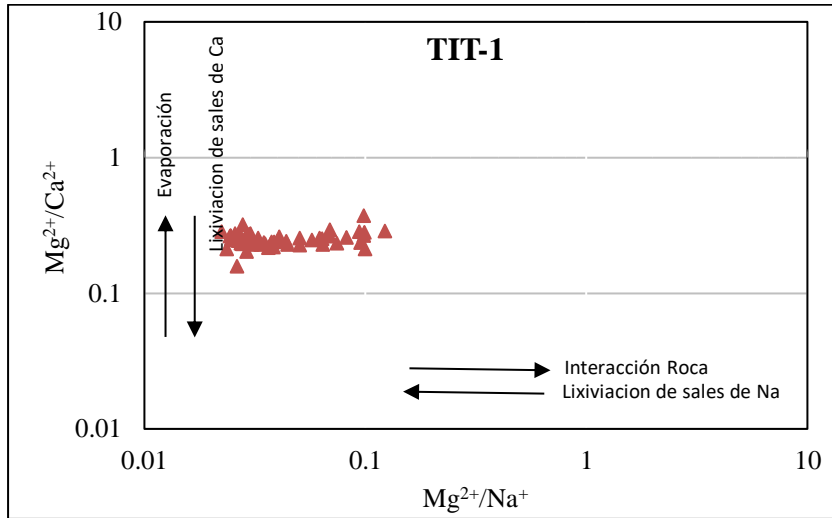
Por otro lado, en aguas abajo después de la confluencia, en la estación QE-36, se mantiene proporciones similares respecto a la estación TIT-1, lo que cual evidencia el río Títire influye de manera significativa sobre las propiedades hidroquímicas del río Coralaque.



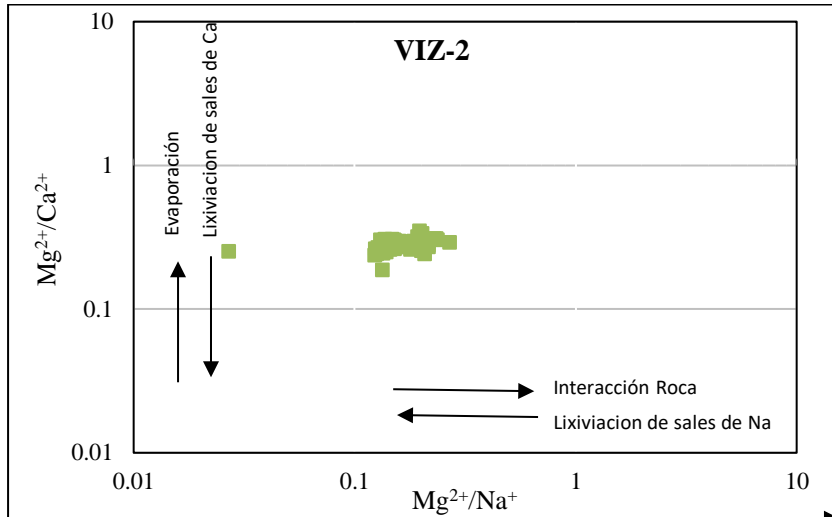
**Figura 46.** Diagramas de Gibbs de las estaciones en estudio

Por otro lado, la Figura 47, Figura 48 y Figura 49 muestran la relación  $Mg^{2+} / Ca^{2+}$  vs  $Mg^{2+} / Na^{+}$  de las estaciones en estudio. La estación TIT-1, presenta altos valores de la relación  $Mg^{2+} / Ca^{2+}$  y bajas valores de la relación  $Mg^{2+} / Na^{+}$ , lo que evidencia que los procesos de evaporación y lixiviación de sales de Na regulan las características hidroquímicas en el río Títire. El dominio del proceso de evaporación se debe a la presencia de fuentes termales aguas arriba del río Títire; mientras que la predominancia de la lixiviación se debe a los aportes de drenaje ácido de mina aguas en la cabecera del río Aruntaya; ubicado aguas arriba del río Títire. En ese sentido, se comprueba que en las características hidroquímicas del río Títire influyen tanto procesos naturales como antropogénicos.

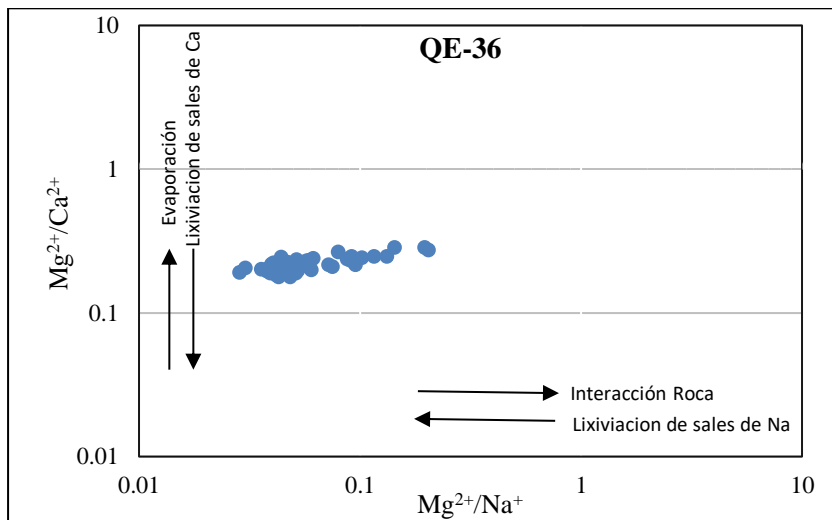
Por otro lado, la estación VIZ-2 presenta altos valores de la relación  $Mg^{2+} / Ca^{2+}$  y altos valores de la relación  $Mg^{2+} / Na^{+}$ , lo cual indica predominancia del proceso de interacción agua-roca. Mientras que, aguas abajo después de la confluencia, la estación QE-36 presenta la misma tendencia que la estación TIT-1 (evaporación y lixiviación de sales de Na), lo que evidencia la influencia significativa del río Títire sobre la condición hidroquímica del río Coralaque.



**Figura 47.** Gráficos de  $Mg^{2+}/Na^{+}$  vs  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  de la estación TIT-1



**Figura 48.** Gráficos de  $Mg^{2+}/Na^{+}$  vs  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  de la estación VIZ-2



**Figura 49.** Gráficos de  $Mg^{2+}/Na^{+}$  vs  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  de la estación QE-36



#### 4.4. Modelamiento de la zona de mezcla y de la dispersión de los parámetros de calidad de agua

Esta sección tiene el propósito de evaluar la dispersión de parámetros críticos en la confluencia de los ríos Títire y Vizcachas, para lo cual se utilizó el modelo CORMIX 1. Se analizó la variación de la concentración de los parámetros en la zona de mezcla, así como a medida que se va distanciando aguas debajo de la zona de mezcla.

##### 4.4.1. Selección de Parámetros para Modelar

Se seleccionó los parámetros de aluminio, arsénico, boro y manganeso debido a que presentan altas concentraciones en el río Títire (TIT-1) respecto al río Vizcachas (VIZ-2). Además, se seleccionó dos fechas para época húmeda y dos para época seca, es decir en total cuatro fechas de monitoreo, con el objetivo de comparar las concentraciones estimadas con el modelamiento respecto a las concentraciones medidas en campo. Cabe precisar que, para la selección de fechas, se consideró el criterio de máximo caudal en el río Títire (afluente) y mínimo caudal en el río Vizcachas (cuerpo receptor), pero siempre tomando en cuenta que el caudal del río Títire sea inferior al caudal del río Vizcachas.

En la Tabla 10 se presenta la información necesaria para realizar el modelamiento.

**Tabla 10:** Información recopilada de la zona de confluencia para el modelamiento

Parámetro	Época	Fecha	Estación	
			TIT-1	VIZ-2
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Seca	Jul-2017	0.305	1.167
		Nov-2019	0.368	1.272
	Húmeda	Feb-2016	0.980	2.715
		Dic-2020	0.490	3.427
Aluminio (mg/L)	Seca	Jul-2017	20.15	0.074
		Nov-2019	26.86	0.855
	Húmeda	Feb-2016	31.35	1.46
		Dic-2020	39.88	0.315

Continuación ...

Parámetro	Época	Fecha	Estación	
			TIT-1	VIZ-2
Arsénico (mg/L)	Seca	Jul-2017	0.48762	0.07385
		Nov-2019	0.6693	0.0656
	Húmeda	Feb-2016	0.1162	0.0775
		Dic-2020	0.75	0.032
Boro (mg/L)	Seca	Jul-2017	8.65	0.209
		Nov-2019	35.37	0.743
	Húmeda	Feb-2016	3.195	0.27
		Dic-2020	35.34	0.089
Manganeso (mg/L)	Seca	Jul-2017	2.176	0.017
		Nov-2019	2.774	0.6447
	Húmeda	Feb-2016	2.198	0.1177
		Dic-2020	4.133	0.187

**FUENTE:** Informes de monitoreo de calidad de agua superficial del proyecto Quellaveco de Anglo American.

#### 4.4.2. Modelamiento

Para el modelamiento en el programa CORMIX se completaron diversos formularios en cada “ventana” del programa, que son proyecto, efluente, ambiente, descarga, zona de mezcla; cuyo detalle se presenta a continuación:

- Proyecto: En esta “ventana” se añade la información que se muestra en la Tabla 11. Es preciso señalar que se va a simular las concentraciones de aluminio, arsénico, boro y manganeso en el río Coralaque, luego de la confluencia de los ríos Títire y Vizcachas, hasta 35000 metros aguas abajo después de la confluencia.

**Tabla 11:** Descripción del proyecto de simulación en CORMIX

Descripción del proyecto	
Nombre del proyecto	Simulación de la zona de confluencia entre los ríos Títire y Vizcarras
Caso del diseño	CORMIX1
Modelador	Kiara Tello Vergaray
Fecha de simulación	14/10/2023

- **Efluente:** En esta “ventana” se añade la información de los caudales de descarga y concentraciones de los parámetros (aluminio, arsénico, boro y manganeso) del río Títire, obtenidos de los monitoreos (ver Tabla 12). Asimismo, se agrega la densidad del agua.

Cabe precisar que los parámetros mencionados se consideraron como conservativos.

**Tabla 12:** Descripción de las características del río Títire

Características	Unidad	Época Seca		Época Húmeda	
		Jul-2017	Nov-2019	Feb-2016	Dic-2020
Caudal de descarga	m <sup>3</sup> /s	0.305	0.368	0.980	0.490
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1000	1000	1000	1000
Concentración de Aluminio	mg/L	20.15	26.86	31.35	39.88
Concentración de Arsénico	mg/L	0.48762	0.6693	0.1162	0.75
Concentración de Boro	mg/L	8.65	35.37	3.195	35.34
Concentración de Manganeso	mg/L	2.176	2.774	2.198	4.133

- **Ambiente:** Se adiciona en esta “ventana” las condiciones ambientales del cuerpo receptor (rio Vizcachas), obtenidos de los monitoreos. El ancho del río se estimó mediante Google Earth, obteniendo un valor de 12 m. Se considero una apariencia del flujo de ligeros meandros, ya que no presenta irregularidades que generen gran influencia sobre la dirección en el flujo. Además, por tratarse de un río se consideró el borde limitado (ver Tabla 13).

**Tabla 13:** Descripción de las condiciones ambientales del río Vizcachas

Características	Parámetro	Unidad	Valor		
Características hidráulicas y datos de campo del flujo	Profundidad media (HA)	m	0.8		
	Profundidad en las inmediaciones del punto de descarga (HD)	m	0.8		
	Velocidad del viento	m/s	2.6		
	Borde	-	Limitado		
	Ancho del cuerpo receptor	m	12		
	Apariencia del flujo	-	Ligeros meandros		
	Tipo de flujo	-	Estable		
	Caudal		m <sup>3</sup> /s	Jul-2017	1.167
				Nov-2019	1.272
				Feb-2016	2.715
Dic-2020				3.427	
Rugosidad (Coeficiente de manning)	-	0.025			
Datos de densidad ambiental	Tipo de agua	-	Dulce		
	Densidad del medio receptor	kg/m <sup>3</sup>	1000		

- Descarga: En esta “ventana” se presenta los datos relacionados a las características geométricas de la confluencia de los ríos Títire y Vizcachas (ver Tabla 14).

**Tabla 14:** Descripción de las características de la confluencia

Características	Unidad	Valor
Tipo de subsistema	-	Cormix 1
Banco cercano	-	Derecha
Distancia al banco cercano	m	0.1
Angulo vertical THETA	°	1
Angulo horizontal SIGMA	°	60
Diámetro del puerto	m	10
Altura del chorro	m	Sobre la superficie a 0.01 m

- Zona de mezcla: En esta “ventana” se añade la distancia desde la estación TIT-1 hasta la estación de monitoreo QE-36, que corresponde a 35 km (región de interés), con el propósito de estimar las concentraciones de los parámetros en ese punto. Además, se considera el valor del ECA para la Categoría 3 D1: Riego de Vegetales (ver Tabla 15).

**Tabla 15:** Descripción de la zona de mezcla

Parámetro	Observación
Tipo de efluente	No toxico
Estándar de calidad de agua (ECA Agua - Categoría 3: D1)	Aluminio 5 mg/L
	Arsénico 0.1 mg/L
	Boro 1 mg/L
	Manganeso 0.2 mg/L
Zona de mezcla especifica	2000 m
Región de interés	35000 m
Numero de intervalos/pasos	50

Luego de la corrida del modelo, se obtendrá las concentraciones estimadas para los parámetros aluminio, arsénico, boro y manganeso. Además, se generó la pluma de dilución de los parámetros mencionados, que posteriormente será analizada.

#### 4.4.3. Interpretación y Análisis de Datos

Luego de la corrida del modelo, se realiza el análisis de los datos obtenidos que se muestran en la Tabla 16.

**Tabla 16:** Comparación de las concentraciones simuladas con el modelamiento CORMIX y las concentraciones monitoreadas en la estación QE-36

Parámetro	Época	Fecha	Concentración medida en campo (monitoreo) (mg/L)	Concentración simulada (CORMIX)* (mg/L)	ECA – Agua Categoría 3- D1 (mg/L)
Aluminio	Seca	Jul-2017	<b>5.338</b>	<b>5.27</b>	5
		Nov-2019	2.356	<b>7.760</b>	
	Húmeda	Feb-2016	<b>15.61</b>	<b>11.300</b>	
		Dic-2020	1.762	<b>5.700</b>	
Arsénico	Seca	Jul-2017	0.09174	<b>0.127</b>	0.1
		Nov-2019	<b>0.1214</b>	<b>0.193</b>	
	Húmeda	Feb-2016	0.0928	0.042	

Continuación ...

Parámetro	Época	Fecha	Concentración medida en campo (monitoreo) (mg/L)	Concentración simulada (CORMIX)* (mg/L)	ECA – Agua Categoría 3- D1 (mg/L)
		Dic-2020	0.076	<b>0.107</b>	
Boro	Seca	Jul-2017	<b>1.028</b>	<b>2.260</b>	1
		Nov-2019	<b>6.453</b>	<b>10.200</b>	
	Húmeda	Feb-2016	<b>1.888</b>	<b>1.150</b>	
		Dic-2020	<b>4.065</b>	<b>5.050</b>	
		Manganeso	Seca	Jul-2017	
Nov-2019	<b>0.5064</b>			<b>0.801</b>	
Húmeda	Feb-2016		<b>1.507</b>	<b>0.793</b>	
	Dic-2020		<b>0.362</b>	<b>0.59</b>	

Nota:

Los datos en negrita corresponden a los valores que exceden el ECA para Agua (D.S. 004-2017-MINAM).

\*Las concentraciones simuladas mostradas en la tabla corresponden a las obtenidas a 35 km de distancia después de la zona de confluencia.

Tal como se observa en la Tabla 16 y Anexo 2, en la mayoría de los casos las concentraciones simuladas con el modelo CORMIX son ligeramente superiores a las concentraciones medidas en campo en la estación de monitoreo QE-36, inclusive superando el valor respectivo establecido en el ECA-Agua (Categoría 3-D1). Además, para los parámetros boro y manganeso, tanto todas las concentraciones medidas en campo (monitoreadas) como las simuladas con CORMIX superan el valor establecido del ECA-Agua (Categoría 3-D1).

Asimismo, la dilución total dentro del cuerpo receptor se da a una distancia máxima de 1610.47 m aguas abajo, dado que en este punto la dilución se completó y las concentraciones de los parámetros no varían; tal como se muestra en los resultados de la concentración simulada de los parámetros aluminio, arsénico, boro y manganeso en época seca y húmeda que se presentan en el Anexo 2.

En la época húmeda, la dilución de los parámetros se da a lo largo de un tramo de 1470.46 m en febrero del 2016 y a 1610.47 m en diciembre del 2020; mientras que, en la época seca, la dilución se da a largo de una distancia de 1540.47 m en julio del 2017 y 1540.46 m en noviembre del 2019. Por lo que se deduce que en general la dilución de los parámetros es similar durante las épocas seca y húmeda.

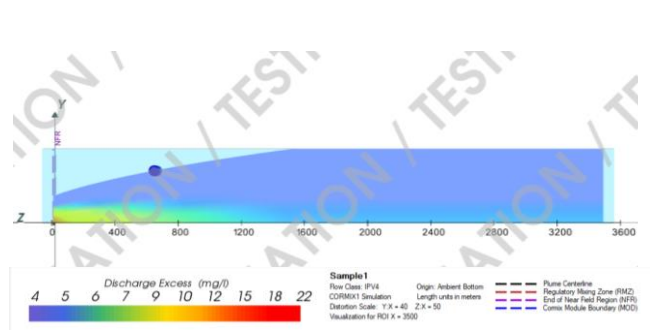
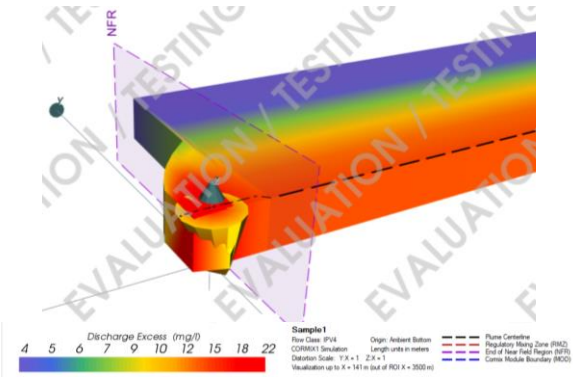
La Tabla 17, Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 muestran la representación tridimensional y vista en perfil (relación de los ejes X y Y) de la simulación de la dispersión de los parámetros aluminio, arsénico, boro y manganeso cuando el río Títire confluye con el río Vizcachas, bajo dos escenarios de época seca (julio 2017 y noviembre del 2019) y dos escenarios de época húmeda (febrero del 2016 y diciembre 2020); respectivamente. La vista en perfil permite visualizar la pluma de dilución con mayor detalle. Se puede observar que la dilución de los parámetros disminuye su intensidad rápidamente y luego se mantiene estable durante todo el recorrido dentro del río Coralaque (después de la confluencia de los ríos Títire y Vizcachas), en especial en la simulación con los datos de febrero del 2016 (ver Tabla 19), donde la pluma de dilución tiene la más corta distancia.

Además, comparando la pluma de dilución entre los parámetros, se puede observar que aluminio y boro presentan una dilución más intensa debido a que las concentraciones de las mismas en el río afluente (río Títire) es elevada respecto al cuerpo receptor (río Vizcachas), por lo que la tendencia será la dilución de la concentración de estos parámetros aguas abajo.

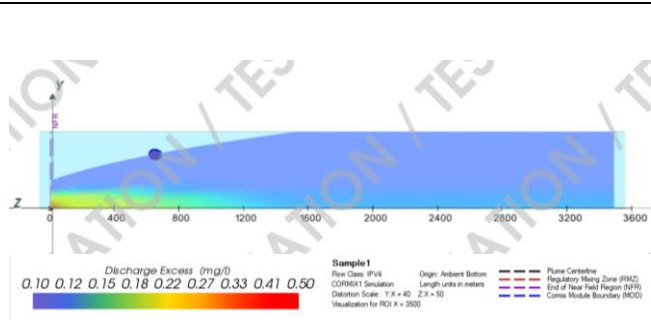
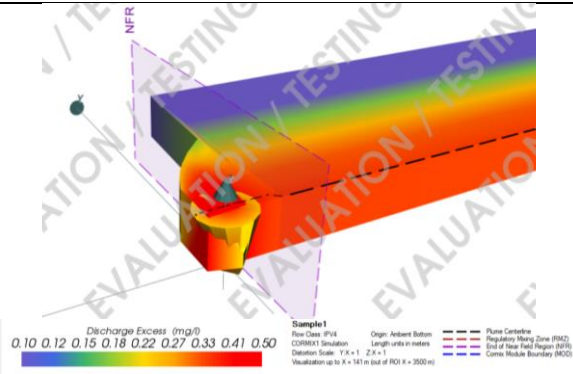
Por otro lado, se puede observar que todas las figuras de la simulación de dispersión de los parámetros tienen algo en común, y es que una vez finalizada la dilución y la concentración de los parámetros se mantiene estable aguas abajo, la concentración es diferente en el borde opuesto (izquierda); esto es más visible por la diferencia de colores que representa las concentraciones del parámetro. La línea de corriente más próxima al borde de mezcla, representa la variación de la concentración simulada por el modelamiento, que corresponde al borde derecha. Esto es debido a las características ingresadas en el modelo. En el modelo que indico un ancho constante del río Vizcachas de 12 m, pero, esto en la realidad no es así, puesto que el ancho es variable a lo largo del recorrido del río. Al variar el área de la sección transversal del río, varía también la manera en que se mezclan las concentraciones de los parámetros.

**Tabla 17:** Representación tridimensional y vista en perfil de la simulación de la dispersión de los parámetros en época seca (julio-2017)

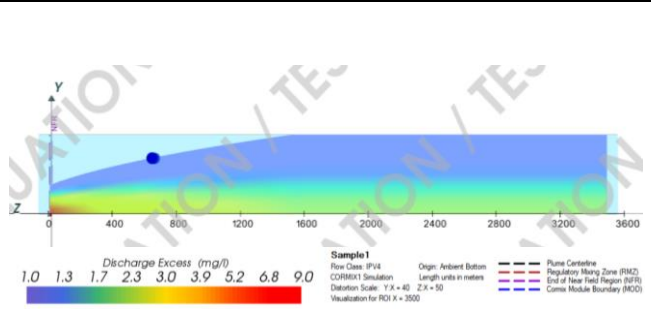
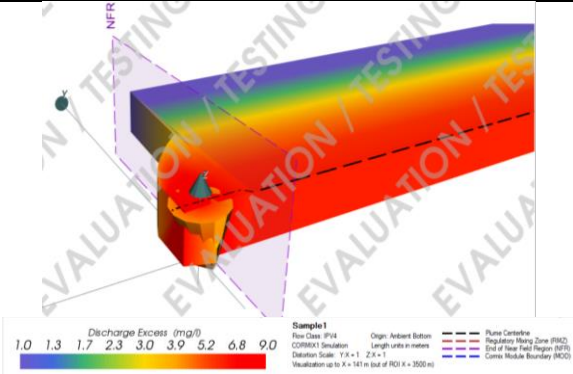
Aluminio



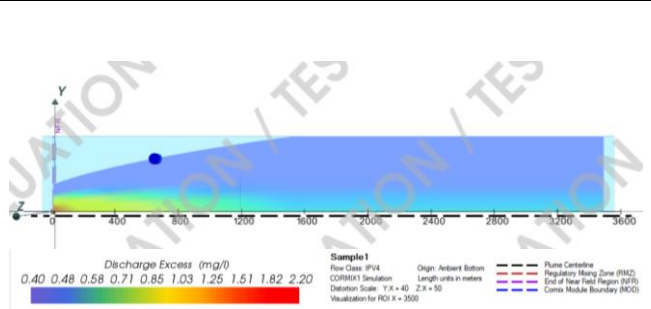
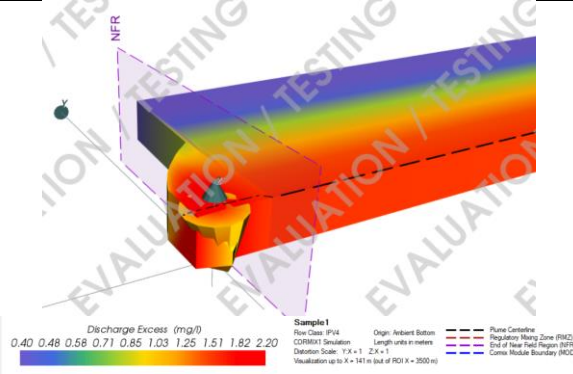
Arsénico



Boro



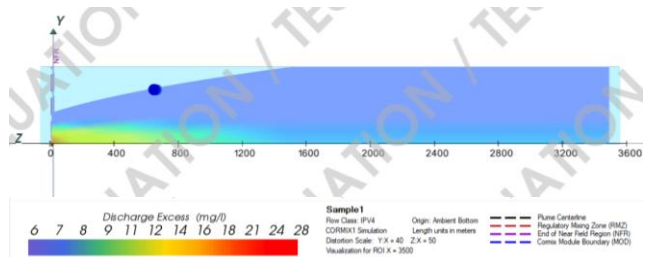
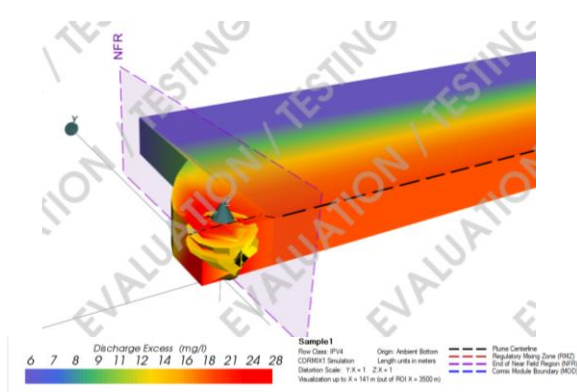
Manganeso



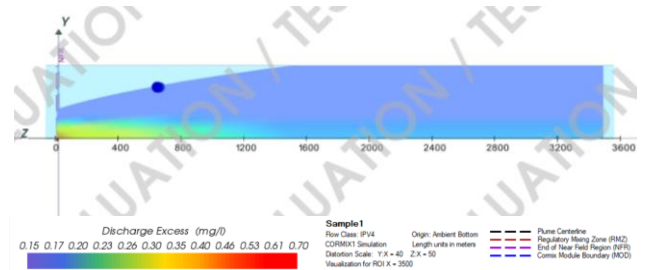
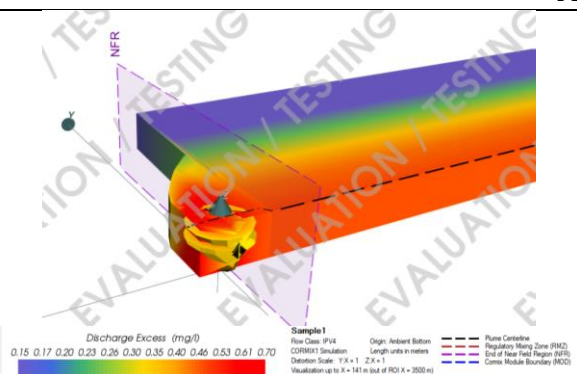


**Tabla 18:** Representación tridimensional y vista en perfil de la simulación de la dispersión de los parámetros en época seca (noviembre-2019)

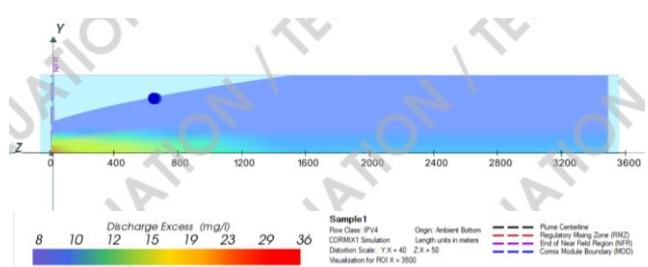
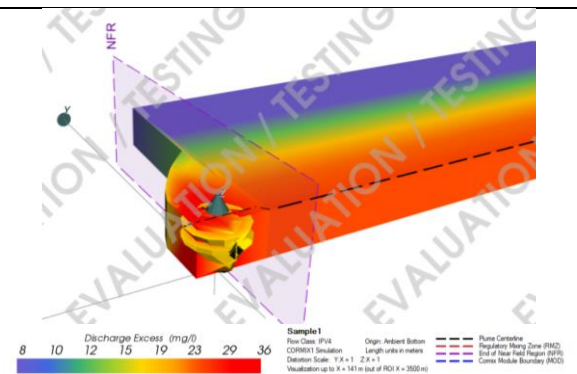
Aluminio



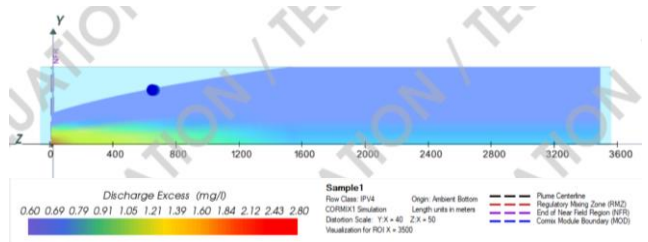
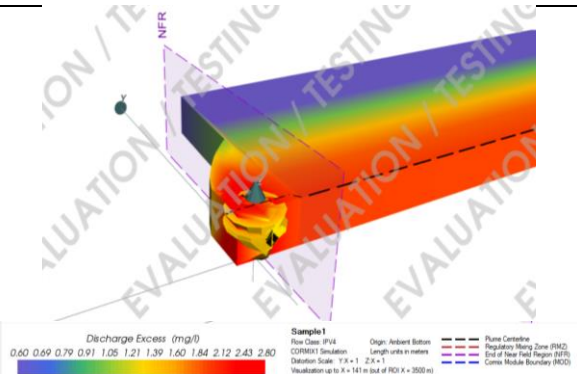
Arsénico



Boro

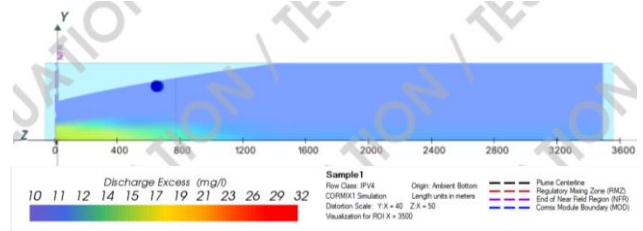
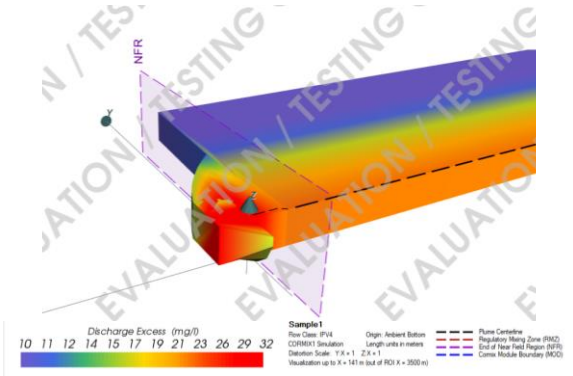


Manganeso

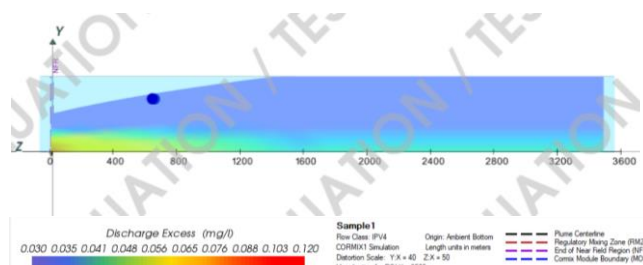
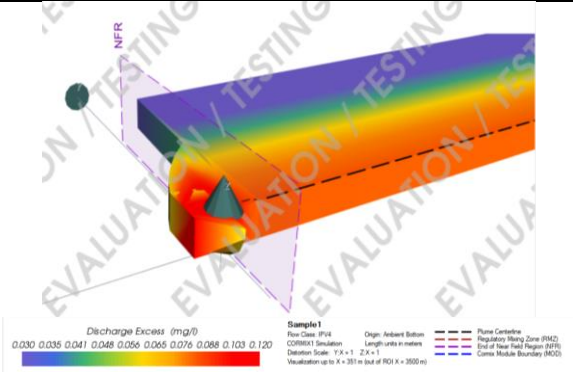


**Tabla 19:** Representación tridimensional y vista en perfil de la simulación de la dispersión de los parámetros en época húmeda (febrero-2016)

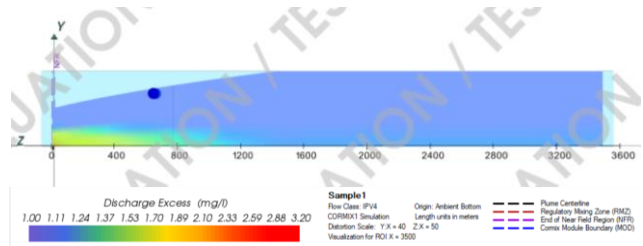
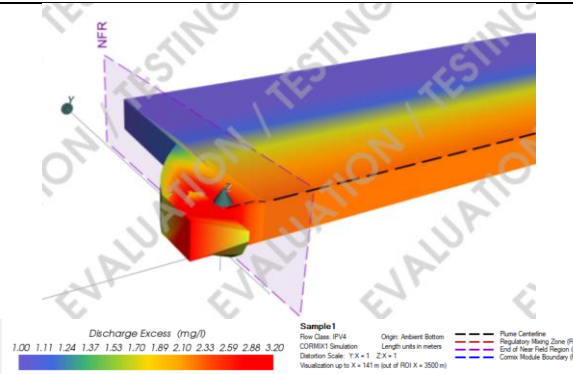
Aluminio



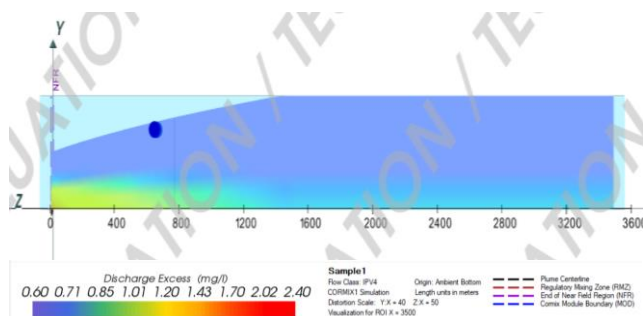
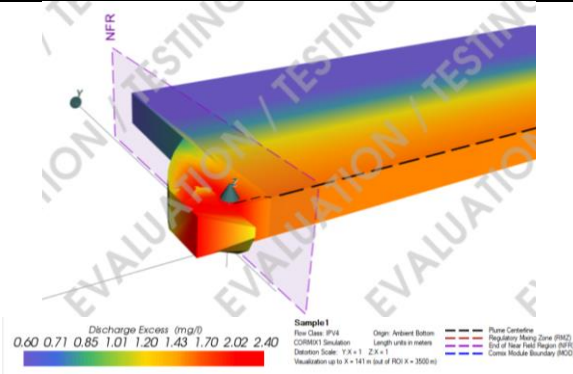
Arsénico



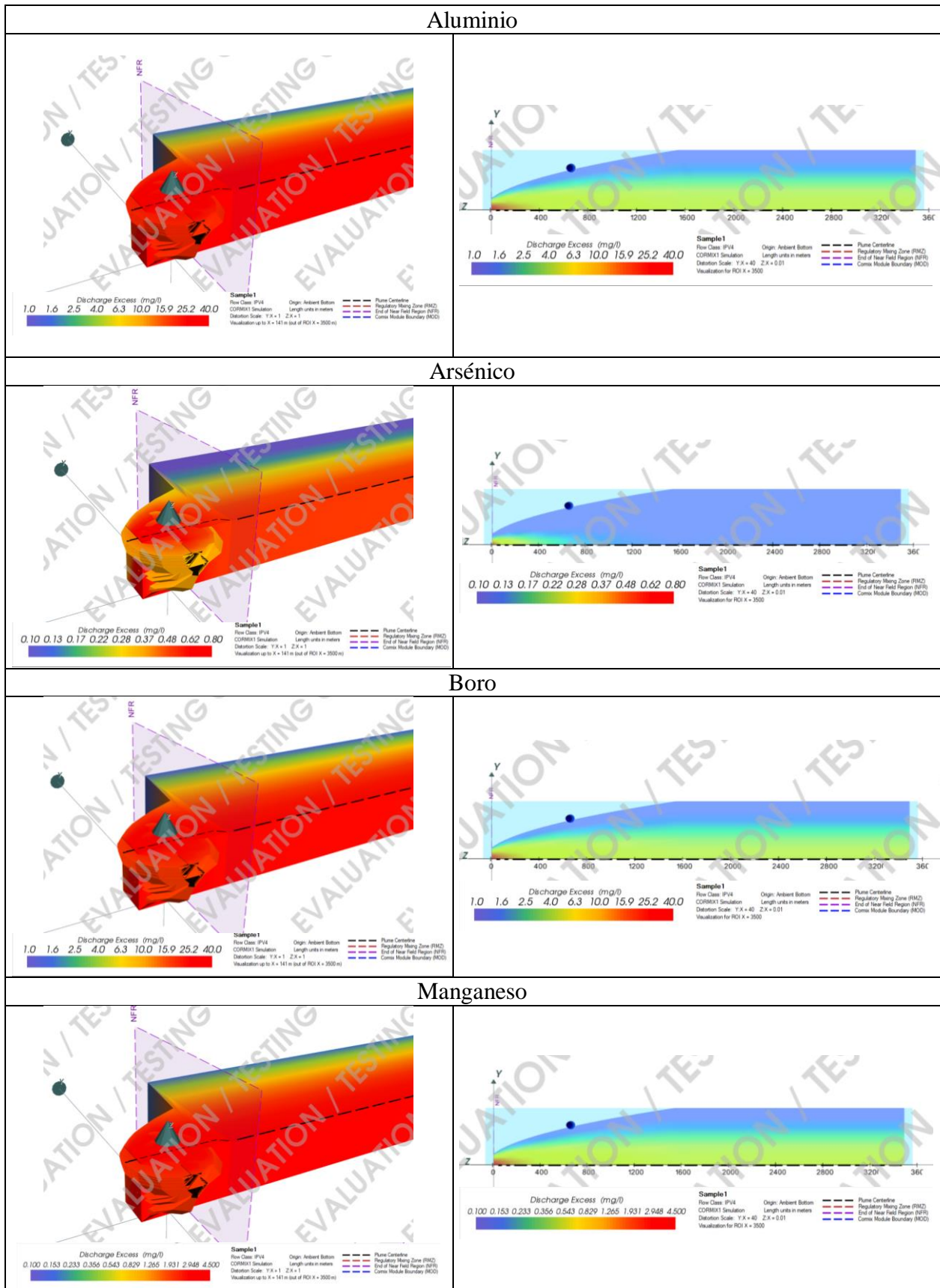
Boro



Manganeso



**Tabla 20:** Representación tridimensional y vista en perfil de la simulación de la dispersión de los parámetros en época húmeda (diciembre-2020)



#### 4.5. Evaluación del riesgo ecotoxicológico

De acuerdo a los resultados de los monitoreos hidrobiológicos realizados durante el periodo 2016-2020 presentados en el Octavo ITS y Noveno ITS del Proyecto Quellaveco, en el área de estudio (subcuenca Coralaque) se identificó las especies *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris) y *Daphnia magna* (microcrustáceo), las cuales fueron seleccionadas para evaluar el riesgo ecotoxicológico.

En la Tabla 21 se presenta la concentración letal media (CL50) de las especies mencionadas cuando están expuestas a aluminio, arsénico, boro y manganeso, obtenida de la revisión bibliográfica.

**Tabla 21:** Concentración letal media (CL<sub>50</sub>)

Parámetros	Especie	Concentración Letal Media (CL <sub>50</sub> )	Referencia
Aluminio	<i>Oncorhynchus Mykiss</i>	2.018 mg/L (96h)	Corpus, 2010
	<i>Daphnia Magna</i>	0.8594 mg/L (48h)	Torres y Quintero, 2010
Arsénico	<i>Oncorhynchus Mykiss</i>	15.3 mg/L (96 h)	Tisler y Zagorc-Končan, 2002
	<i>Daphnia Magna</i>	0.0671 (48h)	Torres y Quintero, 2010
Boro	<i>Oncorhynchus Mykiss</i>	105.19 mg/L (96h)	Rivera & Molina, 2010
	<i>Daphnia Magna</i>	133 mg/L (48h)	Gersich, 1984
Manganeso	<i>Oncorhynchus Mykiss</i>	4.80 mg/L (96h)	Davies y Brinkman, 1994
	<i>Daphnia Magna</i>	1.87 mg/L (48h)	Dávila y Rincón, 2009

Para obtener la concentración umbral sin efecto (PNEC), se divide la concentración letal media (CL50) entre el factor de valoración (FV) de 100, debido a que el río Títire presenta altas concentraciones de aluminio, arsénico, boro y manganeso que son constantes. En la Tabla 22 se presenta los valores calculados de PNEC, donde se observa que ambas especies presentan mayor sensibilidad a la exposición de aluminio respecto a los metales arsénico, boro y manganeso.

**Tabla 22:** Concentración umbral sin efecto (PNEC)

Parámetros	Especie	PNEC (mg/L)
Aluminio	<i>Oncorhynchus Mykiss</i>	0.02018
	<i>Daphnia Magna</i>	0.008594
Arsénico	<i>Oncorhynchus Mykiss</i>	0.153
	<i>Daphnia Magna</i>	0.000671
Boro	<i>Oncorhynchus Mykiss</i>	1.0519
	<i>Daphnia Magna</i>	1.33
Manganeso	<i>Oncorhynchus Mykiss</i>	0.048
	<i>Daphnia Magna</i>	0.0187

Por otro lado, el valor del PEC representa la concentración de los contaminantes a los que están expuestos las especies, que corresponde a la concentración de aluminio, arsénico, boro y manganeso simulados en los escenarios de época seca y húmeda obtenidos por el modelamiento en CORMIX (ver Anexo 2).

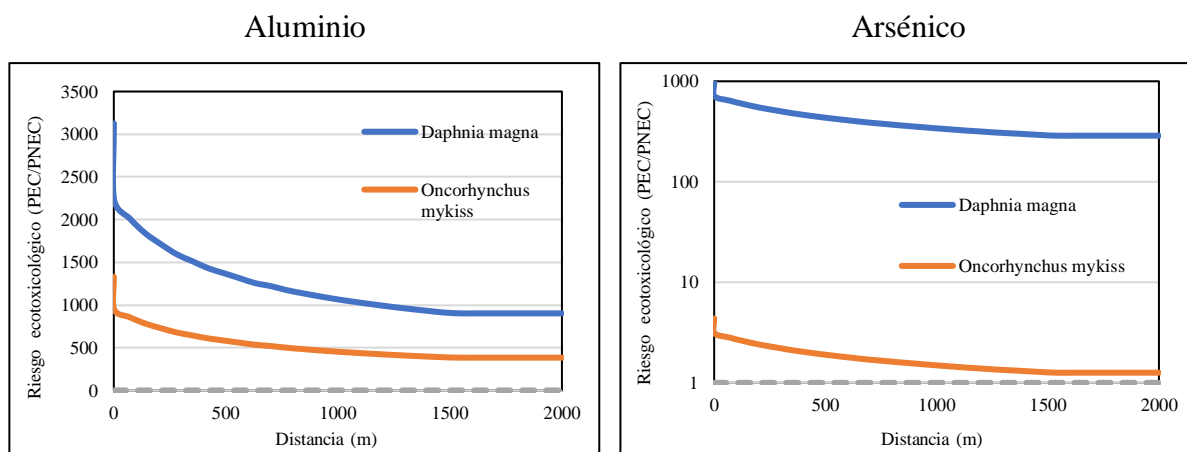
Luego, se calculó el riesgo (relación PNEC/PEC) y se analizó respecto a la distancia después la confluencia de los ríos Títire y Vizcachas, para época seca y húmeda; tal como se muestra en la Figura 50, Figura 51, Figura 52, Figura 53 y Anexo 3. Se observa que en época seca se presenta un riesgo alto para las especies *Oncorhynchus mykiss* y *Daphnia magna* en la exposición de aluminio, arsénico, boro y manganeso; mientras que, en época húmeda, se presenta un riesgo alto para la especie *Oncorhynchus mykiss* en la exposición de aluminio, boro y manganeso y para la especie *Daphnia magna* en la exposición de aluminio, arsénico, boro (riesgo alto solo hasta los 911 m de distancia) y manganeso. Además, el riesgo es mayor para aluminio, por ende, las especies son más sensibles a la exposición de este metal respecto a los demás.

Asimismo, en general se observa que la especie *Daphnia magna* es más sensible a la exposición de los metales respecto a la especie *Oncorhynchus mykiss*, a excepción del parámetro boro. Además, en época húmeda, para la especie *Oncorhynchus mykiss* en la exposición de arsénico, el riesgo se mantiene inferior 1 (ver Figura 52), debido a que el valor del PEC (concentración del arsénico) no supera el ECA-Agua (0.1 mg/L). Mientras que

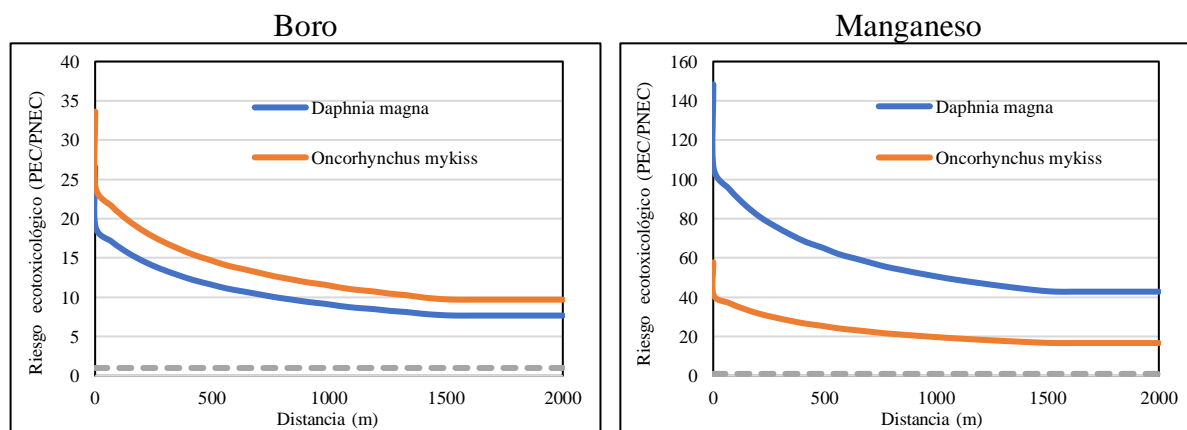


respecto a la especie *Daphnia magna* en la exposición de boro, después de 911 m de distancia, el riesgo se volvió inferior a 1, lo cual se debe a que el valor del PEC (concentración de boro) se mantiene próximo al valor del ECA-Agua (1 mg/L).

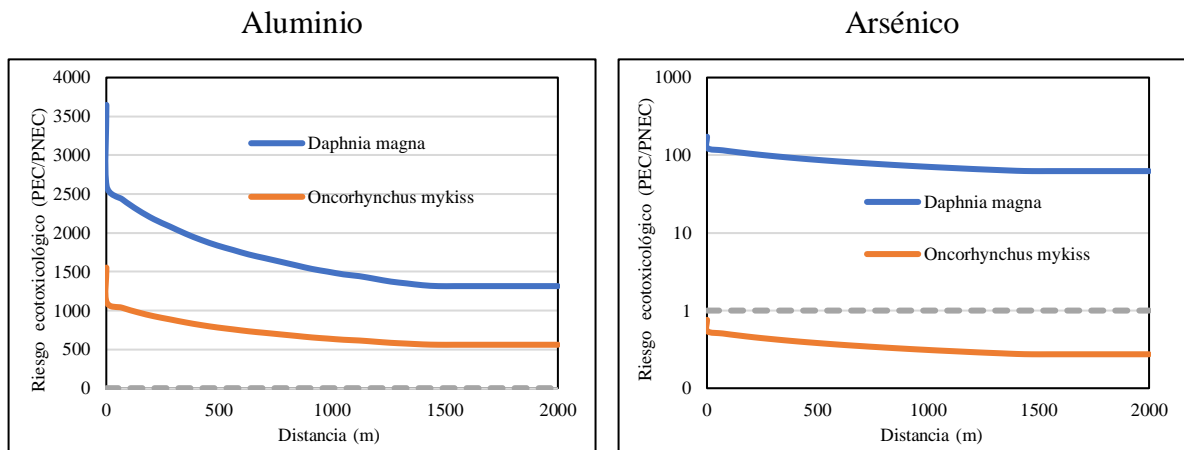
Considerando que el riesgo ecotoxicológico se mantiene elevado después de varios km luego de la confluencia, y teniendo en cuenta que el centro poblado más cercano está ubicado a 22 km de distancia (centro población Coralaque), se deduce que es posible una afectación en la salud de la población y animales. Algunos estudios mencionan que personas expuestas a altas concentraciones de aluminio pueden desarrollar la enfermedad de Alzheimer, sin embargo, no se tiene la certeza de ello. Asimismo, estudios en animales han comprobado que el sistema nervioso presenta mayor probabilidad de ser afectado por el aluminio (ATSDR, 2008).



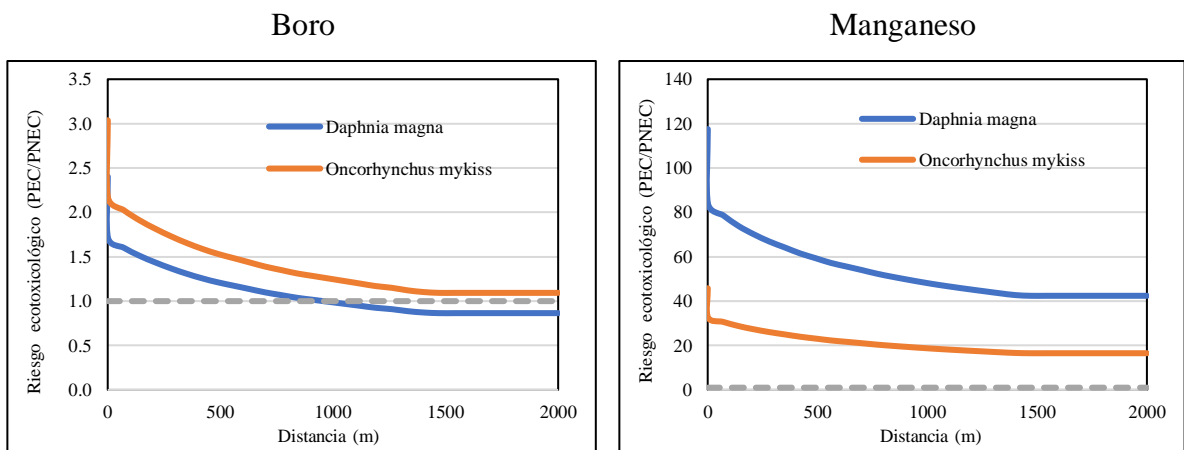
**Figura 50.** Riesgo ecotoxicológico del aluminio y arsénico para el *Oncorhynchus mykiss* y *Daphnia magna* en época seca



**Figura 51.** Riesgo ecotoxicológico del boro y manganeso para el *Oncorhynchus mykiss* y *Daphnia magna* en época seca



**Figura 52.** Riesgo ecotoxicológico del aluminio y arsénico para el *Oncorhynchus mykiss* y *Daphnia magna* en época húmeda



**Figura 53.** Riesgo ecotoxicológico del boro y manganeso para el *Oncorhynchus mykiss* y *Daphnia magna* en época húmeda

#### 4.6. Análisis estadístico

La presente sección permitió analizar la validez y calidad de los resultados de monitoreo usados para el presente estudio, así como definir la relación entre los parámetros de calidad de agua en los puntos de monitoreo a través de la correlación de Pearson y análisis de componentes principales (ACP).

Con el propósito de explicar la variabilidad de los parámetros se seleccionaron cuatros factores (F1, F2, F3 y F4). En la Tabla 23 se presenta la variabilidad y los valores propios de las estaciones de monitoreo de interés.

**Tabla 23:** Valores propios del análisis de componentes principales (ACP)

Estación	Parámetros	F1	F2	F3	F4
TIT-1	Valor propio	19.10	10.73	3.83	3.73
	Variabilidad (%)	35.37	19.87	7.08	6.90
	% acumulado	35.37	55.24	62.32	69.22
VIZ-2	Valor propio	16.35	7.75	4.70	3.73
	Variabilidad (%)	31.43	14.91	9.03	7.17
	% acumulado	31.43	46.34	55.37	62.54
QE-36	Valor propio	18.64	7.95	5.78	3.24
	Variabilidad (%)	36.54	15.60	11.32	6.36
	% acumulado	36.54	52.14	63.46	69.82

En la estación TIT-1, los dos primeros factores explican el 55.24 por ciento de la variabilidad total, donde F1 y F2 representan el 35.37 y 55.24 por ciento de variabilidad, respectivamente. Por lo que con el propósito de evaluar la mayor variabilidad posible y realizar una adecuada interpretación de los resultados, se analizaron los cuatro primeros factores que explican el 69.22 por ciento de la variabilidad.

En la estación VIZ-2, los cuatro primeros factores explican el 62.54 por ciento de la variabilidad, mientras que en la estación QE-36 explican el 69.82 por ciento de la variabilidad.

De acuerdo con Liu, Lin, & Kuo (2003), las cargas factoriales se clasifican en fuertes, moderadas y débiles, siendo para valores mayores a 0.75, 0.75-0.5 y 0.5-0.3, respectivamente. En la Tabla 24, Tabla 25 y Tabla 26 se muestra la correlación entre los parámetros y los factores obtenidos del ACP en las estaciones TIT-1, VIZ-2 y QE-36, respectivamente. Es importante precisar que, dentro del análisis se ha considerado el caudal, dado que es una variable que influye en la dispersión de los parámetros de calidad de agua.

**Tabla 24:** Correlación entre los parámetros y los factores en la estación TIT-1

Parámetro	F1	F2	F3	F4
Caudal	-0.457	-0.239	-0.231	-0.068
Conductividad Eléctrica	<b>0.563</b>	0.272	0.192	0.074
Oxígeno Disuelto	<b>-0.656</b>	-0.281	0.148	-0.025
pH	<b>0.886</b>	-0.009	0.123	0.081
Temperatura	<b>0.670</b>	0.385	-0.213	0.012
Alcalinidad Total	<b>0.792</b>	0.114	-0.048	0.059
Dureza Total	<b>0.946</b>	0.261	0.074	0.087
Sólidos Totales Disueltos	<b>0.869</b>	0.362	0.069	0.060
Sólidos Totales Suspensos	-0.298	-0.072	<b>-0.549</b>	<b>0.636</b>
Color	-0.495	<b>0.690</b>	0.000	0.213
Bromuro	0.295	-0.022	0.326	0.264



Continuación ...

Parámetro	F1	F2	F3	F4
Cloruro	<b>0.948</b>	0.257	0.073	0.070
Fluoruro	-0.071	<b>0.765</b>	-0.012	0.003
Fosfatos	0.036	-0.052	0.427	0.355
Nitratos	0.246	<b>0.554</b>	-0.075	-0.029
Nitrito	-0.176	-0.070	-0.060	-0.119
Nitratos+Nitritos	0.355	0.410	-0.048	-0.104
Sulfato	0.460	<b>0.826</b>	0.108	0.122
Cianuro Total	-0.071	-0.137	<b>0.533</b>	0.289
Cianuro Wad	-0.041	-0.099	0.464	0.282
Sulfuros	0.169	0.124	-0.040	-0.097
Aluminio	<b>-0.711</b>	<b>0.655</b>	-0.025	0.074
Antimonio	<b>0.656</b>	<b>0.504</b>	-0.176	-0.059
Arsénico	<b>0.674</b>	<b>0.644</b>	0.059	0.142
Bario	0.346	-0.171	<b>-0.554</b>	<b>0.701</b>
Berilio	-0.457	<b>0.669</b>	-0.189	-0.270
Bismuto	-0.467	<b>0.604</b>	-0.161	0.093
Boro	<b>0.914</b>	0.312	-0.142	-0.077
Cadmio	<b>-0.581</b>	<b>0.640</b>	0.116	-0.025
Calcio	<b>0.939</b>	0.279	0.062	0.076
Cobalto	<b>-0.593</b>	<b>0.749</b>	0.110	0.074
Cobre	<b>-0.749</b>	<b>0.597</b>	0.010	0.009
Cromo	-0.128	-0.127	<b>0.760</b>	<b>0.539</b>
Estaño	-0.011	0.116	0.046	0.001
Estroncio	<b>0.946</b>	0.290	0.009	0.047
Fósforo	<b>-0.666</b>	<b>0.546</b>	-0.215	0.230
Hierro	<b>-0.667</b>	<b>0.653</b>	-0.047	0.140
Litio	<b>0.913</b>	0.319	-0.140	-0.073
Magnesio	<b>0.936</b>	0.314	0.020	0.096
Manganeso	0.380	<b>0.615</b>	-0.013	0.106
Mercurio	0.094	0.147	-0.060	-0.051
Molibdeno	-0.342	<b>0.757</b>	-0.045	-0.051
Níquel	<b>-0.643</b>	<b>0.720</b>	0.131	0.117
Plata	-0.284	0.151	0.042	-0.089
Plomo	-0.298	-0.238	<b>-0.606</b>	<b>0.617</b>
Potasio	<b>0.949</b>	0.269	0.031	0.079
Selenio	-0.023	-0.141	<b>0.727</b>	<b>0.521</b>
Silicio	<b>0.651</b>	0.062	-0.368	0.448
Sodio	<b>0.946</b>	0.266	0.062	0.078
Talio	-0.010	<b>0.673</b>	-0.050	-0.150
Titanio	-0.273	-0.348	<b>-0.511</b>	<b>0.703</b>
Uranio	<b>-0.738</b>	<b>0.638</b>	0.073	-0.052
Vanadio	<b>-0.540</b>	0.322	0.296	<b>0.638</b>
Zinc	<b>-0.666</b>	<b>0.716</b>	0.009	-0.014

Nota: Los valores resaltados de color verde corresponden a las cargas factoriales fuertes (mayor a 0.75), mientras que los de color amarillo corresponden a las cargas factoriales moderadas (0.75-0.5).

En la estación TIT-1, los parámetros que presentan fuerte contribución en el Factor 1 son: pH (0.886), alcalinidad total (0.792), dureza total (0.946). sólidos totales disueltos (0.869), cloruro (0.948), boro (0.914), calcio (0.939), estroncio (0.946), litio (0.913), magnesio (0.936), potasio (0.949) y sodio (0.946); para el Factor 2, los de fuerte contribución son fluoruro (0.765), sulfato (0.826) y molibdeno (0.757); para el Factor 3, el parámetro de fuerte contribución es cromo (0.760); para el Factor 4, los parámetros de moderada contribución son sólidos totales suspendidos (0.636), bario (0.701), cromo (0.539), plomo (0.617), selenio (0.521), titanio (0.703) y vanadio (0.638).

El Factor 1 evidencia la influencia de las fuentes naturales termales saladas (aguas subterráneas) en el río Títire, lo cual contribuye a las altas concentraciones de sales minerales disueltas. Esto se confirma con la fuerte correlación con los parámetros de pH, dureza total, solidos totales disueltos, cloruro, boro, calcio, sodio, potasio y magnesio. Asimismo, se presenta las altas correlaciones con los metales estroncio y litio, que puede estar relacionado con fuentes naturales o antropogénicas. El factor 2 se atribuye a las sales fluoruro y sulfatos y su origen se relaciona a las aguas subterráneas. Los factores 3 y 4 indican la presencia de varios metales (cromo, titanio, vanadio, bario, entre otros) que pueden estar vinculados con drenajes ácidos del río Aruntaya, que a su vez proviene de filtraciones ácidas de desmonte en la cabecera de la subcuenca Aruntaya, ajeno al proyecto Quellaveco; tal como se precisa en el informe de monitoreo de calidad y cantidad de agua superficial del proyecto Quellaveco (2021).

**Tabla 25:** Correlación entre los parámetros y los factores en la estación VIZ-2

Parámetro	F1	F2	F3	F4
Caudal	-0.070	0.118	0.251	<b>0.607</b>
Conductividad Eléctrica	<b>0.632</b>	-0.223	-0.249	0.207
Oxígeno Disuelto	-0.127	-0.227	-0.412	-0.286
pH	-0.220	0.164	0.059	-0.067
Temperatura	0.169	0.267	0.406	0.289
Alcalinidad Total	<b>-0.695</b>	0.232	0.160	-0.004
Dureza Total	<b>0.963</b>	-0.125	0.067	-0.011
Sólidos Totales Disueltos	<b>0.829</b>	-0.131	-0.217	0.118
Sólidos Totales Suspendidos	0.161	<b>0.803</b>	-0.172	0.282
Color	-0.239	0.186	0.298	<b>0.673</b>
Bromuro	0.238	0.022	-0.303	0.143
Cloruro	<b>0.784</b>	-0.039	-0.313	0.121
Fluoruro	<b>0.750</b>	0.115	-0.054	0.107
Fosfatos	0.129	<b>0.577</b>	-0.399	-0.085
Nitratos	0.189	0.123	-0.117	<b>0.645</b>
Nitrito	0.018	0.179	-0.053	0.498

Continuación ...

Parámetro	F1	F2	F3	F4
Nitratos+Nitritos	0.012	0.074	<b>0.656</b>	0.014
Sulfato	<b>0.823</b>	-0.157	-0.220	0.149
Sulfuros	-0.086	0.091	<b>0.637</b>	0.378
Aluminio	0.492	<b>0.801</b>	-0.148	0.012
Antimonio	0.019	0.062	-0.209	-0.484
Arsénico	<b>0.800</b>	0.124	-0.188	-0.302
Bario	0.298	<b>0.732</b>	-0.285	0.084
Berilio	0.389	<b>0.503</b>	<b>0.549</b>	-0.326
Bismuto	-0.025	0.122	<b>0.766</b>	-0.228
Boro	<b>0.912</b>	-0.204	0.071	-0.080
Cadmio	0.064	-0.030	0.179	0.339
Calcio	<b>0.966</b>	-0.133	0.062	-0.010
Cobalto	<b>0.985</b>	-0.034	0.001	-0.030
Cobre	<b>0.912</b>	-0.091	0.085	-0.047
Cromo	-0.077	0.126	0.284	-0.230
Estaño	-0.040	0.013	0.216	-0.207
Estroncio	<b>0.932</b>	-0.151	0.065	-0.057
Fósforo	0.032	<b>0.807</b>	0.226	-0.199
Hierro	0.168	<b>0.957</b>	-0.058	0.102
Litio	<b>0.927</b>	-0.199	0.070	-0.068
Magnesio	<b>0.971</b>	-0.108	0.081	0.007
Manganeso	<b>0.860</b>	0.085	-0.151	0.081
Mercurio	-0.169	-0.108	0.270	0.025
Molibdeno	-0.128	0.281	-0.230	-0.383
Níquel	<b>0.958</b>	0.005	-0.040	0.052
Plata	-0.067	0.002	0.267	0.297
Plomo	0.141	<b>0.874</b>	-0.042	-0.078
Potasio	<b>0.949</b>	-0.139	0.097	-0.034
Selenio	-0.065	-0.052	0.355	-0.417
Silicio	-0.251	0.446	-0.421	<b>-0.515</b>
Sodio	<b>0.915</b>	-0.193	0.081	-0.075
Talio	<b>0.558</b>	0.333	<b>0.627</b>	-0.245
Titanio	0.091	<b>0.863</b>	-0.260	0.264
Uranio	0.364	<b>0.538</b>	<b>0.541</b>	-0.348
Vanadio	-0.012	<b>0.936</b>	-0.135	0.015
Zinc	<b>0.557</b>	-0.079	0.393	0.029

Nota: Los valores resaltados de color verde corresponden a las cargas factoriales fuertes (mayor a 0.75), mientras que los de color amarillo corresponden a las cargas factoriales moderadas (0.75-0.5).

En la estación VIZ-2, los parámetros que presentan fuerte contribución en el Factor 1 son: dureza total (0.963), sólidos totales disueltos (0.829), cloruro (0.784), fluoruro (0.750), sulfato (0.823), arsénico (0.800), boro (0.912), calcio (0.966), cobalto (0.985), cobre (0.912), estroncio (0.932), litio (0.927), magnesio (0.971), manganeso (0.860), níquel (0.958), potasio (0.949) y sodio (0.915); para el Factor 2, los de fuerte contribución son sólidos totales suspendidos (0.803), aluminio (0.801), bario (0.732), fósforo (0.807), hierro (0.957), plomo

(0.874), titanio (0.863), vanadio (0.936); para el Factor 3, el parámetro de fuerte contribución es bismuto (0.766); para el Factor 4, los parámetros de moderada contribución son caudal (0.607), color (0.673), nitratos (0.645) y silicio (-0.515).

En el Factor 1, el incremento de la concentración de los sólidos totales disueltos está relacionado a las altas concentraciones de sales minerales disueltas (cloruros, fluoruros y sulfatos) y dureza total, debido a aporte de aguas subterráneas aguas arriba del río Vizcachas. Asimismo, se evidencia la influencia de diversos metales, que puede relacionarse a la composición geológica del suelo que por erosión se genera el arrastre de material. En el factor 2, se infiere que el incremento de sólidos totales suspendidos se debe al aumento de la concentración de los metales (aluminio, bario, fosforo. hierro, plomo, entre otros) por fuentes naturales o antropogénicas. El bismuto es el principal contribuyente en el Factor 3, el cual puede proceder de fuentes antropogénicas aguas arriba del río Vizcachas. El factor 4 correlaciona positivamente el caudal con la concentración de nitratos y silicio proveniente del suelo por escorrentía.

**Tabla 26:** Correlación entre los parámetros y los factores en la estación QE-36

Parámetro	F1	F2	F3	F4
Caudal	<b>-0.556</b>	-0.487	0.045	-0.188
Conductividad Eléctrica	<b>0.640</b>	0.389	0.050	0.220
Oxígeno Disuelto	0.308	0.308	-0.275	0.376
pH	<b>0.808</b>	-0.239	0.038	0.221
Temperatura	-0.122	-0.334	0.392	-0.477
Alcalinidad Total	<b>0.775</b>	-0.195	0.258	-0.204
Dureza Total	<b>0.768</b>	0.155	0.205	0.346
Sólidos Totales Disueltos	<b>0.778</b>	0.466	0.230	0.072
Sólidos Totales Suspendidos	<b>-0.620</b>	-0.438	<b>0.544</b>	0.103
Color	0.298	-0.332	0.122	-0.280
Bromuro	-0.119	-0.046	-0.249	-0.079
Cloruro	<b>0.931</b>	0.198	0.214	0.006
Fluoruro	0.151	<b>0.524</b>	0.280	-0.196
Nitratos	0.492	-0.056	0.482	-0.319
Nitrito	0.012	-0.194	-0.208	-0.206
Nitratos+Nitritos	<b>0.536</b>	-0.086	0.464	-0.349
Sulfato	0.219	<b>0.874</b>	0.147	0.008
Sulfuros	-0.055	-0.306	-0.225	-0.174
Aluminio	<b>-0.847</b>	0.449	0.171	0.020
Antimonio	-0.099	0.235	0.481	0.205
Arsénico	-0.076	<b>0.677</b>	0.446	0.155
Bario	-0.405	<b>-0.553</b>	<b>0.621</b>	0.038
Berilio	<b>-0.722</b>	0.450	0.175	-0.086
Bismuto	-0.357	0.068	<b>0.528</b>	0.181

Continuación ...

Parámetro	F1	F2	F3	F4
Boro	<b>0.763</b>	0.340	0.123	0.122
Cadmio	<b>-0.635</b>	<b>0.705</b>	-0.096	-0.006
Calcio	<b>0.874</b>	0.164	0.337	0.110
Cobalto	<b>-0.716</b>	<b>0.671</b>	-0.050	0.006
Cobre	<b>-0.698</b>	<b>0.617</b>	-0.080	-0.130
Cromo	-0.158	-0.193	-0.135	<b>0.739</b>
Estaño	-0.228	-0.163	0.080	<b>0.562</b>
Estroncio	<b>0.926</b>	0.212	0.264	0.011
Fósforo	<b>-0.710</b>	-0.077	<b>0.555</b>	-0.156
Hierro	<b>-0.820</b>	0.421	0.235	-0.098
Litio	<b>0.840</b>	0.295	0.268	-0.072
Magnesio	<b>0.807</b>	0.160	0.453	0.128
Manganeso	<b>-0.595</b>	0.255	0.216	0.207
Mercurio	-0.281	-0.455	0.062	0.478
Molibdeno	<b>0.503</b>	0.331	<b>0.656</b>	-0.112
Níquel	<b>-0.741</b>	<b>0.640</b>	-0.039	0.015
Plata	-0.403	0.054	0.384	0.157
Plomo	<b>-0.581</b>	<b>-0.536</b>	<b>0.525</b>	0.000
Potasio	<b>0.896</b>	0.167	0.296	0.061
Selenio	0.060	-0.148	-0.240	<b>0.779</b>
Silicio	-0.423	-0.306	<b>0.649</b>	0.143
Sodio	<b>0.924</b>	0.234	0.171	0.118
Talio	<b>-0.602</b>	0.491	0.273	0.108
Titanio	-0.498	-0.459	<b>0.615</b>	0.107
Uranio	<b>-0.753</b>	0.495	0.142	-0.012
Vanadio	<b>-0.669</b>	-0.293	<b>0.532</b>	0.299
Zinc	<b>-0.662</b>	<b>0.576</b>	-0.158	-0.107

Nota: Los valores resaltados de color verde corresponden a las cargas factoriales fuertes (mayor a 0.75), mientras que los de color amarillo corresponden a las cargas factoriales moderadas (0.75-0.5).

En la estación QE-36, los parámetros que presentan fuerte contribución en el Factor 1 son: pH (0.808), alcalinidad total (0.775), dureza total (0.768), sólidos totales disueltos (0.778), cloruro (0.931), aluminio (-0.847), boro (0.763), calcio (0.874), estroncio (0.926), hierro (-0.820), litio (0.840), magnesio (0.807), sodio (0.924) y uranio (-0.753); para el Factor 2, el parámetro de fuerte contribución es sulfato (0.874); para el Factor 3, los parámetros de moderada contribución son Sólidos Totales Suspendedos (0.544), Bario (0.621), Bismuto (0.528), Fósforo (0.555), Molibdeno (0.656), Plomo (0.525), Silicio (0.649) y Titanio (0.615), Vanadio (0.532); para el Factor 4, el parámetro de fuerte contribución es selenio (0.779).

En relación a esta estación, se observa que el Factor 1 muestra unas correlaciones semejantes a las analizadas en la estación TIT-1, lo que evidencia la influencia de las aguas subterráneas del río Títire sobre el río Coralaque. Se observa una fuerte correlación positiva entre la

dureza total, alcalinidad total y pH con la concentración de sólidos totales disueltos, cloruro, boro, calcio, magnesio y sodio y una correlación negativa con el caudal, aluminio y hierro. Esto último se debe a que en época seca se genera un incremento en la concentración de los iones provenientes de las aguas subterráneas y se genera una menor disolución de minerales provenientes del suelo. El Factor 2 indica la presencia de sulfato, que puede estar relacionado con aportes de fuentes subterráneas. El Factor 3 evidencia la posible influencia de la escorrentía del suelo, debido a las correlaciones con sólidos totales suspendidos y diversos metales. Finalmente, el selenio es el principal aportante en el Factor 4, el cual se encuentra de forma natural en el suelo y rocas.

## V. CONCLUSIONES

1. El río Títire influye negativamente en la calidad del agua y composición hidroquímica del río Coralaque, pertenecientes a la subcuenca del río Coralaque.
2. El indicador ICARHS demostró que los ríos afluentes Títire y Vizcachas presentan una calidad de agua mala y buena, respectivamente, mientras el cuerpo receptor (río Coralaque) presenta una calidad de agua regular. Respecto al indicador IM, el río Títire presenta inferior calidad del agua respecto a los ríos Vizcachas y Coralaque.
3. Respecto a la evaluación hidroquímica, los ríos Títire y Coralaque presentan altas concentraciones de los aniones cloruro y sulfato y catión sodio, mientras que el río Vizcachas presenta neutralidad en la carga aniónica con una ligera predominancia del anión bicarbonato y ligera tendencia de los cationes sodio y potasio. Asimismo, las aguas del río Títire en general no son aptas para el riego de cultivo; por el contrario, las aguas del río Vizcachas es apta para todo cultivo en cualquier tipo de suelo. Mientras que el río Coralaque presenta una condición intermedia respecto a los ríos Títire y Vizcachas, siendo aptas en general solo para plantas resistentes a la salinidad.
4. Los procesos que controlan la hidroquímica del río Títire son la evaporación y cristalización y meteorización de las rocas (interacción agua-roca) debido a la presencia de aguas termales en la zona geotermal Títire-Puente Bello; asimismo, se presenta la predominancia de la lixiviación, debido a los aportes del drenaje ácido de mina aguas arriba del río Títire. Mientras que en el río Vizcachas hay una predominancia de la meteorización de las rocas (interacción agua-roca). Por otro lado, el río Coralaque presenta características similares al río Títire, lo cual evidencia la influencia significativa que tiene el río Títire.

5. Se determinó que el modelo CORMIX 1 es útil para simular la dispersión de los parámetros excedentes (aluminio, arsénico, boro y manganeso) en la composición hidroquímica del río Títire respecto al río Coralaque, inclusive superando el valor del ECA-Agua respectivo. La dilución completa se da a una distancia máxima de 1610.47m aguas abajo después de la confluencia.
6. Las aguas del río Títire cuando ingresan en el río Coralaque, representan un riesgo ecotoxicológico para las especies acuáticas *Daphnia magna* y *Oncorhynchus mykiss*.



## **VI. RECOMENDACIONES**

1. El índice de metal (IM) no resulta suficientemente útil para el análisis temporal de la calidad del agua, puesto que es de naturaleza acumulativa, por lo que se recomienda su aplicación para períodos cortos de tiempo.
2. Se presenta riesgo ecotoxicológico en el río Coralaque, por lo que es necesario realizar más estudios sobre la afectación de la calidad del agua del río Coralaque en la población y animales de las localidades cercanas.
3. Es necesario que las autoridades realicen monitoreos periódicos de los ríos Títire y Coralaque puesto que se demostró la influencia de fuentes antropogénicas en la calidad del agua de las mismas, con el propósito de tomar las medidas correctivas pertinentes.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSR) (s.f.). *ToxFAQs™ sobre el aluminio*. Recuperado de [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts22.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts22.html).
- Álvarez, R. (1995). *Estadística multivariante y no paramétrica con SPSS*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Anglo American Quellaveco S.A. (2008)., *Modificatoria de Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Quellaveco*, aprobada por Resolución Directoral N°140-2010- MEM/AAM.
- Anglo American Quellaveco S.A. (2012)., *Modificatoria del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Quellaveco*, aprobada por Resolución Directoral N°377-2012-MEM-AAM.
- Anglo American Quellaveco S.A. (2015)., *Modificatoria del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Quellaveco*, aprobada por Resolución Directoral R.D. N°339-2015-MEM/DGAAM.
- Anglo American. (2019). *El proyecto – Anglo American Perú*. Recuperado el 11 de noviembre de 2019, de <https://peru.angloamerican.com/es-es/quellaveco/el-proyecto>
- Árcega, I. (2010). *Caracterización hidrogeoquímica del acuífero del valle de Villa Hidalgo, San Luis Potosí, México* (Tesis de maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Posgrado en Ciencias Aplicadas). Recuperado de <http://hdl.handle.net/11627/35>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2013). *Informe de la Identificación de los Contaminantes en la Cuenca del Río Tambo*. Lima, Perú.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2017). *Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto del vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua*. Lima, Perú.

- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2018). *Clasificación de los cuerpos de agua continentales superficiales*. Lima, Perú. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/2439>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2018). *Metodología para la determinación del índice de calidad de agua ICA-PE, aplicado a los cuerpos de agua continentales superficiales*. Lima, Perú.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2020). *Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS)*. Lima, Perú.
- Blasco & De La Rubia (1973). Laboratorio de suelos IRYDA, Normas de Riverside para evaluar la calidad de las aguas de riego (U.S. Soil Salinity Laboratory).
- Bustamante, E. (2017). *Identificación de procesos hidrogeoquímicos aplicando modelación inversa en el acuífero Soconusco, Chiapas*. (Tesis de Maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Posgrado en Geociencias Aplicadas). Recuperado de <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/3252>
- Cadahía, C. (2005). *Fertirrigación*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Callo, N., & Vigo, M. (2014). Propuesta de Mejoramiento de Diseño del Vertimiento de un Efluente Minero en la Quebrada Chonta mediante la aplicación de un Modelo de Dispersión de Contaminantes y los Índices de Calidad de Agua (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2433>
- Carpio, J., & Peña, F. (2020). Hidrogeología de la cuenca del río Tambo (1318) regiones Arequipa, Moquegua y Puno. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET. Lima, Perú.
- Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME). (2017). *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: Water Quality Index, User's Manual*. Canadá.
- Corpus, A. (2010). *Determinación de la concentración letal media (CL50-96) del aluminio mediante pruebas toxicológicas utilizando alevinos de *Oncorhynchus mykiss* (Trucha arco iris)* (Tesis de pregrado, Universidad La Salle). Recuperado de [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/511](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/511)

- Cruz, V., Vargas, V., & Cacya, L. (2014). *Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la Región Moquegua*. Lima, Perú.
- Cuadras, C. (2019). *Nuevos Métodos de Análisis Multivariante*. Madrid: CMC Editions.
- Davies, P., & Brinkman, S. (1994). Acute and chronic toxicity of manganese to exposed and unexposed rainbow and brown trout. *Water Pollution Studies, Colorado Division of Wildlife, Federal Aid Project #F-243R-1*.
- Dávila, D., & Rincón, N. (2009). *Diseño de un sistema a nivel piloto para la remoción del hierro y el manganeso por debajo de la concentración letal media (CL50-48) para Daphnia magna* (Tesis de pregrado, Universidad La Salle). Recuperado de [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1125&context=ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1125&context=ing_ambiental_sanitaria)
- De la Torre, A., Nuñez, J., & Carballo, M. (2004). *Curso de Toxicología Ambiental y Seguridad Química*. Murcia: Sanidad Ambiental CISA.
- Doneker, R., & Jirka, G. (2007). *Cormix User Manual*. Estados Unidos: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos – USEPA.
- Fernández, E. (2008). *Los hidrogramas y otros sistemas de representación del quimismo de las aguas*. Madrid: Grafinat – Método Gráfico.
- Fernández, E., García, M., & García, J. M. (2008). *La calidad de las aguas en función de su uso*. Madrid: Grafinat-Método Gráfico.
- Flores, R. (2017). *Variación Temporal de la Calidad de Agua en la Bocatoma «La Atarjea», Río Rímac (2009-2015)* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina). Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2892>
- Gao, Z., Lin, Z., Niu, F., Luo, J., Liu, M., & Yin, G. (2017). Hydrochemistry and controlling mechanism of lakes in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor, China. *Geomorphology*, 297, 159–169. doi:<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.020>
- García, Y., Balmaseda, C., & Vargas, H. (2012). Caracterización hidroquímica de las aguas de riego de la cuenca del río Naranjo, municipio Majibacoa, provincia Las Tunas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(3), 29-34. Recuperado de

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-00542012000300005](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542012000300005)

- Gersich, F. (1984). Evaluation of a static renewal chronic toxicity test method for *Daphnia magna* using boric acid. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 3(1), 89-94. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/etc.5620030111>
- Gibbs, R. (1970). Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science*, 170(3962), 1088-1090. Recuperado de <http://www.jstor.org/stable/1730827> .
- Giraldo, V. (2021). *Análisis hidrogeoquímico y de calidad del agua subterránea en el Valle de San Nicolás - Oriente antioqueño, para su uso potencial en abastecimiento poblacional* (Tesis de pregrado, Universidad EAFIT). Recuperado de <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/29996>
- Goher, M., Hassan, A., Abdel-Moniem, I., Fahmy, A., & El-sayed, S. (2014). Evaluation of surface water quality and heavy metal indices of Ismailia Canal, Nile River, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 40(3), 225–233. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejar.2014.09.001>
- González, C., & Barreiro, A. (2006). *Tratamiento de datos*. Madrid: Díaz de Santos.
- Guisande, C. (2006). *Tratamiento de Datos*. España: Ediciones Díaz de Santos.
- Hernández, Z. (2012). *Métodos de Análisis de Datos: Apuntes*. Logroño: Universidad de la Rioja.
- Hua, K., Xiao, J., Li, S., & Li, Z. (2020). Analysis of hydrochemical characteristics and their controlling factors in the Fen River of China. *Sustainable Cities and Society journal*, 52. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101827>
- Insideo (2017a). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Primer Trimestre 2017.
- Insideo (2017b). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Segundo Trimestre 2017.
- Insideo (2017c). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Tercer Trimestre 2017.
- Insideo (2017d). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Cuarto Trimestre 2017.

- Insideo (2018a). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Primer Trimestre 2018.
- Insideo (2018b). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Segundo Trimestre 2018.
- Insideo (2018c). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Tercer Trimestre 2018.
- Insideo (2018d). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Cuarto Trimestre 2018.
- Insideo (2019a). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Primer Trimestre 2019.
- Insideo (2019b). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Segundo Trimestre 2019.
- Insideo (2019c). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Tercer Trimestre 2019.
- Insideo (2019d). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Cuarto Trimestre 2019.
- Insideo (2020a). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Segundo Trimestre 2020.
- Insideo (2020b). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Tercer Trimestre 2020.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). (2010). *Introducción al análisis de riesgos ambientales* (2° ed.). Ciudad de México.
- Jiang, L., Yao, Z., Liu, Z., Wang, R., & Wu, S. (2015). Hydrochemistry and its controlling factors of rivers in the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau Liguang. *Journal of Geochemical Exploration*, 155, 76–83. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.04.009>
- Knigt Piésold Consulting (2016a). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Primer Trimestre 2016.
- Knigt Piésold Consulting (2016b). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Segundo Trimestre 2016.

- Knigt Piésold Consulting (2016c). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Tercer Trimestre 2016.
- Knigt Piésold Consulting (2016d). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Cuarto Trimestre 2016.
- Legrioui, R., Baali, F., Hamad, A., Abdeslam, I., & Redha, M. (2017). Water Quality At A Karstic Aquifer In The Region Of Tebessa, Northeast -Algeria. *Energy Procedia*, 119, 356-366. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.119>
- Liu, C. W., Lin, K. H., & Kuo, Y. M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *The Science of the Total Environment*, 313(1-3), 77-89. doi:[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00683-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00683-6)
- Martínez, P. E., Martínez, P., & Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Noveno Informe Técnico Sustentatorio del Proyecto Quellaveco (2022). Anglo American Quellaveco S.A., aprobada por Resolución Directoral N°00152-2022-SENACE-PE/DEAR.
- Ocampo, A. (2017). *Impactos en la calidad del agua que abastece a la ciudad de Puebla por efecto de la explotación del acuífero* (Tesis de maestría, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). Recuperado de <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1670?locale-attribute=en>
- Octavo Informe Técnico Sustentatorio del Proyecto Quellaveco (2021). Anglo American Quellaveco S.A., aprobada por Resolución Directoral N°00003-2022-SENACE-PE/DEAR.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2015). *Informe N°174-2015-OEFA/DE-SDCA*. Lima, Perú.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2016). *Evaluación ambiental de la cuenca Tambo durante el año 2016*. Lima, Perú.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2018). *Evaluación ambiental temprana en el área de influencia del proyecto Quellaveco de Anglo American Quellaveco S.A. durante el 2017 y 2018*. Lima, Perú.

- Peña, F., Cotrina, G., & Acosta, H. (2009). *Hidrogeología de la cuenca del Río Caplina - Región Tacna. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET*. Lima, Perú.
- Pereyra, L. (2022). *Probabilidad y estadística*. Ciudad de México: Klik Soluciones Educativas.
- Puerta, C. (2019). *Determinación de la influencia de la descarga del río Mayo en la calidad de agua del río Huallaga, a través de los ICA-PE* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto). Recuperado de <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3460>
- Rivera, Y., & Molina, D. (2010). *Determinación de la concentración letal media (CL 50-96) de selenio y boro sobre alevinos de trucha arco iris (Oncorhynchus Mykiss) mediante bioensayos* (Tesis de pregrado, Universidad La Salle). Recuperado de [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1046&context=ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1046&context=ing_ambiental_sanitaria)
- Rodriguez-Alvarez, M., Moraña, L., Salusso, M., & Seghezzo, L. (2017). Caracterización espacial y estacional del agua de consumo proveniente de diversas fuentes en una localidad periurbana de Salta. *Revista Argentina de Microbiología*, 49(4), 366-376. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.03.006>
- Sánchez, A. (2012). *Análisis de Componentes Principales: Versiones Dispersas y Extensiones con Diferentes Costes* (Tesis de pregrado, Universidad Carlos III de Madrid). Recuperado de <http://hdl.handle.net/10016/15618>
- Sogorb, M., Estévez, J., & Vilanova, E. (2018). *Casos prácticos de evaluación de riesgo toxicológico y ecotoxicológico*. Alicante: Universidad Miguel Hernández.
- Tisler, T., & Zagorc-Končan, J. (2002). Acute and Chronic Toxicity of Arsenic to Some Aquatic Organisms. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 69(3), 421–429. doi:<https://doi.org/10.1007/s00128-002-0079-5>
- Torres, S., & Quintero, V. (2010). *Determinación de la concentración letal media CL50 48 de aluminio y arsénico mediante bioensayos de toxicidad acuática sobre Daphnia magna* (Tesis de pregrado, Universidad La Salle). Recuperado de [https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1692&context=ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1692&context=ing_ambiental_sanitaria)



- Triveño, D. (2016). *Influencia del agua del río Mariño en la calidad del agua del río Pachachaca* (Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Los Andes). Recuperado de <http://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/66>
- Vargas, L., Perez, V., Castañeda, D., Tacuche, E., Pajares, C., Aguilar Julca, P., Vargas, J. (2017). *Prospección geoquímica de segunda fase en la cuenca Tambo: subcuencas medio Tambo, Coralaque, medio Alto Tambo, Ichuña y Alto Tambo*. Lima: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET.
- Webster, J., Brown, K., & Vincent, W. (1994). Geochemical processes affecting meltwater chemistry and the formation of saline ponds in the Victoria Valley and Bull Pass region, Antarctica. *Hydrobiologia*, 281, 171–186. doi:<https://doi.org/10.1007/BF00028680>
- WES (2020). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Cuarto Trimestre 2020.
- WES (2021a). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Primer Trimestre 2021.
- WES (2021b). Informe de Monitoreo de Calidad y Cantidad de Agua Superficial Segundo Trimestre 2021.
- Zhu, B., Yang, X., Rioual, P., Qin, X., Liu, Z., Xiong, H., & Yu, J. (2011). Hydrogeochemistry of three watersheds (the Erlqis, Zhungarer and Yili) in northern Xinjiang, NW China. *Applied Geochemistry*, 26(8), 1535-1548. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.06.018>

## **VIII. ANEXOS**



Continuación ...

Fecha de Muestreo	Caudal	Conductividad	Oxígeno Disuelto	pH	Temperatura	Alcalinidad Total	Dureza Total	Sólidos Totales Disueltos	Sólidos Totales Suspendedos	Color Verdadero	Bromuro	Cloruros	Fluoruros	Fosfatos	Nitratos	Nitritos	Nitratos + Nitritos	Sulfatos	Cianuro Total	Cianuro WAD	Sulfuros	Calcio disuelto	Sodio disuelto	Magnesio disuelto	Potasio disuelto	Aceites y Grasas	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Demanda Química de Oxígeno	Detergentes Aniónicos	Policloruros bifenilos totales	Coliformes Termotolerantes	Coliformes Totales	Enterococos Fecales	Escherichia coli	Huevos y Larvas de Helminos	
	L/s	µS/cm	mg/L	Unidades pH	°C	mg CaCO <sub>3</sub> /L	mg CaCO <sub>3</sub> /L	mg/L	mg/L	UC	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg MBAS/L	µg/L	NMP/100mL	NMP/100mL	NMP/100 mL	NMP/100mL	Huevos/L	
11/12/2019	398.83	10540	5.84	7.14	16.8	70.9	852.3	6560	153	<1.0	<0.001	2886	0.543	<0.020	1.113	<0.001	1.1135	1084	<0.001	<0.001	0.0047	229.2	1917	53.56	108.3	<0.100	<2	14	0.062	<0.0010	2	33	<1.8	<1.8	<1	
25/06/2020	656.5	7591	6.19	5.33	14.1	2.5	611.9	9640	313	12.5	<0.001	2373	0.718	<0.020	1.533	<0.001	1.5335	972.8	<0.001	<0.001	0.0435	176.5	1500	41.56	84.39	<0.100	2	4	0.022	<0.0010	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8	---	
25/08/2020	443.4	6820	5.99	5.48	16.4	3.2	615.8	4930	150	3.5	<0.004	2019	1.261	<0.004	0.925	<0.004	0.927	758.2	<0.001	<0.001	0.0844	160.2	1181	36.33	68.38	<0.100	3	8	0.026	<0.0010	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8	---	
16/09/2020	457	6790	6.91	4.89	8.6	<1.0	475.9	7100	135	1.8	<0.007	2317	0.989	<0.01	1.74	<0.001	1.7405	---	<0.001	<0.001	0.0573	135.5	1115	33.44	60.26	<0.100	<2	<2	0.023	<0.0010	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8	---	
19/10/2020	1272	4370	5.68	4.67	16.2	<1	401.8	4430	125	<1	<0.001	1047	0.7	<0.02	0.35	<0.001	---	599	<0.001	<0.001	0.071	111.9	715.1	27.16	42.35	<0.1	<2	9	0.01	<0.001	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8	<1	
5/11/2020	537.6	9510	4.61	7.79	21.3	93.3	655.6	6350	113	<1	<0.001	2603	0.921	0.02	0.509	<0.001	---	927.6	<0.001	<0.001	0.061	170.2	1594	48.68	89.88	<0.1	<2	18	<0.002	<0.001	4.5	790	<1.8	<1.8	4.5	<1
3/12/2020	489.6	9200	5.5	6.29	18.7	41.3	778.9	5460	190	<1	<0.001	2452	0.357	0.02	2.67	<0.001	---	1008	<0.001	<0.001	0.019	199.1	1648	45.13	93	<0.1	<2	15	0.026	<0.001	<1.8	350	<1.8	<1.8	<1.8	<1
21/01/2021	8658	1939	7.22	3.18	7.2	<1	121.6	1960	245	58.3	<0.001	122.4	1.212	<0.02	0.353	0.012	---	845.1	<0.001	<0.001	<0.001	32.04	77.6	9.104	7.38	<0.1	5	13	<0.002	<0.001	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8	<1	
25/02/2021	4481	3060	6.06	2.8	16.1	<1	179.2	3316	205	101.6	<0.001	234.4	1.929	<0.02	1.083	<0.001	---	1662	<0.001	<0.001	<0.001	44.4	162.4	15.96	11.81	<0.1	<2	3	<0.002	<0.001	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8	<1	
06/03/2021	4987	1799	7.22	3.24	7.6	<1	157	1750	215	16.9	<0.001	165.5	0.758	<0.02	0.624	<0.001	---	667.9	<0.001	<0.001	<0.001	39.67	119	11.66	9.98	<0.1	2	6	<0.002	<0.001	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8	<1	
12/04/2021	5730	1577	6.21	3.19	15.2	<1	139.6	1584	175	10.7	<0.001	160.1	0.76	<0.02	0.616	<0.001	---	594.5	<0.001	<0.001	<0.001	39.2	123.4	10.08	10.71	<0.1	<2	7	<0.002	<0.001	<1.8	<1.8	---	<1.8	---	
16/05/2021	1191	3210	7.84	4.79	8.3	<1	266.5	2928	95	<1	<0.001	687.3	0.597	<0.02	0.164	<0.001	---	534.8	<0.001	<0.001	<0.001	76.61	468.9	18.25	26.26	<0.1	<2	<2	<0.002	<0.001	<1.8	<1.8	---	<1.8	---	
01/06/2021	1289	3210	5.95	4.57	15.9	<1	275.1	3324	81	<1	<0.001	608.2	0.651	<0.02	0.177	<0.001	---	481.6	<0.001	<0.001	<0.001	76.8	468.9	18.26	27.98	<0.1	<2	9	<0.002	<0.001	<1.8	<1.8	---	<1.8	---	



Continuación ...

Fecha de Muestreo	Aluminio	Antimonio	Arsénico	Bario	Berilio	Bismuto	Boro	Cadmio	Calcio	Cobalto	Cobre	Cromo	Estaño	Estroncio	Fosforo	Hierro	Litio	Magnesio	Manganeso	Mercurio	Molibdeno	Niquel	Plata	Plomo	Potasio	Selenio	Silicio	Sodio	Talio	Titanio	Uranio	Vanadio	Zinc
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
01.06/2021	35.04	0.002	0.246	0.039	0.001	<0.0002	8.704	0.013	78.81	0.098	0.945	0.004	<0.0002	1.752	0.24	21.86	1.513	19.01	1.754	<0.00005	0.003	0.072	<0.00008	0.001	28.74	0.002	23.3	477	0.002	0.002	0.002	0.004	0.912



Continuación ...

Fecha de Muestreo	Caudal	Conductividad	Oxígeno Disuelto	pH	Temperatura	Alcalinidad Total	Dureza Total	Sólidos Totales Disueltos	Sólidos Totales Suspendidos	Color Verdadero	Bromuro	Cloruros	Fluoruros	Fosfatos	Nitratos	Nitritos	Nitratos + Nitritos	Sulfatos	Cianuro Total	Cianuro WAD	Sulfuros	Calcio disuelto	Sodio disuelto	Magnesio disuelto	Potasio disuelto	Aceites y Grasas	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Demanda Química de Oxígeno	Detergentes Aniónicos	Policloruros bifenilos totales	Coliformes Termotolerantes	Coliformes Totales	Enterococos Fecales	Escherichia coli	Huevos y Larvas de Helminos
	L/s	µS/cm	mg/L	Unidades pH	°C	mg CaCO3/L	mg CaCO3/L	mg/L	mg/L	UC	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg MBAS/L	µg/L	NMP/100mL	NMP/100mL	NMP/100 mL	NMP/100mL	Huevos/L
25/08/2020	856.4	168.3	7.18	7.96	10.5	34.3	47.87	120	8	25	<0.004	17.53	0.153	<0.004	<0.002	<0.004	0.003	18.64	<0.001	<0.001	0.0085	9.62	17.11	2.487	4.12	<0.100	4	6	0.027	<0.0010	4.5	3500	<1.8	4.5	---
16/09/2020	905.9	174.1	7.72	8.03	6.8	35.1	35.27	124	6	35	<0.007	19.2	0.16	<0.01	0.004	<0.001	0.0045	23.5	<0.001	<0.001	0.0042	9.39	16.57	2.43	3.67	<0.100	<2	10	0.018	<0.0010	2	2400	<1.8	2	---
19/10/2020	3895.0	160.2	6.9	8.5	16	35.3	36.05	106	7	40.4	<0.001	8.611	0.15	<0.02	<0.003	<0.001	20.73	---	<0.001	<0.001	0.018	8.99	15.42	2.949	4.85	<0.1	<2	4	0.009	<0.001	4.5	240	<1.8	2	<1
5/11/2020	926.9	185.8	5.61	8.66	20.4	32.5	34.75	118	5	29.2	<0.001	14.68	0.159	<0.02	<0.003	<0.001	21.76	---	<0.001	<0.001	0.014	9.21	15.53	2.662	4.6	<0.1	<2	17	0.01	<0.001	31	1300	4.5	4.5	<1
3/12/2020	3427.0	180.7	6.32	8.33	17	29.4	48.56	104	13	31.3	<0.001	12.17	0.159	<0.02	0.007	<0.001	31.92	---	<0.001	<0.001	0.009	9.94	15.85	3.147	5.11	<0.1	<2	19	0.01	<0.001	14	790	<1.8	9.3	<1
21/01/2021	3910.0	155.8	7.02	7.26	10.8	33.6	38.31	100	13	43.2	<0.001	12.45	0.178	<0.02	0.029	0.001	---	13.34	<0.001	<0.001	<0.001	10.19	12.31	2.444	3.52	<0.1	3	18	<0.002	<0.001	22	490	4.5	11	<1
25/02/2021	2208.0	148.2	5.73	8.38	20.6	34.4	33.84	106	<3	42.8	<0.001	11.76	0.174	<0.02	<0.003	<0.001	---	15.52	<0.001	<0.001	<0.001	9.13	13.72	2.681	3.98	<0.1	<2	5	<0.002	<0.001	33	460	2	13	<1
06/03/2021	3219.0	156.7	7.08	7.23	10.8	37.8	39.09	104	10	48.4	<0.001	12.56	0.142	<0.02	<0.003	<0.001	---	13.85	<0.001	<0.001	<0.001	10.56	13.95	2.95	3.8	<0.1	<2	13	<0.002	<0.001	33	1600	<1.8	33	<1
11/04/2021	2136.0	148.5	6.52	8.59	15.5	38.2	33.43	102	6	33.7	<0.001	10.91	0.134	<0.02	<0.003	<0.001	---	13.92	<0.001	<0.001	<0.001	9.38	13.56	2.43	3.29	<0.1	<2	5	<0.002	<0.001	23	240	---	7.8	---
16/05/2021	1021.0	169.1	7.65	7.8	9.4	31.7	36.39	110	5	22.8	<0.001	14.94	0.158	<0.02	0.011	<0.001	---	21.74	<0.001	<0.001	<0.001	9.98	16.25	2.633	3.71	<0.1	<2	3	<0.002	<0.001	6.8	920	---	2	---
01/06/2021	1455.0	177.2	6.24	8.26	17.5	29.8	34.69	134	3	19.4	<0.001	14.76	0.13	<0.02	<0.003	<0.001	---	18.98	<0.001	<0.001	<0.001	9.31	16.13	2.533	3.76	<0.1	<0.0009	6	<0.002	<0.001	2	490	---	<1.8	---





Continuación ...

Fecha de Muestreo	Aluminio	Antimonio	Arsénico	Bario	Berilio	Bismuto	Boro	Cadmio	Calcio	Cobalto	Cobre	Cromo	Estaño	Estroncio	Fosforo	Hierro	Litio	Magnesio	Manganeso	Mercurio	Molibdeno	Niquel	Plata	Plomo	Potasio	Selenio	Silicio	Sodio	Talio	Titanio	Uranio	Vanadio	Zinc
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
25/08/2020	0.133	0.0013	0.0945	0.02	<0.0002	<0.0002	0.341	<0.00010	13.29	<0.0002	0.002	<0.0007	0.0072	0.1697	0.19	0.938	0.038	3.565	0.0465	<0.00005	0.0019	0.0005	<0.00008	0.0005	5.67	<0.0006	27.3	24.33	<0.0002	0.0101	<0.0002	0.0045	0.015
16/09/2020	0.056	0.0006	0.0694	0.0146	<0.0002	<0.0002	0.179	<0.00010	9.82	<0.0002	0.0015	<0.0007	<0.0002	0.1292	0.06	0.858	0.0184	2.61	0.0453	<0.00005	0.0014	0.0005	<0.00008	0.0007	3.74	<0.0006	16.8	17.3	<0.0002	0.0033	<0.0002	0.0034	0.215
19/10/2020	0.116	0.001	0.036	0.018	<0.0002	<0.0002	0.106	<0.0001	9.32	0.0003	0.001	<0.0007	<0.0002	0.108	0.08	0.963	0.017	3.104	0.062	<0.00005	0.001	<0.0002	<0.00008	0.0003	4.990	<0.0006	15.9	15.42	<0.0002	0.006	<0.0002	0.002	0.426
5/11/2020	0.08	0.0006	0.055	0.018	<0.0002	<0.0002	0.287	<0.0001	9.38	<0.0002	0.002	<0.0007	<0.0002	0.124	0.09	0.839	0.025	2.751	0.027	<0.00005	0.001	0.001	<0.00008	0.0003	4.780	<0.0006	16.7	15.86	<0.0002	0.003	<0.0002	0.003	0.016
3/12/2020	0.315	0.0004	0.032	0.03	<0.0002	0.0005	0.089	0.0005	12.74	0.001	0.003	0.002	<0.0002	0.139	0.13	1.458	0.041	4.068	0.187	<0.00005	0.002	0.003	<0.00008	0.001	6.480	<0.0006	19.6	21.12	0.0006	0.011	0.0005	0.003	0.173
21/01/2021	0.629	0.001	0.049	0.029	<0.0002	<0.0002	0.151	<0.0001	10.97	0.0006	0.004	<0.0007	<0.0002	0.139	0.09	1.193	0.016	2.651	0.073	<0.00005	0.001	0.001	<0.00008	<0.0002	3.830	<0.0006	18.1	12.76	<0.0002	0.032	<0.0002	0.004	0.018
25/02/2021	0.136	<0.0002	0.056	0.019	<0.0002	<0.0002	0.199	<0.0001	9.13	0.0005	0.0008	<0.0007	<0.0002	0.118	0.09	0.682	0.028	2.681	0.035	<0.00005	0.001	0.0005	<0.00008	0.001	3.98	<0.0006	18.8	13.72	<0.0002	0.006	<0.0002	0.003	<0.008
06/03/2021	0.174	0.0009	0.047	0.021	<0.0002	<0.0002	0.193	<0.0001	10.6	0.0003	0.003	0.002	<0.0002	0.129	0.07	0.81	0.02	3.065	0.052	<0.00005	0.001	0.0009	<0.00008	0.002	3.88	<0.0006	18.1	14.28	<0.0002	0.008	<0.0002	0.003	0.022
11/04/2021	0.129	0.002	0.047	0.019	<0.0002	<0.0002	0.163	<0.0001	9.38	<0.0002	0.002	0.001	<0.0002	0.111	0.08	0.544	0.02	2.43	0.037	<0.00005	0.001	0.0005	<0.00008	0.0005	3.29	<0.0006	17.7	13.56	<0.0002	0.007	<0.0002	0.003	0.031
16/05/2021	0.079	0.002	0.051	0.018	<0.0002	<0.0002	0.205	<0.0001	9.98	0.0003	0.002	0.0009	<0.0002	0.126	0.12	0.463	0.033	2.784	0.053	<0.00005	0.001	0.0008	<0.00008	0.0005	3.79	<0.0006	19.2	17.3	<0.0002	0.005	<0.0002	0.003	<0.008
01/06/2021	0.078	0.001	0.051	0.016	<0.0002	<0.0002	0.237	<0.0001	9.61	<0.0002	0.001	<0.0007	<0.0002	0.121	0.14	0.367	0.031	2.596	0.034	<0.00005	0.001	<0.0002	<0.00008	<0.0002	3.84	<0.0006	20.3	16.47	<0.0002	0.005	<0.0002	0.003	0.019



Continuación ...

Fecha de Muestreo	Caudal	Conductividad	Oxígeno Disuelto	pH	Temperatura	Alcalinidad Total	Dureza Total	Sólidos Totales Disueltos	Sólidos Totales Suspendedos	Color Verdadero	Bromuro	Cloruros	Fluoruros	Fosfatos	Nitratos	Nitritos	Nitratos + Nitritos	Sulfatos	Cianuro Total	Cianuro WAD	Sulfuros	Calcio disuelto	Sodio disuelto	Magnesio disuelto	Potasio disuelto	Aceites y Grasas	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Demanda Química de Oxígeno	Detergentes Aniónicos	Policloruros bifenilos totales	Coliformes Termotolerantes	Coliformes Totales	Enterococos Fecales	Escherichia coli	Huevos y Larvas de Helminos
	L/s	µS/cm	mg/L	Unidades pH	°C	mg CaCO3/L	mg CaCO3/L	mg/L	mg/L	UC	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg MBAS/L	µg/L	NMP/100mL	NMP/100mL	NMP/100 mL	NMP/100mL	Huevos/L
6/11/2019	2174.3	2520	7.86	8.06	10.0	60.3	268.5	1826.0	26.0	12.6	<0.001	546.1	0.416	<0.02	0.193	<0.001	0.1935	283.0	<0.001	<0.001	<0.0004	77.53	345.7	15.19	22.84	<0.1	<2	17	0.003	<0.0010	2	470	<1.8	<1.8	---
6/12/2019	1389.3	2630	7.19	7.99	15.9	50.4	296.0	1580.0	60.0	11.4	<0.001	586.3	0.466	<0.02	0.257	<0.001	0.2575	332.6	<0.001	<0.001	<0.0004	87.22	371.1	16.68	22.25	<0.1	<2	<2	0.02	<0.0010	<1.8	330	<1.8	<1.8	---
27/06/2020	3841.0	1851	9.35	6.56	2.1	1.6	197.6	1094	95	15.8	<0.001	395	0.181	<0.020	0.231	<0.001	0.2315	274.7	<0.001	<0.001	0.0021	57.81	248.9	12.24	17.98	<0.1	<2	6	0.01	<0.0010	<1.8	2	<1.8	<1.8	---
27/08/2020	1770.0	1982	6.7	7.71	15.5	24.4	206.5	1344	57	4.5	<0.007	417	0.221	<0.01	0.428	<0.001	0.4285	265	<0.001	<0.001	<0.0010	61.82	300.6	12.65	19.51	<0.1	2	4	0.021	<0.0010	<1.8	79	<1.8	<1.8	---
17/09/2020	2394.0	2020	6.55	7.43	16.4	11.8	197.3	1520	63	3.5	<0.007	467	0.299	<0.01	0.287	<0.001	0.2875	267	<0.001	<0.001	0.0051	58.71	314.2	12.31	18.87	<0.1	<2	7	0.018	<0.0010	<1.8	33	<1.8	<1.8	---
21/10/2020	4788.0	945	7.89	7.56	9.4	16.1	114.8	648	43	9.5	<0.001	176.5	0.236	<0.020	0.219	0.15	---	127.4	<0.001	<0.001	0.012	---	134.5	7.64	11.32	<0.1	<2	12	0.01	<0.0010	4.5	2200	2	2	<1
06/11/2020	1554.0	1880	7.27	8.2	14.4	51.2	179.8	1250	17	15.5	<0.001	417.5	0.397	<0.021	0.178	<0.001	---	191.1	<0.001	<0.001	0.013	---	274.8	11.6	19.02	<0.1	<2	4	<0.002	<0.0010	2	170	<1.8	2	<2
02/12/2020	2978.0	1521	6.05	8.25	19.5	43.6	151.8	1018	23	19.90	<0.001	328.2	0.301	<0.022	0.204	0.095	---	155.5	<0.001	<0.001	<0.001	---	232.1	9.968	16.71	<0.1	<2	18	0.009	<0.0010	<1.8	110	<1.8	<1.8	<3
22/01/2021	32027.0	435	6.34	6.15	19.9	1.1	70.53	302	940	2.4	<0.001	43.47	0.161	<0.02	0.127	<0.001	---	86.03	<0.001	<0.001	<0.001	16.86	37.98	3.6	4.31	<0.1	5	19	<0.002	<0.001	220	5400	40	17	<1
25/02/2021	---	1141	6.75	3.41	15.2	<1	103.8	1082	87	2	<0.001	105.2	0.534	<0.02	0.409	<0.001	---	300.4	<0.001	<0.001	<0.001	29.88	81.07	7.086	7.25	<0.1	<2	<2	<0.002	<0.001	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8	<1
07/03/2021	6436.0	803	6.71	4.42	14.2	<1	171.2	766	583	1.7	<0.001	83.01	0.45	<0.02	0.538	<0.001	---	222.8	<0.001	<0.001	<0.001	46.64	68	7.145	6.71	<0.1	<2	8	<0.002	<0.001	7.8	330	4.5	4.5	<1
10/04/2021	9841.0	1105	7.72	3.41	10.2	<1	109.1	1166	108	4.2	<0.001	91.74	0.294	<0.02	0.051	<0.001	---	310.2	<0.001	<0.001	<0.001	31.07	83.44	7.624	7.83	<0.1	<2	5	<0.002	<0.001	<1.8	<1.8	---	<1.8	---
17/05/2021	4118.0	1414	8.23	4.76	5.7	<1	146.6	1486	62	<1	<0.001	230.7	0.459	<0.02	0.116	<0.001	---	355.8	<0.001	<0.001	<0.001	42.66	163.5	9.651	11.1	<0.1	<2	<2	<0.002	<0.001	<1.8	<1.8	---	<1.8	---
02/06/2021	4382.0	1393	8.45	4.93	4.9	<1	159.8	1392	49	1.6	<0.001	218.8	0.386	<0.02	0.14	<0.001	---	240	<0.001	<0.001	<0.001	47.33	176	10.12	12.45	<0.1	<2	9	<0.002	<0.001	<1.8	<1.8	---	<1.8	---



Continuación ...

Fecha de Muestreo	Aluminio	Antimonio	Arsénico	Bario	Berilio	Bismuto	Boro	Cadmio	Calcio	Cobalto	Cobre	Cromo	Estaño	Estroncio	Fosforo	Hierro	Litio	Magnesio	Manganeso	Mercurio	Molibdeno	Niquel	Plata	Plomo	Potasio	Selenio	Silicio	Sodio	Talio	Titanio	Uranio	Vanadio	Zinc
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
6/11/2019	2.356	0.0017	0.1214	0.0305	<0.0002	<0.0002	6.453	0.00171	80.89	0.0134	0.0972	<0.0007	<0.0002	1.336	0.070	1.499	1.1000	16.14	0.5064	<0.00005	0.00360	0.0122	<0.00008	0.0007	24.21	0.0011	17.7	358.6	<0.0002	0.0096	0.0005	0.0031	0.0880
6/12/2019	5.672	0.0012	0.1546	0.0428	<0.0002	<0.0002	6.837	0.00275	89.56	0.0187	0.1669	0.0010	<0.0002	1.438	0.080	2.296	1.2170	17.58	0.6120	<0.00005	0.00380	0.0151	<0.00008	0.0006	23.27	<0.0006	20.3	393.7	0.0004	0.025	0.0007	0.0043	0.1880
27/06/2020	11.19	0.0004	0.1123	0.0324	0.0006	<0.0002	5.316	0.00611	58.64	0.0419	0.4904	0.0019	<0.0002	1.016	0.07	7.022	1.154	12.43	0.9625	<0.00005	0.0023	0.0302	0.00057	0.0005	18.34	0.0013	19.3	262.8	0.0006	0.0047	0.0011	0.0031	0.397
27/08/2020	8.108	0.0003	0.1354	0.0306	0.0004	<0.0002	5.095	0.00488	61.82	0.0319	0.2494	<0.0007	<0.0002	1.079	<0.05	3.323	0.9716	12.65	0.7839	<0.00005	0.0025	0.022	0.00046	<0.0002	19.51	<0.0006	20.3	300.6	0.0006	<0.0005	0.0009	0.0017	0.301
17/09/2020	10.32	0.0013	0.1514	0.0352	0.0005	<0.0002	5.879	0.00669	58.71	0.0395	0.274	0.0016	0.0005	1.1	0.13	4.384	0.9735	12.31	0.9629	<0.00005	0.0029	0.0273	<0.00008	0.0006	18.87	<0.0006	20.6	314.2	0.0006	0.0041	0.001	0.0028	0.391
21/10/2020	4.949	0.0005	0.076	0.026	<0.0002	<0.0002	2.059	0.003	33.34	0.018	0.127	0.001	0.0004	0.529	0.09	2.517	0.401	7.671	0.494	<0.00005	0.002	0.013	<0.00008	0.0004	11.32	<0.0006	16.9	134.5	0.0003	0.01	0.0006	0.003	0.968
06/11/2020	2.308	0.0007	0.086	0.027	<0.0002	<0.0002	4.543	0.002	52.88	0.013	0.064	<0.0007	<0.0002	0.955	0.06	0.959	0.882	11.6	0.441	<0.00005	0.002	0.009	<0.00008	<0.0002	19.4	<0.0006	16.3	288.9	0.0004	0.003	0.0004	0.0008	0.093
02/12/2020	1.762	0.0007	0.076	0.029	<0.0002	<0.0002	4.065	0.001	44.34	0.009	0.059	0.003	<0.0002	0.853	0.11	1.167	0.73	9.968	0.362	<0.00005	0.002	0.007	<0.00008	0.0006	17.15	<0.0006	16.4	232.1	0.0003	0.007	0.0003	0.002	0.515
22/01/2021	15.04	0.002	0.099	0.172	0.0008	0.0004	0.626	0.002	19.24	0.017	0.149	0.005	<0.0002	0.242	0.4	15.46	0.125	5.462	0.848	0.0002	0.002	0.014	0.0005	0.017	7.84	0.002	31.2	38.12	0.001	0.217	0.002	0.025	0.177
25/02/2021	20.75	<0.0002	0.115	0.03	0.0009	<0.0002	1.275	0.008	29.88	0.059	0.963	0.004	<0.0002	0.456	0.22	24.2	0.239	7.086	0.792	<0.00005	0.002	0.052	0.0010	0.002	7.25	<0.0006	16.6	81.07	0.001	0.01	0.002	0.007	0.689
07/03/2021	23.36	0.002	0.14	0.136	0.0009	0.0006	1.123	0.005	46.64	0.05	0.567	0.009	0.0005	0.432	0.47	25.75	0.25	13.28	0.967	<0.00005	0.003	0.044	0.0008	0.009	7.92	<0.0006	31.6	68	0.001	0.152	0.002	0.031	0.443
10/04/2021	26.87	0.001	0.173	0.032	0.0008	<0.0002	1.381	0.009	31.07	0.077	1.542	0.006	<0.0002	0.415	0.38	39.44	0.277	7.646	0.748	<0.00005	0.003	0.068	<0.00008	0.002	7.83	0.002	18.2	83.44	0.001	0.015	0.002	0.015	0.898
17/05/2021	22.42	0.001	0.14	0.025	0.0007	<0.0002	2.678	0.009	42.66	0.064	0.988	0.004	<0.0002	0.704	0.22	23.1	0.524	9.729	0.837	<0.00005	0.002	0.053	<0.00008	0.001	11.1	<0.0006	18.5	163.5	0.0009	0.004	0.002	0.007	0.743
02/06/2021	14.12	0.001	0.093	0.025	0.0005	<0.0002	2.967	0.006	47.33	0.045	0.439	0.002	<0.0002	0.758	0.16	9.754	0.519	10.12	0.77	<0.00005	0.002	0.034	<0.00008	0.0004	12.45	<0.0006	18.8	176	0.0009	0.002	0.001	0.003	0.428

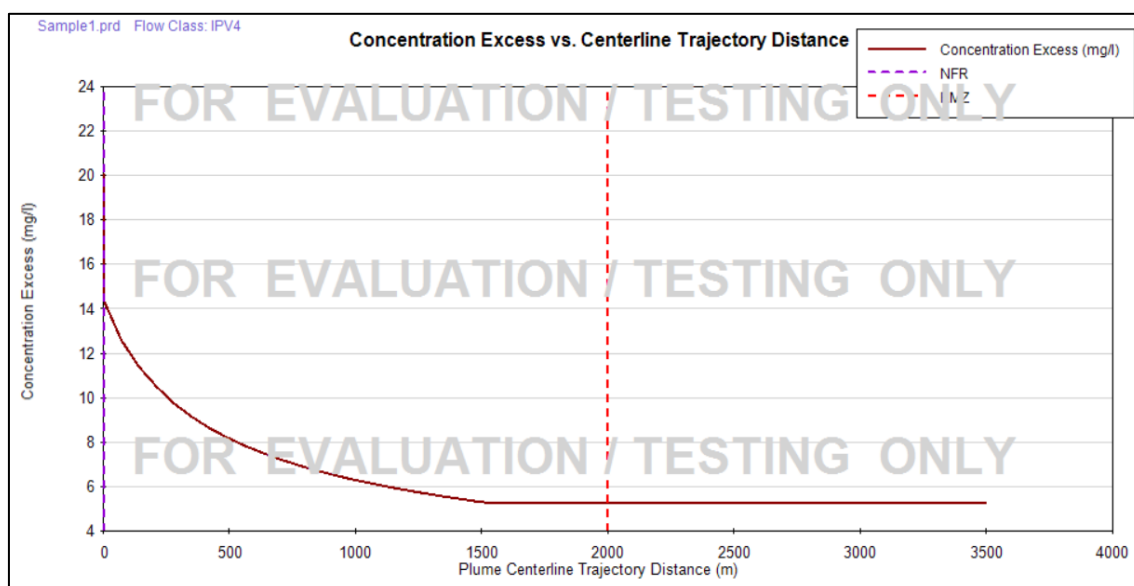
## Anexo 2: Modelamiento CORMIX

**Tabla 33:** Resultados de la concentración simulada de los parámetros aluminio, arsénico, boro y manganeso en época seca (julio- 2017)

Eje X (Distancia aguas abajo en m)	Eje Y (Distancia al borde de confluencia en m)	Eje Z (Altura respecto a la parte inferior en m)	S (Factor de dilución hidrodinámica adimensional)	Concentración simulada (mg/L)			
				Aluminio	Arsénico	Boro	Manganeso
0.83	-0.1	0.8	1.4	14.40	0.348	6.18	1.55
70.82	-0.1	0.8	1.6	12.60	0.306	5.43	1.37
140.80	-0.1	0.8	1.8	11.40	0.276	4.90	1.23
210.78	-0.1	0.8	1.9	10.50	0.253	4.50	1.13
280.77	-0.1	0.8	2.1	9.74	0.236	4.18	1.05
350.75	-0.1	0.8	2.2	9.14	0.221	3.92	0.987
420.73	-0.1	0.8	2.3	8.63	0.209	3.71	0.932
490.72	-0.1	0.8	2.5	8.21	0.199	3.52	0.886
560.70	-0.1	0.8	2.6	7.84	0.190	3.36	0.846
630.68	-0.1	0.8	2.7	7.52	0.182	3.23	0.812
700.67	-0.1	0.8	2.8	7.23	0.175	3.10	0.781
770.65	-0.1	0.8	2.9	6.97	0.169	2.99	0.753
840.63	-0.1	0.8	3.0	6.74	0.163	2.89	0.728
910.62	-0.1	0.8	3.1	6.53	0.158	2.80	0.705
980.60	-0.1	0.8	3.2	6.34	0.153	2.72	0.685
1050.58	-0.1	0.8	3.3	6.17	0.149	2.65	0.666
1120.57	-0.1	0.8	3.4	6.01	0.145	2.58	0.649
1190.55	-0.1	0.8	3.4	5.86	0.142	2.51	0.632
1260.53	-0.1	0.8	3.5	5.72	0.138	2.45	0.617

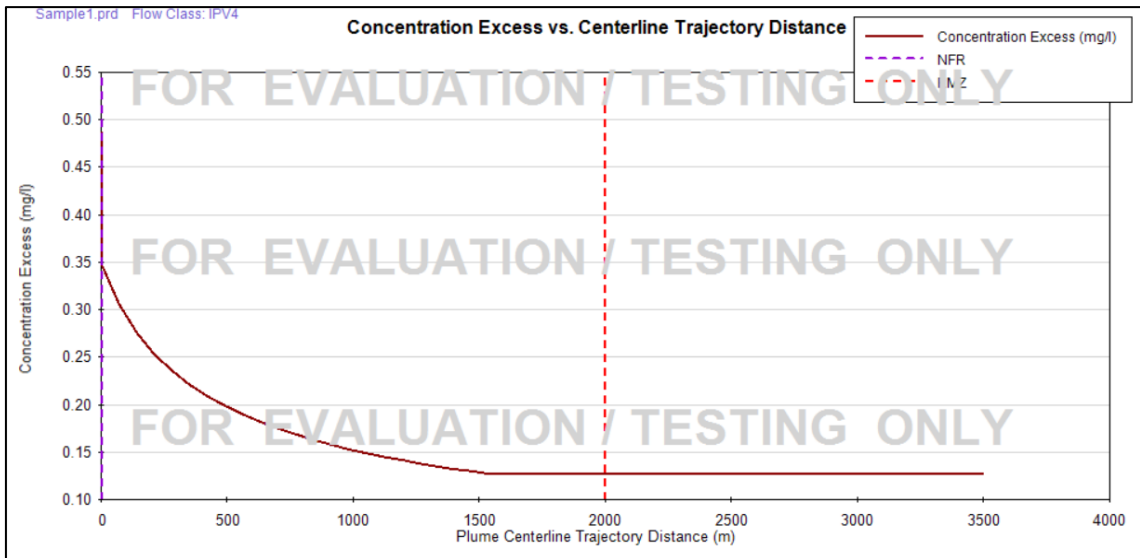
Continuación ...

Eje X (Distancia aguas abajo en m)	Eje Y (Distancia al borde de confluencia en m)	Eje Z (Altura respecto a la parte inferior en m)	S (Factor de dilución hidrodinámica adimensional)	Concentración simulada (mg/L)			
				Aluminio	Arsénico	Boro	Manganeso
1330.52	-0.1	0.8	3.6	5.59	0.135	2.40	0.604
1400.50	-0.1	0.8	3.7	5.47	0.132	2.35	0.590
1470.48	-0.1	0.8	3.8	5.35	0.130	2.30	0.578
<b>1540.47</b>	-0.1	0.8	3.8	<b>5.27</b>	<b>0.127</b>	<b>2.26</b>	<b>0.569</b>
1610.45	-0.1	0.8	3.8	5.27	0.127	2.26	0.569
1680.43	-0.1	0.8	3.8	5.27	0.127	2.26	0.569
1750.42	-0.1	0.8	3.8	5.27	0.127	2.26	0.569

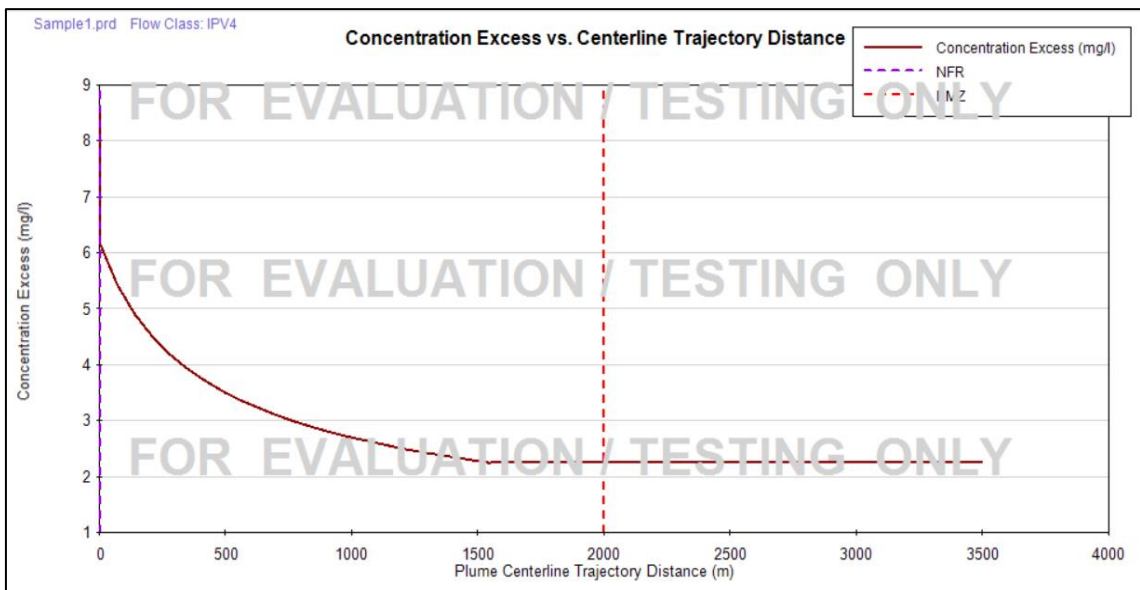


**Figura 54.** Concentración simulada del parámetro aluminio en época seca (julio-2017) respecto a la distancia aguas abajo

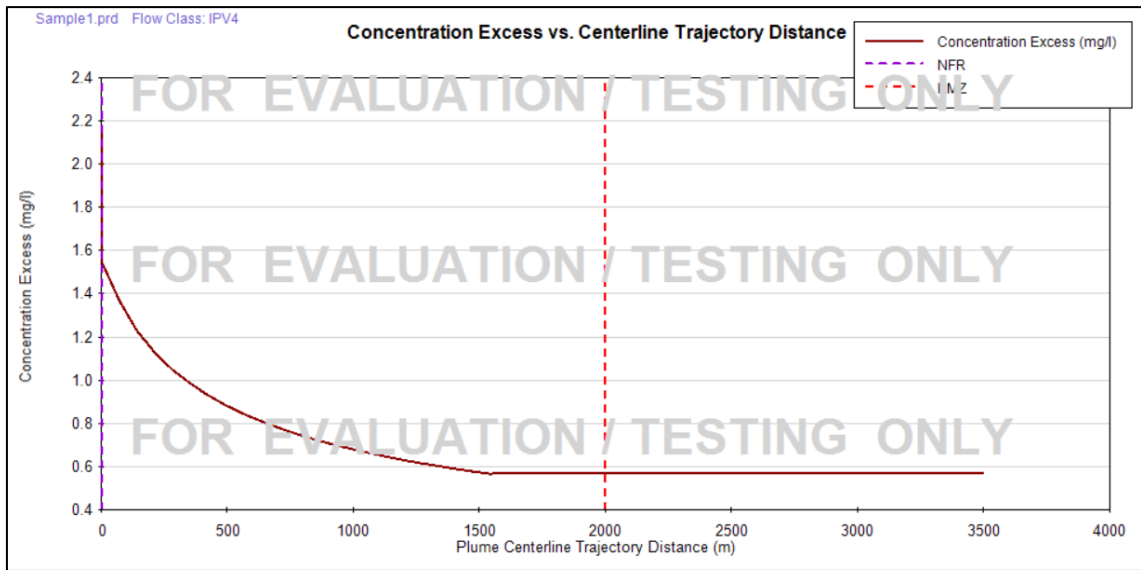




**Figura 55.** Concentración simulada del parámetro arsénico en época seca (julio-2017) respecto a la distancia aguas abajo



**Figura 56.** Concentración simulada del parámetro boro en época seca (julio-2017) respecto a la distancia aguas abajo



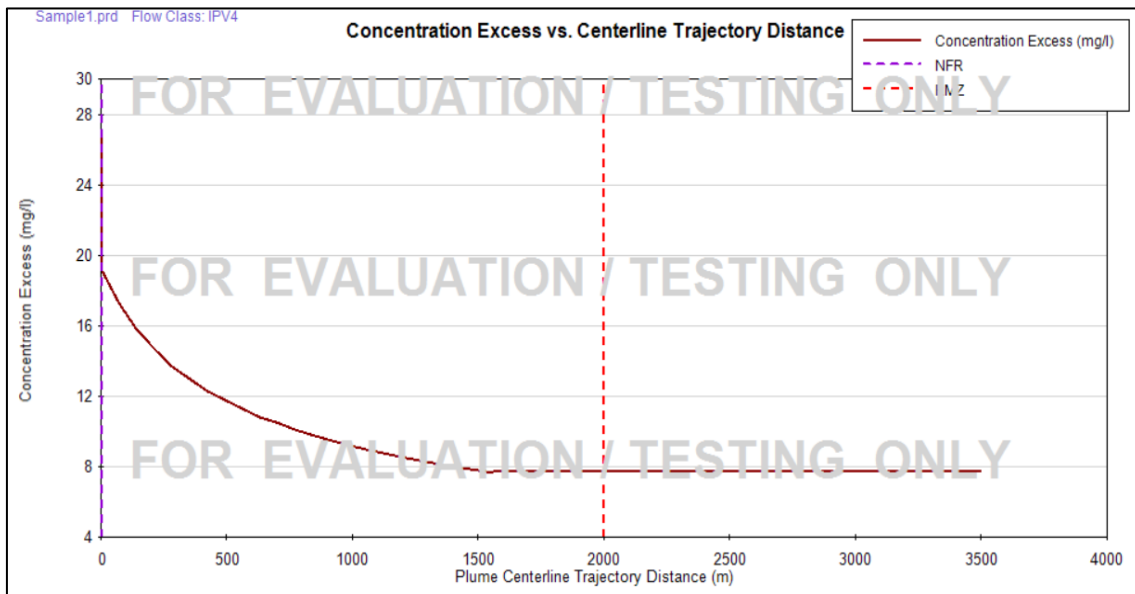
**Figura 57.** Concentración simulada del parámetro manganeso en época seca (julio-2017) respecto a la distancia aguas abajo

**Tabla 34:** Resultados de la concentración simulada de los parámetros aluminio, arsénico, boro y manganeso en época seca (noviembre- 2019)

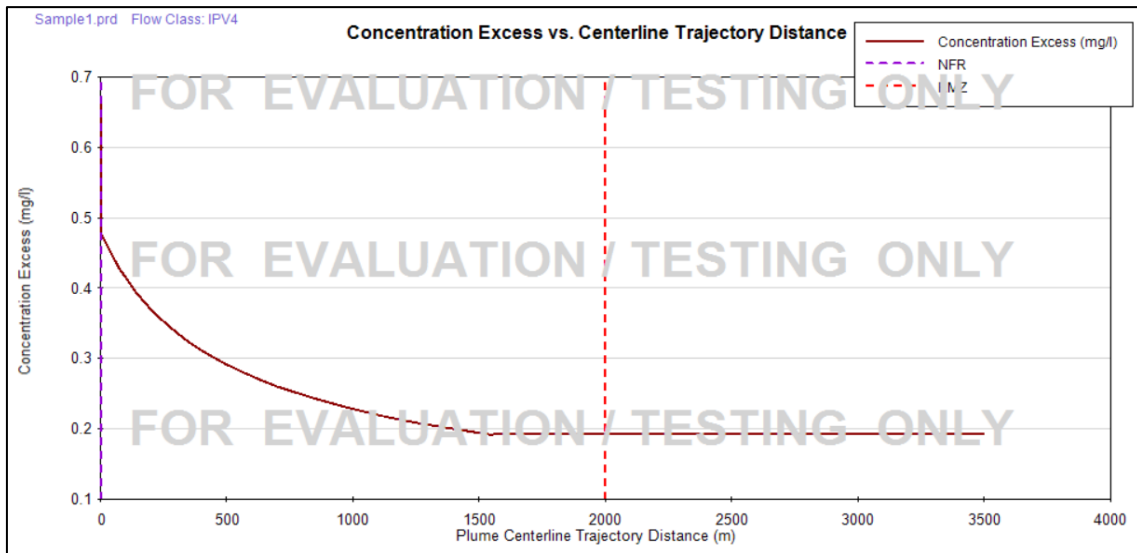
Eje X (Distancia aguas abajo en m)	Eje Y (Distancia al borde de confluencia en m)	Eje Z (Altura respecto a la parte inferior en m)	S (Factor de dilución hidrodinámica adimensional)	Concentración simulada (mg/L)			
				Aluminio	Arsénico	Boro	Manganeso
0.82	-0.1	0.8	1.4	19.20	0.478	25.30	1.98
70.81	-0.1	0.8	1.6	17.30	0.430	22.70	1.78
140.79	-0.1	0.8	1.7	15.80	0.394	20.80	1.63
210.77	-0.1	0.8	1.8	14.70	0.365	19.30	1.51
280.76	-0.1	0.8	2.0	13.70	0.343	18.10	1.42
350.74	-0.1	0.8	2.1	13	0.323	17.10	1.34
420.73	-0.1	0.8	2.2	12.30	0.307	16.20	1.27
490.71	-0.1	0.8	2.3	11.80	0.293	15.50	1.22
560.69	-0.1	0.8	2.4	11.30	0.281	14.80	1.16
630.68	-0.1	0.8	2.5	10.80	0.270	14.30	1.12
700.66	-0.1	0.8	2.6	10.50	0.260	13.80	1.08
770.64	-0.1	0.8	2.7	10.10	0.252	13.30	1.04
840.63	-0.1	0.8	2.7	9.79	0.244	12.90	1.01
910.61	-0.1	0.8	2.8	9.50	0.237	12.50	0.981
980.59	-0.1	0.8	2.9	9.23	0.230	12.20	0.954
1050.58	-0.1	0.8	3.0	8.99	0.224	11.80	0.928
1120.56	-0.1	0.8	3.1	8.77	0.218	11.50	0.905
1190.54	-0.1	0.8	3.1	8.56	0.213	11.30	0.884
1260.53	-0.1	0.8	3.2	8.36	0.208	11.00	0.864
1330.51	-0.1	0.8	3.3	8.18	0.204	10.80	0.845

Continuación ...

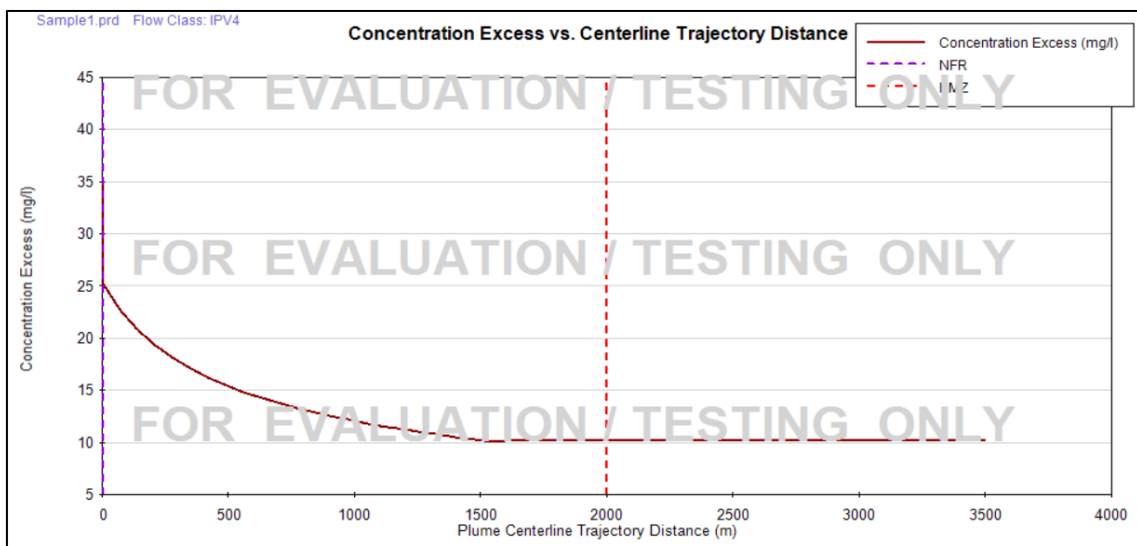
Eje X (Distancia aguas abajo en m)	Eje Y (Distancia al borde de confluencia en m)	Eje Z (Altura respecto a la parte inferior en m)	S (Factor de dilución hidrodinámica adimensional)	Concentración simulada (mg/L)			
				Aluminio	Arsénico	Boro	Manganeso
1400.49	-0.1	0.8	3.4	8.01	0.200	10.50	0.827
1470.48	-0.1	0.8	3.4	7.85	0.196	10.30	0.811
<b>1540.46</b>	-0.1	0.8	3.5	<b>7.76</b>	<b>0.193</b>	<b>10.20</b>	<b>0.801</b>
1610.45	-0.1	0.8	3.5	7.76	0.193	10.20	0.801
1680.43	-0.1	0.8	3.5	7.76	0.193	10.20	0.801
1750.41	-0.1	0.8	3.5	7.76	0.193	10.20	0.801



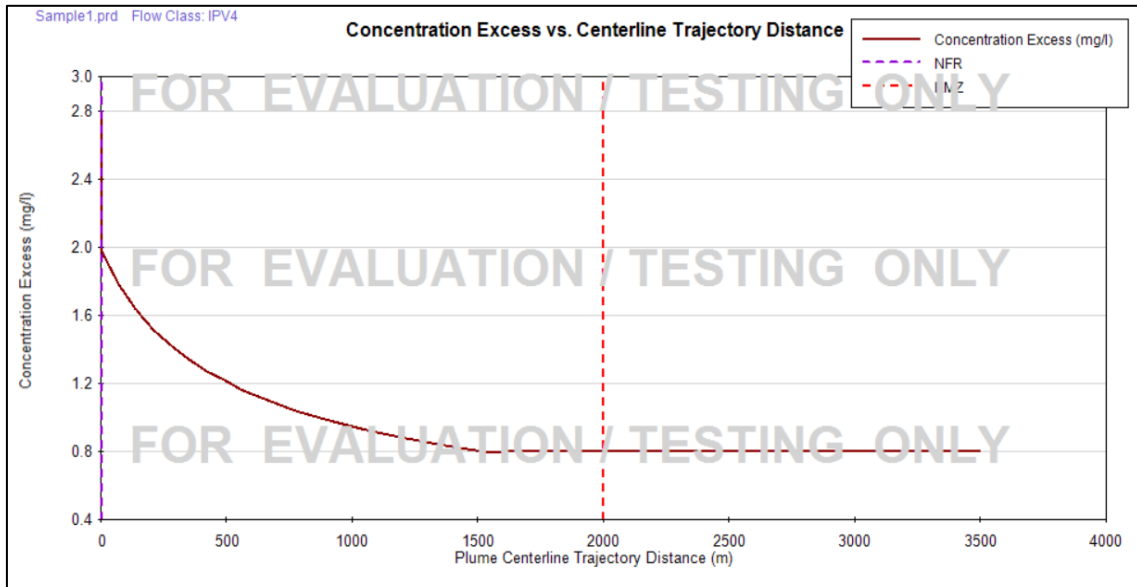
**Figura 58.** Concentración simulada del parámetro aluminio en época seca (noviembre-2019) respecto a la distancia aguas abajo



**Figura 59.** Concentración simulada del parámetro arsénico en época seca (noviembre-2019) respecto a la distancia aguas abajo



**Figura 60.** Concentración simulada del parámetro boro en época seca (noviembre-2019) respecto a la distancia aguas abajo



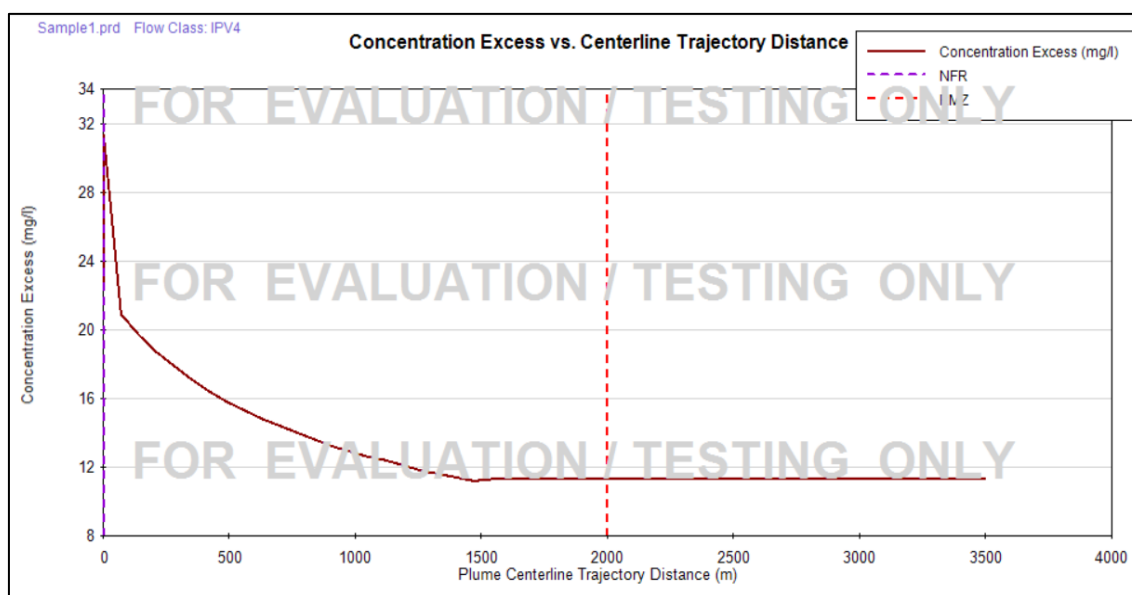
**Figura 61.** Concentración simulada del parámetro manganeso en época seca (noviembre-2019) respecto a la distancia aguas abajo

**Tabla 35:** Resultados de la concentración simulada de los parámetros aluminio, arsénico, boro y manganeso en época húmeda (febrero-2016)

Eje X (Distancia aguas abajo en m)	Eje Y (Distancia al borde de confluencia en m)	Eje Z (Altura respecto a la parte inferior en m)	S (Factor de dilución hidrodinámica adimensional)	Concentración simulada (mg/L)			
				Aluminio	Arsénico	Boro	Manganeso
0.80	-0.1	0.8	1.4	22.4	0.083	2.28	1.57
70.78	-0.1	0.8	1.5	20.9	0.0776	2.13	1.47
140.77	-0.1	0.8	1.6	19.7	0.0732	2.01	1.38
210.75	-0.1	0.8	1.7	18.7	0.0694	1.91	1.31
280.74	-0.1	0.8	1.8	17.9	0.0662	1.82	1.25
350.72	-0.1	0.8	1.8	17.1	0.0634	1.74	1.20
420.70	-0.1	0.8	1.9	16.4	0.0609	1.67	1.15
490.69	-0.1	0.8	2.0	15.8	0.0587	1.61	1.11
560.67	-0.1	0.8	2.0	15.3	0.0567	1.56	1.07
630.66	-0.1	0.8	2.1	14.8	0.0549	1.51	1.04
700.62	-0.1	0.8	2.2	14.4	0.0533	1.46	1.01
770.62	-0.1	0.8	2.2	14.0	0.0518	1.42	0.979
840.61	-0.1	0.8	2.3	13.6	0.0504	1.38	0.953
910.59	-0.1	0.8	2.4	13.2	0.0491	1.35	0.929
980.58	-0.1	0.8	2.4	12.9	0.0479	1.32	0.906
1050.56	-0.1	0.8	2.5	12.6	0.0468	1.29	0.885
1120.54	-0.1	0.8	2.5	12.4	0.0458	1.26	0.866
1190.53	-0.1	0.8	2.6	12.1	0.0448	1.23	0.848
1260.51	-0.1	0.8	2.6	11.8	0.0439	1.21	0.831
1330.50	-0.1	0.8	2.7	11.6	0.0431	1.18	0.814

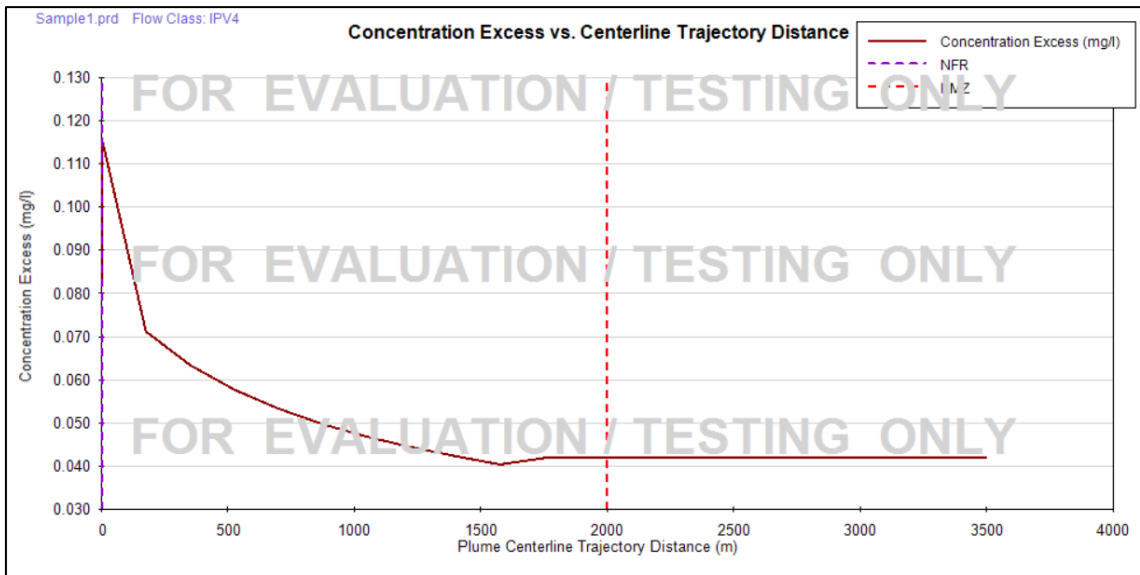
Continuación ...

Eje X (Distancia aguas abajo en m)	Eje Y (Distancia al borde de confluencia en m)	Eje Z (Altura respecto a la parte inferior en m)	S (Factor de dilución hidrodinámica adimensional)	Concentración simulada (mg/L)			
				Aluminio	Arsénico	Boro	Manganeso
1400.48	-0.1	0.8	2.8	11.4	0.0423	1.16	0.799
<b>1470.46</b>	-0.1	0.8	2.8	<b>11.3</b>	<b>0.0419</b>	<b>1.15</b>	<b>0.793</b>
1540.45	-0.1	0.8	2.8	11.3	0.0419	1.15	0.793
1610.43	-0.1	0.8	2.8	11.3	0.0419	1.15	0.793
1680.42	-0.1	0.8	2.8	11.3	0.0419	1.15	0.793
1750.40	-0.1	0.8	2.8	11.3	0.0419	1.15	0.793

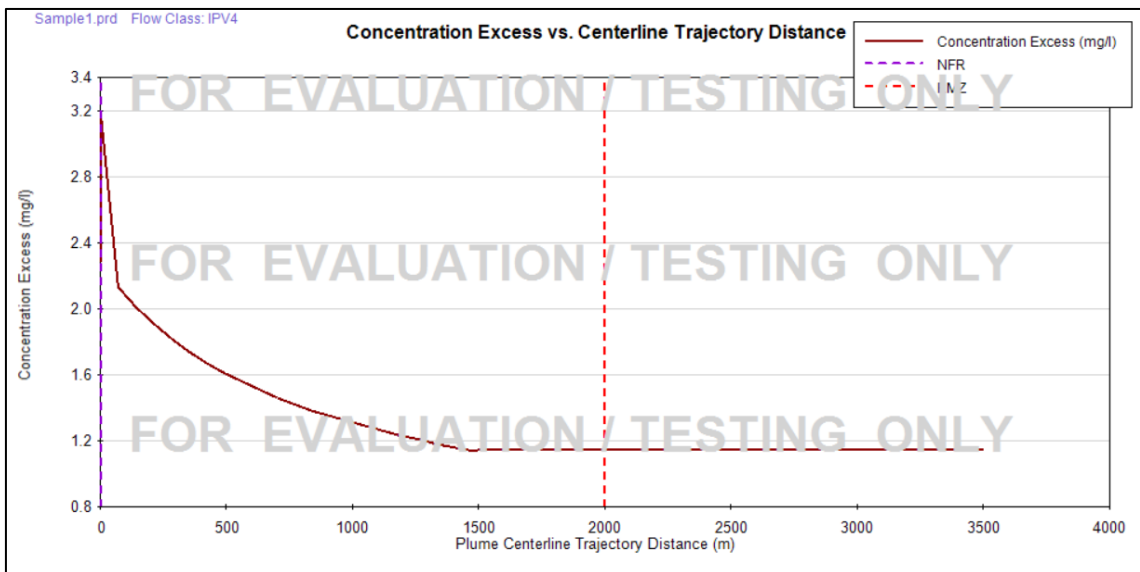


**Figura 62.** Concentración simulada del parámetro aluminio en época húmeda (febrero-2016) respecto a la distancia aguas abajo

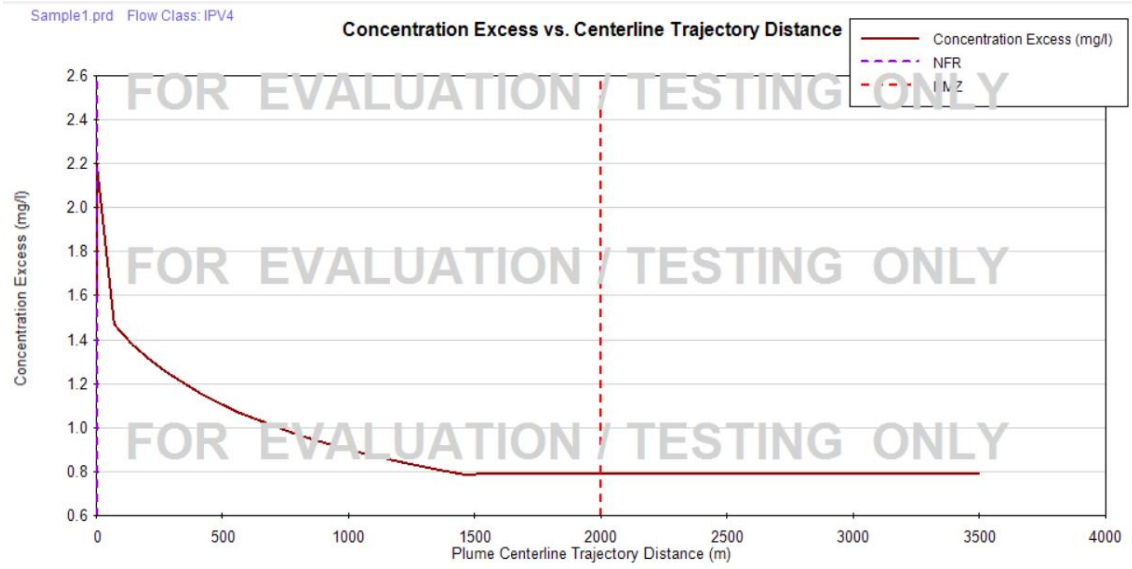




**Figura 63.** Concentración simulada del parámetro arsénico en época húmeda (febrero-2016) respecto a la distancia aguas abajo



**Figura 64.** Concentración simulada del parámetro boro en época húmeda (febrero-2016) respecto a la distancia aguas abajo



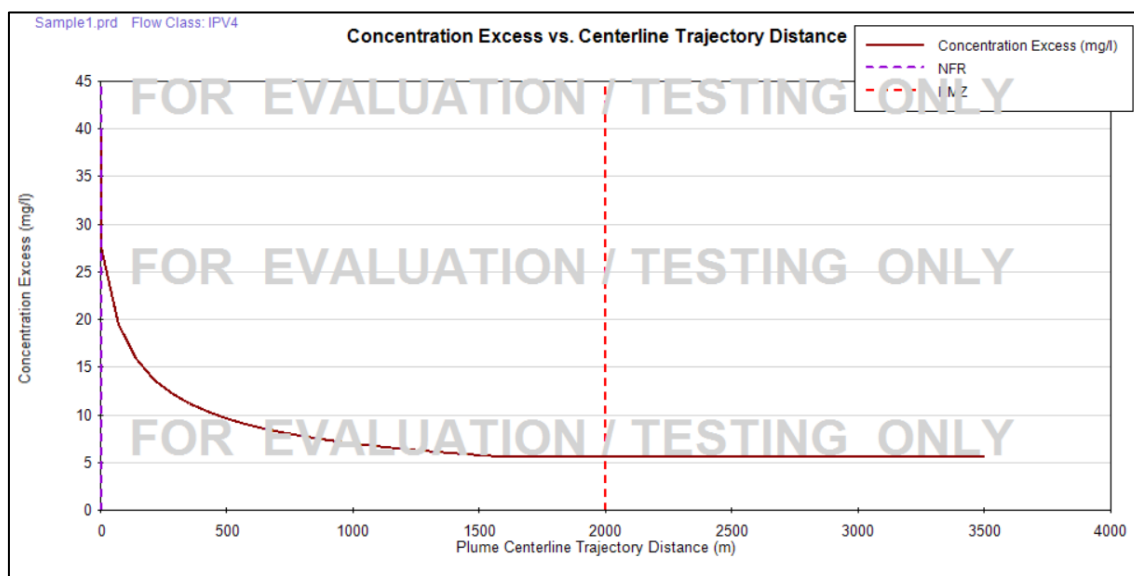
**Figura 65.** Concentración simulada del parámetro manganeso en época húmeda (febrero-2016) respecto a la distancia aguas abajo

**Tabla 36:** Resultados de la concentración simulada de los parámetros aluminio, arsénico, boro y manganeso en época húmeda (diciembre-2020)

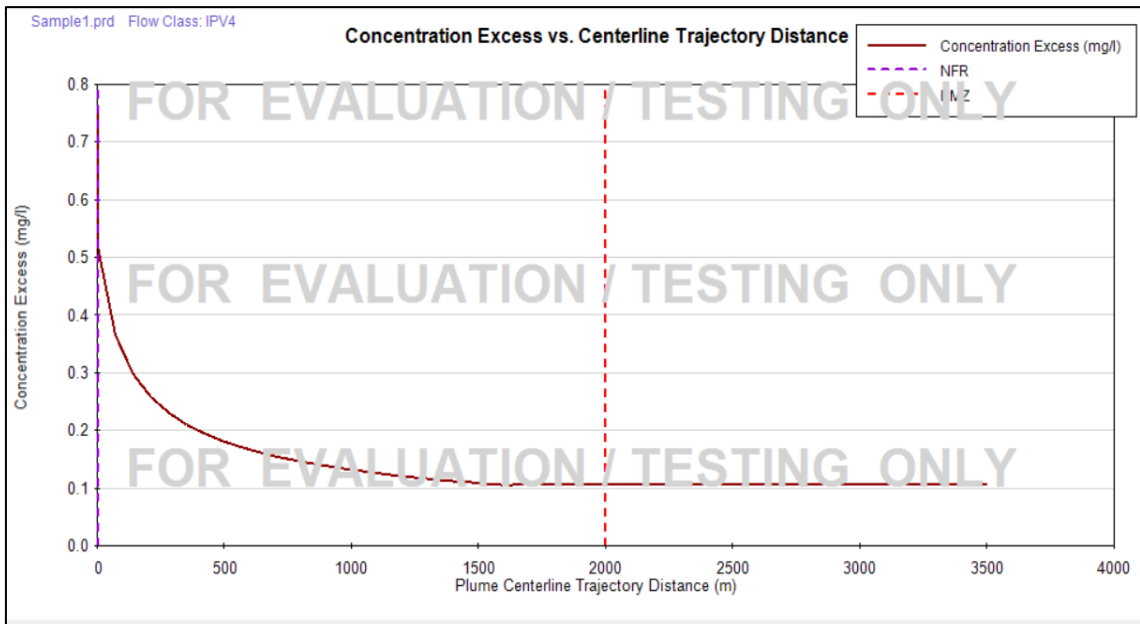
Eje X (Distancia aguas abajo en m)	Eje Y (Distancia al borde de confluencia en m)	Eje Z (Altura respecto a la parte inferior en m)	S (Factor de dilución hidrodinámica adimensional)	Concentración simulada (mg/L)			
				Aluminio	Arsénico	Boro	Manganeso
0.88	-0.1	0.8	1.4	27.7	0.521	24.60	2.87
70.86	-0.1	0.8	2.0	19.5	0.366	17.30	2.02
140.84	-0.1	0.8	2.5	15.9	0.298	14.10	1.64
210.82	-0.1	0.8	2.9	13.7	0.258	12.20	1.42
280.81	-0.1	0.8	3.3	12.3	0.231	10.90	1.27
350.79	-0.1	0.8	3.6	11.2	0.210	9.92	1.16
420.77	-0.1	0.8	3.8	10.4	0.195	9.18	1.07
490.75	-0.1	0.8	4.1	9.69	0.182	8.58	1
560.74	-0.1	0.8	4.4	9.13	0.172	8.09	0.946
630.72	-0.1	0.8	4.6	8.66	0.163	7.68	0.898
700.70	-0.1	0.8	4.8	8.26	0.155	7.32	0.856
770.68	-0.1	0.8	5.0	7.91	0.149	7.01	0.819
840.67	-0.1	0.8	5.3	7.60	0.143	6.73	0.787
910.65	-0.1	0.8	5.4	7.32	0.138	6.49	0.758
980.63	-0.1	0.8	5.6	7.07	0.133	6.26	0.733
1050.61	-0.1	0.8	5.8	6.84	0.129	6.07	0.709
1120.60	-0.1	0.8	6.0	6.64	0.125	5.88	0.688
1190.58	-0.1	0.8	6.2	6.45	0.121	5.72	0.669
1260.56	-0.1	0.8	6.3	6.28	0.118	5.57	0.651
1330.54	-0.1	0.8	6.5	6.12	0.115	5.42	0.634

Continuación ...

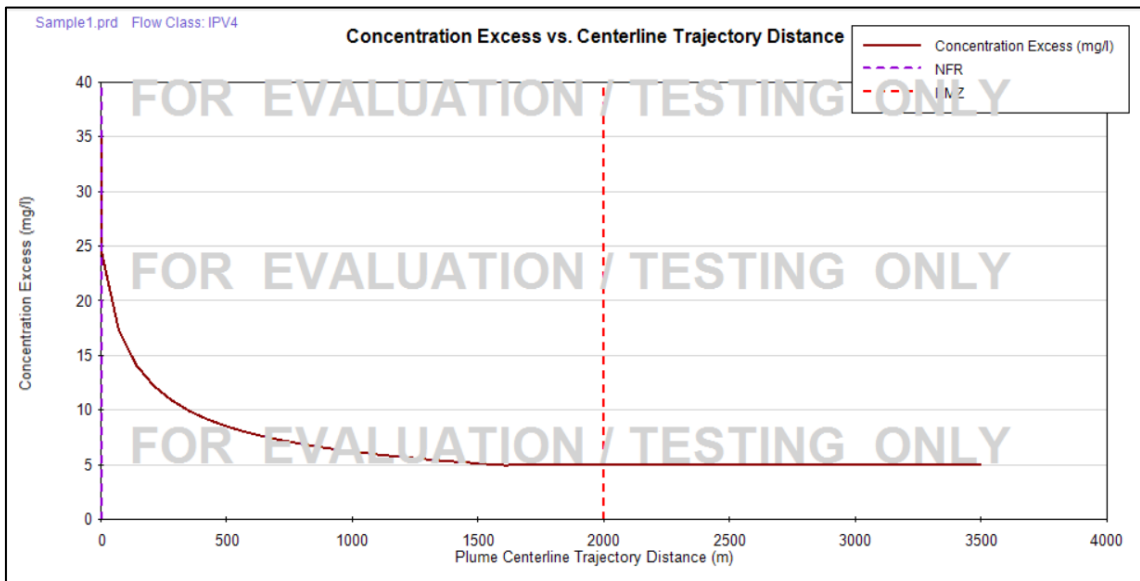
Eje X (Distancia aguas abajo en m)	Eje Y (Distancia al borde de confluencia en m)	Eje Z (Altura respecto a la parte inferior en m)	S (Factor de dilución hidrodinámica adimensional)	Concentración simulada (mg/L)			
				Aluminio	Arsénico	Boro	Manganeso
1400.53	-0.1	0.8	6.7	5.97	0.112	5.29	0.619
1470.51	-0.1	0.8	6.8	5.84	0.110	5.17	0.605
1540.49	-0.1	0.8	7.0	5.71	0.107	5.06	0.592
<b>1610.47</b>	-0.1	0.8	7.0	<b>5.70</b>	<b>0.107</b>	<b>5.05</b>	<b>0.591</b>
1680.46	-0.1	0.8	7.0	5.70	0.107	5.05	0.591
1750.44	-0.1	0.8	7.0	5.70	0.107	5.05	0.591



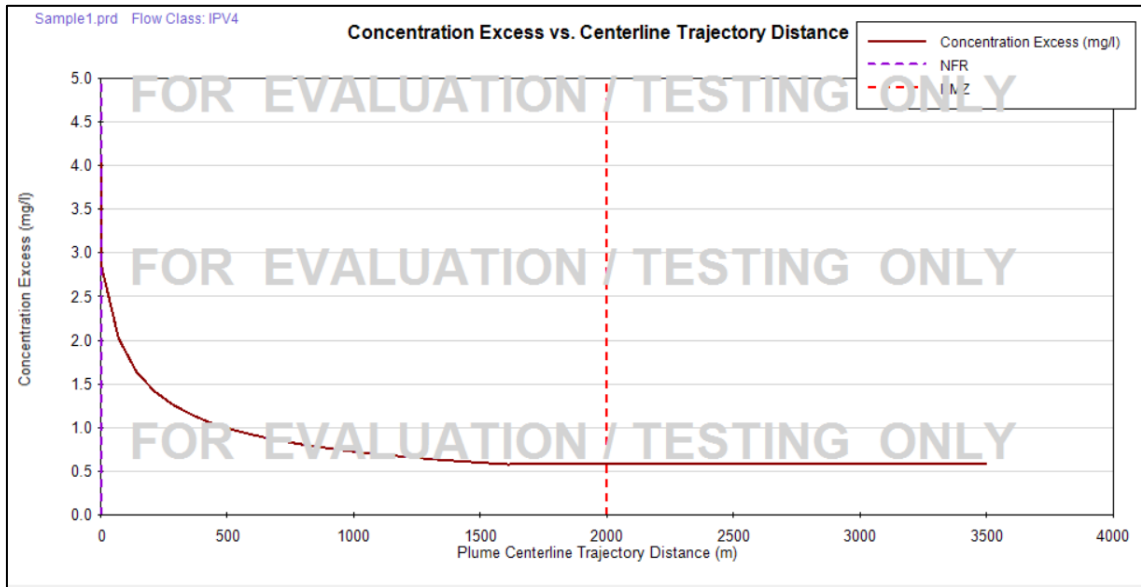
**Figura 66.** Concentración simulada del parámetro aluminio en época húmeda (diciembre-2020) respecto a la distancia aguas abajo



**Figura 67.** Concentración simulada del parámetro arsénico en época húmeda (diciembre-2020) respecto a la distancia aguas abajo



**Figura 68.** Concentración simulada del parámetro boro en época húmeda (diciembre-2020) respecto a la distancia aguas abajo



**Figura 69.** Concentración simulada del parámetro manganeso en época húmeda (diciembre-2020) respecto a la distancia aguas abajo

### Anexo 3: Riesgo ecotoxicológico

**Tabla 37:** Riesgo ecotoxicológico con información del modelamiento CORMIX para el parámetro aluminio

Distancia (m)	Época seca		Época húmeda	
	PEC/PNEC (Oncorhynchus mykiss)	PEC/PNEC (Daphnia magna)	PEC/PNEC (Oncorhynchus mykiss)	PEC/PNEC (Daphnia magna)
0	1331.02	3125.44	1553.52	3647.89
1	951.44	2234.12	1110.01	2606.47
71	857.28	2013.03	1035.68	2431.93
141	782.95	1838.49	976.21	2292.30
211	728.44	1710.50	926.66	2175.94
281	678.89	1594.14	887.02	2082.85
351	644.20	1512.68	847.37	1989.76
421	609.51	1431.23	812.69	1908.31
491	584.74	1373.05	782.95	1838.49
561	559.96	1314.87	758.18	1780.31
631	535.18	1256.69	733.40	1722.13
701	520.32	1221.78	713.58	1675.59
771	500.50	1175.24	693.76	1629.04
841	485.13	1139.17	673.93	1582.50
911	470.76	1105.42	654.11	1535.96
981	457.38	1074.01	639.25	1501.05
1051	445.49	1046.08	624.38	1466.14
1121	434.59	1020.48	614.47	1442.87
1191	424.18	996.04	599.60	1407.96
1261	414.27	972.77	584.74	1373.05
1331	405.35	951.83	574.83	1349.78
1400	396.93	932.05	564.92	1326.51
1470	389.00	913.43	559.96	1314.87
1540	384.54	902.96	559.96	1314.87
1610	384.54	902.96	559.96	1314.87
1680	384.54	902.96	559.96	1314.87
1750	384.54	902.96	559.96	1314.87
2000	384.54	902.96	559.96	1314.87

**Tabla 38:** Riesgo ecotoxicológico con información del modelamiento CORMIX para el parámetro arsénico

Distancia (m)	Época seca		Época húmeda	
	PEC/PNEC ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	PEC/PNEC ( <i>Daphnia magna</i> )	PEC/PNEC ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	PEC/PNEC ( <i>Daphnia magna</i> )
0	4.37	997.47	0.76	173.17
1	3.12	712.37	0.54	123.70
71	2.81	640.83	0.51	115.65
141	2.58	587.18	0.48	109.09
211	2.39	543.96	0.45	103.43
281	2.24	511.18	0.43	98.66
351	2.11	481.37	0.41	94.49
421	2.01	457.53	0.40	90.76
491	1.92	436.66	0.38	87.48
561	1.84	418.78	0.37	84.50
631	1.76	402.38	0.36	81.82
701	1.70	387.48	0.35	79.43
771	1.65	375.56	0.34	77.20
841	1.59	363.64	0.33	75.11
911	1.55	353.20	0.32	73.17
981	1.50	342.77	0.31	71.39
1051	1.46	333.83	0.31	69.75
1121	1.42	324.89	0.30	68.26
1191	1.39	317.44	0.29	66.77
1261	1.36	309.99	0.29	65.42
1331	1.33	304.02	0.28	64.23
1400	1.31	298.06	0.28	63.04
1470	1.28	292.10	0.27	62.44
1540	1.26	287.63	0.27	62.44
1610	1.26	287.63	0.27	62.44
1680	1.26	287.63	0.27	62.44
1750	1.26	287.63	0.27	62.44
2000	1.26	287.63	0.27	62.44



**Tabla 39:** Riesgo ecotoxicológico con información del modelamiento CORMIX para el parámetro boro

Distancia (m)	Época seca		Época húmeda	
	PEC/PNEC (Oncorhynchus mykiss)	PEC/PNEC (Daphnia magna)	PEC/PNEC (Oncorhynchus mykiss)	PEC/PNEC (Daphnia magna)
0	33.62	26.59	3.04	2.40
1	24.05	19.02	2.17	1.71
71	21.58	17.07	2.02	1.60
141	19.77	15.64	1.91	1.51
211	18.35	14.51	1.82	1.44
281	17.21	13.61	1.73	1.37
351	16.26	12.86	1.65	1.31
421	15.40	12.18	1.59	1.26
491	14.74	11.65	1.53	1.21
561	14.07	11.13	1.48	1.17
631	13.59	10.75	1.44	1.14
701	13.12	10.38	1.39	1.10
771	12.64	10.00	1.35	1.07
841	12.26	9.70	1.31	1.04
911	11.88	9.40	1.28	1.02
981	11.60	9.17	1.25	0.99
1051	11.22	8.87	1.23	0.97
1121	10.93	8.65	1.20	0.95
1191	10.74	8.50	1.17	0.92
1261	10.46	8.27	1.15	0.91
1331	10.27	8.12	1.12	0.89
1400	9.98	7.89	1.10	0.87
1470	9.79	7.74	1.09	0.86
1540	9.70	7.67	1.09	0.86
1610	9.70	7.67	1.09	0.86
1680	9.70	7.67	1.09	0.86
1750	9.70	7.67	1.09	0.86
2000	9.70	7.67	1.09	0.86

**Tabla 40:** Riesgo ecotoxicológico con información del modelamiento CORMIX para el parámetro manganeso

Distancia (m)	Época seca		Época húmeda	
	PEC/PNEC (Oncorhynchus mykiss)	PEC/PNEC (Daphnia magna)	PEC/PNEC (Oncorhynchus mykiss)	PEC/PNEC (Daphnia magna)
0	57.79	148.34	45.79	117.54
1	41.25	105.88	32.71	83.96
71	37.08	95.19	30.63	78.61
141	33.96	87.17	28.75	73.80
211	31.46	80.75	27.29	70.05
281	29.58	75.94	26.04	66.84
351	27.92	71.66	25.00	64.17
421	26.46	67.91	23.96	61.50
491	25.42	65.24	23.13	59.36
561	24.17	62.03	22.29	57.22
631	23.33	59.89	21.67	55.61
701	22.50	57.75	21.04	54.01
771	21.67	55.61	20.40	52.35
841	21.04	54.01	19.85	50.96
911	20.44	52.46	19.35	49.68
981	19.88	51.02	18.88	48.45
1051	19.33	49.63	18.44	47.33
1121	18.85	48.40	18.04	46.31
1191	18.42	47.27	17.67	45.35
1261	18.00	46.20	17.31	44.44
1331	17.60	45.19	16.96	43.53
1400	17.23	44.22	16.65	42.73
1470	16.90	43.37	16.52	42.41
1540	16.69	42.83	16.52	42.41
1610	16.69	42.83	16.52	42.41
1680	16.69	42.83	16.52	42.41
1750	16.69	42.83	16.52	42.41
2000	16.69	42.83	16.52	42.41