

**Determinación del impacto de los usos  
del suelo para identificar la calidad del agua  
en un tramo del Río Tune del municipio de  
Palermo, departamento del Huila.**

**Camila Cerquera Valderrama**

**Natali García Betancurt**

**Paola Andrea Ramírez Quiroga**

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Especialistas en Sistemas de Información Geográfica

Director (a):

PhD., Alberto Boada Rodríguez

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2024

---

## Resumen

El agua es un elemento fundamental para el desarrollo de los asentamientos humanos. Por lo tanto, es crucial garantizar la calidad de las fuentes hídricas, ya que estas abastecen tanto el consumo humano como las actividades productivas. En el presente trabajo se identificaron las principales actividades económicas en el área de influencia del río Tune, ubicado en el municipio de Palermo, departamento del Huila, con el objetivo de evaluar la calidad del agua en la zona de estudio y determinar el impacto de las actividades productivas en los índices de calidad del agua, que incluyen ICA, ICOMI, ICOMO, ICOSUS, ICOpH, IPPH y BMWP. Durante el desarrollo del proyecto se identificaron los usuarios beneficiarios del río Tune, y se estableció una red de monitoreo de la calidad del agua en el cauce principal del río, abarcando desde el kilómetro 15 hasta su desembocadura en el río Baché, donde se recolectaron datos de calidad del agua tanto en temporada seca como en temporada de lluvias.

Los resultados indicaron que, durante la temporada seca, no existen diferencias significativas en los índices de calidad del agua para cada tipo de actividad, lo que sugiere un impacto mínimo. Esto podría indicar que la calidad del agua está afectada por variables externas no contempladas en este estudio. Por otro lado, en la temporada de lluvias, se determinó que las actividades agrícolas y pecuarias afectan negativamente los niveles del índice BMWP, principalmente debido a los vertimientos directos y difusos de agua contaminada por agroquímicos y estiércol en las zonas ribereñas.

**Palabras claves:** Calidad de agua, Actividad económica, análisis espacial, índices de calidad, contaminación hídrica

## Abstract

Water is a fundamental element for the development of human settlements. Therefore, it is crucial to ensure the quality of water sources, as they supply both human consumption and productive activities. In this study, the main economic activities in the area of influence of the Tune River, located in the municipality of Palermo, department of Huila, were identified to evaluate the water quality in the study area and determine the impact of productive activities on water quality indices, including ICA, ICOMI, ICOMO, ICOSUS, ICOpH, IPPH, and BMWP. During the development of the project, the beneficiaries of the Tune River were identified, and a water quality monitoring network was established in the river's main course, covering from kilometer 15 to its confluence with the Baché River, where water quality data were collected for both the dry and rainy seasons.

The results indicated that during the dry season, there are no significant differences in the water quality indices for each type of activity, suggesting a minimal impact. This could indicate that water quality is affected by external variables not considered in this study. On the other hand, during the rainy season, agricultural and livestock activities were found to negatively affect the levels of the BMWP index, mainly due to the direct and diffuse discharges of water contaminated by agrochemicals and manure in the riparian zones.

**Keywords: Water quality, economic activity, spatial analysis, quality indices, water pollution**

---

# Contenido

	<b>Pág.</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>19</b>
1.1 Descripción del área problemática .....	19
1.2 Formulación del problema .....	21
1.3 Justificación.....	23
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>26</b>
2.1 Objetivo general .....	26
2.2 Objetivos específicos.....	26
<b>3. ANTECEDENTES.....</b>	<b>27</b>
<b>4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL .....</b>	<b>37</b>
4.1 Leyes .....	37
4.1.1 Ley 23 de 1973.....	37
4.1.2 Ley 9 de 1979.....	37
4.1.3 Ley 79 de 1986.....	38
4.1.4 Ley 99 de 1993.....	38
4.1.5 Ley 373 de 1997.....	39
4.2 Decretos.....	39
4.2.1 Decreto 2811 de 1974 .....	39
4.2.2 Decreto 1594 de 1984: .....	40
4.2.3 Decreto 3930 del 2010 .....	40
4.2.4 Decreto 2667 de 2012 .....	40
4.2.5 Decreto 1076 de 2015 .....	41
4.3 Resoluciones.....	42
4.3.1 Resolución 2115 de 2007:.....	42
4.3.2 Resolución 1514 de 2012.....	42

---

4.3.3	Resolución 1207 de 2014.....	43
4.3.4	Resolución 631 de 2015.....	43
4.3.5	Resolución 853 de 2022.....	44
<b>5.</b>	<b>REFERENTE TEÓRICO .....</b>	<b>45</b>
5.1	Calidad del agua.....	45
5.1.1	Contaminación Hídrica .....	45
5.1.2	Índices de calidad de agua .....	46
5.1.3	Parámetros fisicoquímicos.....	47
5.1.4	Índices hidrobiológicos.....	49
5.1.5	Cargas contaminantes .....	50
5.1.6	Disponibilidad de agua .....	51
5.2	Análisis espacial.....	52
5.2.1	Procesamiento de datos .....	55
5.2.2	Imágenes satelitales .....	56
5.2.3	Sistema de información Geográfica – SIG .....	57
5.3	Uso del suelo.....	59
5.3.1	Actividades económicas.....	61
5.3.2	Cobertura vegetal.....	62
<b>6.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>64</b>
6.1	Enfoque metodológico .....	64
6.2	Tipo de estudio.....	64
6.3	Procedimiento.....	65
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>127</b>
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>239</b>
<b>9.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>244</b>
<b>10.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>245</b>

## Lista de Tablas

Tabla 1. Actividad productiva por subsector económico primario.....	76
Tabla 2. Identificación de tipo de actividad.....	77
Tabla 3. Actividades Productivas de la Zona de estudio .....	78
Tabla 4. Parámetros físicos, químicos, microbiológicos e hidrobiológicos para los monitoreos .	85
Tabla 5. Preparación de Recipientes, Materiales y Equipos.....	89
Tabla 6. Preservación y almacenamiento de muestras de agua .....	92
Tabla 7. Especificaciones metodológicas para la toma de muestras .....	99
Tabla 8. Método de análisis variables Hidrobiológicas.....	100
Tabla 9. Clases de Aguas de acuerdo con la Conductividad Eléctrica .....	102
Tabla 10. Niveles Tóxicos de Cloruros en aguas para riego.....	103
Tabla 11. Clasificación de la calidad del agua según los valores que toma el ICA.....	109
Tabla 12. Categorías de valores de los índices de Contaminación ICOs.....	110
Tabla 13. Factores de ponderación para la determinación del ICOMO .....	111
Tabla 14. Factores de ponderación para la determinación del ICOMI.....	112
Tabla 15. Puntuación dada para las diferentes familias de MIAb en el índice BMWP/Colombia .....	113
Tabla 16. Clasificación del BMWP/Col .....	114
Tabla 17. Interpretación de los valores del IPPH .....	115
Tabla 18. Campos de recolección de información.....	128
Tabla 19. Principales fuentes hídricas de la zona de estudio.....	132
Tabla 20. Usuarios Eliminados de la base de datos .....	133
Tabla 21. Actividades productivas en la zona de estudio .....	134
Tabla 22. Descripción del tramo objeto de análisis .....	138
Tabla 23. Principales afluentes de la zona media y baja del Rio Tune.....	140
Tabla 24. Grupos establecidos para la clasificación de vertimientos .....	140
Tabla 25. Descripción punto de monitoreo C01 .....	140
Tabla 26. Descripción punto de monitoreo C02 .....	141

---

Tabla 27. Descripción punto de monitoreo C03 .....	142
Tabla 28. Descripción punto de monitoreo C04 .....	142
Tabla 29. Descripción punto de monitoreo C05 .....	143
Tabla 30. Descripción punto de monitoreo C06 .....	143
Tabla 31. Descripción punto de monitoreo C07 .....	144
Tabla 32. Descripción punto de monitoreo C08 .....	144
Tabla 33. Descripción punto de monitoreo C09 .....	145
Tabla 34. Descripción punto de monitoreo C10 .....	145
Tabla 35. Descripción punto de monitoreo C11 .....	146
Tabla 36. Descripción punto de monitoreo C12 .....	146
Tabla 37. Descripción punto de monitoreo A01 .....	147
Tabla 38. Descripción punto de monitoreo A02.....	147
Tabla 39. Descripción punto de monitoreo A03.....	148
Tabla 40. Descripción punto de monitoreo A04.....	148
Tabla 41. Descripción punto de monitoreo A05.....	149
Tabla 42. Descripción punto de monitoreo A06.....	149
Tabla 43. Descripción punto de monitoreo A07.....	150
Tabla 44. Descripción punto de monitoreo A08.....	150
Tabla 45. Localización puntos de monitoreo definidos en el estudio.....	151
Tabla 46. Datos In Situ Estación C01 - Río Tune.....	154
Tabla 47. Datos In Situ Estación C02 - Río Tune.....	155
Tabla 48. Datos In Situ Estación C03 - Río Tune.....	155
Tabla 49. Datos In Situ Estación C04 - Río Tune.....	156
Tabla 50. Datos In Situ Estación C05 - Río Tune.....	156
Tabla 51. Datos In Situ Estación A01 – Quebrada San Juan.....	157
Tabla 52. Datos In Situ Estación A02 – Quebrada El Nilo .....	157
Tabla 53. Datos In Situ Estación A03 – Quebrada La Guagua .....	158
Tabla 54. Datos In Situ Estación A04 – Quebrada La Guagua .....	158
Tabla 55. Resultados Río Tune y afluentes principales, Campaña 1 .....	159
Tabla 56. Resultados Río Tune y afluentes principales, Campaña 2.....	160

---

Tabla 57. Resultados de laboratorio del Punto C10.....	162
Tabla 58. Conversión de mg/L a meq/L Aniones y Cationes – Campaña 1 .....	164
Tabla 59. Conversión de mg/L a meq/L Aniones y Cationes – Campaña 2 .....	165
Tabla 60. Conductividad del Río Tune y sus principales afluentes – Campaña 1 .....	166
Tabla 61. Conductividad del Río Tune y sus principales afluentes – Campaña 2.....	167
Tabla 62. Contenido de Cloruros – Río Tune y Afluentes principales – campaña 1.....	169
Tabla 63. Contenido de Cloruros – Río Tune y Afluentes principales – campaña 2.....	169
Tabla 64. Resultados del Img Río Tune y afluentes principales – campaña 1 .....	170
Tabla 65. Resultados del Img Río Tune y afluentes principales – campaña 2 .....	170
Tabla 66. Evaluación normativa para uso doméstico y consumo humano – Qda. La Guagua con Resolución N.º 2115 de 2007.....	171
Tabla 67. Índice de calidad de agua (ICA IDEAM) Río Tune -"campaña 1" .....	174
Tabla 68. Índice de calidad de agua (ICA IDEAM) Río Tune "Campaña 2".....	175
Tabla 69. Índice de calidad de agua (ICA IDEAM) – Afluentes "Campaña 1" .....	177
Tabla 70. Índice de calidad de agua (ICA IDEAM) – Afluentes "Campaña 2" .....	178
Tabla 71. Índice de calidad de agua (ICA IDEAM) Río Tune, principales afluentes "campaña 1 y 2".....	179
Tabla 72. Índice de calidad de agua ICOMO "campaña 1" .....	182
Tabla 73. Índice de calidad de agua ICOMO "campaña 2" .....	183
Tabla 74. Valores del índice de contaminación - ICOMO “Campaña 1 y 2” .....	184
Tabla 75. Índice de Contaminación por Mineralización ICOMI "Campaña 1" .....	186
Tabla 76. Índice de Contaminación por Mineralización ICOMI "Campaña 2" .....	187
Tabla 77. Valores del índice de contaminación - ICOMI “Campaña 1 y 2” .....	188
Tabla 78. Índice de Contaminación por Sólidos suspendidos - ICOSUS “Campaña 1” .....	191
Tabla 79. Índice de Contaminación por Sólidos suspendidos - ICOSUS “Campaña 2” .....	191
Tabla 80. Valores del índice de contaminación - ICOSUS “Campaña 1 y 2”.....	192
Tabla 81. Índice de contaminación por pH ICOPH “Campaña 1” .....	193
Tabla 82. Índice de contaminación por pH ICOPH “Campaña 2” .....	194
Tabla 83. Valores del índice de contaminación ICOPH “Campaña 1 y 2”.....	195

Tabla 84. Resultados del índice BMWP registrado en el Río Tune y sus principales afluentes en la campaña 1 y 2 .....	197
Tabla 85. Resultados del Índice Promedio Ponderado Hidrobiológico (IPPH) campaña 1 y campaña 2 .....	198
Tabla 86. Resultados de Prueba de Shapiro Wilks .....	200
Tabla 87. Componentes Importantes del ACP campaña 2 .....	217
Tabla 88. Componentes Importantes del ACP campaña 2 .....	218
Tabla 89. Error Cuadrático Medio (RMSE) .....	221
Tabla 90. Resultados ANOVA campaña 1 .....	236
Tabla 91. Resultados Prueba de Tukey para índice ICOMI .....	237
Tabla 92. Tabla 93. Resultados ANOVA campaña 2 .....	237
Tabla 94. Resultados Prueba de Tukey para índice BMWP .....	238

## Lista de Graficas

Gráfica 1. Predios por propietario.....	132
Gráfica 2. Predios Productivos por Subsectores .....	135
Gráfica 3. Histograma Parámetro ICA-IDEAM campaña 1 de monitoreo.....	201
Gráfica 4. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICA-IDEAM campaña 1 de monitoreo.....	202
Gráfica 5. Histograma Parámetro ICA-IDEAM campaña 2 de monitoreo.....	203
Gráfica 6 Gráfico QQ-Plot Parámetro ICA-IDEAM campaña 2 de monitoreo.....	203
Gráfica 7. Histograma Parámetro ICOMI campaña 1 de monitoreo. ....	204
Gráfica 8. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOMI campaña 1 de monitoreo. ....	204
Gráfica 9. Histograma Parámetro ICOMI campaña 2 de monitoreo. ....	205
Gráfica 10. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOMI campaña 2 de monitoreo. ....	205
Gráfica 11. Histograma Parámetro ICOMO campaña 1 de monitoreo.....	206
Gráfica 12. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOMO campaña 1 de monitoreo.....	207
Gráfica 13. Histograma Parámetro ICOMO campaña 2 de monitoreo.....	207
Gráfica 14. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOMO campaña 2 de monitoreo.....	208
Gráfica 15. Histograma Parámetro ICOSUS campaña 1 de monitoreo.....	209
Gráfica 16. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOSUS campaña 1 de monitoreo.....	209
Gráfica 17. Histograma Parámetro ICOSUS campaña 2 de monitoreo.....	210
Gráfica 18. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOSUS campaña 2 de monitoreo.....	210
Gráfica 19. Histograma Parámetro ICOpH campaña 1 de monitoreo. ....	211
Gráfica 20. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOpH campaña 1 de monitoreo. ....	211
Gráfica 21. Histograma Parámetro ICOpH campaña 2 de monitoreo. ....	212
Gráfica 22. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOpH campaña 2 de monitoreo. ....	212
Gráfica 23. Histograma Parámetro BMWP campaña 1 de monitoreo.....	213
Gráfica 24. Gráfico QQ-Plot Parámetro BMWP campaña 1 de monitoreo.....	213
Gráfica 25. Histograma Parámetro BMWP campaña 2 de monitoreo.....	214
Gráfica 26. Gráfico QQ-Plot Parámetro BMWP campaña 2 de monitoreo.....	214
Gráfica 27. Histograma Parámetro IPPH campaña 1 de monitoreo. ....	215

Gráfica 28. Gráfico QQ-Plot Parámetro IPPH campaña 1 de monitoreo. ....	215
Gráfica 29. Histograma Parámetro IPPH campaña 2 de monitoreo. ....	216
Gráfica 30. Gráfico QQ-Plot Parámetro IPPH campaña 2 de monitoreo. ....	216
Gráfica 31. ACP campaña de monitoreo 1 .....	219
Gráfica 32. ACP Campaña de monitoreo 2 .....	220

## Lista de figuras

Figura 1. Localización del área de estudio.....	66
Figura 2. Planchas escala 1:25.000 IGAC .....	68
Figura 3. Cuenca Hidrográfica del Rio Tune.....	128
Figura 4. Predios Encuestados en la zona de estudio.....	130
Figura 5. Delimitación de la Zona de Estudio .....	131
Figura 6. Predios productivos de la zona de estudio.....	133
Figura 7. Distribución espacial de los subsectores productivos .....	135
Figura 8. Tramo objeto de análisis.....	138
Figura 9. Puntos de monitoreo seleccionados a lo largo del área de estudio.....	153
Figura 10. Distribución Espacial Índice ICA-IDEAM .....	222
Figura 11. Distribución Espacial Índice ICOMI.....	223
Figura 12. Distribución Espacial Índice ICOMO .....	224
Figura 13. Distribución Espacial Índice ICOSUS .....	225
Figura 14. Distribución Espacial Índice ICOpH.....	226
Figura 15. Distribución Espacial Índice IPPH.....	227
Figura 16. Distribución Espacial Índice BMWP .....	228
Figura 17. Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua ICA-IDEAM	229
Figura 18. Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua ICOMI .....	230
Figura 19, Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua ICOMO.....	231
Figura 20. Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua ICOpH .....	232
Figura 21. Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua ICOSUS .....	233
Figura 22. Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua IPPH.....	234
Figura 23. Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua BMWP .....	235

## Lista de Ilustraciones

	<b>Pág.</b>
Ilustración 1. Clasificación de las herramientas técnicas utilizadas para el análisis espacial.....	54
Ilustración 2. Diagrama de flujo del proyecto .....	65
Ilustración 3. Insumos de información.....	67

## Lista de Imágenes

Imagen 1. Herramientas de hidrología en ArcGis Pro.....	69
Imagen 2. Base de datos encuestas realizadas .....	70
Imagen 3. Herramienta Select By Location de ArcGIS Pro .....	71
Imagen 4. Selección de los predios encuestados .....	72
Imagen 5. Capa predial de usuarios del rio Tune.....	72
Imagen 6. Código en R para Test de Normalidad de Shapiro Wilks .....	117
Imagen 7. Configuración de Histograma en ArcGIS Pro .....	118
Imagen 8. Análisis de Componentes Principales en R .....	119
Imagen 9. Generación de Grafica Biplot en R.....	119
Imagen 10. Código para calculo RMSE de cada orden polinomial en R .....	121
Imagen 11. Aplicación Método Kriging Ordinario en ArcGis Pro.....	122
Imagen 12. Configuración Herramienta Zonal Statistics as Table .....	123
Imagen 13. Código en R Studio para ANOVA.....	124
Imagen 14. Código en R Studio para Prueba de Tukey .....	125

## Lista de símbolos y abreviaturas

- **ACC:** Análisis Canónico de Correspondencia
- **ACP:** Análisis de Componentes Principales
- **APHA:** American Public Health Association
- **AWWA:** Water Environment Federation
- **BMWP/Col:** Índice Biological Monitoring Working Party- Colombia
- **C.E:** Compensación ecológica.
- **CE:** Conductividad específica
- **CIU:** Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas.
- **COT:** carbono orgánico Total
- **CPC:** Clasificación Central de Productos
- **CUSUM:** Suma acumulativa.
- **CVC:** Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
- **DBO<sub>5</sub>:** Demanda Biológica de Oxígeno
- **DO:** Oxígeno Disuelto
- **DQO:** demanda química de oxígeno
- **EWMA:** Promedio móvil ponderado exponencialmente.
- **ICA:** Índice de calidad del agua
- **ICO'S:** Índices of contamination
- **ICOMI:** Índice de contaminación por Mineralización

- **ICOMO:** Índice de contaminación de materia orgánica
- **ICOSUS:** Índice de contaminación por Sólidos Suspendidos Totales
- **IDEAM:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
- **IPPH:** Índice Promedio Ponderado Hidrobiológico
- **NPI:** Índice de contaminación de Nemerow
- **pH:** Potencial de hidrógeno
- **PMA:** Plan de manejo ambiental.
- **PORH:** Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico
- **SIG:** Sistema de información geográfica.
- **SIOC:** Desempeño de las Organizaciones de Cadena
- **SST:** Sólidos Suspendidos Totales
- **WEF:** Water Environment Federation
- **WPI:** Índice de contaminación del agua
- **WQI:** Índice de calidad del agua.

# 1. Planteamiento del problema de investigación

## 1.1 Descripción del área problemática

El agua es un recurso de gran importancia para la conservación de los ecosistemas, para la regulación de la temperatura y fundamental para el desarrollo de la humanidad (Nuño-Velasco et al., 2022). A pesar de cumplir un papel tan importante para la vida, la calidad del agua se ha visto afectada a nivel mundial por diversos factores como el vertimiento de los desechos industriales, agrícolas y domésticos; ya que estos carecen del adecuado tratamiento de las aguas antes de su vertimiento sobre las fuentes hídricas (Calixto et al., 2023; Ruíz-Sevilla & Ortiz-Paniagua, 2021). En el sector agrícola se destacan las fuentes de contaminación difusas por el uso indiscriminado de productos químicos y agotamiento del suelo, lo cual ocasiona que estas sustancias terminen en los cuerpos hídricos debido a la escorrentía del agua (FAO, 2018), de igual manera, Se conoce que aproximadamente el 70% del consumo mundial de agua dulce se concentra en el sector agropecuario, el 20 % en el sector industrial y el 10 % restante se utiliza para consumo humano (IAEA, 2023; Nuño-Velasco et al., 2022).

El deterioro de la calidad y disponibilidad del agua en las últimas décadas es un problema global de gran relevancia. El aumento de la población ha generado una creciente demanda de agua potable y alimentos para los próximos años (Nuño-Velasco et al., 2022). Para abordar esta alta demanda, se ha recurrido a la expansión de la frontera agrícola, lo que ha contribuido al deterioro de áreas forestales y del suelo debido a la expansión urbana,

---

impactando negativamente en el ciclo del agua y reduciendo su disponibilidad de manera significativa (FAO, 2018).

Colombia, no es ajeno a esta situación, en el país el agua es empleada para abastecimiento de agua potable, como también para suministro de actividades productivas como agricultura, ganadería, pesca, minería e industria (Donato-Rondón, 2022). A pesar de contar con normativas de regulación, en el país se presenta un seguimiento y control deficiente por parte de las entidades gubernamentales y corporaciones ambientales para garantizar el cumplimiento de estas normas, lo cual, ha conllevado al deterioro de la calidad y disminución de las fuentes hídricas del país (IDEAM, 2023).

Finalmente, es importante mencionar que, la presencia de los entes ambientales y gubernamentales es escasa, por lo cual la implementación de prácticas de conservación del agua es limitada. En la zona rural del municipio de Palermo, se presentan altos niveles de uso del recurso hídrico en temporadas de sequía, como fue reportado en la Evaluación regional, donde se registró que el Rio Tune en la zona alta presenta un índice de uso de agua alto, mientras que la zona baja del rio presento un estado crítico en la calidad del agua presentando así una alta vulnerabilidad para los años hidrológicos secos (CAM, 2016)

## 1.2 Formulación del problema

La calidad del agua determina en gran medida la salud de los ecosistemas y el bienestar humano, precisa el estado fisicoquímico como microbiológico del recurso hídrico. Sin embargo el deterioro de la calidad del agua se ha convertido en un desafío global de gran magnitud, los cuerpos de agua superficiales han sido históricamente utilizados como receptores de aguas residuales domésticas e industriales, lo que ha contribuido a un acelerado deterioro de su calidad (Ureta Valdez, Méndez, & Cazar, 2019). Los ríos desempeñan funciones clave en el desarrollo económico y social, la salud pública, la protección ambiental y el desarrollo agrícola (Wang et al., 2023).

Según informe de la ONU-Hábitat & OMS, (2021) revelo que en el año 2020 aproximadamente el 44% del agua residual doméstica a nivel mundial no contó con un proceso de tratamiento antes de ser vertidas en las diferentes fuentes hídricas, generando así variación en las características fisicoquímicas de los cuerpos hídricos. Según la FAO, (2022), en los últimos 18 años la disponibilidad hídrica en el mundo disminuyó en un 20% como consecuencia de la sobre explotación de los recursos hídricos y la carencia de sistemas de tratamiento empleados para el procesamiento del agua residual. Los principales factores causantes del consumo desmedido del agua es el crecimiento poblacional y desarrollo económico (Koncagül & Connor, 2023).

El Estudio Nacional del Agua – ENA para el año 2021, revela que las fuentes hídricas que abastecen de agua a los municipios de Colombia presentan distintos grados de contaminación. Los monitoreos realizados por el IDEAM en el año 2021 identificaron 42 puntos

de monitoreo dentro de la calidad del agua que se describe como “mala” de un total de 162 puntos que hay a nivel nacional. Entre las fuentes afectadas se encuentran corrientes como el río Bogotá, Magdalena, Lebrija, Opon, Pamplonita, Negro, Sogamoso, Villeta, Guayurubia, Guejar, La Vieja y Lagunilla (IDEAM, 2023).

Los principales factores identificados como causantes de la contaminación del agua en el país son las actividades extractivas mineras, la industria agrícola y el crecimiento de las zonas urbanas. La carga contaminante de estas actividades se debe, al uso de compuestos químicos para facilitar los procesos productivos; en el caso de la minería se emplea mercurio para la extracción de minerales como el oro. Asimismo, en la actividad agrícola, el uso excesivo de agroquímicos para controlar plagas y mejorar el rendimiento, también contribuye a la contaminación. Estos vertimientos son transportados por escorrentía a los cuerpos de agua, afectando no solo la vida acuática, sino también exponiendo a los seres humanos a sustancias tóxicas a través del consumo de agua. (Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA, 2017).

Los Índices de Calidad Del Agua - ICA son una herramienta valiosa para evaluar el estado de los recursos hídricos y para guiar la toma de decisiones en materia de políticas públicas y seguimiento de su impacto. Estos índices permiten describir la condición general de un cuerpo de agua a partir de variables físicas, químicas y microbiológicas. No obstante, es importante resaltar que el alcance de los índices de calidad puede resultar insuficientes, puesto que no se logra identificar de forma específica el origen de la contaminación hídrica (Iglesias & Basílico, 2022).

Es importante reconocer que la calidad del agua es variable en el tiempo y en el espacio; estudios como el de Wang et al., (2023), han demostrado que el uso del suelo influye en la

variación de la calidad del agua de los ríos. De igual manera, Zhang et al., (2019), encontraron que existe una correlación positiva entre la proporción de la superficie afectada por factores antropogénicos, como tierras de cultivo y áreas urbanas con la contaminación del agua.

Por tal razón es importante identificar los factores que deterioran la calidad del agua en las fuentes hídricas, para de esta manera establecer medidas de mitigación y garantizar agua apta para las diferentes actividades. En este sentido, el presente proyecto busca identificar cual es el impacto de las actividades productivas en la calidad del agua del río Tune, municipio de Palermo, departamento del Huila, en un tramo comprendido desde el 15,64 km – hasta su desembocadura en el río bache.

### **1.3 Justificación**

El uso inconsciente del recurso hídrico ha ocasionado el deterioro de la calidad del agua del Río Tune localizado en el municipio de Palermo, departamento del Huila. Esta situación se estima que principalmente es ocasionada por los vertimientos y captaciones informales realizadas sobre el cauce de la misma. Por esta razón, la variación de las propiedades fisicoquímicas de la fuente hídrica no solo conlleva a problemas ambientales, si no también perjudica de manera considerable las actividades productivas y la calidad de vida de los beneficiarios del agua.

Es por esto que, para garantizar la disponibilidad de agua apta para el suministro requerido para el desarrollo de las líneas productivas de la zona, es necesario identificar los actores puntuales que afectan las características del agua del río; de esta manera, se busca establecer ~~una~~ herramientas que permitan a las autoridades locales y ambientales implementar

---

medidas de control y educación que promuevan la conservación del recurso hídrico y mejorar la calidad de vida de los residentes de la subcuenca.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario la elaboración de estudios que permiten establecer el estado actual de las fuentes hídricas, siendo una de ellas, el estudio por medio de índices de calidad del agua, los cuales son usados para sintetizar una gran cantidad de información de muchas variables o indicadores, que se transforman en una sola variable y que es fácil de entender e interpretar (Calvo-Brenes, 2019). A su vez, es importante tener presente, que estos índices incluyen varios parámetros, en su mayoría fisicoquímicos, y en algunos casos microbiológicos, los cuales constituyen una de las mejores herramientas para calcular el potencial de contaminación de manera comprensiva (Fernández-Rodríguez & Guardado-Lacaba, 2021).

Con el desarrollo de este estudio, se pretende contar como beneficiarios directos la comunidad que integra la subcuenca del Río Tune, como lo son los municipios de Palermo y Teruel, en el departamento del Huila. La investigación contribuirá en la concientización de la comunidad de la zona y la implementación de prácticas de conservación sostenibles del recurso hídrico que contribuyan con la reducción de las cargas contaminantes del agua del Río.

Finalmente, se espera a su vez, mejorar el desarrollo y calidad de vida de las poblaciones compuesta por agricultores, piscícolas y ganaderos, quienes podrán aumentar las producciones agropecuarias, mejorando su desarrollo de la mano con el cumplimiento de estándares y regulaciones para la conservación del agua, contribuyendo en la conservación de la biodiversidad y la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos, mitigando riesgos ambientales. Los datos

derivados de la presente investigación son valiosos para comprender la dinámica de los recursos hídricos y los impactos generados por las actividades antrópicas.

## **2.Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar el impacto de los usos del suelo para identificar la calidad del agua del Río Tune del municipio de Palermo, departamento del Huila en el tramo comprendido desde el kilómetro 15 hasta su desembocadura en el río Bache.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Determinar la zona con mayor influencia en la cuenca del rio Tune para el estudio de las actividades económicas.
- Determinar la carga contaminante que incide en las características del agua del rio Tune debido al uso del suelo.
- Identificar los sectores que generan mayor deterioro de la calidad del agua del Río Tune.

### 3. Antecedentes

De acuerdo con Strokhal & Kroeze, (2020) los sistemas hídricos en todo el mundo se encuentran bajo presión principalmente debido a la contaminación del agua. Este fenómeno está asociado con factores como el crecimiento demográfico, la producción de alimentos, el desarrollo económico y la urbanización. A medida que las ciudades se expanden, la demanda de agua potable aumenta vertiginosamente, sin embargo, esta demanda no va acompañada de un manejo adecuado de las aguas residuales y los desechos industriales, lo que intensifica la contaminación de los recursos hídricos. Gran parte de los contaminantes que se encuentran en los ríos, lagos y mares, provienen de sistemas de alcantarillado deficientes.

En Colombia, la situación del agua no dista mucho de la realidad global. El deterioro del recurso hídrico está asociado principalmente con vertimientos de aguas residuales domésticas, industriales, producción agrícola y ganadera, así como actividades relacionadas con el transporte terrestre, fluvial y marítimo de sustancias peligrosas o petróleo, aguas de extracción minera y residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios o directamente en cuerpos de agua, como lo señalan Cerón-Vivas & Peñuela Mesa, (2024) una de las principales fuentes de contaminación farmacéutica en el país son las descargas de aguas residuales crudas o tratadas provenientes de zonas urbanas, agrícolas o industriales. Estas aguas al llegar a los cuerpos de agua pueden representar un riesgo para la salud de los ecosistemas acuáticos.

Razón por la cual, los índices de calidad del agua –ICA– surgen como una herramienta simple para la evaluación del recurso hídrico fundamental en procesos decisorios de políticas públicas y en el seguimiento de sus impactos. Sin embargo, los índices de calidad del agua -

ICA no son la única herramienta que permite evaluar la calidad del recurso hídrico, pues Conceição et al., (2018), en su estudio cuantificó la calidad del agua en un tramo urbano de los ríos Passaúana y Piraquara a través de la identificación de herramientas de control estadístico del proceso para el monitoreo de la calidad del agua. Para el estudio emplearon tres gráficos de control, el Shewhart individual, el promedio móvil ponderado exponencialmente (EWMA) y la suma acumulativa (CUSUM), determinando que la reducción en la calidad de los parámetros analizados está condicionada por el crecimiento demográfico y el desarrollo industrial de la región. De la investigación se resalta que la metodología guarda relación con el estudio a realizar, debido a que la base de datos es producto de un trabajo de campo, de recopilación de información a través de puntos de monitoreo; datos de entrada que se almacenan y gestionan fácilmente a través de su implementación con el uso de las herramientas SIG, obteniendo datos de salida que se pueden almacenar, administrar y analizar. Por consiguiente, los datos generados de manera efectiva son resultados realistas y de fácil interpretación, el estudio es útil para comprender los efectos de la disminución en los índices de la calidad del agua, así como para evaluar los puntos críticos de mayor impacto en los cuerpos de agua superficial.

Por otro lado, en el estudio realizado por Castañeda Villanueva et al., (2019), se llevó a cabo el diagnóstico de la calidad de las aguas superficiales en la región de los Altos Norte de Jalisco en México, con el objetivo de evaluar paramétricamente la calidad del agua superficial a través del análisis de su comportamiento y tendencia mediante información geográfica, como rasgos hidrológicos de la región y por medio de recorridos de campo, estableciendo 20 puntos de análisis y muestreo. Para determinar la calidad del agua emplearon una sonda Hydrolab surveyor, modelo DS5X de la marca OTT Hydromet, evaluando parámetros en campo, según la

precisión y resolución especificada por el fabricante del equipo, las características que se cuantifican en las muestras de agua fueron la Conductividad específica - CE, Cloruros, Potencial de reducción de Oxígeno, cantidad de Oxígeno Disuelto y el Nitrógeno Amoniacal. Del estudio se resalta la afinidad con el proyecto a realizar en la determinación del grado de contaminación presente en los cuerpos de agua.

A su vez, según el estudio de Fornari et al., (2018), el impacto de los residuos urbanos e industriales del municipio de Marau en la calidad del agua del Río Marau, se analizó mediante el monitoreo de cuatro puntos de muestreo del agua y un punto de recolección de efluentes utilizando análisis fisicoquímicos para la evaluación, considerando parámetros, normas y lineamientos establecidos en las resoluciones y directrices ambientales por parte de las autoridades públicas. Entre las conclusiones de Fornari et al., (2018), se resalta que la falta de supervisión por parte de los organismos públicos y la falta de redes de recolección y tratamiento de aguas residuales producto de distintas actividades industriales, son los principales factores que agravan la problemática y contribuyen con el aumento de la contaminación de los ríos, como consecuencia de la ocupación del suelo urbano producto de las aglomeraciones urbanas.

Su estudio es útil para comprender que, si bien el tratamiento de efluentes es responsabilidad de las autoridades de la región, la población cumple un papel fundamental en la mitigación del problema, puesto que la falta de participación social y de interés de la población en la solución de los problemas relacionados con el mal uso y la disminución de la calidad del agua, es producto de una falta de control y una gestión ambiental deficiente debido a la falta de pertenencia de la población al entorno en el que vive. Por lo tanto, debe intervenir y concientizar a la población sobre los riesgos ocasionados por sus actividades en el medio ambiente, por lo que

tienen derecho a ser informados y educados para interferir en la gestión ambiental y poder desarrollar a futuro enfoques participativos, en la planificación y optimización de programas de monitoreo de la calidad del agua. De ahí que, cuanta más contaminación presente un cuerpo de agua, resulta más difícil y costoso su tratamiento y en ocasiones ineficiente y por ende acarreará que el servicio sea más elevado para el consumidor. En consecuencia, es inminente que los estudios a desarrollar contribuyan en la determinación de elementos para la gestión sostenible de los recursos hídricos, teniendo en cuenta los actores involucrados (agricultores, industriales, y ciudadanos), dado que, de la calidad del medio ambiente y la sostenibilidad de los modelos de producción depende la salud humana.

Otra manera de establecer la calidad del agua es la llevada a cabo por Hu et al., (2023), quién en su documento establecieron un método de medición de la Compensación Ecológica CE, adoptando (1) un índice de contaminación de Nemerow (NPI) mejorado para evaluar la calidad del agua y el impacto de diversos contaminantes (2) estableciendo puntos de monitoreo de la calidad y cantidad del agua aguas arriba y aguas abajo de acuerdo con las características regionales con el propósito de determinar objetivamente cambios relativos en la calidad del agua regional para finalmente formular modelos de asignación de compensación basados en las características de ubicación regional y datos de uso de agua. El método de evaluación empleado resalta los derechos y responsabilidades de las partes interesadas, al mismo tiempo que establece estándares de compensación con el fin de ayudar a resolver los inconvenientes y desafíos en el control de la contaminación del agua. Con el estudio, se evidencia la responsabilidad de los administradores regionales por el medio ambiente dentro de las cuencas, en la protección de la

calidad y cantidad del agua, destacando que quienes se benefician deben compensar y quienes son responsables de los daños y perjuicios deben pagar.

A su vez, Simanca et al., (2020), en su publicación realizaron una correlación de los usos establecidos en el Plan de Manejo Ambiental (PMA) para el Salto del Tequendama, con los datos arrojados por el estudio mediante monitoreo ambiental y cálculos para establecer indicadores con el fin de estimar la calidad del agua y posibles focos de contaminación provenientes de actividades de origen antropogénico como captación de agua, ocupación de sitios, y vertidos de cargas contaminantes sobre el recurso hídrico, así como el análisis de las concentraciones de otros parámetros importantes no sólo porque representan un riesgo para la fuente hídrica y su entorno, sino también por traer consecuencias negativas a la salud humana. Este estudio guarda estrecha relación con el presente proyecto de grado a desarrollar debido a que con el trabajo se pretende evaluar el estado y la dinámica del cuerpo de agua superficial, para conocer su comportamiento y estimar si las condiciones presentes en el recurso hídrico cumplen actualmente con lo establecido en los lineamientos, decretos establecidos a nivel nacional y regional, cuantificando el índice de calidad del agua (WQI) e índice de contaminación del agua (WPI) mediante variables como Oxígeno disuelto (DO), sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), conductividad eléctrica, pH entre otras variables fisicoquímicas que dan lugar a seis índices de contaminación como: índice de contaminación por mineralización, índice de contaminación por materia orgánica, índice de contaminación trófica, índice de contaminación por sólidos en suspensión e índice de contaminación por pH. De esta manera, este tipo de proyectos busca contribuir con procesos de gestión del agua, orientados a adoptar

medidas correctivas y/o preventivas según sea el caso, a través de la planificación, gestión, uso y manejo del recurso hídrico.

De igual forma, existe otros métodos de establecer la calidad del agua, uno de ellos es por medio de la identificación de macroinvertebrados bentónicos, tal y como se llevó a cabo en el estudio realizado en el Río Arapicos, la cual tuvo como objetivo la evaluación de la calidad de agua mediante el Índice de Calidad del Agua de la National Sanitation Foundation (ICA- NSF) y la identificación de macroinvertebrados bentónicos. La investigación se inició con la selección de tres estaciones de monitoreo (PA-1, PA-2, PA-3) llevadas a cabo durante tres meses consecutivos. Se analizaron nueve parámetros del ICA establecidos por la NSF siguiendo la metodología establecida por el Standard Methods. Parámetros como temperatura, pH y oxígeno disuelto se midieron de manera in situ, mientras que, parámetros como DBO5, nitratos, fosfatos, coliformes fecales, sólidos disueltos totales y turbidez se analizaron en el laboratorio. Los macroinvertebrados colectados en cada microhábitat se integraron para formar una muestra compuesta por cada estación para con ello analizar la diversidad taxonómica. Según el índice Biological Monitoring Working Party- Colombia (BMWP/Col) se registró un total de 10 órdenes y 24 familias de macroinvertebrados en las tres campañas de monitoreo, el Análisis Canónico de Correspondencia (ACC) muestra tres agrupaciones que relacionan los macroinvertebrados bentónicos con parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (Chacha & Zambrano, 2022).

Asimismo, en la cuenca del río Magdalena (Antioquia, Colombia) se llevó a cabo un estudio sobre la fauna acuática de los ecosistemas kársticos tropicales, donde se realizó la toma de muestras de agua para la caracterización fisicoquímica en cada sitio de muestreo donde se incluyeron las variables de conductividad, oxígeno, temperatura y pH in situ utilizando un

equipo de celdas multiparamétricas HACH. Además, se tomaron muestras de agua para evaluar en el laboratorio la presencia de nitratos, fósforo total, ortofosfatos, sólidos totales, suspendidos y disueltos, y la turbiedad, así como parámetros bacteriológicos (*Escherichia coli* y coliformes). Todos los parámetros se evaluaron según los métodos estandarizados para análisis de aguas de la American Public Health Association-APHA, il American Water Works Association-AW WA , y la Water Environment Federation-WEF, lo anterior con el objetivo de caracterizar las comunidades de peces y macroinvertebrados acuáticos que habitan las corrientes asociadas con ecosistemas kársticos de los municipios de San Luis y Sonsón (Antioquia, Colombia) y su relación con las condiciones ambientales internas y externas mediante métodos estandarizados de recolección y tratamiento de datos biológicos y fisicoquímicos. Además, se determinó la composición y la abundancia de especies de peces y macroinvertebrados, así como los índices ecológicos de diversidad y dominancia, y los de bioindicadores de la calidad de agua (BMWP/Col) con base en macroinvertebrados bentónicos. La variabilidad espacial y temporal, así como la relación entre los parámetros ambientales y biológicos, se estableció mediante análisis de varianza y discriminantes canónicos (Jiménez-González et al., 2021).

Actualmente, con el auge de la tecnología geoespacial, dentro de las cuales se destacan los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son muchos los trabajos realizados a través de la implementación de las herramientas SIG, debido a que sobresale su importancia específicamente para cuantificar las variaciones de los componentes de la calidad del agua a través del tiempo.

Un caso particular es el publicado por Kowe et al., (2023) para quien la información cuantitativa sobre el estado de la calidad del agua es fundamental en la planificación y conservación de los recursos hídricos, de ahí que su estudio, tuvo como objeto cuantificar las

variaciones espaciales y temporales de los parámetros de calidad del agua para el lago Manyame, localizado en Zimbabwe. Los parámetros de calidad de agua detectados remotamente y cuantificados en este estudio fueron: nitrógeno total, turbidez, clorofila y materia suspendida; La información identificada se realizó a partir de imágenes satelitales (Sentinel 2) durante un periodo de 5 años (2017 a 2022) y utilizando modelos empíricos basados en la regresión lineal entre los datos producto del trabajo de campo a través de la toma de muestras in situ e información proporcionada de manera remota a partir de las imágenes satelitales sobre indicadores de calidad del agua. En el estudio, seleccionaron 10 puntos de muestreo a una altura de 0.5 metros, teniendo en cuenta factores como: fuentes de contaminación, accesibilidad al sitio de muestreo, disponibilidad de datos históricos de campo y parámetros de calidad del agua (biológicos, químicos y físicos), además de georreferenciar mediante un dispositivo móvil (GPS) cada punto de monitoreo.

Una vez obtenido el archivo de los puntos con información de las ubicaciones específicas de cada muestra, se superpuso la información obtenida en campo con los datos de Sentinel 2 para generar los valores de píxeles de los indicadores de calidad del agua. Posteriormente, compararon los resultados de la calidad del agua derivados del análisis de las muestras de agua con los indicadores de la calidad del agua determinados por Sentinel 2, para finalmente analizar la información en un software estadístico con el fin de desarrollar un modelo empírico.

Del estudio se resalta, que la teledetección es hoy en día una herramienta valiosa para el análisis de la calidad del agua, al proporcionar datos sobre la temperatura superficial del agua, concentración de clorofila (indicador de presencia de algas), turbidez y otros parámetros a lo largo del tiempo y cubriendo áreas de estudio extensas de manera eficiente y a menudo menos

costosa que las técnicas de campo tradicionales debido a que, logran proporcionar una cobertura temporal y espacial más amplia, puesto que los contaminantes varían espacialmente, permitiendo un monitoreo continuo y destacando que la información adquirida a partir de datos satelitales puedan complementar las mediciones in situ los cuales son métodos convencionales precisos y en consecuencia, ayudar a comprender mejor la dinámica de los cuerpos de agua, identificar problemas en la calidad y contribuir en la toma de decisiones para su gestión debido al impacto negativo de las actividades antrópicas sobre la calidad del agua en las fuentes hídricas, y el aumento acelerado de la población a nivel mundial, la calidad es un tema de gran importancia y preocupación por el deterioro de los cuerpos de agua. Lo anterior consolida la importancia del presente proyecto de grado.



## 4.Referente normativo y legal

### 4.1 Leyes

#### 4.1.1 Ley 23 de 1973

*“Por la cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y protección al medio ambiente y se dictan otras disposiciones”* emitida por el Congreso de Colombia, decretando en el Artículo 1 que, “es objeto de la presente ley prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente, y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio nacional” (El Congreso de Colombia, 1973, Article 1).

#### 4.1.2 Ley 9 de 1979

*“Por la cual se dictan Medidas Sanitarias”*, emitido por el Congreso de Colombia, decreta que, “para la protección del Medio Ambiente la presente Ley establece que, las normas generales que servirán de base a las disposiciones y reglamentaciones necesarias para preservar, restaurar u mejorar las condiciones necesarias en lo que se relaciona a la salud humana y los procedimientos y las medidas que se deben adoptar para la regulación, legalización y control de los descargos de residuos y materiales que afectan o pueden afectar las condiciones sanitarias del Ambiente” (El Congreso de Colombia, 1979).

### **4.1.3 Ley 79 de 1986**

*Por la cual se prevé a la conservación de agua y se dictan otras disposiciones,* emitido por el Congreso de Colombia, a su vez decreta que “las áreas de reserva forestal protectora, para la conservación y preservación del agua todos los bosques y la vegetación natural que se encuentren en los nacimientos de agua permanente o no, en una extensión no inferior a doscientos (200) metros a la redonda, medidos a partir de la periferia, todos los bosques y la vegetación natural existentes en una franja no inferior a cien (100) metros de ancho, paralela a las líneas de mareas máximas, a cada lado de los cauces de los ríos, quebradas y arroyos, sean permanentes o no alrededor de los lagos, lagunas, ciénagas o depósitos de agua que abastezcan represas para servicios hidroeléctricos o de riego, acueducto rurales y urbanos, o estén destinados al consumo humano, agrícola, ganadero, o la acuicultura o para usos de interés social y todos los bosques y la vegetación natural, existentes en el territorio nacional, que se encuentren sobre la cota de los tres mil (3.000) metros sobre el nivel del mar” (El Congreso de Colombia, 1986).

### **4.1.4 Ley 99 de 1993**

*“Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones”*, emitido por el Congreso de Colombia el cual decretó que, “la formulación de las políticas ambientales tendrá en cuenta el resultado del proceso de investigación científica. No obstante, las autoridades ambientales y los particulares darán aplicación al principio de precaución conforme al cual, cuando exista peligro de daño grave e irreversible, la falta de certeza científica absoluta no

deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces para impedir la degradación del medio ambiente (El congreso de Colombia, 1993).

#### **4.1.5 Ley 373 de 1997**

*“Por el cual se establece el Programa ahorro y uso eficiente del agua”*, el cual Decreta en el artículo 1 que, “el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Todo plan ambiental regional y municipal debe incorporar obligatoriamente un programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Se entiende por programa para el uso eficiente y ahorro de agua el conjunto de proyectos y acciones que deben elaborar y adoptar las entidades encargadas de la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado, riego y drenaje, producción hidroeléctrica y demás usuarios del recurso hídrico” (El Congreso de Colombia, 1997, Article 1).

## **4.2 Decretos**

### **4.2.1 Decreto 2811 de 1974**

*“Por el cual se dicta el código de Recursos Naturales Renovables y Protección del Medio ambiente”* en el artículo 3 hace referencia a la terminología asociada con la preservación, manejo y cuidado del medio ambiente. Esta normativa en el título II del libro XII enfatiza en el manejo de áreas especiales, entre estas: cuencas hidrográficas, áreas donde se desarrollen actividades que involucren el uso y conservación del suelo y áreas destinadas a la recreación. (Presidencia de la República, 1974).

#### **4.2.2 Decreto 1594 de 1984:**

*“Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos, el cual decreta en el artículo 4 que, “los criterios de calidad establecidos en el presente Decreto son guías para ser utilizados como base de decisión en el ordenamiento, asignación de usos al recurso y determinación de las características del agua para cada uso” (Presidencia de la República, 1984, Article 4).*

#### **4.2.3 Decreto 3930 del 2010**

*“Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979 así como el Capítulo II del Título VI-Parta III-Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones”, considerando “que la Constitución Política de Colombia en sus artículos 79 y 80 establece que es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación ambiental para garantizar el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución; debiendo prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados” (Presidencia de la República, 2010).*

#### **4.2.4 Decreto 2667 de 2012**

*“Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones”, “en*

ejercicio de sus atribuciones constitucionales y legales, en especial las conferidas en el artículo 189 numeral 11 de la Constitución Política y en desarrollo de los previsto en el artículo 42 de la Ley 99 de 1993, modificado por el artículo 211 de la Ley 1450 de 2011”, considerando “que la Constitución Política de Colombia en sus artículos 79 y 80 establece que es deber del Estado, proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación ambiental para garantizar el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución, debiendo prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados” (Presidencia de la República, 2012).

#### **4.2.5 Decreto 1076 de 2015**

*“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”*, emitida por el Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, considerando que “el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es el rector de la gestión del ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de orientar y regular el ordenamiento ambiental del territorio y de definir las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables y del ambiente de la Nación, a fin de asegurar el desarrollo sostenible, sin perjuicio de las funciones asignadas a otros sectores” (Presidencia de la República, 2015, Article 1).

## 4.3 Resoluciones

### 4.3.1 Resolución 2115 de 2007:

*“Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”,* emitido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, a su vez, “los Ministros de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en ejercicio de las facultades legales y en especial las conferidas por los Decretos-ley 205 de 2003 y 216 de 2003, los artículos 3°, 8° párrafo 1°, 9° párrafo 4° y 14 del Decreto 1575 de 2007 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial & Ministerio de la Protección Social, 2007).

### 4.3.2 Resolución 1514 de 2012

*“Por la cual adoptan los términos de referencia para la elaboración del Plan de Gestión del Riesgo para el Manejo de vertimientos”,* considerando “que el artículo 41 del Decreto 3930 de 2010 “por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI – parte III libro II del Decreto – Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones, dispone que toda persona natural o jurídica cuya actividad o servicio genere vertimientos a las aguas superficiales, marinas, o al suelo, deberá solicitar y tramitar ante la autoridad ambiental competente, el respectivo permiso de vertimientos” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012).

### 4.3.3 Resolución 1207 de 2014

*“Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas”*, emitido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la ministra de ambiente y desarrollo sostenible “en ejercicio de sus facultades legales y en desarrollo de lo dispuesto en los numerales 2 y 11 del artículo 5 de la Ley 99 de 1993, la Ley 373 de 1997, el Decreto – Ley 3570 de 2011”, considerando “que la constitución Política establece la obligación en cabeza del estado y de los particulares de proteger las riquezas naturales de la Nación y planificar el uso y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su conservación, restauración y uso sostenible, que el uso eficiente del agua es fundamental para la conservación del recurso hídrico, y es básico para el desarrollo sostenible y que el reúso de agua residual constituye una solución ambientalmente amigable, capaz de reducir los impactos negativos asociados con la extracción y descarga a cuerpos de agua naturales” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

### 4.3.4 Resolución 631 de 2015

*“Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”*, emitido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, considerando que, corresponde al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, fijar los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir los vertimientos puntuales a las aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

### **4.3.5 Resolución 853 de 2022**

*“Por la cual se adopta el Plan Nacional de Cartografía Básica de Colombia”* emitido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, “en ejercicio de las atribuciones legales, en especial las que le confiere los numerales 1, 2 y del artículo 4 y los numerales 2 y 20 del artículo 10 del Decreto 846 de 2021”, a su vez, considera que, “el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC tiene como objetivos cumplir el mandato constitucional referente a la elaboración y actualización del mapa oficial de La República de Colombia, ejercer como máxima autoridad catastral nacional, formular y ejecutar políticas y planes del Gobierno Nacional en materia de cartografía, agrología, catastro, geodesia y geografía, mediante la producción, análisis y divulgación de información con el fin de apoyar los procesos de planificación y ordenamiento territorial”, así como también, que, “la Resolución IGAC 471 del 14 de mayo de 2020 establece las especificaciones técnicas mínimas que deben tener los productos de la cartografía básica oficial de Colombia y que las especificaciones técnicas de los productos de la Cartografía Básica Oficial de Colombia, son de obligatorio cumplimiento para todo aquel que produzca cartografía básica para fines oficiales, así como para los gestores y operadores catastrales en ejercicio de la gestión catastral,” (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2022).

---

## 5.Referente teórico

### 5.1 Calidad del agua

#### 5.1.1 Contaminación Hídrica

La contaminación hídrica artificial proviene de la disposición de los residuos tanto líquidos como sólidos en lugares no adecuados, las aguas superficiales de los principales ríos del país son muy susceptibles a la contaminación por actividades antrópicas que pueden incorporar contaminantes derivados de industrias, zonas urbanas, agricultura y minería. Además, el aumento de la población ha generado una mayor demanda de bienes y servicios en el consumo del agua (Ibana-Lopez et al., 2021).

Por ende, la principal contaminación antrópica presentada sobre los cuerpos hídricos, son los vertimientos puntuales y difusos de diferentes compuestos químicos producto del desarrollo de las actividades industriales, agropecuarias y piscícolas (ONU-Hábitat & OMS, 2021). Los agroquímicos son unas de las sustancias químicas más empleadas a nivel mundial, por tanto, la determinación de las concentraciones de plaguicidas en aguas superficiales es considerada un primer acercamiento hacia la evaluación del grado de contaminación de un ecosistema, del riesgo tóxico hacia la biota y los seres humanos debido a su exposición, y de su dinámica en el medio ambiente (Derbalah et al., 2019).

De igual manera, cabe resaltar que la producción de alimentos no solo afecta las reservas de agua por la contaminación que este le aporta, si no también, la agricultura emplea alrededor del 70% del uso global del agua, por lo cual debido al uso irracional del recurso y a la falta de

tratamiento del mismo, el agua restante de la producción agrícola es retornada con altas cargas contaminantes a las fuentes hídricas, panorama que es altamente preocupante (FAO, 2020). Esta dinámica pone en riesgo el abastecimiento del agua a futuro para el desarrollo de las diferentes actividades humanas.

### **5.1.2 Índices de calidad de agua**

Tener una buena calidad del agua es importante para un río saludable, ya que afecta a los humanos, animales y plantas que utilizan el agua. Sin embargo, es difícil cuantificar el estado de la calidad del agua de los ríos debido a la gran variedad de posibles parámetros de calidad del agua utilizados para describirla. Por otro lado, la financiación insuficiente, especialmente en los países en desarrollo, es una de las limitaciones más comunes para monitorear todos los parámetros de calidad del agua de un río, ya que es laborioso y costoso. Por lo tanto, los índices de calidad del agua (ICA) se han utilizado en el pasado como uno de los enfoques más comúnmente utilizados para evaluar la calidad del agua de un cuerpo de agua (Sutadian et al., 2018).

Los ICA son herramientas que permiten describir la condición general de un ambiente acuático a partir de variables físicas, químicas y, en algunos casos, microbiológicas. Es de destacar el alcance de este tipo de herramientas, ya que puede resultar insuficiente. Si bien permiten integrar información relevante de distintos fenómenos naturales, en algunos casos no logran identificar de forma específica el origen de la contaminación hídrica (Iglesias & Basílico, 2022). Para tener una idea rápida y general de cómo se encuentra la calidad de un ecosistema, se sugiere utilizar los indicadores: temperatura, conductividad eléctrica (CE), pH, oxígeno disuelto (OD) y sólidos totales disueltos (STD), el uso de estos indicadores tiene como ventaja, que se

pueden medir in situ, son poco costosos, eficientes y pueden servir como alerta de contaminación (Larrea Murrel et al., 2022).

En caso de que se conozca la presencia de algún tipo de contaminación, por ejemplo, contaminación por desechos orgánicos, se deben determinar los indicadores: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Carbono Orgánico Total (COT), nitrógeno orgánico disuelto, fósforo total, Coliformes Termotolerantes (CTE) y *Escherichia coli* (Dadi et al., 2018).

Finalmente, se resalta la importancia de la implementación de los ICA e ICO como herramienta útil para el monitoreo de la calidad de las fuentes hídricas y permitiendo así tomar decisiones que permitan reducir y mitigar los niveles de contaminación del agua a nivel nacional y regional.

### **5.1.3 Parámetros fisicoquímicos**

Los parámetros fisicoquímicos son fundamentales en la identificación de la calidad de agua, es una herramienta que permite caracterizar los cuerpos de agua, por tanto, se destaca la necesidad de realizar análisis periódicos de la calidad del agua y de los parámetros fisicoquímicos del agua del río y del agua tratada, ya que los valores pueden variar significativamente de una temporada a otra debido a los procesos naturales, así como a la cantidad de cuerpos adicionados al agua por las actividades domésticas e industriales. Además, estos procesos son la base para definir si son aptos para la destinación en actividades humanas, según lo establecido en el Decreto 1076 de 2015 respecto a los criterios de calidad admisibles para cada destinación del recurso (Sandoval et al., 2021). Las variables que más se emplean en el

monitoreo de la calidad del agua se relacionan a continuación junto con una breve explicación de su importancia.

**Temperatura:** La Temperatura es un parámetro físico que caracteriza el calor, o transferencia térmica, a su vez, es un parámetro crítico en los ecosistemas acuáticos, ya que de ella depende el tipo de vida acuática (psicrófilos, mesófilos, termófilos, hipertermófilos), regula las concentraciones de oxígeno disuelto y afecta los diferentes procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en los ecosistemas acuáticos (Sutadian et al., 2018).

**Turbiedad:** la turbiedad ha sido una característica ampliamente aplicada como criterio de calidad del agua, tanto en las fuentes de abastecimiento como en los procesos de potabilización y sistemas de distribución (Corrales Ramírez et al., 2021).

**Potencial de hidrogeno pH:** El pH en buenas condiciones está asociado a la proliferación y desarrollo de vida acuática, ya que se prefieren rangos de pH entre 6.5 a 8.0, fuera de este rango se reduce a la diversidad por estrés fisiológico y la reproducción (Moreno & Grey, 2021).

**Conductividad eléctrica (C.E):** La conductividad eléctrica indica el potencial del agua de conducir la corriente y está relacionado con el contenido iónico del agua (Ahmed et al., 2020).

**Demanda biológica de oxígeno (DBO):** La DBO es la cantidad de oxígeno consumido por las actividades biológicas en el agua, particularmente por bacterias y protozoos. Si los niveles de DBO sobrepasan las concentraciones de oxígeno disuelto, entonces puede verse afectada la biota acuática (Ahmed et al., 2020).

**Demanda química de oxígeno (DQO):** Es la cantidad de oxígeno necesaria para descomponer los residuos orgánicos biodegradables y no biodegradables en el agua provocados por el vertido de aguas residuales urbanas. DQO se refiere a los contaminantes que causan condiciones adversas para el desarrollo de microorganismos (Ewaid et al., 2020).

**Oxígeno Disuelto (OD):** El oxígeno disuelto es un indicador primario de calidad de agua, el cual es esencial para la respiración aerobia, el límite mínimo permisible establecido en las normas de calidad de agua es de 3 mg. L-1, por debajo de este valor se compromete la vida acuática (Ahmed\_2020). La descomposición de materia orgánica, desechos industriales, gases disueltos y escorrentía agrícola dan como resultado un nivel más bajo de OD (Ewaid et al., 2020).

**Nitratos/Nitritos:** la presencia de nitratos en el agua puede estar asociada principalmente a causas de origen urbano, industrial y rural. Los efluentes domiciliarios y la actividad agrícola intensiva pueden significar una contribución al deterioro en la calidad del agua, debido a la aplicación de fertilizantes y pesticidas que son transportados al sistema fluvial como contaminantes dispersos (Perdomo et al., 2020). La contaminación por nitratos de las aguas superficiales y subterráneas es un problema global que está relacionado con la intensa actividad agrícola. Las altas concentraciones afectan la calidad de las aguas y resulta ser un indicador importante de la influencia humana (Calvi et al., 2018).

#### **5.1.4 Índices hidrobiológicos**

Los ecosistemas dulceacuícolas se destacan por presentar una gran biodiversidad rica y variada en peces y otros vertebrados, así como también, una buena diversidad de invertebrados,

plantas y algas, en nuestro país debido al gran número de ríos y otros ecosistemas acuáticos continentales, especialmente en la región Andina, están sometidos a grandes impactos causados por el hombre, relacionados con los cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo condicionando la calidad de los cuerpos de agua presentes en nuestro País (Rincón-Bello et al., 2021).

Por tanto, surge la necesidad de implementar otras metodologías fuera de los que incluyen los parámetros fisicoquímicos, siendo el empleo de indicadores biológicos, donde se destacan los monitoreos con macroinvertebrados acuáticos, los cuales reflejan perturbaciones existentes sobre los cuerpos de agua, finalmente, uno de los más utilizados es el BMWP (Biological Monitoring Working Party), propuesto en Inglaterra, modificado para la península ibérica por Alba Tercedor y adaptado para Colombia por Roldán Pérez e identificado como BMWP/Col (López Mendoza et al., 2022).

### **5.1.5 Cargas contaminantes**

La Calidad del agua altera las condiciones de los ecosistemas presentes en ella, pues interviene en la existencia de los seres vivos, esto debido a los vertimientos de tipo domésticos, industriales y agrícolas provenientes de las actividades humanas, ocasionando la contaminación de las aguas que discurren sobre las fuentes hídricas debido a la modificación de sus propiedades físico-químicas y biológicas, restringiendo su uso y aplicaciones donde es empleada (Fernández-Rodríguez & Guardado-Lacaba, 2021).

Debido a lo mencionado anteriormente, surgió la importancia de evaluar la calidad del agua superficial mediante la implementación de metodologías que involucren más de dos

parámetros, entre ellos fisicoquímicos y microbiológicos, tal y como es el caso de los índices de Calidad del Agua – ICA, el cual permite identificar el potencial de contaminación de manera comprensiva y pueden ser usados para mejorar o aumentar y difundir la información sobre la calidad del agua y por ende la carga contaminante que esta presenta (Fernández-Rodríguez & Guardado-Lacaba, 2021).

### **5.1.6 Disponibilidad de agua**

Nuestro País es considerado uno de los más ricos en recursos hídricos, puesto que supera los 68 metros cúbicos por habitante por día, sin embargo, debido al crecimiento poblacional los problemas de contaminación en las corrientes de agua cada día son de mayor preocupación, lo cual hace que los usos del agua sean limitados y su disponibilidad disminuye cada día, generando impactos adversos en el medio ambiente y consecuencias graves en salud pública (Camacho Botero, 2020).

Por otro lado, el agua potable en el sector rural no supera el 35%, la cobertura de sistemas de alcantarillado es inferior al 15 % y el porcentaje de las aguas residuales domésticas que son vertidas a las fuentes receptoras sin tratamiento alguno en el país es del orden del 60 % en términos de caudal, adicionalmente, el sector industrial aporta gran cantidad de carga contaminante a las corrientes hídricas, puesto que estas aguas residuales son vertidas sin ningún tipo de tratamiento a los cauces de los ríos (Camacho Botero, 2020).

Finalmente, el atraso en las coberturas de acueducto, alcantarillado y sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas; la contaminación de las aguas nacionales que no admiten vertimientos tales como cabeceras de los ríos y acuíferos; vertimientos industriales sin el

tratamiento adecuado a las mismas fuentes receptoras; vertimiento de basura y desechos sólidos, escorrentía que drena en época de lluvias desde las zonas agrícolas, urbanas y mineras a los ríos, lagos, lagunas y embalses transportando sedimentos orgánicos e inorgánicos con metales pesados y sustancias tóxicas orgánicas disueltas y adsorbidas a dichos sedimentos (Camacho Botero, 2020).

## 5.2 Análisis espacial

Se define al análisis espacial como una herramienta integrada por una serie de técnicas que permiten analizar datos geográficos desde diferentes perspectivas, para resolver problemas complejos orientados a la ubicación, explorar y entender los datos desde una visión geográfica, determinar relaciones, detectar y cuantificar patrones, evaluar tendencias, realizar predicciones y tomar decisiones (Charles et al., 2024). Este análisis no se limita al componente geográfico, este va más allá de la simple representación gráfica del espacio, dándole relevancia a diversidad de datos asociados (Murray, 2021), permitiendo estudiar las características de los lugares y la interacción de los procesos que ocurren en el espacio, transformando datos en información para aportar conocimientos adicionales de gran importancia al momento de solucionar problemáticas socioespaciales, aportando explicaciones objetivas de la dinámica espacial, basándose en datos cuantitativos y cualitativos que se presentan en la actualidad (Buzai & Baxendale, 2010).

El análisis espacial es una herramienta fundamental en el campo de la investigación ya que permite complementar información requerida en diversos estudios, como es el caso de Lateef et al., (2020), en donde el objetivo de dicho estudio fue evaluar los parámetros de calidad del agua en el río Shatt Al-Arab del sur de Irak, para ello se emplearon las bases de datos de

monitoreo de diferentes instituciones, una vez unificada las bases de datos, encontraron la carencia de algunos datos de calidad de agua en unos puntos de monitoreo, por lo cual se empleó el Método Kriging, el cual permite realizar la interpolación de datos, teniendo en cuenta la información suministrada en la base de datos y la localización de los puntos de control; de esta manera se realizó un análisis completo de los parámetros de calidad de agua de la zona de estudio. De igual manera, Li et al., (2019), realizó la combinación del análisis espacial y los índices de calidad de agua para evaluar el monitoreo del agua potable en provincia de Shandong, China, en dicho estudio se realizó un mapa de ICA mediante valores estimados con el método Kriging, representando así la distribución espacial y temporal de la calidad del agua en la zona de estudio.

Para el desarrollo investigativo, existen gran variedad de herramientas que permitan un análisis espacial idóneo, las cuales complementan y permiten la visualización de la situación evaluada. Al-Madhhachi et al., (2020), evaluó el impacto de presa de Ilisu en la presa de Mosul, ubicadas sobre el río Tigris, para ello empleó un Modelo de Elevación Digital del servicio Geológico de Estados Unidos, con el fin de identificar las características físicas, demográficas, geográficas y topográficas de la zona de estudio; con la información extraída se clasificó la zona de estudio teniendo en cuenta la altitud en dos categorías, para facilitar la evaluación de alteración del talud en la presa.

Los casos de estudio anteriores son solo una pequeña muestra de las grandes oportunidades que nos brindan las herramientas de análisis espacial, facilitando la interpretación y comunicación de los resultados de las investigaciones a nivel mundial. Para Las herramientas técnicas empleadas en un análisis espacial son definidas como instrumentos de tipo gráfico,

cuantitativo, cualitativo y/o mixto (Madrid Soto & Ortiz López, 2005), los cuales integran una o más variables permitiendo identificar los componentes del espacio y el procesamiento de datos, con el objetivo de hacer más explicable y visible un fenómeno. A continuación, se observa la clasificación de las herramientas técnicas utilizadas para el análisis espacial.

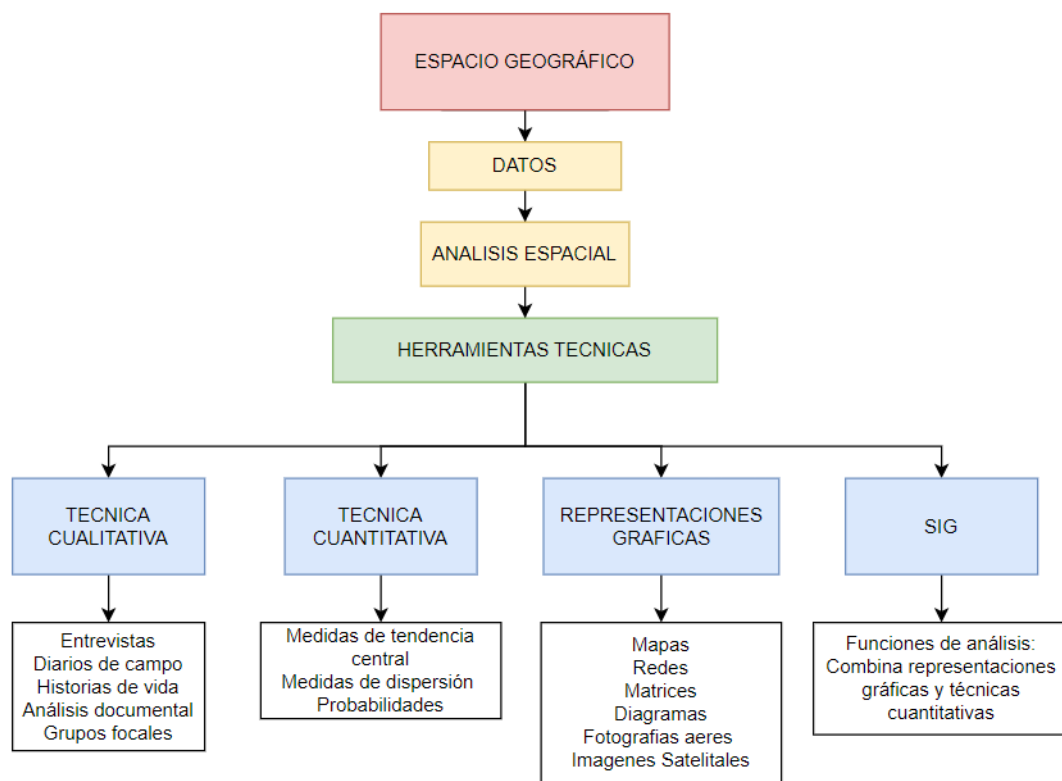


Ilustración 1. Clasificación de las herramientas técnicas utilizadas para el análisis espacial

*Fuente: Madrid Soto & Ortiz López, 2005.*

Cabe resaltar que el análisis espacial es un conjunto de métodos y herramientas que integran los Sistemas de Información geográfica, enfocada principalmente al análisis de datos tanto gráficos como matemáticos, empleando herramientas estadísticas, cartográficas, y SIG

(Charles et al., 2024). Finalmente, estas herramientas son el resultado de la estandarización digital de diferentes técnicas que llevan a una aplicación tecnológica-científica de divulgación generalizada. Corresponde a un camino que permite a todo procedimiento técnico de la Geografía ser aplicado a través de medios computacionales (Buzai & Baxendale, 2010).

### **5.2.1 Procesamiento de datos**

Los datos son la información primaria para llevar a cabo una investigación, esto no es diferente al momento de realizar un análisis espacial, para esta última se emplean datos espaciales los cuales cuentan con información geográfica, así como también características específicas de la zona de estudio o puntos de control (Charles et al., 2024). Actualmente, se cuenta con diversas herramientas para la adquisición de datos a nivel mundial, como son las imágenes satelitales y sensores remotos, de igual manera, existen software especializados que permiten extraer y procesar los datos espaciales (Cian et al., 2020).

El procesamiento de los datos varía dependiendo de los datos y el resultado que se quiere obtener de ellos, es así que se puede procesar la información obtenida de un DEM, Cian et al., (2020), realizó la delimitación de la zona de estudio mediante la importación del DEM en un software GIS, para la delimitación empleo la herramienta de Análisis de terreno y posteriormente realizo la corrección del DEM para finalmente generar los límites de las cuencas hidrográficas en archivos vectoriales. De igual manera, mediante el uso de imágenes satelitales del satélite Sentinel 2, determino mediante el análisis de las bandas las diferentes coberturas de suelo en el área. Dicha información fue validada mediante métodos estadísticos de las herramientas de análisis espacial del software QGIS y software Infostat.

Para realizar un buen procesamiento de datos espaciales, Medrano Pérez et al., (2022) emplearon 4 fases, la primera la recopilación de los datos, la segunda la generación de la base de datos digital con la información geográfica correspondiente, la tercera fase consiste en el geoprocesamiento y análisis para concluir con los resultados. De esta manera se realizó la caracterización hidro climatológica de la zona de estudio en Centla, México. Al realizar esta metodología permite evaluar la calidad de los datos, permitiendo así completar y estimar los datos posteriormente mediante diferentes herramientas.

### **5.2.2 Imágenes satelitales**

El tratamiento de imágenes satelitales incluye una etapa de preprocesamiento que corresponde a las correcciones geométricas y radiométricas, comprendiendo la calibración y la corrección atmosférica (Liu et al., 2018). Una segunda etapa comprende la clasificación, en este caso multiespectral, donde es definida como el proceso de ordenar los píxeles en un número finito de clases individuales, o categorías de datos, basados en sus niveles digitales. Si un píxel satisface cierto conjunto de criterios, el píxel es asignado a la clase que corresponde a ese criterio (Veneros et al., 2020). Los procesos de clasificación son divididos en dos etapas, entrenamiento y clasificación que usa una regla de decisión. El sistema computacional debe ser entrenado para reconocer patrones en los datos a partir de un método supervisado o no supervisado (Álvarez-Rogel & Conesa García, 2018).

El uso de imágenes satelitales se ha incrementado en los últimos años, debido a la cantidad de factores que pueden ser observados y estudiados, entre estos se destaca el monitoreo del agua (Veneros et al., 2020), un estudio realizado por Kaplan & Avdan, (2017) demostró que el uso de imágenes satelitales en ese de Sentinel – 2 con una resolución de 10 metros en el área

de Macedonia permitió mediante la clasificación supervisada y no supervisada datos más exactos y de zonas de difícil acceso en comparación de estudios realizados con datos de campo para el monitoreo de cuerpos de agua.

Así mismo, en la región del lago Vichuquén en Chile, se emplearon imágenes satelitales Landsat 8, las cuales fueron corregidas radiométricamente, con el fin de identificar la distribución espacial de la calidad de agua del lago, para validar la información suministrada por las imágenes satelitales, realizaron la toma de datos en campo, evidenciando así, que el uso de sensores remotos y fotografías satelitales a pesar de ser una gran herramienta y complemento para diversos estudios, en algunas zonas se puede interpretar de manera errónea los resultados, debido al a baja reflectancia de las longitudes de ondas (Briceño et al., 2018).

### **5.2.3 Sistema de información Geográfica – SIG**

Los sistemas de información geográfica son la integración sistemática de datos, personal, equipos y software, a partir de estos se pueden ejecutar numerosas funciones de análisis como la captación de información o entrada de datos, almacenamiento y recuperación de la información, manipulación, análisis y representación de datos (Lateef et al., 2020). Asimismo, los SIG permiten ejecutar operaciones con datos geográficos como lo son la extracción y superposición de datos, agregar y calcular campos de atributos, resumir y agregar datos, calcular estadísticas, modelar relaciones y descubrir patrones (Buzai & Montes Galbán, 2021).

La aplicación de los sistemas de información geográfica se ha expandido a la totalidad de las áreas del conocimiento entre las más destacadas tenemos epidemiología, política, economía, geología, agricultura, forestal y ambiental (Buzai & Montes Galbán, 2021). En el área forestal

podemos encontrar gran variedad de estudios de cambios de cobertura, como el desarrollado por Leija et al., (2023), el cual cuenta con el objetivo de analizar los cambios de cobertura y conectividad de los Bosques de niebla de Sistema Volcánico Transversal del estado de Michoacán, México, se empleó técnicas de interpretación de imágenes, para ello se emplearon imágenes satelitales SPOT 5 previamente procesadas, posteriormente se realizó un análisis de vecindad, con el fin de identificar los diferentes elementos presentes en la zona de estudio usando un software especializado, este proceso permitió conocer el deterioro de la cobertura y el área de esta para cada uno de los años de seguimiento. Finalmente se logró identificar la variación de la cobertura, la tasa de deforestación y las zonas más afectadas.

De igual manera, se ha popularizado el uso de los SIG para el monitoreo de los índices de calidad de agua tanto superficial como subterránea, como por ejemplo el estudio realizado por (Balakrishnan, 2011), donde estudio la variación de la calidad agua subterránea del área corporativa de la ciudad de Gulbarga, en la India, con el fin de analizar la calidad del agua, para ello se determinaron los índices de calidad de agua y se emplearon técnicas SIG. Se realizó la técnica de interpolación espacial utilizando el enfoque de ponderación de distancia inversa (IDW). Una vez obtenidos los resultados de los diferentes procesos, se determinó mediante la distribución espacial de los puntos de muestreo las zonas con mayor concentración de cloruro, sólidos disueltos totales, nitratos y dureza total. Adicionalmente se generaron varias representaciones cartográficas, donde se pudo observar que solo un parte de la región de estudio cuenta con agua apta para el consumo humano.

### 5.3 Uso del suelo

De acuerdo con Chigbu et al., (2024), el uso de la tierra se refiere a la manera en que los seres humanos interactúan y utilizan la tierra para satisfacer diversas necesidades. Este uso tiene implicaciones tanto previstas como involuntarias en las sociedades, esta ha generado la transformación general en el uso de los recursos naturales para el sustento de las comunidades en todo el mundo. Sin embargo, estas transformaciones también han traído consigo desafíos significativos como el cambio climático, pérdida de especies nativas, problemas relacionados con la tierra rural y urbana, acaparamiento de tierras, escasez de agua potable, riesgos ambientales y muchos otros problemas sociales graves. En definitiva, el uso de la tierra, si bien ha sido fundamental para el desarrollo humano, también ha generado desafíos ambientales y sociales que exigen soluciones urgentes.

Ma et al., (2023), en su estudio determinaron el impacto del uso del suelo y los patrones de paisaje en la calidad del agua del embalse de Danjiangkou en China, en la investigación analizaron los datos de uso y cobertura del suelo para comprender los patrones de paisaje de la subcuenca denominados en el estudio como MSPA (patrones espaciales morfológicos). De acuerdo con los datos de uso de la tierra, clasificaron el área de estudio en siete tipos de uso de los cuales se destacan bosques, pastizales, tierras de cultivo, áreas urbanizadas, tierras desnudas y áreas de agua. Posteriormente, utilizaron el modelo de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR) para evaluar la relación entre las variables analizadas: datos de uso y cobertura del suelo (LULC), patrones espaciales (MSPA) y la calidad del agua. Del estudio se resalta, que los resultados evidenciaron que el uso de la tierra, la forma del relieve y el patrón espacial del

paisaje tienen un impacto importante en la calidad del agua de la cuenca analizada. La investigación demuestra que el modelo que incorpora datos morfológicos funciona mejor para predecir la calidad del agua en comparación con el modelo basado únicamente con datos de uso del suelo. Por lo tanto, cuanto más variables son analizadas se puede predecir con precisión la calidad del agua de la cuenca.

El objetivo del estudio de Levin et al., (2024), fue analizar el impacto del uso del suelo en la calidad del agua en afluentes de la cuenca del río Gwathle en el cinturón de platino de Sudáfrica, mediante el monitoreo de 15 sitios de muestreo de agua en tres ríos durante un periodo de 12 meses, para seis eventos de muestreo entre mayo de 2021 y marzo de 2022. Los puntos de muestreo se ubicaron inmediatamente aguas arriba y aguas debajo de diferentes actividades de uso de la tierra. La investigación utilizó un enfoque de modelado de múltiples escalas espaciales, en el cual se determinaron cinco parámetros clave de calidad de agua (sulfato, amonio, cobre, turbidez y pH) con el fin de investigar la influencia del uso del suelo, como la minería, la agricultura y las áreas urbanas afectan la calidad del agua. De los análisis realizados se encontraron que las concentraciones de amonio eran características por el estrés urbano, las concentraciones de cobre aumentaron con la minería y la agricultura, la turbidez aumentaba con la elevación del terreno, las actividades agrícolas, la urbanización y las tierras en barbecho. Los resultados revelan que las actividades antrópicas generan una considerable presión sobre los recursos hídricos, llevando a la degradación de la calidad del agua

Debido a la gran diversidad de usos que se ejecutan actualmente sobre el suelo, se vio la necesidad de establecer una clasificación, para ello se tiene en cuenta características tales como el paisaje, tipo de suelo, cobertura vegetal y zonas de conservación establecidas por las entidades

ambientales y gubernamentales (Vazquez et al., 2015). Dicha clasificación permite identificar de manera más eficiente las características del suelo, lo cual permite un desarrollo óptimo de las actividades que se realizan en él, el suelo es un componente primordial para el desarrollo de la vida en el planeta, es indispensable para la producción de alimentos, a que en él se encuentran los principales nutrientes para el desarrollo de los cultivos (Rico Calvano & Rico Fontalvo, 2014).

### **5.3.1 Actividades económicas**

Se conoce como actividades económicas a todas las actividades desarrolladas por el ser humano con el fin de obtener un beneficio, ya sea para prestar un servicio a la comunidad o para servicio propio (Lesmes et al., 2019). Existen diferentes actividades económicas, entre ellas se destacan la siembra de cultivos, crianza de animales, explotación minera, explotación de madera, ventas de servicios, turismo, alimentación entre otros. Con el fin de agrupar actividades con características similares y permitir el acceso a la información desde cualquier parte del mundo, la Comisión de Estadística de naciones Unidas planteó una nueva clasificación de actividades, teniendo en cuenta los sectores económicos establecidos a nivel mundial (DANE, 2022).

Para la implementación de la Clasificación de actividades económicas en Colombia el Departamento Administrativo Nacional de Estadística mediante la Resolución 066 del 31 estableció el uso de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas- CIIU (DANE, 2022). Para efectos del presente trabajo el sector económico de importancia es el sector agropecuario, el cual cuenta con diversas cadenas productivas que se clasifican en 4 subsectores; el primero es el más complejo, este está conformado por los cultivos empleados para alimentación animal y humana, este se conoce como el sector agrícola; el

segundo es el sector pecuario, conformado por las actividades de crianza, levante y engorde de animales de granja y especies menores y los subproductos derivados de estos; el subsector forestal es el tercero de esta clasificación, en él se ubican las actividades de extracción de material forestal como madera, caucho y guadua, de igual manera se encuentra las actividades de conservación forestal; finalmente el subsector acuícola y pesquero, contiene las actividades de acuicultura y pesca (Lesmes et al., 2019).

### **5.3.2 Cobertura vegetal**

La cobertura vegetal se conoce como toda aquella capa vegetal natural que cubre el suelo, esta puede ser sotobosque, bosque nativo, matorrales, pastizales entre otras (DNP, 2022). Esta capa natural es de gran importancia para determinar la sostenibilidad de una región. conocerla cobertura vegetal y la vocación del terreno es la base para la planificación agrícola, ambiental y forestal (Hernández-Moreno et al., 2021).

Gule et al., (2023) analizaron como los cambios en el uso y cobertura del suelo a lo largo del tiempo afectan la calidad del agua en la ciudad de Addis Abeba, Etiopía. A través de correlaciones, regresiones lineales múltiples y análisis de componentes, evaluaron la relación entre el uso de la tierra, la cobertura y la calidad del agua. Mediante información recopilada mensualmente a lo largo de cada año en intervalos de cinco años durante el año 1991 – 2021, obtuvieron 252 datos sobre la calidad del agua superficial. Además, realizaron estudios de campo con el objetivo de identificar los usos predominantes del suelo en la ciudad y mediante imágenes satelitales analizaron los cambios en la cobertura terrestre. Evaluaron la calidad del agua por medio del método del índice aritmético ponderado de calidad del agua (ICA), los resultados indicaron que la calidad del agua de la ciudad, disminuyó durante todo el periodo de estudio

pasando de agua pobre a extremadamente pobre. El estudio mostró una fuerte relación entre el cambio de calidad de agua y cambios en la cobertura del suelo. También, se identificó que la turbidez está relacionada con la agricultura y los asentamientos. Con el estudio se evidencia el impacto del crecimiento urbano sobre los recursos hídricos de la ciudad y su calidad, destacando la importancia de la planificación y gestión adecuada del uso del suelo para mejorar y mantener la calidad del agua en las ciudades

---

## **6. Metodología**

### **6.1 Enfoque metodológico**

El presente trabajo se desarrollará bajo un enfoque metodológico cuantitativo, teniendo en cuenta que durante el desarrollo de la investigación se realizará el seguimiento y medición de parámetros de calidad de aguas, adicionalmente se identificarán los usos de suelo presentes en la zona, como también la ubicación de las captaciones y vertimientos sobre la fuente hídrica. En el cual se realizará un análisis espacial por medio de la correlación de los resultados obtenidos en los índices de Calidad del agua y los diferentes usos del suelo existentes en la zona de estudio.

Por ende, con la correlación estadística y el análisis espacial de los datos anteriores se espera realizar un análisis de la situación identificada en la subcuenca del Río Tune, localizada en el municipio de Palermo, departamento del Huila.

### **6.2 Tipo de estudio**

El trabajo se categoriza teniendo en cuenta lo planteado por Hernández et al., (2010) como un estudio cuantitativo correlacional explicativo, esto debido que durante la ejecución del trabajo se pretende establecer la correlación cuantitativa existente entre las diferentes variables, para de esta manera identificar las causas que ocasionan el problema presente en la zona de estudio.

### 6.3 Procedimiento

El proyecto se planteó para ser desarrollado en cuatro fases: La primera consistió en la clasificación de los usos actuales presentes sobre el Río, el segundo en efectuar el análisis espacial para la identificación de los puntos de monitoreo del recurso hídrico sobre el cauce del río, seguidamente el tercer componente consistió en analizar los parámetros fisicoquímicos e hidrobiológicos del afluente para finalmente, identificar los sectores que ocasionan mayor impacto en la contaminación de la calidad del agua del Río. Para ello se estableció el siguiente diagrama de ejecución de las fases.

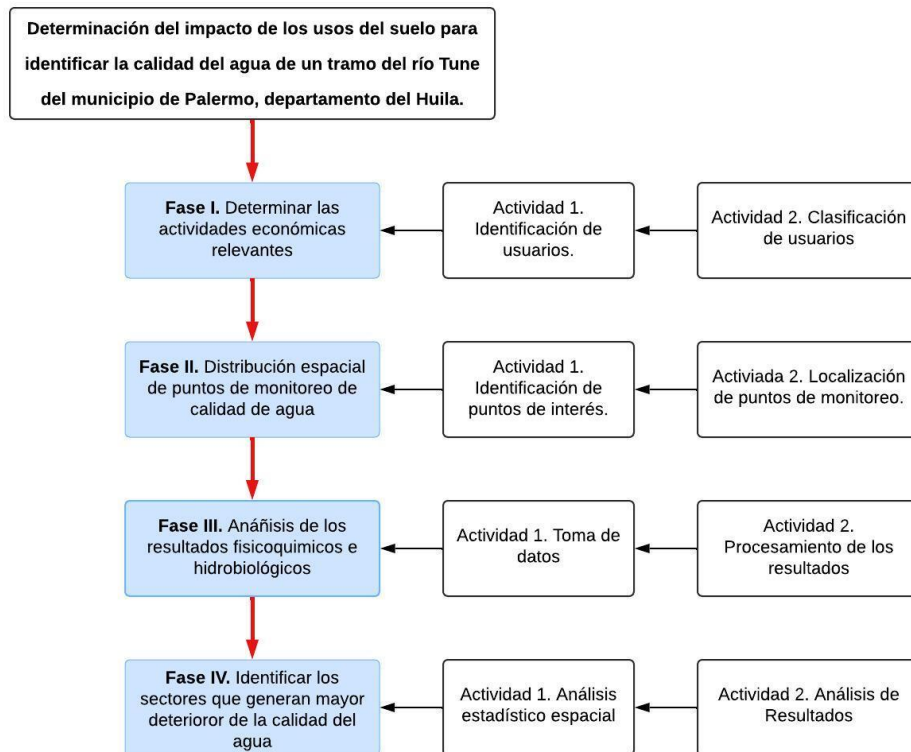


Ilustración 2. Diagrama de flujo del proyecto

**Fase I:** Para determinar las actividades económicas relevantes en la zona de estudio se empleó como base la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas (CIIU).

**Descripción del área de estudio**

El Río Tune nace en el Municipio de Teruel, a poco más de 1.000 metros sobre el nivel del mar, y tiene una longitud aproximada de 36 kilómetros. Atraviesa la zona urbana del Municipio de Palermo antes de desembocar, a unos 2 kilómetros, en el Río Bache. Esta subcuenca está formada por diversas microcuencas que la alimentan, como La Urriaga y El Salado, entre otras, siendo las más significativas por su capacidad: Quebrada Nilo, Quebrada San Juan y Quebrada La Guagua.

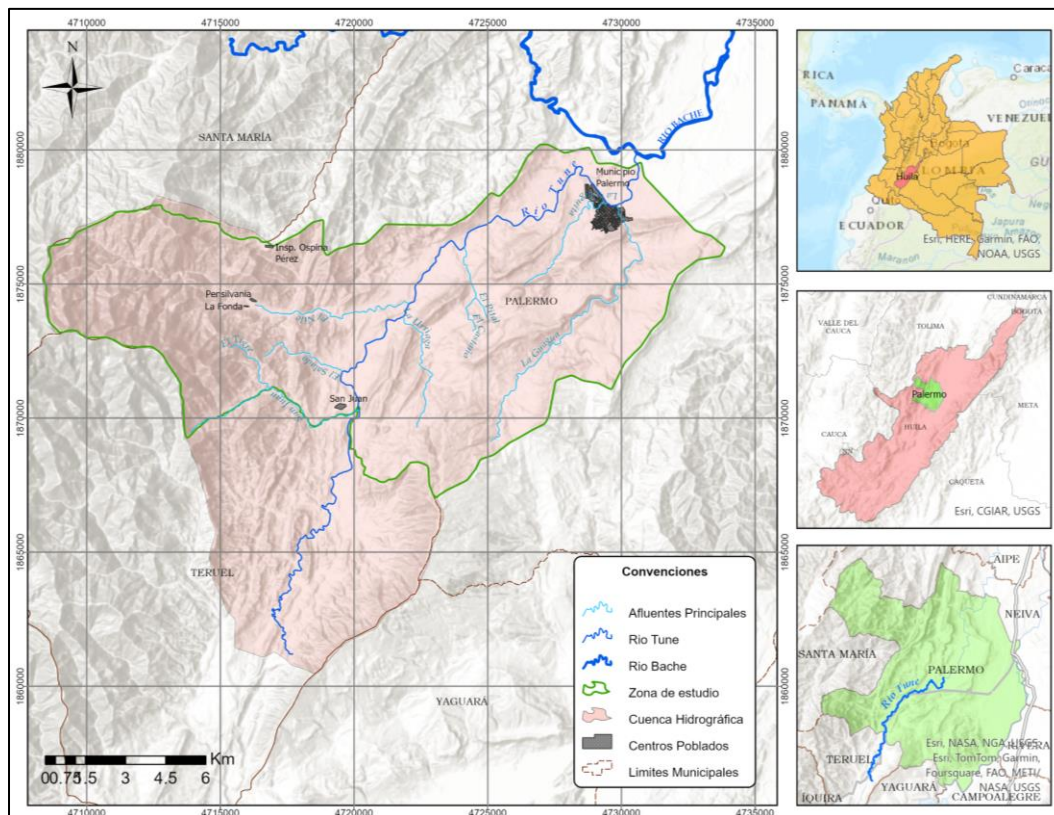


Figura 1. Localización del área de estudio.

- **Actividad 1. Identificación de los usuarios que hacen parte de la subcuenca del Río.**

**1. Revisión de información existente:** Como primer paso se realizó la revisión de la información existente en la base de datos de las entidades ambientales y gubernamentales. Adicionalmente, se realizó una búsqueda y descarga de capas geográficas de la base de datos abiertos de Instituto Geográfico Agustín Codazzi, a escala 1:25.000 y 1:100.000 de la zona de estudio.

Los principales insumos para la recolección de información se presentan en la



Ilustración 3. Insumos de información.

Con la información recolectada, se procedió a identificar el área de estudio, para ello se delimitó la cuenca hidrográfica del río Tune, se tomó como insumo las

curvas de nivel escala 1:25000 del IGAC planchas 322IVA, 322IVB, 322IVC, 322IVD, 323IIIB, 323IIID, 323IVC, 344IIA, 344IIB, 344IIC Y 345IB (Figura 2).

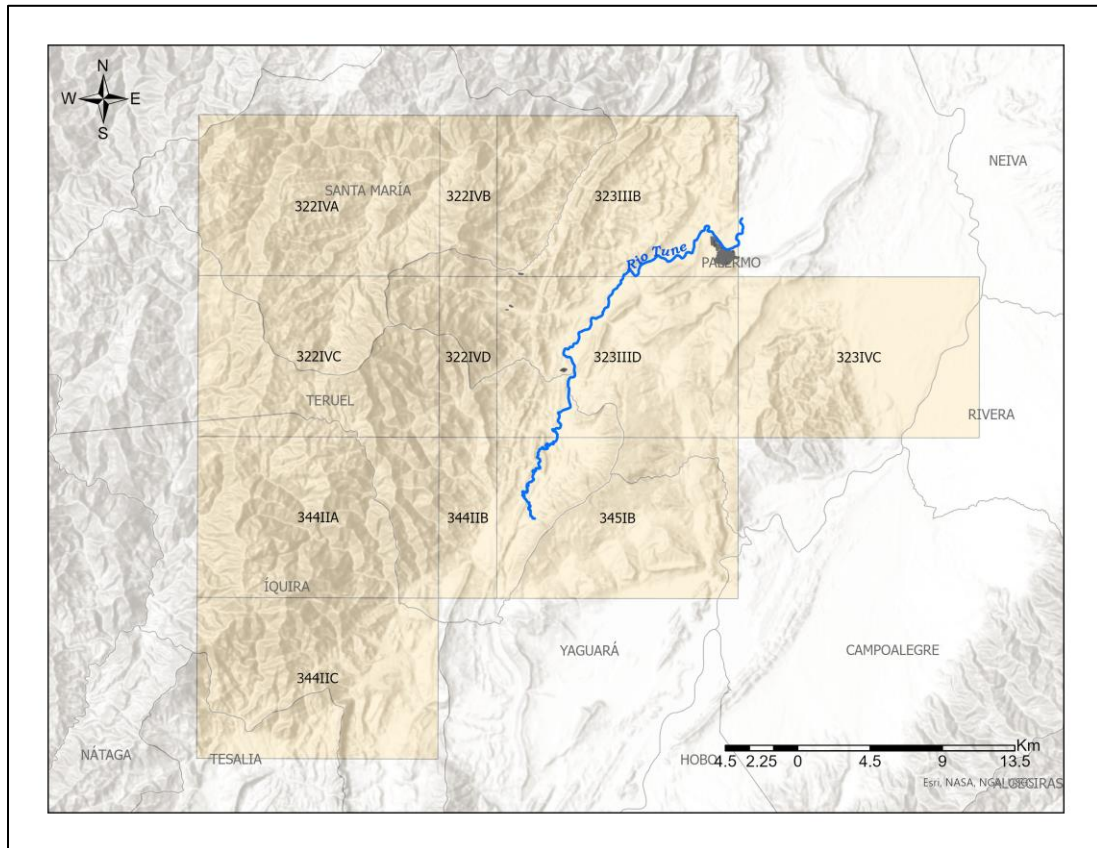


Figura 2. Planchas escala 1:25.000 IGAC

Mediante el software ArcGIS Pro se realizó el Modelo Digital de Elevación (DEM), para posteriormente aplicar las herramientas de hidrología *Fill*, *Flow Direction*, *Flow Accumulation* y *watershed* (Imagen 1).

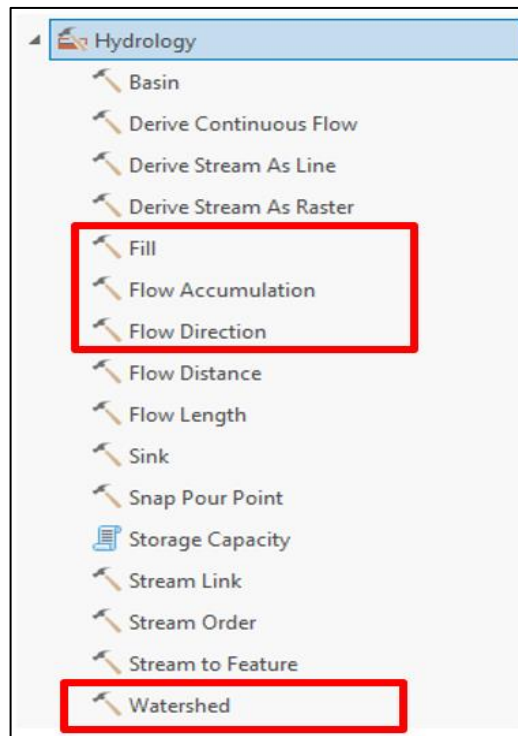


Imagen 1. Herramientas de hidrología en ArcGis Pro

**2. Elaboración de encuestas:** Una vez extraída identificada la cuenca hidrográfica del río Tune, y con la base de datos de los usuarios existentes, se procedió a establecer la información relevante para el estudio, esto con el objetivo de diligenciar un formulario para cada uno de los predios localizados durante el recorrido de campo.

Como líneas principales de información se consideraron las siguientes:

- **Información Catastral:** Permitted to identify the plots and their respective owners.
- **Información Productiva:** Productive activities and area destined for the same.
- **Localización geográfica**
- **La información hídrica.**

The information collected was tabulated in an Excel database, to subsequently perform the cleaning of the same.

ID_PREDIC	ID_PROPIETARIO	NOMBRES_APELLIDOS	CEDULA_NI	NOMBRE_PREDIO	COD_CATASTRAL	MATRICULA_INM	AREA_DEL_PF	MUNICIPIO	VEREDA	TIPO_FUENTE	FUENTE_DE_ABASTECIM	ACTIVIDAD_PRODUCTIVA	AREA_SOLICIT
7	4	HUGO FERNELI DIAZ PLAZAS	12110283	BUENA VISTA	5240000010023900	200-81255	10	PALERMO	JUAN (Palerm)	QUEBRADA	EL SALADO	OVINO CAPRINO	3
8	4	HUGO FERNELI DIAZ PLAZAS	12110283	BUENA VISTA	5240000010023900	200-81255	10	PALERMO	JUAN (Palerm)	QUEBRADA	EL SALADO	AVICULTURA	1
9	5	LUIS EDUARDO LOSADA RAMIREZ	4922618	IFORNIA DE LAS PALMAS	5240000032005600		24	PALERMO	JUAN (Palerm)	RIO	TUNE	ARROZ	0.75
10	6	CAMILLO BARRIOS ARAGONÉS	83220481	CASA LOTE	5240000009021100	200-97193	0.116	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	NIL0	AVICULTURA	0.1
11	7	TIVA MULTIACTIVA AGROPECUARIA P	90119813-8	CHONTADURO	4.1801E+19	200-101041	14.55	TERUEL	ALMORZADEI	RIO	TUNE	BOVINO	10
12	8	ALLENDY MEDINA BORGIA	83245992	EL CEDRO	52400000090217000	200-168934	2.8026	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	NIL0	BOVINO	2.5
13	9	ADRIANA LAVAO TOVAR	55190003	EL CONCIERTO	52400000045000300	200-18609	41.5	PALERMO	LAS CEIBAS	QUEBRADA	LA URRIAGA	CA CAO	3
14	9	ADRIANA LAVAO TOVAR	55190003	EL CONCIERTO	52400000045000300	200-18609	41.5	PALERMO	LAS CEIBAS	QUEBRADA	LA URRIAGA	BOVINO	30
15	9	ADRIANA LAVAO TOVAR	55190003	EL CONCIERTO	52400000045000300	200-18609	41.5	PALERMO	LAS CEIBAS	QUEBRADA	LA URRIAGA	FRUTALES	1
16	10	CARLOS ARVEY ALDANA CAMACHO	83225143	EL DIFICIL	5240000009031200	200-5415	3.5	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	LA URRIAGA	CITRICOS	2
17	11	ALLENDY MEDINA BORGIA	83245992	EL JORDAN	52400000090071100	200-20639	8	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	NIL0	BOVINO	5
18	12	CARLOS EDUARDO QUINTERO LEIVA	1084923422	EL MIRADOR	5240000010002600		7	PALERMO	JUAN (Palerm)	QUEBRADA	SAN JUAN	FRUTALES	3
19	13	TELEFONO COBALEDA LADINO	1659386	EL PARAISO	52400000009008000	200-33349	1.508	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	EL NIL0	CA CAO	1
20	13	TELEFONO COBALEDA LADINO	1659386	EL PARAISO	52400000009008000	200-33349	1.508	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	EL NIL0	ACUICULTURA	0.1
21	14	HUGO FERNELI DIAZ PLAZAS	12110283	EL PRADO	52400000090009000	200-57737	14.42	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	EL SALADO	BOVINO	10
22	14	HUGO FERNELI DIAZ PLAZAS	12110283	EL PRADO	52400000090009000	200-57737	14.42	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	EL SALADO	AVICULTURA	1
23	14	HUGO FERNELI DIAZ PLAZAS	12110283	EL PRADO	52400000090009000	200-57737	14.42	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	EL SALADO	OVINO CAPRINO	2
24	15	ICTOR FRANCISCO QUINTERO CUELLA	7707297	EL RECREO	4.1524E+19	200-1677	115	PALERMO	EL PORVENIR	QUEBRADA	LA GUAGUA	ARROZ	45
25	16	LUIS EDUARDO RAMIREZ CEDEÑO	12123968	EL REMANSO	5240000010021000	200-64413	7.3375	PALERMO	JUAN (Palerm)	QUEBRADA	SAN JUAN	FRUTALES	1.5
26	16	LUIS EDUARDO RAMIREZ CEDEÑO	12123968	EL REMANSO	5240000010021000	200-64413	7.3375	PALERMO	JUAN (Palerm)	QUEBRADA	SAN JUAN	ACUICULTURA	0.1
27	17	WILSON STELLA CUELLAR DE QUINTERO	96145110	EL TUNE	4.1524E+19	200-16500	161	PALERMO	EL PORVENIR	QUEBRADA	LA GUAGUA	ARROZ	65
28	18	NIRSA SILVA FLOREZ	36178893	FINCA VILLA RICA	52400000009013300	200-134184	9.55	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	NIL0	BOVINO	4
29	18	NIRSA SILVA FLOREZ	36178893	FINCA VILLA RICA	52400000009013300	200-134184	9.6	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	NIL0	CA CAO	0.75
30	18	NIRSA SILVA FLOREZ	36178893	FINCA VILLA RICA	52400000009013300	200-134184	9.6	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	NIL0	CAÑA DE AZUCAR	0.25
31	19	EMERSON LEONEL MONTERO VARGAS	7717864	ARGENTINA I PARCEL	52400000007010700	200-185667	5.6065	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	NIL0	BOVINO	5
32	20	LUIS OCTAVIO CORONADO RUIZ	12121922	LA CREMA	52400000090002000	200-48555	4	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	NIL0	CA CAO	4
33	21	NELLY TRUJILLO MURCIA	36149351	SPERANZA (VEREDA NI)	52400000090169000	200-53454	6.5	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	NIL0	CA CAO	2
34	22	LICENIO MINU COLLAZOS	83233500	LA FRONTERA	52400000090158000		1.5	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	NIL0	CA CAO	1
35	23	WILINGTON DIAZ MANCHOLA	83235546	LA PALMA	52400000070019000	200-11514	70.6	PALERMO	NIL0	RIO	TUNE	ARROZ	6
36	23	WILINGTON DIAZ MANCHOLA	83235546	LA PALMA	52400000070019000	200-11514	70.6425	PALERMO	NIL0	RIO	TUNE	BOVINO	36
37	24	TIVA MULTIACTIVA AGROPECUARIA P	90119813-8	LA PALMERA	52400000090132000	200-112767	15	PALERMO	JUAN (Palerm)	RIO	TUNE	BOVINO	10
38	24	LUZ ARCELIA CASTAÑEDA TRUJILLO	55115545	LA PALMERA	52400000045001200	200-54061	100	PALERMO	NIL0	QUEBRADA	NIL0	MAIZ	1

Imagen 2. Base de datos encuestas realizadas

**3. Recorrido de campo:** Durante el recorrido se validó la información recolectada anteriormente, identificando los propietarios y los respectivos predios que se beneficiarían del recurso hídrico del río Tune, y sus principales afluentes. Durante las visitas se diligenció la encuesta para cada uno de los predios, la cual es el insumo para establecer las actividades económicas desarrolladas en la zona de estudio. En cada finca localizada se tomó la información catastral del predio como también su ubicación geográfica, mediante un equipo de posicionamiento satelital global Marca Garmin. Esta información fue recolectada con el fin de relacionar su ubicación con la capa predial del IGAC, que posteriormente permitió realizar una salida cartográfica para visualización de la distribución espacial de los predios de la zona de estudio.

Una vez terminado el recorrido y reconocimiento de campo, se procedió a contrarrestar los predios localizados con la información previa recolectada, de esta

manera se determinó la totalidad de usuarios que influyen en la calidad del agua del río.

Para la verificación de los predios se empleó la capa predial R\_Terreno del IGAC. Para la extracción de los polígonos de cada predio se realizó el siguiente procedimiento.

1. Los puntos recolectados en campo se presentan en formato Shapefile y son procesados en el software ArcGis Pro 3.2.0, para esto se cargaron las capas R\_terreno y predios\_encuestados en un Map Frame.
2. Posteriormente se empleó la herramienta **Select By Location**, del menú **Selection**, con el fin de seleccionar los polígonos de la capa R\_TERRENO que contienen completamente los puntos de los predios encuestados. De esta manera se seleccionó la capa R\_terreno como capa de entrada, *Completely contains* como relación entre las capas y predios\_encuestados como capa de referencia (Imagen 3).

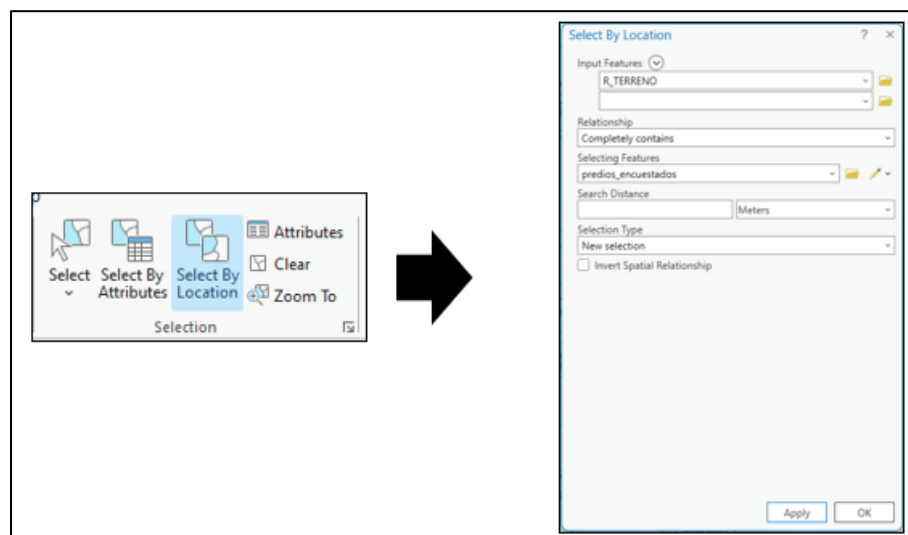


Imagen 3. Herramienta Select By Location de ArcGIS Pro

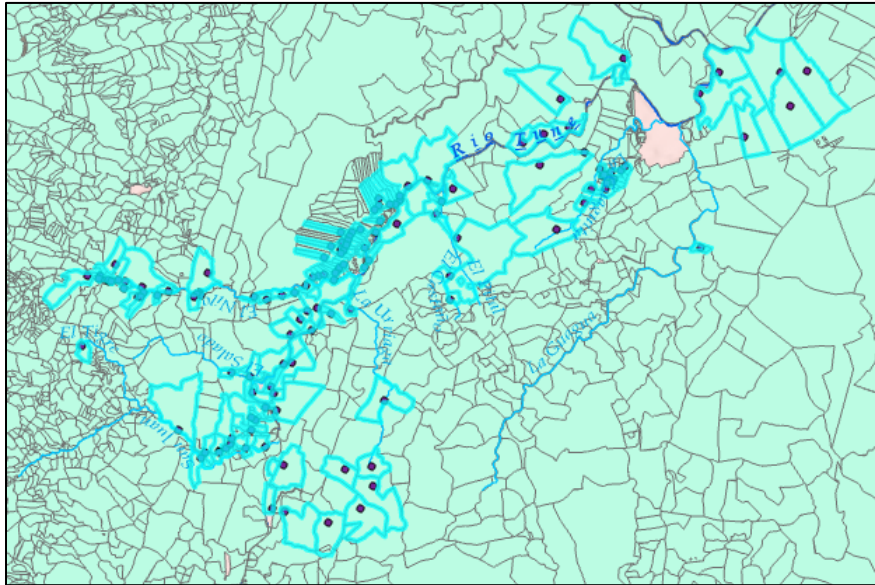


Imagen 4. Selección de los predios encuestados

3. Una vez seleccionados los predios, estos fueron exportados para crear la capa final de los predios beneficiarios encuestados del rio el Tune.

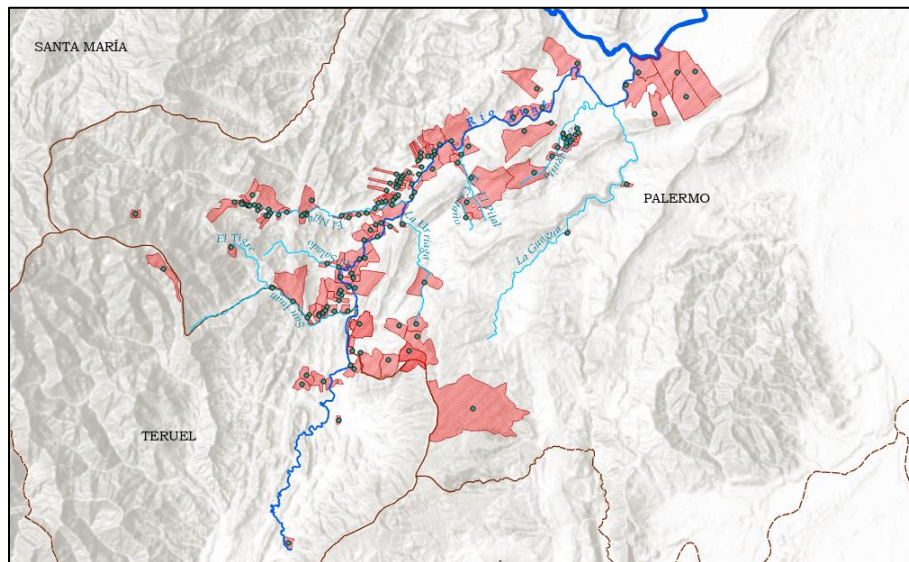


Imagen 5. Capa predial de usuarios del rio Tune

- **Actividad 2. Clasificación de los usuarios**

**1. Organización de la Información:** Una vez realizadas las 228 encuestas y el reconocimiento de campo, se procedió a organizar la información con el fin de identificar componentes similares que permitieron realizar la posterior clasificación. La información recolectada de las encuestas se almacenó en un archivo en formato xls, lo que facilitó la depuración de los datos, unificando los términos empleados en las respuestas, para seguidamente aplicar los filtros que nos permitieron clasificar los usuarios.

El primer filtro empleado fue la fuente hídrica de la cual se beneficia cada predio, para ello se seleccionaron los predios beneficiarios de los afluentes principales del río Tune.

**Clasificación de los usuarios:** Teniendo claro los predios se procedió a realizar la clasificación de los predios por actividades económica, teniendo en cuenta La Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas (CIIU), esta clasificación cuenta con tres divisiones, las cuales se presentan de manera jerárquica de mayor a menor en sección, división y grupo.

Para la clasificación se tuvo en cuenta el procedimiento general para la distribución de unidades estadísticas, según el tipo de actividad económica, planteado por el (Contreras & Oyola, 2022), para efectos del presente trabajo se tomó cada predio como una unidad estadística, al cual se le aplicó el procedimiento de clasificación. Dicho procedimiento está conformado por los siguientes pasos.

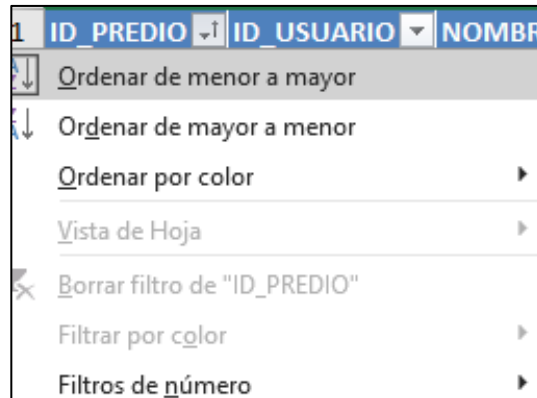
- **Primer paso:** Identificar las actividades económicas de la unidad estadística.

Para esto se debe realizar una descripción detallada de las actividades.

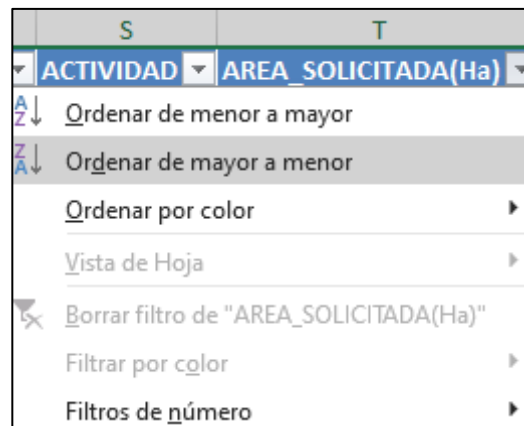
- **Segundo Paso:** Identificación de la actividad principal, para este ítem se emplea como criterio de clasificación el área productiva de cada actividad económica.
- **Tercer paso:** Revisar detalladamente las notas explicativas de la CIIU, con el fin de identificar las categorías de la actividad principal.
- **Cuarto paso:** Verificar la clasificación de la actividad económica principal, esto se realizará mediante relación existente entre la CIIU y la clasificación Central de Productos (CPC). En este paso se desarrollará una tabla de correspondencia que permita relacionar de manera práctica las diferentes clasificaciones que presenta la actividad comercial principal y por ende la unidad estadística.

**Segundo Paso:** Teniendo en cuenta que el primer paso se desarrolló con la aplicación de las encuestas a los propietarios del predio, se procedió a realizar el segundo paso, el cual corresponde en la selección de la actividad principal de cada predio, este proceso se realizó en la base de datos en Excel, siguiendo los siguientes pasos:

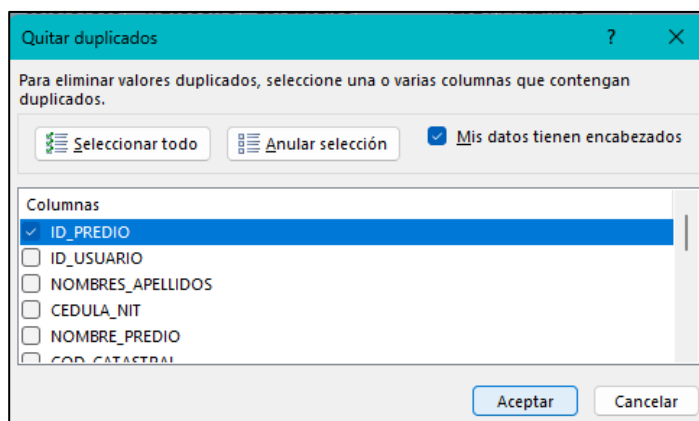
1. para ellos inicialmente se organizaron los datos en orden ascendente teniendo como parámetro el ID de cada predio.



2. posteriormente se organizaron las áreas productivas de manera descendente, de manera que quedara la actividad con mayor área en los primeros lugares en la lista.



3. finalmente se realizó la eliminación de datos duplicados del ID de los predios, obteniendo un listado de cada predio y su actividad principal, esta base de datos se nombre como Actividad Principal. Para esto se ingresó en el Menú Datos opción Quitar Duplicados, se seleccionó solo la columna ID\_PREDIO.



**Tercer Paso:** Una vez seleccionada la actividad principal de cada predio, se procedió a realizar la identificación del subsector económico de cada actividad, para ello, se clasificaron los predios en 4 categorías, agrícola, pecuario, forestal y acuícola (Tabla 1); adicionalmente se agregó como clasificación el uso doméstico, ya que se presentaron varios predios cuyo uso principal es para consumo humano.

Tabla 1. Actividad productiva por subsector económico primario.

Subsector	Característica			
AGRÍCOLA	Aguacate	Cítricos	Panela	
	Algodón	Coco	Papa	
	Alimentos	Fique	Pasiflora	
	Balanceados	Flores	Plantas aromáticas	
	(Alimentos para alimentación animal)	Fresa	Plátano	
	Arroz	Guayaba	Sábila	
	Banano	Hortalizas	Tabaco	
	Cacao	Mango	Yuca	
	Café	Mora	Ñame	
	Caña de azúcar	Palma		
	PECUARIO		Apícola	
			Avícola	

<b>Subsector</b>	<b>Característica</b>
	Cárnica bovina Cárnica porcina Equina y asnal Láctea y sícla Ovino caprino
ACUÍCOLA Y PESQUERO	Acuicultura Pesca
FORESTAL	Caucho Forestal Guadua

*Fuente: Adaptación información SIOC (2023).*

Teniendo en cuenta la tabla anterior, se aplicó a la base de datos Actividad Principal, la función Buscar, para ello se realizó el siguiente procedimiento

1. En una hoja nueva se creó una tabla de los tipos de actividades o subsector económico y se asignó un código identificador a cada una (Tabla 2).

Tabla 2. Identificación de tipo de actividad

<b>ID</b>	<b>Tipo de Actividad</b>
<b>1</b>	ACUÍCOLA Y PESQUERO
<b>2</b>	AGRÍCOLA
<b>3</b>	FORESTAL
<b>4</b>	PECUARIO
<b>5</b>	OTRO

2. Posteriormente, se creó una Tabla (Tabla 3), con las actividades productivas identificadas en la zona de estudio y su respectivo subsector productivo. Con

el fin de facilitar el siguiente paso se asignó como nombre ACT a la columna 2 (NombreActividad) y ID\_TIPO\_A a la columna 3 (IdTipoActividad).

Tabla 3. Actividades Productivas de la Zona de estudio

<b>IDActividad</b>	<b>NombreActividad</b>	<b>IdTipoActividad</b>
1	ACUÍCOLA Y PESQUERO	1
2	ARROZ	2
3	AVICULTURA	4
4	BOVINO	4
5	CACAO	2
6	CAÑA DE AZÚCAR	2
7	CÁRNICA PORCINA	4
8	CÍTRICOS	2
9	DOMESTICO	5
10	EQUINA Y ASNAL	4
11	FRUTALES	2
12	MAÍZ	2
13	OVINO CAPRINO	4
14	PASTO	2
15	PLÁTANO	2

- Finalmente, se aplicó la función *BUSCAR* en la Base de datos de Actividades Principales, para ellos se seleccionó como *Valor Buscado* la casilla de la actividad económica de la Base de datos, como *Vector De Comparación* los datos de la Columna ACT y como *Vector Resultado* los datos de la columna ID\_TIPO\_A.

```
=BUSCAR(S2;ACT;ID_TIPO_A
```

De esta manera se asignan el tipo de actividad a cada uno de los predios. Una vez clasificados los usuarios, esta información se añadió a la Geodatabase que permitió realizar el análisis espacial requerido en el estudio.

**Fase II:** Se llevó a cabo un análisis espacial para distribuir los puntos de monitoreo de calidad del agua sobre la cuenca media y baja del río Tune. Este análisis se basó en el geoprocesamiento de los datos espaciales disponibles.

- **Actividad 1. Identificación de puntos de interés sobre el cauce del río Tune.**

**1. Revisión de información existente:** Como primer paso se identificó si existía información sobre los vertimientos permitidos por la ley sobre el cauce del río Tune, captaciones y afluentes principales del río. Esta información fue consultada en la base de datos del portal web de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena – CAM.

Adicionalmente, se revisó la información topográfica de la zona y se analizaron imágenes satelitales para obtener un panorama general del área de estudio. También, se identificó el trazado del cauce del río con el fin de delimitar el área de estudio y determinar los puntos de fácil y difícil acceso, lo cual permitió establecer la ruta para la identificación de los puntos de interés en campo.

Para la delimitación del área de estudio se utilizaron los criterios establecidos en la Guía Técnica para el Ordenamiento del Recurso Hídrico Continental Superficial desarrollada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y adoptada en la Resolución 751 del año 2018.

De acuerdo con la Guía para el Ordenamiento del Recurso Hídrico (2018) la facilidad de acceso a las áreas de análisis y las condiciones topográficas son aspectos indispensables para determinar el tramo más apto para efectuar el estudio. La selección del tramo se hizo teniendo en cuenta las características similares a nivel hidrológico, geomorfológico, usos del agua y usos del suelo a lo largo de todo el tramo. Por consiguiente, se tuvo en cuenta el resultado del censo de usuarios realizado en la Fase I.

Los puntos de interés establecidos fueron de gran importancia ya que sirvieron como referencia clave para establecer una red de monitoreo eficiente, permitiendo ubicar estratégicamente los puntos y asegurando que se evaluaran los aspectos más relevantes de la calidad del agua del río Tune.

- 2. Toma de datos en campo:** Una vez realizada la revisión de la información existente, se procedió a definir los datos que eran necesarios recolectar. Para ello, se elaboró un formato de registro con el fin de facilitar la recolección de los datos en campo. Se establecieron puntos de monitoreo, considerando los vertimientos, los afluentes más importantes y puntos estratégicos sobre el cauce principal que permitieran evaluar el comportamiento de la calidad del agua del río Tune.

Para seleccionar estratégicamente los puntos de monitoreo, se consideraron factores como la hidrología, la ubicación de asentamientos humanos, actividades productivas y la accesibilidad a la zona, aspecto determinante para facilitar la toma de muestras, transporte de equipos y materiales. Se priorizaron puntos ubicados aguas arriba y aguas abajo de fuentes donde el río recibe el caudal de afluentes naturales o descarga de vertimientos puntuales de contaminación, considerando las entradas y

salidas del cuerpo de agua, así como también zonas representativas de diferentes usos del suelo. Adicionalmente, se tuvieron en cuenta sitios de captación del agua para consumo humano, sitios con cambios significativos en la dinámica fluvial de la fuente y puntos donde se evidencia que no se presenta actividad antrópica.

Para identificar y caracterizar las descargas como vertimientos en el trabajo de campo, se realizó un análisis cualitativo, identificando algunos aspectos típicos como colores oscuros, olor a metano, presencia de espuma, aceites, grasas y material flotante sobre el cauce, apariencia turbia y reporte de los lugareños de la subcuenca.

Una vez identificados los vertimientos sobre el cauce principal del Rio Tune y sus afluentes principales, se procedió a recolectar información georreferenciada utilizando un receptor GPS de alta precisión (Garmin Monterra con precisión de 1 a 3 metros) para cada uno de los puntos de interés. Como información principal, se tomó la información geográfica de cada punto de monitoreo y se registraron sus características fisicoquímicas.

Posteriormente, con el objetivo de facilitar el análisis espacial, se llevó a cabo una tipificación de los vertimientos detectados, agrupándolos en categorías según sus características y naturaleza. Esta clasificación permitió unificar y organizar la información de manera sistemática para incorporarla a la base de datos geográfica para su posterior análisis.

- **Actividad 2. Localización de los puntos de monitoreo sobre el cauce del Río Tune.**

**Organización de la Información:** una vez recolectada la información necesaria en cada uno de los puntos de interés, los datos obtenidos en formato GPX bajo el sistema de referencia WGS84 fueron importados y convertidos a shapefile empleando la herramienta de conversión del Software ArcGIS Pro.

Adicionalmente, se realizó un ajuste a los datos geográficos mediante la comparación con imágenes satelitales, con el fin de minimizar los errores inherentes al GPS. Finalmente, los puntos de monitoreo se localizaron en zonas estratégicas de alto valor ecosistémico, social y ambiental. Para la toma de las muestras se realizaron dos campañas de monitoreo, durante dos periodos climáticos diferentes (época seca y periodo de lluvias), la primera en el mes de enero y la segunda en el mes de marzo de 2023. La tabla de atributos de los puntos de monitoreo fue alimentada con información de la calidad del agua de cada punto analizado.

**Fase III:** Analizar los resultados fisicoquímicos e hidrobiológicos del agua del Río Tune.

- **Actividad 1. Recolección de los resultados Fisicoquímicos e hidrobiológicos existentes sobre el cauce principal del Río Tune.**

1. **Revisión de información existente:** Con el objetivo de tener una línea base de los parámetros fisicoquímicos, Microbiológicos e hidrobiológicos del agua que discurre sobre el Río Tune para de esta manera, tener un registro del estado de la calidad del agua desde años atrás y así, poder identificar si la carga contaminante recibida ha sido constante

o por lo contrario a disminuido o aumentado, se extrajo información de calidad del agua de diferentes instrumentos de planificación ambiental siendo entre ellos el Plan de saneamiento y Manejo de vertimientos – PSMV (2017 – 2027) emitido por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena – CAM, la cual fue solicitada directamente a la Corporación, fue de suma importancia debido a que se obtuvo información sobre la calidad del Vertimiento de la Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR MATADERO) correspondiente al punto de monitoreo V01 y resultados aguas arriba y aguas abajo de la fuente receptora Río Tune siendo los puntos C03 y C04 para el presente proyecto, es de mencionar que dicho instrumento permitió registrar información existente para el año 2017.

Asimismo, se obtuvo información por parte de Empresas Públicas de Palermo Huila sobre la caracterización de aguas residuales del vertimiento planta de tratamiento de aguas residuales PTAR MATADERO y aguas arriba y aguas abajo del Río Tune a partir del año 2018 hasta el año 2020, dicha información fue relacionada a parámetros Insitu, resultados de laboratorio (Físicoquímicos, Hidrocarburos, Compuestos de fósforo, compuestos de Nitrógeno y otros parámetros para análisis y reporte), así como también, información relacionada con el análisis de los índices de contaminación del agua del Río Tune como ICOMI, ICOMO, ICOSUS.

Finalmente, con el objetivo de identificar si actualmente el Río Tune localizado en el municipio de Palermo cuenta con el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico - PORH se realizó la consulta en la página de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena – CAM en la sección transparencia, normatividad, acuerdos de la

CAM, donde se identificó que dicha corriente hídrica si cuenta con el Plan de Ordenamiento, sin embargo, se logró obtener sólo el acuerdo donde mencionan el inicio del proyecto en el municipio de Palermo, por tanto, fue necesario la solicitud de la resolución donde está todo lo relacionado al PORH del Río Tune.

2. **Verificación de la información necesaria:** Una vez se recopilaron los resultados fisicoquímicos, Microbiológicos e hidrobiológicos existentes sobre el cauce principal del Río Tune, en los instrumentos de planificación ambiental como el Plan de saneamiento y Manejo de vertimientos – PSMV (2017 – 2027) y la caracterización de aguas residuales emitida por Empresas públicas de Palermo – Huila, se realizó la verificación de que estos contaran con la mayoría de los parámetros establecidos en la resolución 1076 del 2015 del sector ambiente y desarrollo sostenible los cuales permitirán realizar la evaluación de la calidad del agua teniendo en cuenta los diferentes usos que la población le da a este valioso recurso.
3. **Muestras para determinar la calidad:** En el mes de enero y abril del año 2023, el personal encargado por parte del laboratorio Construcsuelos Suministros Ltda. localizados en la ciudad de Neiva, el cual cuenta con la mayoría de los parámetros acreditados por el IDEAM mediante Resolución N° 0003 del 02 de enero del 2019, realizó las muestras de agua en los puntos definidos sobre el cauce principal del Río Tune, los afluentes principales y el vertimiento representativo (V01), donde se evaluaron los parámetros establecidos en la resolución 1076 del 2015 del sector ambiente y desarrollo sostenible, los cuales permitieron analizar la calidad presente y establecer si el agua es apta o no para los diferentes usos presentes en el área de estudio, por tanto, a

continuación, en la Tabla 4 citada a continuación, se presenta el listado de los parámetros objeto de análisis durante las dos campañas de monitoreo realizadas, siendo la primera en el mes de enero de 2023 y la segunda en el mes de abril de 2023.

Tabla 4. Parámetros físicos, químicos, microbiológicos e hidrobiológicos para los monitoreos

N°	PARÁMETROS	UNIDAD	Analizar en:	
			VERTIMIENTOS	AGUA SUPERFICIAL
<b>IN SITU</b>				
1	PH	Unidades	X	X
2	Conductividad eléctrica	µS/cm	X	X
3	Oxígeno disuelto	mg/LO <sub>2</sub>	X	X
4	Temperatura del agua	°C	X	X
5	Caudal	L/s	X	X
<b>FISICOQUÍMICOS BÁSICOS</b>				
6	Alcalinidad	mg/L CaCO <sub>3</sub>	X	X
7	Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>		X
8	DBO <sub>5</sub> Total	mg/L O <sub>2</sub>	X	X
9	DBO <sub>5</sub> Filtrada	mg/L O <sub>2</sub>	X	X
10	DBO <sub>5</sub> Soluble	mg/L O <sub>2</sub>	X	X
11	DQO Total	mg/L O <sub>2</sub>	X	X
12	DQO Total/COT	(mg/L O <sub>2</sub> ) (mg/L)	X	X
13	DBO última	mg/L O <sub>2</sub>	X	X
14	Sólidos suspendidos totales	mg/L	X	X
15	Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	X	X
16	Sólidos sedimentables	mg/L	X	
17	Sólidos disueltos totales	mg/L	X	X
18	Turbiedad	UNT	X	X
19	Nitrógeno total	mg/L N	X	X
20	Nitrógeno amoniacal	mg/L N-NH <sub>3</sub>	X	X
21	Nitritos	mg/L N-NO <sub>2</sub>	X	X

N°	PARÁMETROS	UNIDAD	Analizar en:	
			VERTIMIENTOS	AGUA SUPERFICIAL
22	Nitratos	mg/L N-NO <sub>3</sub>	X	X
23	Fósforo total	mg/L P	X	X
24	Ortofosfatos	mg/L P-PO <sub>4</sub>	X	X
25	Grasas y aceites	mg/L	X	X
26	SAAM	mg/L	X	X
27	Fenoles	mg/L	X	X
28	Hidrocarburos totales del petróleo	mg/L	X	X
29	Clorofila-a	mg/L Chl-a		X
30	Compuestos organoclorados	mg/L		X
31	Compuestos organofosforados	mg/L		X
<b>METALES Y METALOIDES</b>				
32	Arsénico (As)	mg/L	X	X
33	Bario (Ba)	mg/L	X	X
34	Cadmio (Cd)	mg/L	X	X
35	Cinc (Zn)	mg/L	X	X
36	Cobre (Cu)	mg/L	X	X
37	Cromo Total (Cr)	mg/L	X	X
38	Hierro (Fe)	mg/L	X	X
39	Manganeso (Mn)	mg/L	X	X
40	Mercurio (Hg)	mg/L	X	X
41	Níquel (Ni)	mg/L	X	X
42	Plomo (Pb)	mg/L	X	X
43	Selenio (Se)	mg/L	X	X
44	Vanadio (Va)	mg/L	X	X
<b>IONES</b>				
45	Cianuros	mg/L CN-	X	X
46	Cloruros	mg/L Cl-	X	X

N°	PARÁMETROS	UNIDAD	Analizar en:	
			VERTIMIENTOS	AGUA SUPERFICIAL
47	Sulfatos	mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	X	X
48	Calcio	mg/L		X
49	Magnesio	mg/L		X
50	Sodio	mg/L		X
<b>MICROBIOLÓGICOS</b>				
51	Coliformes Termotolerantes	NMP/100mL	X	X
52	Coliformes totales	NMP/100mL	X	X
53	Coliformes fecales	NMP/100mL	X	X
54	E. Coli	NMP/100mL	X	X
<b>HIDROBIOLÓGICOS</b>				
55	Perifiton	[Org/cm <sub>2</sub> ], [g/m <sup>2</sup> Chl-a] y [g/m <sup>2</sup> Peso seco]		X
56	Macroinvertebrados	[Org/cm <sub>2</sub> ]		X
57	Peces	[# individuos] por especie, [g] por especie		X

Fuente: Decreto 1076 del 2015

Los parámetros In-Situ fueron medidos de forma puntual y determinaron el estado inmediato del cuerpo de agua en los sitios en donde se realizó la medición; dichos parámetros se midieron directamente en el sitio debido a que sufren variaciones considerables durante los procesos de transporte y almacenamiento. Los parámetros medidos fueron: Caudal Promedio, pH, Conductividad Eléctrica, Temperatura del Agua y Oxígeno Disuelto mediante un Multiparámetro Hach (HQ40d).

**Toma de muestras fisicoquímicas y microbiológicas:** La toma de muestras sobre el cuerpo de agua principal fue realizada siguiendo la misma masa de agua desde aguas arriba hacia aguas abajo, para lo cual se generaron previamente los tiempos de viaje, los parámetros fisicoquímicos

sobre los cuerpos de agua correspondieron a muestras integradas en la sección transversal y en la profundidad, mientras que, los parámetros microbiológicos se tomaron de forma puntual, en el centro del cauce o en la vertical asociada con el punto más profundo en la sección transversal y finalmente, las muestras del vertimiento se tomaron de forma compuesta con toma de alícuota y parámetros In situ cada 30 minutos, durante 8 horas.

La recolección de las muestras fue llevada a cabo por el personal capacitado del laboratorio Construcsuelos & Suministro Ltda. en los sitios de estudio seleccionados sobre el Río Tune, Quebrada La Guagua y sus principales tributarios.

Por tanto, para el llenado de los recipientes, en primera instancia, se purgó cada uno de ellos antes de recolectar la muestra final, como mínimo 3 veces. Los recipientes no fueron llenados completamente, excepto en algunos casos específicos (DBO, Sulfuros, entre otros), debido a que se pueden generar rupturas o explosiones por cambios de temperatura y presión. Estos se llenaron hasta el cuello, garantizando su preservación para cada parámetro en particular, finalmente, para el llenado de las bolsas microbiológicas, su colecta se realizó en bolsas especiales esterilizadas las cuales se sumergieron selladas en el Río, una vez inmersa se abrió y se llenó hasta la mitad, sin sacarla se cerró, posteriormente, fue retirada del cauce y refrigerada adecuadamente.

Es importante mencionar que, para la recolección de las muestras se aplicó la metodología establecida en el procedimiento de muestreo de aguas establecido por el IDEAM. Se llenaron los frascos previamente rotulados, teniendo en cuenta que los correspondientes a grasas y aceites y coliformes, se llenan directamente de la fuente, mientras que los demás se llenaron con ayuda de un balde aforado de plástico, asimismo, se llevaron a cabo los protocolos

de recolección, almacenamiento y transporte de las muestras; siguiendo lo estipulado en la cadena de custodia y almacenando las muestras en los recipientes adecuados, con el fin de garantizar la veracidad del resultado del análisis, en la Tabla 5 citada a continuación se observa todo lo relacionado con la preparación de recipientes, materiales y equipos mencionados anteriormente.

Tabla 5. Preparación de Recipientes, Materiales y Equipos

1. Revisar los recipientes utilizados por parte del laboratorio (Material del recipiente de acuerdo con el parámetro a analizar y rotulo de cada recipiente)



2. Chequear el buen estado de los equipos (Molinetes, Multiparámetro y Conductímetro), es decir, la adecuada calibración, ajuste y los accesorios completos.





3. Revisar los buffer de calibración del multiparámetro (pH 4, pH 7 pH 10), la fecha de reenvasado y cantidad suficiente para llevar a campo.



4. Verificar la cantidad de los reactivos de preservación; tanto el KCl para preservar el lente óptico del electrodo del pH metro como los reactivos para la fijación de las muestras.



---

La preservación de las muestras dentro del plan de monitoreo juega un papel importante, pues de ésta depende la veracidad en los resultados hallados para cada muestra tomada; para ello se requiere la revisión de recipientes, materiales y equipos que se utilicen dentro del monitoreo.

Por tanto, todas las muestras se refrigeraron con hielo, con el fin de mantener una temperatura aproximadas de  $6\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$  (evitando la congelación), mientras se transportan las muestras al laboratorio, para el transporte de los envases y preservantes, el embalaje se realizó en neveras de icopor, bien selladas de tal manera que no se presentaran derrames ni rupturas de estos. Las muestras fueron ingresadas al laboratorio al día siguiente de cada monitoreo, una vez recibidas asignaron un código, para dar cumplimiento con el sistema de gestión de calidad del laboratorio, con este código pasan a ser analizadas y procesadas, en la Tabla 6 citada a continuación, se evidencian los parámetros analíticos muestreados con el volumen requerido para su análisis y el tipo de recipiente en que se realizó el envasado, conforme al Standard Methods, el cual se utilizó por el laboratorio subcontratado.

Tabla 6. Preservación y almacenamiento de muestras de agua

Parámetro	Recipiente	Cantidad mínima	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado
Acidez	P. V	100	Puntual	Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C	24 h
Alcalinidad total	P. V	200	Puntual	Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C	28 d
Boro	P	250	Puntual Compuesta	Adicionar HNO <sub>3</sub> Ph <2 C Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C	Extraer en menos de 7 días
Benceno, tolueno xilenos, BTEX	V amb.	100	Puntual	Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C	28 d
Bromuro	P. V	100	Puntual Compuesta	No requiere	7 d
Carbono orgánico total	P. V	100	Puntual Compuesta	Analizar inmediatamente o Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C y adicionar HCL H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> o H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	24 h, si hay presencia de sulfuro
Cianuro total	P. V	1000	Puntual Compuesta	Analizar dentro de los 15 minutos, adicionar NaOH para pH >12 si la muestra se va almacenar. Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C en la oscuridad Adicionar Toisulfato si hay presencia de cloro residual	14 d
Cloro total residual	P. V	500	Puntual	Analizar inmediatamente	0,25 h
				*sin filtrar, sin paso de luz Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C	24-48 h
Clorofila a, b, c	P. V	500	Puntual	Filtrada, sin paso de luz Refrigerar a 20°C (No almacenar en el congelador)	28 d
Cloruros	P. V	100	Puntual Compuesta	No requiere	28 d
Dióxido de carbono	P. V	100	Puntual	Analizar inmediatamente	0,25 h

Parámetro	Recipiente	Cantidad mínima	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado
<b>Heterótrofos</b>	P. V	150	Puntual	Refrigerar <8°C	24 h
<b>Coliformes fecales termotolerantes</b>	P. V	100	Puntual	Refrigerar ≤ 6° C	12 h
<b>Coliformes Totales</b>	P. V	100	Puntual	Refrigerar ≤ 6° C	12h
<b>Color Aparente</b>	P.V (A)	500	Puntual Compuesta	Refrigerar ≤ 6° C	24 h
<b>Color Real</b>	P.V (A)	500	Puntual Compuesta	Refrigerar ≤ 6° C	24 h
<b>Compuestos Fenólicos</b>	V(A) recubierto con aluminio	1000	Puntual Compuesta	Acidificar con HCl 6N Refrigerar ≤ 6° C	Extraer en menos de 14 días y el extracto se puede analizar en un periodo de 30 días. Permanecer ≤ 6° C
<b>Conductividad</b>	P. V	500	Puntual Compuesta	Refrigerar ≤ 6° C	28 d
<b>Cromo Hexavalente</b>	P.V (lavado previamente con 1+1 HNO3)	250	Puntual	Refrigerar ≤ 6° C. pH 9,3-9,7 con buffer de sulfato de amonio, preservante especificado en el método 3500- Cr para ampliar a 28 días	28d
<b>DBO5</b>	P. V	1000	Puntual Compuesta	Refrigerar ≤ 6° C	6 h
<b>Detergentes Tensoactivos (SAAM)</b>	P. V	250	Puntual Compuesta	Refrigerar ≤ 6° C	48 h
<b>DQO</b>	P. V	100	Puntual Compuesta	Analizar tan pronto como sea posible o adicionar H2SO4 a Ph<2; refrigerar ≤ 6° C	28 d
<b>Dureza Cálcica</b>	P. V	100	Puntual Compuesta	Adicionar HNO3 o H2SO4 para Ph<2	6 meses

Parámetro	Recipiente	Cantidad mínima	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado
<b>Dureza Magnésica</b>	P. V	100	Puntual Compuesta	Adicionar HNO <sub>3</sub> o H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> para Ph<2	6 meses
<b>Dureza Total</b>	P. V	100	Puntual Compuesta	Adicionar HNO <sub>3</sub> o H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> para Ph<2	6 meses
<b>E. Coli</b>	P. V	100	Puntual	Refrigerar ≤ 6° C	12 H
<b>fenoles</b>	P. V	500	Puntual Compuesta	Refrigerar ≤ 6° C, Adicionar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , para Ph<2	28 días hasta la extracción; 2 días después de la extracción
<b>Fitoplancton</b>	P. V	100	Puntual	Solución Transeau 1:1 y 3 horas de Lugol Envase Oscuro	2 meses
<b>fluoruros</b>	P	100	Puntual Compuesta	No requiere	28 días
<b>fosfatos</b>	V (lavado previamente con 1+1 HNO <sub>3</sub> )	100	Puntual	Para fosfatos disueltos filtrar inmediatamente Refrigerar ≤ 6° C	48 h
<b>Fosforo Total</b>	P. V	100	Puntual Compuesta	Adicionar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Ph<2 refrigerar ≤ 6° C	28 d
<b>Grasas y Aceites</b>	V boca ancha	1000	Puntual	Adicionar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Ph<2 refrigerar ≤ 6° C	28 d
<b>Hidrocarburos aromáticos policíclicos</b>	V recubierta de papel aluminio	1000	Puntual Compuesta	Tiosulfato de sodio 0,008% Refrigerar ≤ 6° C	Extraer en menos de 7 días y el extracto se puede analizar en un periodo de 40 días
<b>Bifelinos policlorados (PCB's)</b>	V. ámbar con tapa recubierta con papel aluminio	1000	Puntual Compuesta	Tiosulfato de sodio 0,008% Refrigerar ≤ 6° C	Extraer en menos de 7 días y el extracto se puede analizar en un periodo de 40 días

Parámetro	Recipiente	Cantidad mínima	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado
<b>Hidrocarburos Totales</b>	V. boca ancha	1000	Puntual Compuesta	H2SO4 o HCl pH <2 Refrigerar ≤ 6° C	28 d
<b>Huevos de Helminetos</b>	P. V	2000	Puntual Compuesta	Refrigerar 8+2° C	2 meses
<b>Ictiofauna</b>	P.V bolsa hermética	N. A	Puntual	Solución Transeau 1: 1o Etanol 70%	2 meses
<b>Macrófitas acuáticas</b>	Papel, bolsa hermética	N. A	Puntual	Solución Transeau Atomizado	2 meses
<b>Perifiton</b>	P. V	100	Puntual	Solución transeau 1:1 y 3 gotas de lugol	2 meses
<b>Macroinvertebrados bentónicos</b>	P	N. A	Puntual	Solución Transeau 1: 1o Etanol 70%	2 meses
<b>Mercurio</b>	P.V (lavado previamente con 1+1 HNO3)	500	Puntual Compuesta	Adicionar HNO3 o H2SO4 para Ph<2 Refrigerar ≤ 6° C	28 d
<b>metales</b>	P.V (lavado previamente con 1+1 HNO3)	1000	Puntual Compuesta	<b>Metales disueltos:</b> Filtrar inmediatamente y adicionar HNO3 para Ph<2 <b>Metales Totales:</b> Adicionar HNO3 pH<2 refrigerar ≤ 6° C	6 meses
<b>nitrate</b>	P. V	100	Puntual Compuesta	Analizar tan pronto como sea posible refrigerar ≤ 6° C	48 H
<b>nitrate +Nitrito</b>	P. V	200	Puntual Compuesta	Adicionar H2SO4 Ph<2 refrigerar ≤ 6° C	28 D
<b>Nitrógeno Amoniacal</b>	P. V	500	Puntual Compuesta	Analizar tan pronto como sea posible o adicionar H2SO4 a Ph<2; refrigerar ≤ 6° C	28 d
<b>Nitritos</b>	P. V	100	Puntual Compuesta	Analizar tan pronto como sea posible refrigerar ≤ 6° C	48 h

Parámetro	Recipiente	Cantidad mínima	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado
<b>Nitrógeno Total Kjeldahl</b>	P. V	500	Puntual Compuesta	Adicionar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Ph < 2 refrigerar ≤ 6° C	7d
<b>Olor</b>	V	500	Puntual	Analizar tan pronto como sea posible refrigerar ≤ 6° C	6 h
<b>Oxígeno Disuelto Por electrodo</b>	V. Botellas para DBO	300	Puntual	Analizar inmediatamente	0,25 h
<b>Oxígeno Disuelto por Winkler</b>	V. Botellas para DBO	300	Puntual	la titulación puede retrasarse después de la acidificación	8 h
<b>Pesticidas organoclorados</b>	V (Lavado con solventes orgánicos o al horno)	1000	Puntual Compuesta	Refrigerar ≤ 6° C Agregue 100 mg de ácido ascórbico/L si hay cloro residual Tiosulfato de sodio 0,008% en CFR. 136	7 días hasta la extracción, 40 días después de la extracción
<b>Pesticidas organofosforados</b>	V (Lavado con solventes orgánicos o al horno)	1000	Puntual	Refrigerar ≤ 6° C Agregue 100 mg de ácido ascórbico/L si hay cloro residual Tiosulfato de sodio 0,008% en CFR. 136	7 días hasta la extracción, 40 días después de la extracción
<b>Ph</b>	P. V	50	Puntual	Analizar inmediatamente	0,25 h
<b>Salinidad</b>	V (Sello de cera)	240	Puntual	Analizar inmediatamente o utilizar sello de cera	6 meses
<b>solidos disueltos totales</b>	P. V	1000	Puntual Compuesta	Refrigerar ≤ 6° C	7 d
<b>Solidos sedimentables</b>	P. V	1000	Puntual	Refrigerar ≤ 6° C	7 d
<b>Solidos Suspendidos Totales</b>	P. V	1000	Puntual Compuesta	Refrigerar ≤ 6° C	7 d
<b>Solidos Totales</b>	P. V	200	Puntual Compuesta	Refrigerar ≤ 6° C	7 d

Parámetro	Recipiente	Cantidad mínima	Tipo de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado
<b>Sulfatos</b>	P. V	100	Puntual Compuesta	Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C	28 d
<b>Sulfuro</b>	P. V	100	Puntual Compuesta	Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C adicionar 4 gotas acetato de zinc 2N por cada 100 mL, adicionar NaOH A Ph>9	28 d
<b>Formaldehido</b>	V. ámbar	250	Puntual Compuesta	Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C	48 h
<b>compuestos orgánicos volátiles</b>	V	40 ml lleno sin espacio	Puntual	Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C	Extraer en menos de 7 días
<b>Salinidad</b>	V	100	Puntual Compuesta	Analizar inmediatamente O Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C	48 h
<b>trihalometanos</b>	V. ámbar	40 ml lleno sin espacio	Puntual Compuesta	Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C	Extraer en menos de 7 días
<b>Temperatura</b>	P. V	N. A	Puntual	Analizar inmediatamente	0,25 h
<b>turbidez</b>	P. V	100	Puntual Compuesta	Analizar el mismo día, almacenar en la oscuridad hasta 24 horas. Refrigerar $\leq 6^{\circ}$ C	24h
<b>yodo</b>	P. V	500	Puntual	Analizar inmediatamente	0,25 h
<b>Zooplankton</b>	P. V	100	Puntual	Solución Transeau 1,1 o Etanol 70%	2 meses

Fuente: Adaptado de Construcsuelos Suministros Ltda. 2023

**Toma de muestras Hidrobiológicas:** Para la toma de muestras hidrobiológicas inicialmente se organizaron los recipientes del monitoreo, para Perifiton fueron plásticos ámbar opacos y para macroinvertebrados bentónicos frascos plásticos, los cuales estaban correctamente rotulados con la información de cada punto, así mismo se organizaron los reactivos con que fueron preservadas las muestras (solución Transeau), los formatos para la captura de datos (cadena de custodia), los equipos de monitoreo en este caso para macroinvertebrados bentónicos fueron la (Red Surber) y para Perifiton un cuadrante de acetato con un cepillo de dientes, estos están establecidos de acuerdo a los diferentes tipos de sistemas de agua (sistema lotico), para la captura de peces la atarraya.

La toma de dichas muestras fue establecida de acuerdo con los métodos y técnicas descritas por APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association) y WPCF (Water Pollution Control Federation) en el Standard Methods 22nd Edition (2012).

Los envases para este tipo de análisis cumplieron con los siguientes protocolos:

- **Perifiton:** recipientes plásticos ámbar opacos de 100 mL.
- **Macroinvertebrados bentónicos:** recipientes plásticos o bolsas con cierre hermético.
- **Ictiofauna:** Deben ser recolectados en bolsas siglos o bolsas con cierre hermético preferiblemente

En la Tabla 7 citada a continuación se presentan las especificaciones metodológicas que se tuvieron en cuenta para la toma de muestras hidrobiológicas durante las dos campañas de monitoreo ejecutadas.

Tabla 7. Especificaciones metodológicas para la toma de muestras

COMUNIDAD	TIPO DE MUESTRA	TÉCNICA	PRESERVACIÓN	ALMACENAMIENTO MÁXIMO RECOMENDADO
<b>Perifiton</b>	Puntual	Remoción biopelícula en sustratos variables	Solución Transeau 1:1 o Etanol 70%	2 meses
<b>Macroinvertebrados bentónicos</b>	Puntual	Remoción y filtración del lecho contracorriente	Solución Transeau 1:1 y 3 gotas de lugol.	2 meses
<b>Ictiofauna</b>	Puntual	Captura y/o colecta de organismos	Solución Transeau 1:1 o Etanol 70%	2 meses

Fuente: Adaptado de Rice et al., (2012)

Para la toma de las muestras hidrobiológicas (Bentos) se realizó un muestreo cuantitativo con la red surber la cual consistió en una red con un marco de área conocida (0,09 m<sup>2</sup>) que se posicionó sobre el fondo del cuerpo de agua de la siguiente forma: se ubicó en sentido contrario a la corriente sobre el lecho del sistema, se removió con las manos el sustrato haciendo que los organismos flotarán hacia la superficie y fueran arrastrados al interior de la red por efecto de la corriente. Así mismo, se levantaron algunas rocas y se lavaron de tal forma que el resultado de la actividad también fuera al interior de la red.

Para las algas Perifíticas (Perifiton) también se realizó un muestreo cuantitativo el cual consistió en ubicar visualmente los sustratos bien sea mixto (rocas, hojas y/o pedazos de troncos) o solo rocas, principalmente que se vieran sumergidos y con presencia de biopelículas se dispuso de un cuadrante de acetato de un área conocida (9cm<sup>2</sup>) sobre el sustrato y se raspó la superficie con un cepillo de dientes, este ejercicio se realizó 3 veces debido a que el sustrato fue solo roca.

Para (ictiofauna) se realizó un muestreo cualitativo el cual consistió generalmente por medio de diferentes artes de pesca como, atarrayas y red de mano, lo cual se realizó de la siguiente manera: se delimitó el área de muestreo, realizaron 10 lances de atarraya, es de mencionar que el monitoreo se realizó en sentido aguas abajo – aguas arriba para disminuir la perturbación del hábitat y el escape de los especímenes y así obtener una muestra representativa.

La fase de laboratorio comenzó con la limpieza y preparación de las muestras para su posterior análisis. Se realizó la identificación de los organismos hasta el menor nivel taxonómico posible, se efectuó el conteo de organismos, y finalmente se realizó el reporte de los resultados obtenidos. Es importante mencionar que el análisis de las muestras hidrobiológicas también fue realizado por el laboratorio Construcsuelos Suministros Ltda. La Tabla 8 presente a continuación, plasma el método de análisis de variables hidrobiológicas.

Tabla 8. Método de análisis variables Hidrobiológicas

<b>COMUNIDAD</b>	<b>METODOLOGÍA</b>
<b>Perifiton</b>	SM 10300 B. Rivera y Zapata, 2009 En: Acosta et al., 2009
<b>Macroinvertebrados bentónicos</b>	SM 10500B
<b>Ictiofauna</b>	EPA/600/R-92/111

*Fuente: Adaptado de Construcsuelos Suministros, (2023)*

- **Actividad 2: Tabulación y análisis de los resultados recolectados**

El análisis de los datos recolectados se realizó por medio de los índices de calidad - ICA a través de la metodología del IDEAM, ICO'S, BMWP/Col e Índice Promedio Ponderado Hidrobiológico - IPPH.

- 1. Tabulación de los resultados de calidad:**

Una vez entregados los resultados obtenidos en las muestras de agua realizadas sobre los puntos presentes en el cauce principal del Río Tune, los afluentes principales y el vertimiento representativo, se dio inicio a la tabulación de dichos resultados en una base de datos en formato Excel, donde se digitalizaron todos los resultados tanto los In Situ (Ph, Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, Temperatura del agua y Caudal) como los fisicoquímicos básicos, Metales y Metaloides, Iones, Microbiológicos y los Hidrobiológicos, es de mencionar que, con los resultados obtenidos en los In Situ, se realizó una comparación del comportamiento de cada uno de los parámetros por medio de gráficas de barras, el cual permitió establecer el tramo donde se presenta mayor concentración de cargas contaminantes, mientras que, en los demás se realizó una revisión con el fin de identificar si cumplen con el límite máximo permisible establecido en la resolución 631 de 2015 para cada parámetro.

- **Análisis de resultados fisicoquímicos para uso agrícola**

Una vez tabulados los resultados obtenidos en los puntos presentes sobre el cauce principal y los afluentes principales en ambas campañas de monitoreo, se realizaron los cálculos necesarios para el análisis de los resultados fisicoquímicos para uso agrícola, donde se tuvieron en cuenta los datos de algunos Cationes como el Sodio, Magnesio y Calcio, Algunos Aniones como Sulfatos y Cloruros y otros como los Nitratos de cada sitio de muestreo en

estudio, una vez registrados los datos obtenidos, se realizó la conversión de mg/L a meq/l para poder realizar el análisis.

Por tanto, para efectuar este análisis fue necesario calcular algunos índices de calidad de agua como la conductividad Eléctrica, Salinidad Efectiva y salinidad potencial. La mayoría de los cálculos de estos índices, así como muchos de los parámetros de clasificación establecidos, requieren que las cantidades obtenidas para los aniones y cationes fueran expresadas en miliequivalentes por litro. A continuación, se presenta la relación de mg/L a meq/L y los resultados obtenidos de la conversión:

$$\frac{\text{mEq}}{\text{L}} = \frac{\frac{\text{mg}}{\text{L}} * \text{valencia}}{\text{Peso atómico}}$$

- **Análisis de acuerdo con el contenido de Sales Solubles**

Se realizaron los cálculos necesarios para el análisis de acuerdo con el contenido de sales solubles, donde se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos en el parámetro conductividad del cauce principal y los afluentes principales, para seguidamente, definir la clasificación teniendo en cuenta la información presente en la Tabla 9 citada a continuación.

Tabla 9. Clases de Aguas de acuerdo con la Conductividad Eléctrica

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA		CONCENTRACIÓN DE SAL
CE a 25 °C (µs/cm)	CLASIFICACIÓN	gr/l (aprox.)
0-250	Agua de Baja Salinidad	<0,2
250-750	Agua de Salinidad Media	0,2 – 0,5
750-2250	Agua Altamente Salina	0,5 – 1,5
más de 2250	Agua Muy Altamente Salina	1,5 – 3,0

Fuente: Pizarro, (1985)

- **Análisis de acuerdo con el contenido de Elementos Tóxicos**

El análisis de acuerdo con el contenido de elementos tóxicos se realizó por medio del contenido de cloruros el cual nos permitió establecer el nivel tóxico en cada sitio de muestreo y el índice de magnesio aplicando la ecuación propuesta por AZABOLCS y DARAB citados por (Pizarro, 1978) para las muestras tomadas sobre el Río Tune y sus principales afluentes, el cual permitió establecer si el agua es apta para el uso agrícola o no, por medio de la siguiente clasificación presente en la Tabla 10 se estableció el nivel tóxico según el contenido de cloruros presente en cada punto de monitoreo.

Tabla 10. Niveles Tóxicos de Cloruros en aguas para riego

NIVEL TÓXICO	CONTENIDO DE CLORUROS (mEq/l)
Inexistente	< 4.0
Problema Creciente	4.0 – 10.0
Problema Grave	> 10.0

Fuente: Adaptado de Pérez, (2011)

Y finalmente, por medio de la siguiente ecuación propuesta por AZABOLCS y DARAB citados por (Pizarro, 1978), se calculó el índice de Magnesio (Img) en cada punto presente sobre el cauce principal y los afluentes principales.

$$\text{Img} = \frac{\text{Mg}^{++}}{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}} \times 100$$

- **Análisis de Resultados Físicoquímicos para consumo humano y doméstico**

Este análisis se realizó teniendo en cuenta los parámetros y los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución N° 2115 de 2007 emitida por el Ministerio de la

protección social, Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano (Ministerio de la protección social, Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2007).

## **2. Análisis por medio del ICA IDEAM:**

Es importante mencionar que, el índice de calidad del agua ICA por la metodología establecida por el IDEAM es un número (entre 0 y 1) que señala el grado de calidad de un cuerpo de agua, en términos del bienestar humano independiente de su uso. Este número es una agregación de las condiciones físicas, químicas y en algunos casos microbiológicas del cuerpo de agua, el cual da indicios de los problemas de contaminación (IDEAM, 2013).

Por tanto, se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos en parámetros como Oxígeno Disuelto, pH, Demanda Química de Oxígeno - DQO, Sólidos Suspendidos Totales - SST, Conductividad y NT/PT que evalúan la calidad del agua, puesto que, el índice de calidad del agua en corrientes superficiales corresponde a una expresión numérica agregada y simplificada, surgida de la sumatoria aritmética equiponderada de los valores que se obtienen al medir la concentración de las variables en mención (IDEAM, 2020).

**Fórmula de cálculo del indicador es:**

$$ICA_{njt} = \sum_{i=1}^n (W_i * I_{ijkt})$$

- ***ICAnjt*** Es el Índice de Calidad del Agua de una determinada corriente superficial en la estación de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t, evaluado con base en n variables.
- ***Wi*** Es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i.
- ***Iikjt*** Es el valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación de monitoreo j, registrado durante la medición realizada k, del período de tiempo t.
- **n** Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; en este caso 7 variables.

- **Cálculo del valor de cada variable**

El procedimiento general consistió en ingresar la concentración de la variable de calidad del agua i en la curva funcional correspondiente y estimar el valor *Iikjt*. A continuación, se muestran las ecuaciones de referencia:

1. **Oxígeno disuelto (OD):** Esta variable tiene el papel biológico fundamental de definir la presencia o ausencia potencial de especies acuáticas (IDEAM, 2020).

se calcula el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto *PSOD*:

$$PS_{OD} = \frac{O_x * 100}{C_p}$$

Donde:

- **Ox:** Es el oxígeno disuelto medido en campo (mg/L) asociado a la elevación, caudal y capacidad de Re oxigenación.
- **Cp:** Es la concentración de equilibrio de oxígeno (mg/L), a la presión no estándar, es decir, oxígeno de saturación.

Una vez calculado el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (en este caso el % de saturación para cada estación fue medido con multiparámetro en cada estación de monitoreo, durante las dos campañas), el valor  $I_{OD}$  se calculó con la siguiente fórmula:

$$I_{OD} = 1 - (1 - 0,01 * PS_{OD})$$

Cuando el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto es mayor al 100%:

$$I_{OD} = 1 - (1 - 0,01 * PS_{OD} - 1)$$

- 2. Sólidos suspendidos totales (SST):** La presencia de sólidos en suspensión en los cuerpos de agua indica cambio en el estado de las condiciones hidrológicas de la corriente. Dicha presencia puede estar relacionada con procesos erosivos, vertimientos industriales, extracción de materiales y disposición de escombros. Tiene una relación directa con la turbiedad (IDEAM, 2020).

El subíndice de calidad para sólidos suspendidos se calculó de la siguiente manera:

$$I_{SST} = 1 - (-0,02 + 0,003 * SST)$$

Si  $SST \leq 4,5$ , entonces  $I_{SST}=1$

Si  $SST \geq 320$ , entonces  $I_{SST}=0$

- 3. Conductividad eléctrica (C.E.):** Está relacionada con la presencia de sales en solución cuya disociación genera cationes y aniones capaces de transformar energía eléctrica. Refleja condiciones de mineralización (IDEAM, 2020). Se calculó de la siguiente manera:

$$I_{C.E} = 1 - 10^{(-3,26+1,34\text{Log}_{10} C.E)}$$

Cuando  $I_{C.E} < 0$ , entonces  $I_{C.E} = 0$

- 4. Demanda química de oxígeno (DQO):** Refleja la presencia de sustancias químicas susceptibles de ser oxidadas a condiciones fuertemente ácidas y alta temperatura, como la materia orgánica, ya sea biodegradable o no, y la materia inorgánica (IDEAM, 2020). Mediante adaptación de la propuesta de la Universidad Politécnica de Catalunya se calculó con la siguiente fórmula:

Si  $DQO \leq 20$ , entonces  $I_{DQO} = 0,91$

Si  $20 < DQO \leq 25$ , entonces  $I_{DQO} = 0,71$

Si  $25 < DQO \leq 40$ , entonces  $I_{DQO} = 0,51$

Si  $40 < DQO \leq 80$ , entonces  $I_{DQO} = 0,26$

Si  $DQO > 80$ , entonces  $I_{DQO} = 0,125$

- 5. Potencial de Hidrógeno PH:** Mide el nivel de acidez o basicidad de las aguas; niveles extremos afectan los procesos de osmorregulación de la flora y fauna acuática (IDEAM, 2020).

Si  $pH < 4$ , entonces  $I_{pH} = 0,1$

Si  $4 \leq pH \leq 7$ , entonces  $I_{pH} = 0,02628419 * e^{pH*0,520025}$

Si  $7 < \text{pH} \leq 8$ , entonces  $I_{\text{pH}}=1$

Si  $8 \leq \text{pH} \leq 11$ , entonces  $I_{\text{pH}}= 1 * e^{[(\text{Ph}-8)-0,5187742]}$

Si  $\text{pH} > 11$ , entonces  $I_{\text{pH}}= 0,1$

- 6. Coliformes Fecales:** En términos de NMP/100 mL de Coliformes fecales, este subíndice indica la peligrosidad potencial de este tipo de contaminación microbiana proveniente de heces de animales de sangre caliente. Sus límites y formulación fueron de la siguiente manera:

Si  $\text{EC} < 50/100 \text{ mL}$  entonces  $I_{\text{EC}}= 0.98$

Si  $50/100 \text{ mL} < \text{EC} < 1600/100 \text{ mL}$  entonces  $I_{\text{EC}}=0.98 \times e^{((\text{EC}-50) \times 9.917754\text{E-}4)}$

Si  $\text{EC} > 1600/100 \text{ mL}$  entonces  $I_{\text{EC}}= 0.10$

- 7. Nitrógeno total/Fósforo total (NT/PT):** Mide la degradación por intervención antrópica.

La fórmula empleada para calcular el subíndice de calidad para NT/PT fue la siguiente:

Si  $15 \leq \text{NT/PT} \leq 20$ , entonces  $\text{INT/PT} = 0,8$

Si  $10 < \text{NT/PT} < 15$ , entonces  $\text{INT/PT} = 0,6$

Si  $5 < \text{NT/PT} \leq 10$ , entonces  $\text{INT/PT} = 0,35$

Si  $\text{NT/PT} \leq 5$ , ó  $\text{NT/PT} > 20$ , entonces  $\text{INT/PT} = 0,15$

- **Interpretación General de calidad:**

Los valores operativos que puede llegar a tomar el indicador fueron clasificados en categorías, de acuerdo con ellos se realizó la calificación de la calidad del agua de las corrientes superficiales plasmadas en la Tabla 11 citada a continuación.

Tabla 11. Clasificación de la calidad del agua según los valores que toma el ICA

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0,00 – 0,25	Muy mala	Rojo
0,26 – 0,50	Mala	Naranja
0,51 – 0,70	Regular	Amarillo
0,71 – 0,90	Aceptable	Verde
0,91 – 1,00	Buena	azul

Fuente: Hoja Metodológica IDEAM, (2013)

**8. Análisis por medio de los ICO'S:** los índices de contaminación (ICO) fueron:

ICOMI o de mineralización, ICOMO o de contaminación orgánica, ICOSUS relativo a los sólidos suspendidos e índice de contaminación por pH (ICOpH) (Ramírez et al., 1997).

Para el caso del ICOpH, se tomó como referencia la relación presentada para esta variable en el ICA de la NFS con las siguientes modificaciones:

- a. Invertir la escala 0 – 1 a 1 – 0 (Calidad Contaminación)
- b. Ajustar un ICO de cero a un Ph Neutro
- c. Ajustar los valores entre el extremo exterior y el promedio

En este orden de ideas, se presenta a continuación en la Tabla 12 la categoría de los valores de los índices de contaminación ICO'S.

Tabla 12. Categorías de valores de los índices de Contaminación ICOs

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Grado de contaminación	Señal de alerta
0.8-1.0	Muy Alta	Rojo
0.6 -0.8	Alta	Naranja
0.4-0.6	Media	Amarillo
0.2-0.4	Baja	Verde
0.0-0.2	Ninguna	Azul

Fuente: C.R.A, (2011)

- **Índice de contaminación de materia orgánica – ICOMO:**

Dicho índice se definió teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los parámetros Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO5, Coliformes Totales y el porcentaje de saturación de Oxígeno, se definió entre un rango de 0 a 1 donde el aumento desde el valor más bajo se relacionó con el aumento de contaminación en el cuerpo de agua.

Se definió entre un rango de 0 a 1 donde el aumento desde el valor más bajo se relacionó con el aumento de contaminación en el cuerpo de agua. Se definió de la siguiente manera:

$$ICOMO = \frac{1}{3}(I_{DBO} + I_{Coliformes\ Totales} + I_{Sat\ OD})$$

Donde:

- **ICOMO** es el índice de contaminación por materia orgánica, un número entre 0 y 1.
- **I** es el subíndice definido para cada parámetro.

Los subíndices para cada una de las variables se obtuvieron a partir de la aplicación de las siguientes funciones presentadas en la Tabla 13:

Tabla 13. Factores de ponderación para la determinación del ICOMO

Parámetro	Función
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	Si DBO < 30 mg/L, entonces $I_{DBO} = -0.5 + 0.70 \text{Log}_{10} \text{DBO}$ Si DBO > 30 mg/L, entonces tienen $I_{DBO} = 1$ Si DBO < 2 mg/L, entonces tienen $I_{DBO} = 0$
Coliformes Totales (NMP/100 mL)	Coliformes totales < 20.000 NMP/100 mL entonces: $I_{\text{Colif}} = -1.44 + 0.56 \text{Log}_{10} \text{Colif. T.}$ Coliformes Totales > 20.000 NMP/100 mL tienen $I_{\text{Colif}} = 1$ Coliformes Totales < 500 NMP/100 mL tienen $I_{\text{Colif}} = 0$
Porcentaje de Saturación de oxígeno (%)	Cuando % saturación de oxígeno es < 100% $I_{\% \text{Sat. OD}} = 1 - 0.01 \% \text{Sat. OD}$ Cuando % saturación de oxígeno es > 100% $I_{\% \text{Sat. OD}} = 0$

Fuente: Corporación Autónoma Regional del Atlántico, 2011

- **Índice de contaminación por mineralización – ICOMI:**

Para calcular dicho índice se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos en los parámetros Conductividad, Dureza Total y Alcalinidad Total, se definió entre un rango de 0 a 1 donde el aumento desde el valor más bajo se relacionó con el aumento de contaminación en el cuerpo de agua (Ramírez et al., 1997). Se definió mediante la siguiente ecuación.

$$ICOMI = \frac{1}{3} (I_{\text{Conductividad}} + I_{\text{Dureza}} + I_{\text{Alcalinidad}})$$

Donde:

- **ICOMI** es el índice de contaminación por mineralización, un número entre 0 y 1.
- **I** es el subíndice definido para cada parámetro.

Asimismo, el subíndice para cada una de las variables se obtuvo a partir de la aplicación de las siguientes funciones presentadas en la Tabla 14 citada a continuación:

Tabla 14. Factores de ponderación para la determinación del ICOMI

Parámetro	Función
Conductividad (µS/cm)	<p><math>I_{\text{Conductividad}}</math>: Se obtiene a partir de la siguiente expresión:  <math>\text{Log}_{10}I_{\text{Conductividad}} = -3,26 + 1,34 \text{ Log}_{10} \text{Conductividad } (\mu\text{S/cm})</math></p> <p><math>I_{\text{Conductividad}} = 10^{\text{Log}_{10}I_{\text{Conductividad}}}</math></p> <p>Conductividades &gt; 270 µS/cm, tiene índice de conductividad = 1</p>
Dureza Total (mgCaCO3/L)	<p><math>I_{\text{Dureza}}</math>: Se obtiene a partir de la siguiente expresión: <math>\text{Log}_{10}I_{\text{Dureza}} = -9,09 + 4,40 \text{ Log}_{10} \text{Dureza } (\text{mg/L})</math> Durezas &gt; 110 (mg/L) tienen <math>I_{\text{Dureza}} = 1</math></p> <p>Durezas &lt; 30 (mg/L) tienen <math>I_{\text{Dureza}} = 1</math></p>
Alcalinidad Total (mgCaCO3/L)	<p><math>I_{\text{Alcalinidad}}</math>: Se obtiene a partir de la siguiente expresión: <math>I_{\text{Alcalinidad}} = -0,25 + 0,005 \text{ Alcalinidad } (\text{mg/L})</math> Alcalinidades &gt; 250 (mg/L) tienen <math>I_{\text{Alcalinidad}} = 1</math></p> <p>Alcalinidades &lt; 50 (mg/L) tienen <math>I_{\text{Alcalinidad}} = 0</math></p>

Fuente: Corporación Autónoma Regional del Atlántico, 2011

- **Índice de contaminación por Sólidos Suspendidos – ICOSUS:**

Su principal causa la constituye los procesos erosivos y extractivos; su principal efecto es la disminución de la penetración de la luz. La turbiedad es otra forma de expresión de esta variable, más no una medida directa (Ramírez et al., 1997).

Para la ejecución de este índice se tuvieron en cuenta las siguientes expresiones:

Si  $SST < 340 \text{ mg/L}$  entonces:

$$ICOSUS = -0.02 + 0.003 * SST$$

Si  $SST > 340 \text{ mg/L}$  tienen  $ICOSUS = 1$

Si  $SST < 10 \text{ mg/L}$  tienen  $ICOSUS = 0$

• - **Índice de contaminación por pH – ICOpH:**

Dicho índice se obtuvo a partir de la siguiente expresión:

$$ICOpH = \frac{e^{-3.108+3.45 pH}}{1 + e^{-31.08+3.45 pH}}$$

**9. Análisis por medio del BMWP/Col:** el análisis de la calidad biológica del agua de acuerdo con el índice BMWP/Col, se valoró teniendo en cuenta el nivel taxonómico de la familia de la comunidad de MIAb, donde se utilizó una escala que va de 1-10 de acuerdo con la tolerancia a la contaminación, asignando el mayor valor a las familias más sensibles y el menor a las más tolerantes. Específicamente, los puntajes empleados para cada familia encontrada fueron los reportados por Roldán, (2003) para Colombia. Los cuales se encuentran registrados en la Tabla 15.

Tabla 15. Puntuación dada para las diferentes familias de MIAb en el índice BMWP/Colombia

Familias	Puntajes
Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hidridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae	10
Ampullariidae, Dytiscidae, Ephemeridae, Euthyplociidae, Gyrinidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopotamidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae	9
Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Psedothelpusidae, Saldidae, Simuliidae, Veliidae	8
Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenogrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossosomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptohyphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae	7
Aeshnidae, Ancyliidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae	6
Belostomatidae, Gelastocoridae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae	5
Chrysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Dolycopodidae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydraenidae, Hydrometridae, Noteridae	4

Familias	Puntajes
Ceratopogonidae, Glossiphonidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae	3
Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae	2
Tubificidae	1

*Fuente: Roldán, 2003*

Una vez se realizó la sumatoria para cada sitio de monitoreo por dicho índice, la clase, calidad biológica del agua, el significado y colores se utilizaron en la construcción de un mapa cartográfico para los puntos analizados sobre el cauce principal de acuerdo a lo establecido por Roldan, 2003, teniendo en cuenta la clasificación plasmada en la Tabla 16 presente a continuación.

Tabla 16. Clasificación del BMWP/Col

Clase	Calidad	Valor	Significado	Color
I	"Buena"	>150, 101-120	Aguas muy limpias a limpias	Azul
II	"Aceptable"	61-100	Aguas ligeramente contaminadas	Verde
III	"Dudosa"	36-60	Aguas contaminadas	Amarillo
IV	"Crítica"	16-35	Aguas muy contaminadas	Naranja
V	"Muy Crítica"	<15	Aguas fuertemente contaminadas	Rojo

*Fuente: Fuente: Roldán, 2003*

### 10. Análisis por medio del Índice Promedio Ponderado Hidrobiológico – IPPH:

Siendo este la obtención de un único valor indicador basado en los valores de calidad hidrobiológica de cada una de las comunidades evaluadas en la cuenca priorizada, la

metodología que se empleó para el cumplimiento de dicho análisis fue mediante la siguiente ecuación, la cual se encuentra modificada por el índice de saprobiedad de Kolkwitz & Marsson, (1909):

$$IPPH = \frac{\sum IHC * VP_{IHC}}{\sum VP_{IHC}}$$

$$\sum VP_{IHC}$$

Donde:

**IPPH** = Índice promedio ponderado hidrobiológico

**IHC** = Índice hidrobiológico por comunidad

**VP** = Valor ponderado

Los puntajes de calidad ecológica obtenidos del IPPH se interpretaron y se representaron cartográficamente teniendo en cuenta la interpretación de los valores presentes en la Tabla 17 citada a continuación.

Tabla 17. Interpretación de los valores del IPPH

Valor	Interpretación	Color
>7,0 - <= 10,0	Aguas muy limpias	Verde
>5,0 - <= 7,0	Aguas ligeramente contaminadas	Azul
>3,0 - <= 5,0	Aguas moderadamente contaminadas	Amarillo
>1,0 - <= 3,0	Aguas muy contaminadas	Naranja
<= 1,0	Aguas fuertemente contaminadas	Rojo

Fuente: Kolkwitz y Marsson, 1909

Para la aplicación del IPPH se estandarizaron los datos de los índices hidrobiológicos, teniendo en cuenta el método propuesto por Guisande - González *et al.* (2011), a través de la expresión:

$$X = \frac{X - Min}{Max - Min}$$

Donde VE es el valor estandarizado, Max y Min corresponden a los valores máximo y mínimo de cada variable. Con esta estandarización, los datos se llevan a un rango entre 0 y 1 sin perder la esencia de las distancias entre los registros

**Fase IV:** Identificar los sectores que generan mayor deterioro de la calidad del agua del Río Tune.

- **Actividad 1. Realizar un análisis estadístico espacial para determinar la correlación entre los índices de calidad y el uso actual del suelo**

Una vez completada la base de datos de los parámetros de calidad de agua, se realizó la exploración de datos y se comprobaron los supuestos de Normalidad de los datos cada uno de los parámetros con resultados cuantitativos. Para ello se aplicaron los siguientes pasos.

- 1. Estandarización de los datos:** Para la evaluación de los supuestos de normalidad de los datos de los índices de calidad de agua del Río Tune, se empleó inicialmente la prueba de Normalidad de Shapiro Wilks, esta prueba se aplicó mediante el software R Studio con un nivel de significancia de 0.05; para la ejecución de esta prueba se estableció la siguiente hipótesis nula.

**Ho:** Los índices de calidad de agua se distribuye de manera normal.

Para correr la prueba en el software, se debe como primer paso cargar el archivo y posterior correr la herramienta shapiro\_test, para ellos se empleó el siguiente código, el cual se empleó para cada parámetro de calidad de agua.

```
install.packages("dplyr")
install.packages("writexl")
library(dplyr)
library(readxl)
library(writexl)

setwd("C:/Users/Nata/Documentos/DB/Resultados")

Datos_de_calidad_finales <- read_excel("C:/Users/Nata/Documentos/DB/Resultados/Datos de calidad finales.xls",
sheet = "Hoja1")

resultados_shapiro <- lapply(Datos_de_calidad_finales, shapiro.test)

resultados_exportar <- data.frame(
  variable = names(resultados_shapiro),
  Estadístico = sapply(resultados_shapiro, function(x) x$statistic),
  p_value = sapply(resultados_shapiro, function(x) x$p.value)
)

write_xlsx(resultados_exportar, "resultados_shapiro.xlsx")
```

Imagen 6. Código en R para Test de Normalidad de Shapiro Wilks

Con el fin de validar la distribución de los datos, se aplicaron métodos gráficos, para observar la distribución de los datos en comparación con la distribución normal. Se desarrolló un Histograma ajustado, teniendo en cuenta que transformación se requiere en cada parámetro para obtener la distribución normal de los datos. Adicionalmente se realizó un gráfico de Q-Q plot; estos métodos se ejecutaron en el software ArcGis Pro empleando las herramientas Histogram y QQ plot.

Para realizar el histograma para cada parámetro, primero cargó la capa que contiene los datos en un Map Frame, posteriormente se seleccionó la capa y se eligió la herramienta Histogram, y se diligenció eligiendo la columna de los datos a evaluar, posteriormente si los datos requieren una transformación para ajustarse a la distribución normal, se eligió la más adecuada para cada conjunto de datos. El software automático

genera los resultados estadísticos básicos de los datos evaluados, como se muestra a continuación.

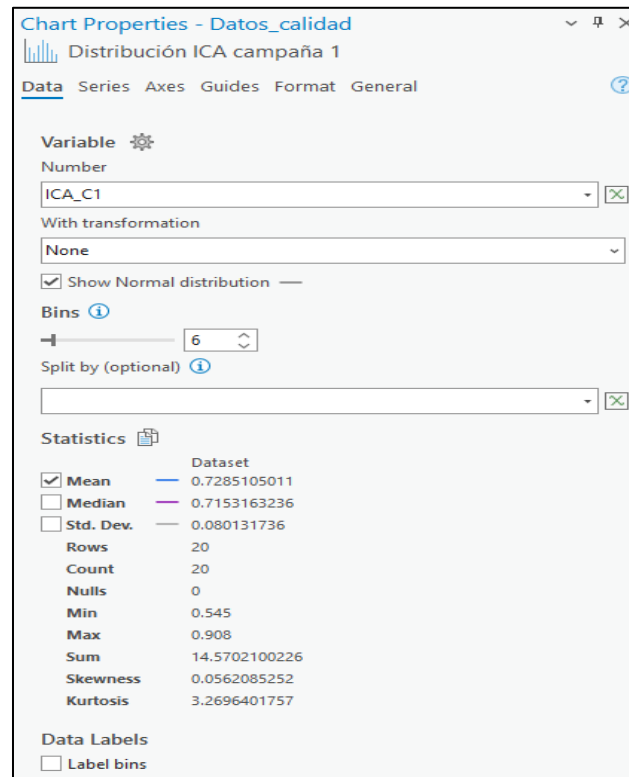


Imagen 7. Configuración de Histograma en ArcGIS Pro

**Análisis de Componentes Principales - ACP:** Para evaluar la correlación presente entre los diferentes parámetros de calidad de agua se ejecutó un ACP en el software R Studio. Con el objetivo de analizar de mejor manera las variables los datos del ACP se presentaron en un Grafico Biplot, cabe aclarar que el análisis se aplicó para todos los parámetros teniendo en cuenta la fecha de toma de muestras, es decir se realizaron dos ACP uno para la campaña 1 y otro para la campaña de monitoreo 2. para realizar el análisis completo se ejecutó el siguiente código en el software.

```

#Clasificar datos por campaña
ACP_C1 <- Datos_de_calidad_finales[, c("ICA_C1", "ICOMI_C1", "ICOMO_C1",
                                       "ICOSUS_C1", "ICOPH_C1", "BMWP_C1",
                                       "IPPH_C1")]

ACP_C2 <- Datos_de_calidad_finales[, c("ICA_C2", "ICOMI_C2", "ICOMO_C2",
                                       "ICOSUS_C2", "ICOPH_C2", "BMWP_C2",
                                       "IPPH_C2")]

ACP_C1 <- ACP_C1 %>% mutate_all(~replace(., is.na(.), 0))
ACP_C2 <- ACP_C2 %>% mutate_all(~replace(., is.na(.), 0))

# Estandarizar
estandarizados_C1 <- scale(ACP_C1)
estandarizados_C2 <- scale(ACP_C2)

# ACP
ACP_resultado_C1 <- prcomp(estandarizados_C1, center = TRUE, scale. = TRUE)
ACP_resultado_C2 <- prcomp(estandarizados_C2, center = TRUE, scale. = TRUE)

# resumen
summary(ACP_resultado_C1)
summary(ACP_resultado_C2)

ACP_resultado_C1$rotation
ACP_resultado_C2$rotation

```

Imagen 8. Análisis de Componentes Principales en R

De igual manera para crear las gráficas se empleó el siguiente código.

```

png("biplot_ACP_C15.png", width = 800, height = 600)
biplot(
  ACP_resultado_C1,
  main = "Biplot del PCA C1",
  xlab = "Componente Principal 1",
  ylab = "Componente Principal 2",
  col = c("black", "blue"),
  cex = 0.6,
  cex.axis=1,
  cex.lab=0.5,
  xlim = c(-0.4, 0.4),
  ylim = c(-0.4, 0.4) )
dev.off()

png("biplot_ACP_C2.png", width = 800, height = 600)
biplot(
  ACP_resultado_C2,
  main = "Biplot del PCA C2",
  xlab = "Componente Principal 1",
  ylab = "Componente Principal 2",
  col = c("black", "blue"),
  cex = 0.6,
  cex.axis=1,
  cex.lab=2,
  xlim = c(-0.4, 0.4),
  ylim = c(-0.4, 0.4))
dev.off()

```

Imagen 9. Generación de Grafica Biplot en R

- **Actividad 2. Identificar los principales sectores que generan mayor contribución de cargas contaminantes una vez analizados los resultados obtenidos en los Índice de Calidad - ICA.**

**1. Distribución Espacial:** Para la distribución espacial de los índices de calidad de agua se aplicó el Método de Kriging Ordinario en el software ArcGIS Pro, para ello se realizó con anterioridad un análisis exploratorio de datos conformado por Histograma, grafico QQPlot, análisis de tendencia y variograma. En la actividad anterior se realizaron los métodos gráficos histograma y QQPlot, por ello en esta actividad se desarrolló el análisis de tendencia aplicando la herramienta Trend Analysis de ArcGIS, con el fin de establecer la tendencia espacial de los datos, como también el orden polinomial que más se ajusta a los datos.

Para determinar el orden polinomial más adecuado, se determinó el Error cuadrático medio (RMSE) de cada orden para cada variable empleando el software R Studio, para ello se ejecutó el código de la Imagen 10, estableciendo como orden máximo 3 y orden mínimo 1, se realizó el cálculo para cada columna a excepción de la columna 1 ya que corresponde al ID de los datos y se generó una tabla con los resultados.

```
datos <- read_excel("C:/Users/Nata/Documentos/DB/Resultados/Datos de calidad finales.xls",
  sheet = "Hojal")

head(datos)

calcular_rmse <- function(observado, predicho) {
  sqrt(mean((observado - predicho)^2, na.rm = TRUE))
}

ajustar_polinomio_y_calcular_rmse <- function(datos, orden_maximo = 3) {
  resultados <- list()

  for (var in names(datos)[-1]) {
    rmse_por_orden <- c()

    for (orden in 1:orden_maximo) {
      modelo <- lm(as.formula(paste(var, "~ poly(ID, ", orden, ", raw=TRUE)")), data = datos)
      predicciones <- predict(modelo, newdata = datos)
      rmse <- calcular_rmse(datos[[var]], predicciones)
      rmse_por_orden <- c(rmse_por_orden, rmse)
    }

    resultados[[var]] <- rmse_por_orden
  }

  resultados_df <- do.call(rbind, resultados)
  colnames(resultados_df) <- paste("orden", 1:orden_maximo, sep = "_")
  return(resultados_df)
}

rmse_resultados <- ajustar_polinomio_y_calcular_rmse(datos, orden_maximo = 4)
print(rmse_resultados)

if (!require(openxlsx)) install.packages("openxlsx")
library(openxlsx)

write.xlsx(rmse_resultados, "rmse_resultados1.xlsx")
```

Imagen 10. Código para calculo RMSE de cada orden polinomial en R

Conociendo los RMSE de cada orden para cada variable, se eligió el orden con menor error ya que es el que mejor se ajusta a los datos. Posteriormente se aplicó el Método de interpolación espacial Kriging, con el objetivo de estimar valores de los índices de calidad de agua en zonas no muestreadas, lo cual nos permitió realizar un análisis más detallado. Para aplicar este método se empleó la Herramienta Kriging/CoKriging del software ArcGis Pro. En la herramienta se debe elegir el tipo de Método, el tipo de transformación aplicada a los datos, el valor lambda de la transformación y el orden polinomial del conjunto de datos (Imagen 11).

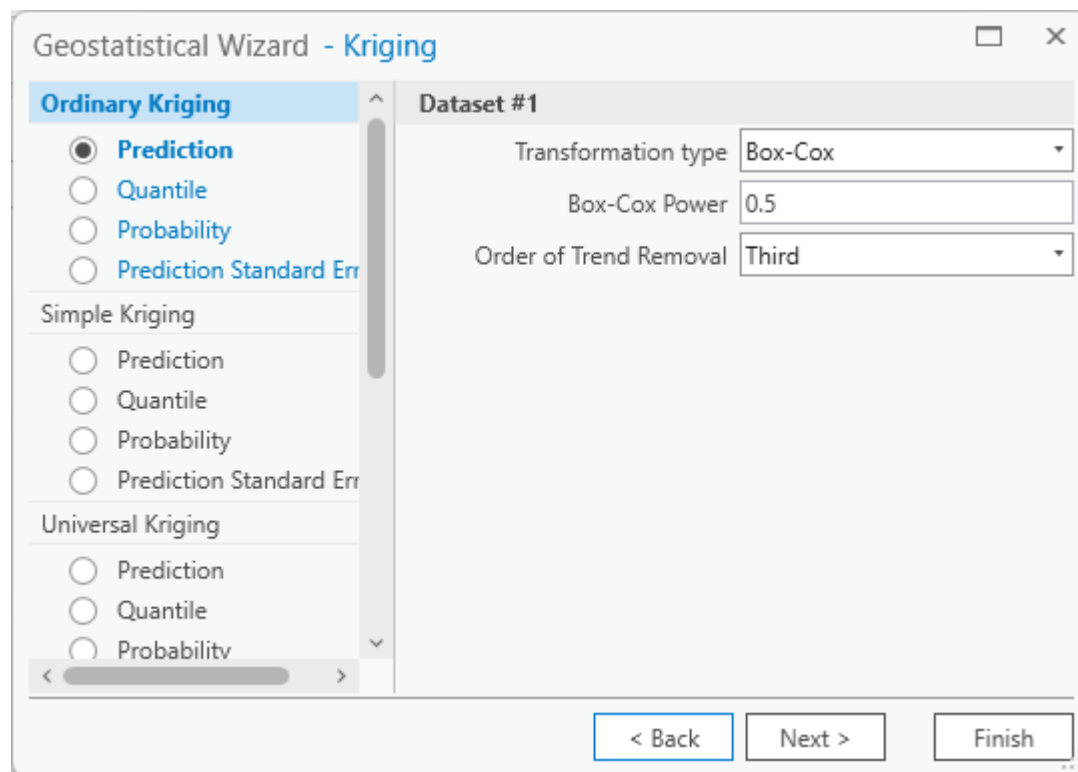


Imagen 11. Aplicación Método Kriging Ordinario en ArcGis Pro

**2. Asociación espacial:** Para identificar si las actividades productivas contribuyen en la contaminación del agua, se empleó la herramienta Zonal Statistics as Table, la cual nos permitió calcular el valor promedio del índice de calidad de agua para cada predio. De esta manera se extrajo de la capa Raster (Kriging) el valor promedio del índice en el área de cada polígono. La herramienta se configuró como se muestra en la Imagen 12, seleccionando como Feature de entrada la capa de predios productivos, especificando la columna con el código identificador de cada predio, de igual manera se seleccionó el Raster para extraer la información, este archivo varía para cada uno de los parámetros, como dato estadístico, se estableció la media y finalmente se seleccionó la carpeta de salida de la nueva

capa.

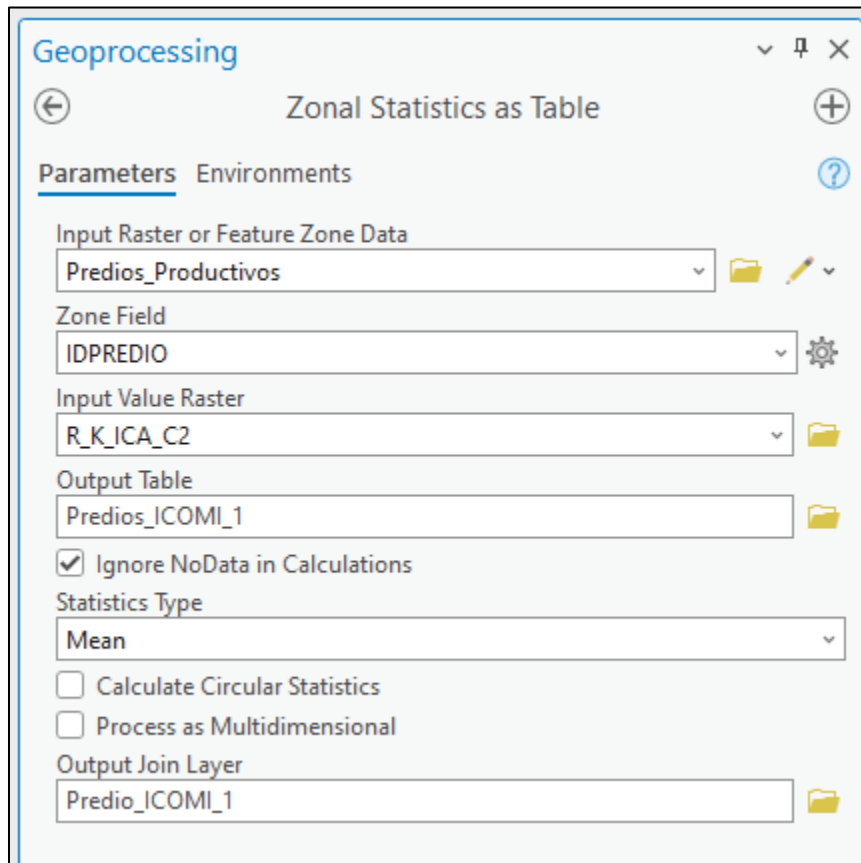


Imagen 12. Configuración Herramienta Zonal Statistics as Table

- **Análisis de Varianza (ANOVA)**

Con la información obtenida de la relación espacial entre los índices de calidad de agua y los predios de la zona de estudio, se desarrolló una tabla por cada campaña de monitoreo, cada tabla está compuesta por el valor promedio de los índices de calidad para cada predio, a dicha información se aplicó un Análisis de varianza (ANOVA) con el fin de identificar si existe diferencia significativa entre los valores de calidad de agua de cada tipo de actividad productiva. Este análisis se realizó en el software R Studio empleando el siguiente código.

```

library(dplyr)
library(ggplot2)
library(readxl)
library(writexl)
library(broom)

datos1 <- read_excel("C:/Users/Nata/Documentos/DB/TABLAS/datos.xls", sheet = "CAMPAÑA 1")
datos1$Tipo_Actividad <- as.factor(datos1$Tipo_Actividad)

anova_results <- list()
indices <- c("ICA_1", "ICOMI_1", "ICOMO_1", "ICOPH_1", "ICOSUS_1", "IPPH_1", "BMWP_1")

anova_results_df <- data.frame(indice = character(),
                              Df = numeric(),
                              Sum_Sq = numeric(),
                              Mean_Sq = numeric(),
                              F_value = numeric(),
                              Pr_F = numeric(),
                              stringsAsFactors = FALSE)

for (indice in indices) {
  formula <- as.formula(paste(indice, "~ Tipo_Actividad"))
  anova_model <- aov(formula, data = datos1)
  anova_summary <- summary(anova_model)[[1]]
  anova_results_df <- rbind(anova_results_df,
                            data.frame(indice = indice,
                                        Df = anova_summary[1, "Df"],
                                        Sum_Sq = anova_summary[1, "Sum Sq"],
                                        Mean_Sq = anova_summary[1, "Mean Sq"],
                                        F_value = anova_summary[1, "F value"],
                                        Pr_F = anova_summary[1, "Pr(>F)"]))
}
write_xlsx(anova_results_df, "C:/Users/Nata/Documentos/DB/TABLAS/anova_results.xlsx")
print((anova_results_df))

```

Imagen 13. Código en R Studio para ANOVA

Se establece como archivo de salida una tabla en formato Excel que cuente con 7 columnas, en las cuales nos entregue la información de los grados de libertad (Df), suma de cuadrados (Sum Sq), Media de cuadrados (Mean Sq), valor F (F Value) y Valor p (Pr>F). Con los valores resultantes se realiza el análisis y se determina si se acepta o se rechaza la prueba de hipótesis.

Hipótesis Nula ( $H_0$ ): Las medias de todos los grupos son iguales.

Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ): Al menos una de las medias es diferente.

Para los índices que presentaron diferencias significativas, se aplicó una prueba de Tukey para establecer si existe un efecto significativo del tipo de actividad sobre estos índices. Para la prueba de Tukey se ejecutó el siguiente código en R Studio.

```
library(readxl)
library(writexl)

datos2 <- read_excel("C:/Users/Nata/Documentos/DB/TABLAS/datos.xls", sheet = "CAMPAÑA 2")
print(datos2)
datos2$Tipo_Actividad <- as.factor(datos2$Tipo_Actividad)
tukey_bmw <- TukeyHSD(aov(BMWP_2 ~ Tipo_Actividad, data = datos2))
print(tukey_bmw)
tukey_bmw_df <- as.data.frame(tukey_bmw$Tipo_Actividad)
write_xlsx(tukey_bmw_df, "C:/Users/Nata/Documentos/DB/TABLAS/tukey_bmw_results.xlsx")
```

Imagen 14. Código en R Studio para Prueba de Tukey



## 7.Resultados

**Fase I:** Para determinar las actividades económicas relevantes en la zona de estudio se empleó como base la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas (CIIU), para ello, se plantearon 3 actividades.

- **Actividad 1. Identificación de los usuarios que hacen parte de la subcuenca del Río.**

- 1. Revisión de información existente:**

Con la revisión de la información existente proporcionada por las diferentes entidades y la consulta de los datos abierto de las misma, se obtuvieron las capas geográficas de hidrografía, centros poblados, división político-administrativa y curvas de nivel de la base de datos Instituto Geográfico Agustín Codazzi a escala 1:25000. Con dicha información se realizó la delimitación de la cuenca hidrográfica del rio Tune aplicando los procesos explicados en el capítulo anterior, como resultado se presenta la siguiente salida cartográfica (Figura 3).

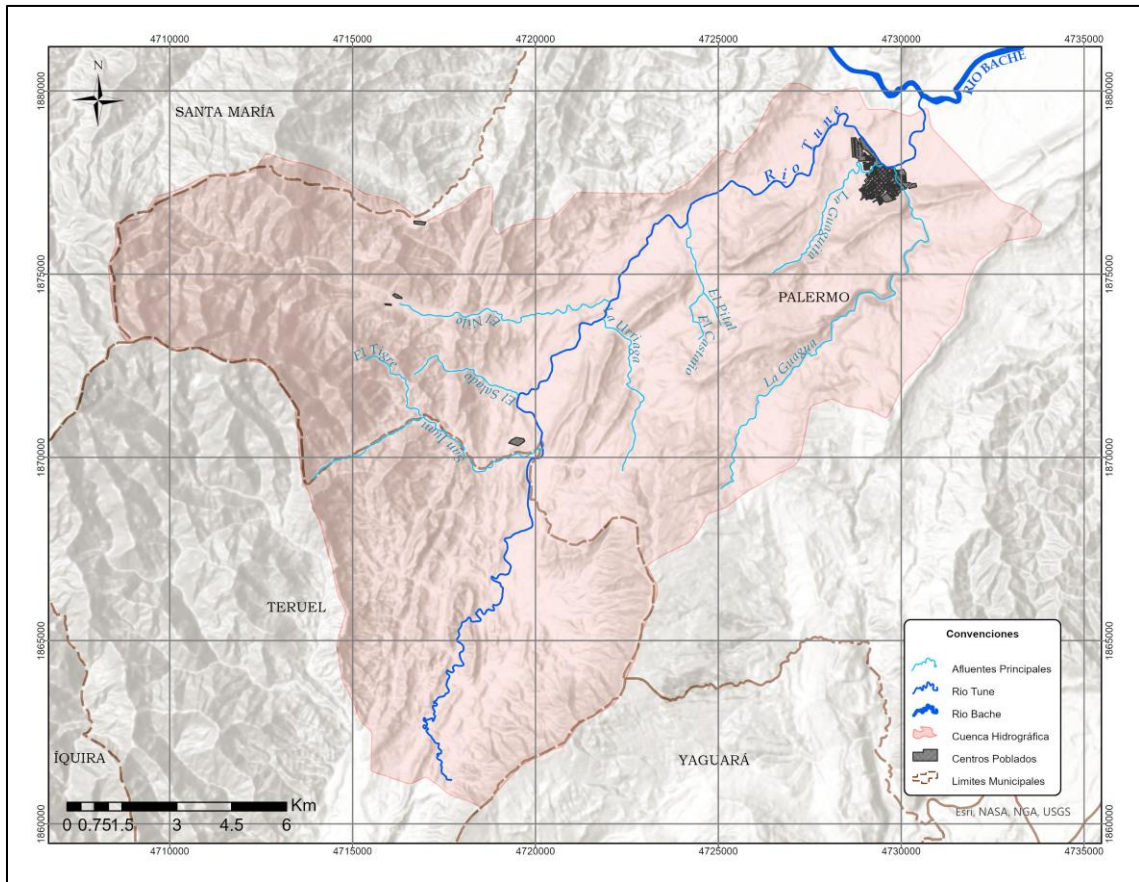


Figura 3. Cuenca Hidrográfica del Río Tune

2. **Elaboración de encuestas:** Para los formularios se establecieron 4 líneas base de información, con dichas líneas se establecieron los siguientes campos de consulta:

Tabla 18. Campos de recolección de información.

<b>Información Catastral</b>	Nombres y apellidos del propietario
	Cedula/Nit
	Nombre del predio
	Código Catastral
	Area del predio
	Municipio
	Vereda

<b>Localización Geográfica</b>	Longitud
	Latitud
<b>Información Hídrica</b>	Tipo de fuente de abastecimiento
	Nombre de la Fuente Hídrica
<b>Información productiva</b>	Actividad
	Area Productiva (ha)

- 3. Recorrido de campo:** Durante el recorrido se evidenció que algunos predios registrados como usuarios del recurso hídrico del río Tune, realmente cuentan con captaciones y/o vertimientos en otras fuentes hídricas, igualmente, se registraron predios que no se encuentran dentro de la zona de la cuenca, por tal razón estos predios no son considerados para el presente estudio.

Con la Información validada en el recorrido de campo, se procedió a identificar los polígonos prediales correspondientes a las fincas encuestadas, obteniendo como resultado la capa predial del área de interés. En la Figura 4, se observa la distribución espacial de los predios, se observa que la mayoría de los predios se encuentran localizados en el municipio de Palermo, igualmente se evidenciaron predios que no se encuentran cerca de ninguna de las fuentes hídricas consideradas en el estudio.

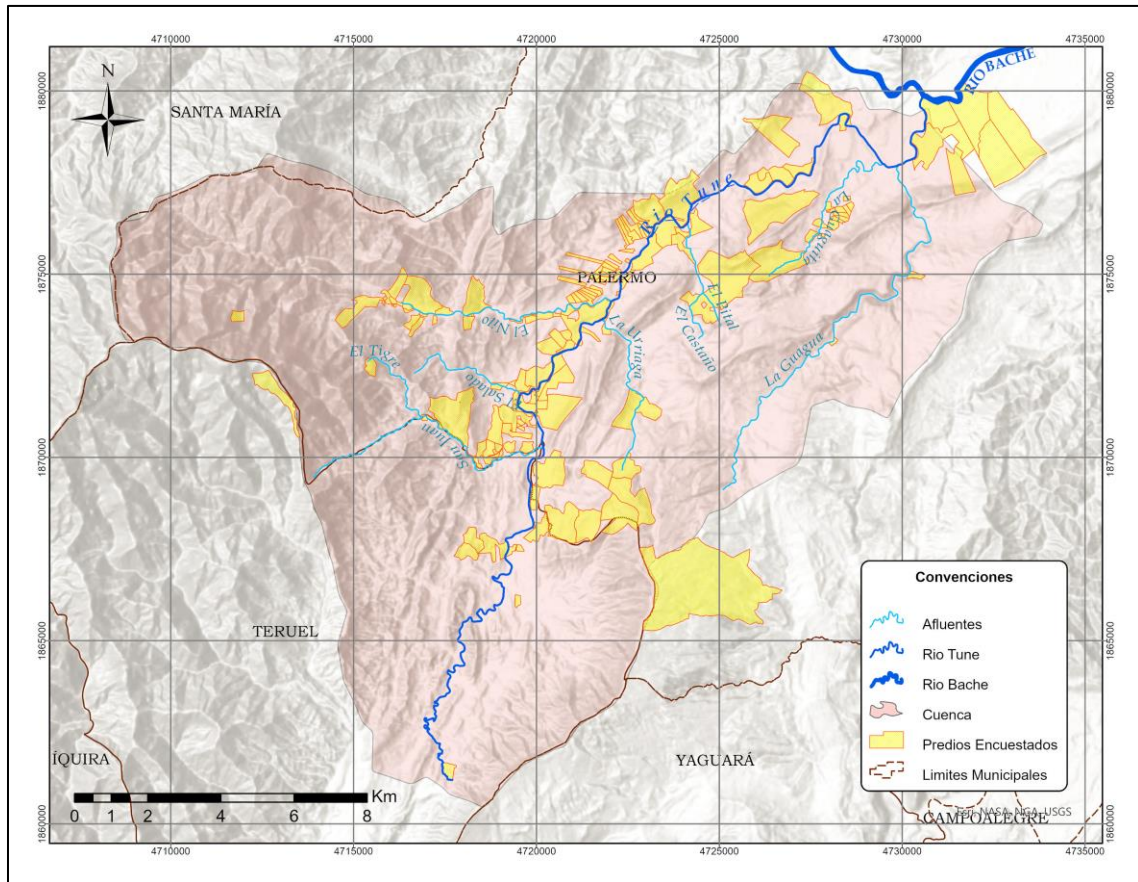


Figura 4. Predios Encuestados en la zona de estudio

Durante el recorrido se diligenciaron 228 encuestas, para un total de 145 predios, cabe aclarar que se aplicaron varias encuestas en un solo predio teniendo en cuenta las diferentes actividades productivas presentes en el mismo. Teniendo en cuenta que la mayoría de los predios localizados se encuentran en el municipio de Palermo, se determinó como área de estudio la zona de la cuenca hidrográfica del río tune localizada en dicho municipio (Figura 5).

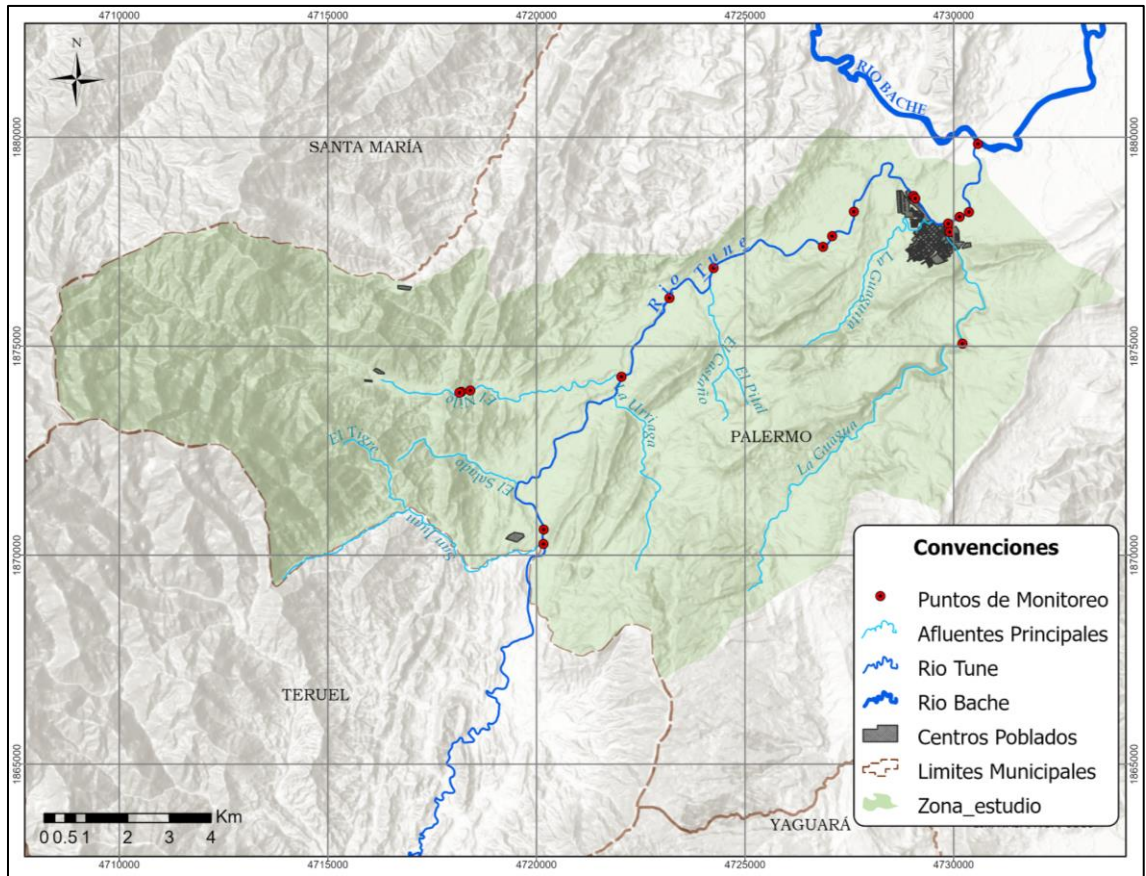


Figura 5. Delimitación de la Zona de Estudio

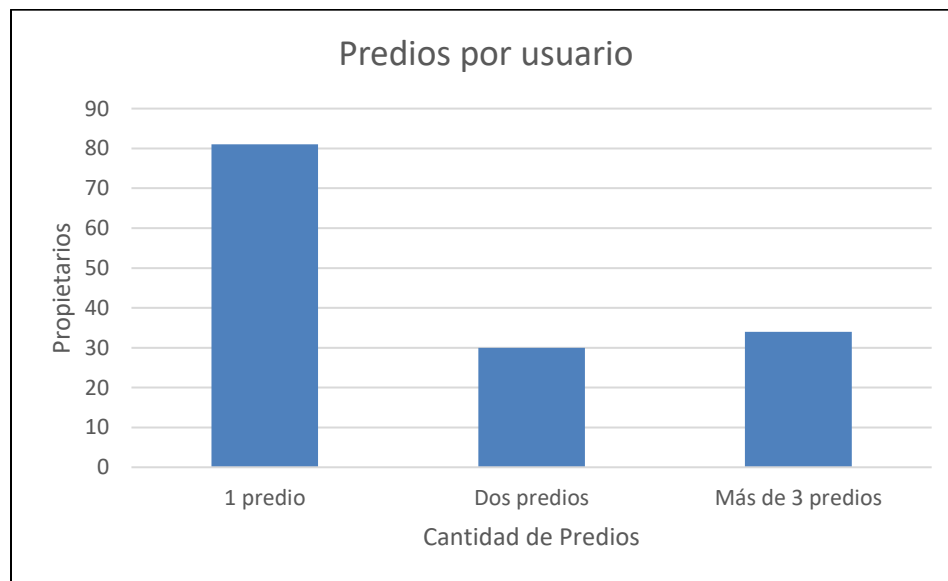
- **Actividad 2. Clasificación de los usuarios.**

**Organización de la Información:** Como resultado del primer filtro para organizar la información, se identificaron los afluentes principales del rio Tuel y los predios que no se benefician de estas fuentes fueron descartados, ya que no presentan una afectación directa. Los afluentes principales se presentan a continuación.

Tabla 19. Principales fuentes hídricas de la zona de estudio

Tipo de Fuente	Nombre de la fuente Hídrica
<b>Quebrada</b>	El Nilo
	El Pital
	El Salado
	El Tigre
	La Guagua
	La Guaguita
	La Urriaga
<b>Rio</b>	San Juan
	Tune

La información proporcionada por las encuestas permitió realizar una caracterización los usuarios de la zona de estudio. Se identificó que se presentan propietarios que cuentan con más de un predio, teniendo como resultado que el 56% de los propietarios cuentan con solo un predio y solo el 23% cuenta con más de 3 predios (Gráfica 1).



Gráfica 1. Predios por propietario

Una vez aplicado el primer filtro, correspondiente a la fuente hídrica de beneficio que presenta cada predio se eliminaron 6 predios, ya que la fuente de abastecimiento no corresponde a fuentes hídricas de importancia en la cuenca, tampoco desarrollan actividades productivas cerca al cauce de las fuentes hídricas.

Tabla 20. Usuarios Eliminados de la base de datos

ID PREDIO	NOMBRE PREDIO	AREA PRODUCTIVA	TIPO FUENTE	FUENTE DE ABASTECIMIENTO	ACTIVIDAD PRODUCTIVA
140	Acueducto Vda San Gerardo	0	Quebrada	Naranjo	Domestico
141	Acueducto Veredal El Viso	0	Quebrada	Playa Rica	Domestico
142	El Azuceno	0.5	Arroyo	EL HIGUERON	Bovino
143	Lote 3 Ceibo	0	Arroyo	La Gruta De La Virgen	Domestico
144	Lote Vega Del Almorzadero	3	Quebrada	El Rincón	Arroz
145	Villa Kony	0	Quebrada	San Joaquín	Domestico

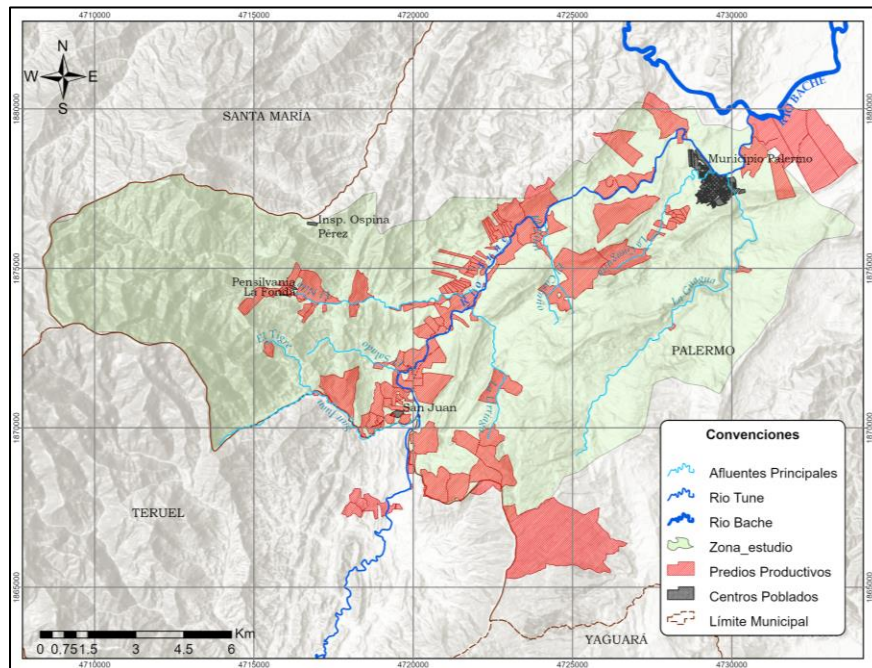


Figura 6. Predios productivos de la zona de estudio

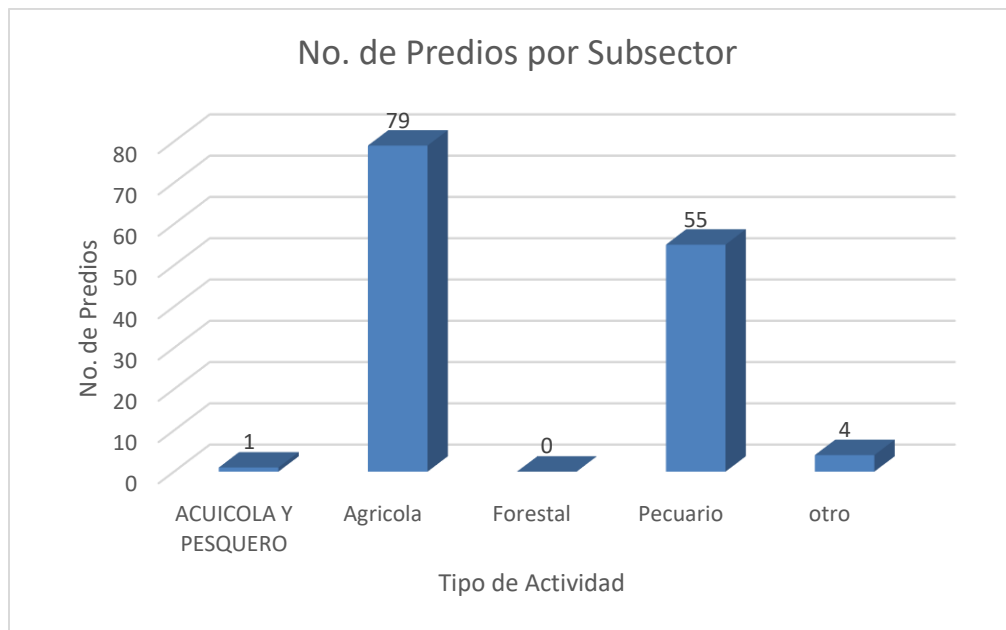
### Clasificación de los usuarios:

Para la clasificación de los predios se empleó la base de datos con los 139 predios restantes, estos fueron sometidos al procedimiento planteado por DANE, (2022), como resultado se identificaron las siguientes actividades productivas en la zona de estudio, siendo la ganadería la más representativa con 772,98 hectáreas distribuidas en 50, seguida por el cultivo del arroz con 455.25 hectáreas comprendidas en 42 predios.

Tabla 21. Actividades productivas en la zona de estudio

NombreActividad	No. Predios	Area (ha)
ACUÍCOLA Y PESQUERO	1	0.29
ARROZ	42	455.25
AVICULTURA	2	2.10
BOVINO	50	772.98
CACAO	16	33.45
CÍTRICOS	5	10.63
DOMESTICO	4	4.00
EQUINA Y ASNAL	1	1.00
FRUTALES	6	10.82
MAÍZ	2	3.50
OVINO CAPRINO	2	1.00
PASTO	8	12.60

Finalmente, se determinaron los subsectores productivos



Gráfica 2. Predios Productivos por Subsectores

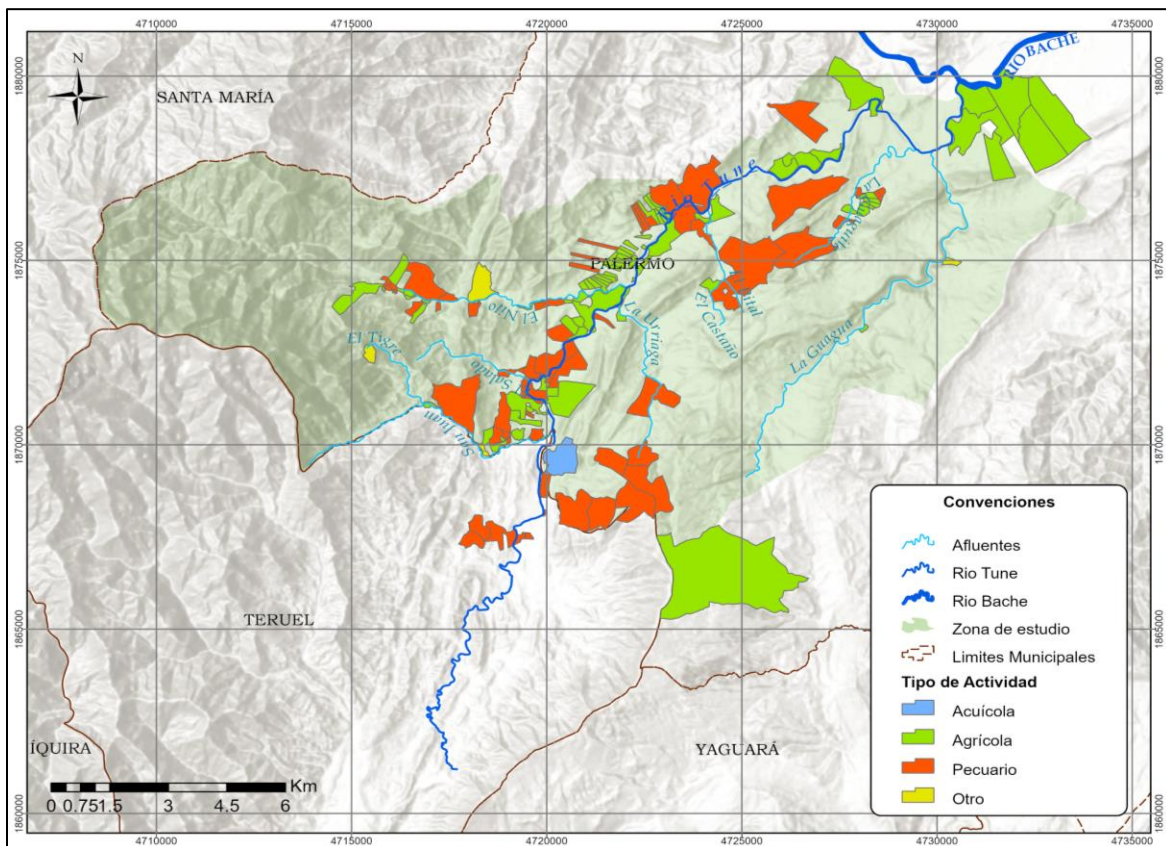


Figura 7. Distribución espacial de los subsectores productivos

**FASE II.** Realizar la distribución espacial de los puntos de monitoreo de calidad del agua establecidos sobre la cuenca del río Tune mediante el geoproceso de datos espaciales.

- **Actividad 1. Identificación de puntos de interés sobre el cauce del Río Tune**

**1. Revisión de información existente:** La línea base para el estudio de la calidad del agua del Río Tune y sus afluentes se construyó a partir de información recopilada de diversas fuentes de carácter institucional. En primer lugar, se consultó el Plan de Saneamiento y Manejo de vertimientos (PSMV 2017-2027) de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM), documento fundamental para comprender la dinámica del recurso hídrico en la zona.

Adicionalmente, fue consultada la cartografía base del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), descargada del Geoportal en línea, escala 1:25000. Asimismo, se solicitó a entidades y organizaciones locales con jurisdicción en la zona suministrar información relacionada con suelos, hidrología, climatología, usos del suelo, calidad de aguas, listado de usuarios e inventario de vertimientos y puntos estratégicos.

Por otra parte, se consultó la cartografía básica rural y urbana suministrada por la CAM, así como el Plan de Desarrollo Municipal 2024- 2027 de Palermo. Esta información permitió contextualizar el estudio dentro del marco del desarrollo local y las prioridades de la región.

Con el fin de obtener un panorama general del cuerpo de agua y de las descargas asociadas al estudio, se realizó una revisión de la caracterización de aguas

---

residuales de las Empresas Públicas de Palermo E.S.P. Finalmente, se utilizó la plataforma Google Earth para explorar y visualizar preliminarmente la zona de estudio a través de imágenes satelitales.

De acuerdo con la información recopilada, para llevar a cabo este estudio, se seleccionó un tramo del Río Tune comprendido entre las coordenadas geográficas (4720180, 1870280) y (4730590, 1879850) cuenta con una distancia de 21.52 km, iniciando desde el kilómetro 15.64 hasta su desembocadura en el Río Bache. Este tramo fue elegido ya que es el tramo que cuenta con mayor número de predios que hacen uso del recurso hídrico del río Tune, lo que lo convierte en una zona de interés para evaluar la calidad del agua y los posibles impactos antropogénicos.

Adicionalmente para la elaboración de los mapas se utilizó el software ArcGIS Pro (Licencia Universidad de Manizales). Los detalles del tramo seleccionado se pueden observar en la siguiente figura.

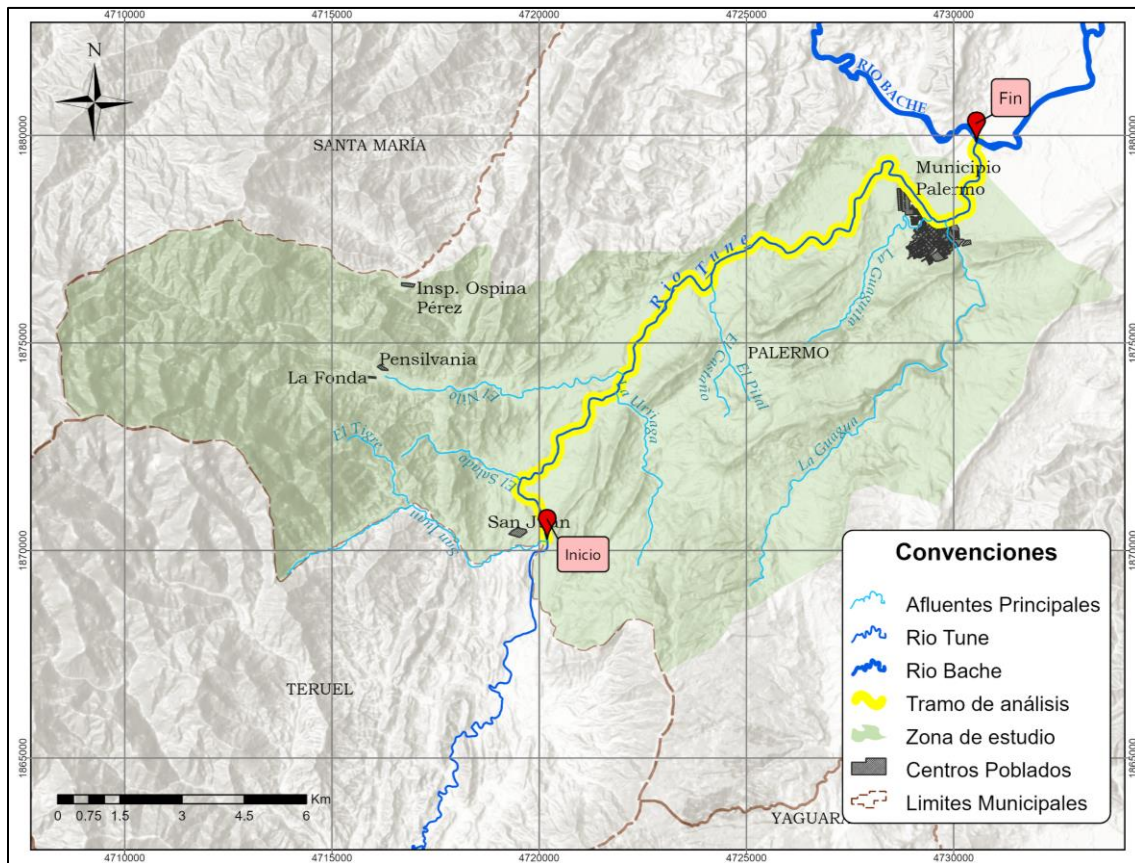


Figura 8. Tramo objeto de análisis

A continuación, se presenta una descripción detallada del tramo del río Tune seleccionado para el estudio.

Tabla 22. Descripción del tramo objeto de análisis

Descripción	Observación
<p>El tramo de análisis está comprendido desde el puente que comunica hacia las veredas El Tablón y Los Pinos a una altura de 750 m.s.n.m. hasta la desembocadura del Río Tune sobre la margen derecha del Río Bache a una altura de 550 m.s.n.m.</p>	<p>En el tramo analizado, desembocan las quebradas El Nilo, La Urriaga, El Salado, La Guagua y La Guagüita. En la zona predominan los usos agrícolas y pecuarios.</p>
<p>La longitud del cauce del río en este tramo es de 21.52 km</p>	<p>El río transita por las veredas Nilo, Farfán, La Urriaga, Buenos Aires y por el casco urbano del municipio de Palermo.</p>
	<p>Según la cobertura y uso del suelo predominan los mosaicos de cultivos, herbazal abierto, pastos limpios y vegetación secundaria baja.</p>

**2. Toma de datos en campo:** Con el desarrollo del levantamiento en campo se identificaron los focos generadores de vertimientos, puntos sobre el cauce del Río Tune y sus afluentes principales. Se recolectó información directamente en la zona de estudio, mediante inspección ocular, diligenciamiento de formularios, georreferenciación de puntos, muestras de agua y registro fotográfico. Para lo anterior se obtuvo la siguiente información:

- Información geográfica y alfanumérica proveniente de la georreferenciación de puntos de control del cauce y afluentes, localización de zonas que presentan intervención antrópica y generan un impacto ambiental en el área de estudio.

El trabajo de campo se realizó con previa programación y coordinación, se inició por el cauce principal y afluentes, atendiendo los puntos de interés y usuarios actuales.

Para complementar la información recopilada en campo, en cada punto de muestreo se capturó una fotografía para documentar visualmente las condiciones del sitio, corroborar las observaciones in situ y enriquecer la base de datos con información cualitativa. Las imágenes fueron georreferenciadas y organizadas de acuerdo con la codificación asignada a cada punto, facilitando su posterior consulta y análisis.

En los recorridos realizados se identificaron y visitaron 3 afluentes principales que abastecen el río Tune, los cuales se relacionan en la Tabla 23.

Tabla 23. Principales afluentes de la zona media y baja del Río Tune

Municipio	Afluente	Longitud (km)
Palermo	Quebrada El Nilo	6.8
	Quebrada La Guagua	13.77
	Quebrada San Juan	8.54

Fuente: Elaboración propia con información de la CAM, 2020

En la Tabla 24 se relacionan los grupos establecidos para la clasificación de los vertimientos.

Tabla 24. Grupos establecidos para la clasificación de vertimientos

No	Código	Tipo de Vertimiento	Descripción
1	VeAg	Vertimiento Agrícola	Provenientes de actividades agrícolas (Cultivo de arroz, Lavado de café)
2	VePc	Vertimiento Pecuario	Proveniente de actividades pecuarias (Lavado de cocheras, establos, galpones)
3	VeDo	Vertimiento Doméstico	Provenientes de baterías sanitarias, lavaplatos, albercas y lavaderos
4	VePTAR	Vertimiento PTAR	Transporte de aguas provenientes de las Plantas de Tratamiento del Municipio de Palermo

A continuación, se describe de manera detallada cada uno de los puntos de monitoreo representativos sobre el cauce del río Rune y sus 3 afluentes principales.

Tabla 25. Descripción punto de monitoreo C01

PUNTO DE MONITOREO - C01	DETALLE
	Descripción Río Tune antes de usos directos sobre el cauce

	Coordenadas	X = 4717702.2177 m Y = 1861200.598 m
	Altitud	926.44 msnm
	Fuente Hídrica	Rio Tune
	Vereda	Almorzadero

Tabla 26. Descripción punto de monitoreo C02

PUNTO DE MONITOREO – C02	DETALLE
	Rio Tune Puente vereda el Tablón. Los Pinos "Estadero Las Locas"
	Descripción En este punto se permite determinar afectaciones producidas por la quebrada San Juan y las redes de drenaje de escorrentía ubicadas aguas arriba de este punto.
	Coordenadas X = 4720173.4777 m Y = 1870612.9112 m
	Altitud 718 msnm
	Fuente Hídrica Rio Tune
Vereda San Juan	

Tabla 27. Descripción punto de monitoreo C03


PUNTO DE MONITOREO – C03	DETALLE	
	Descripción	Vertimiento Agrícola
	Coordenadas	X = 4723188.0099 m Y = 1876151.3626 m
	Altitud	585 msnm
	Fuente Hídrica	Rio Tune
	Vereda	Farfán

Tabla 28. Descripción punto de monitoreo C04


PUNTO DE MONITOREO – C04	DETALLE	
	Descripción	Vertimiento Agrícola
	Coordenadas	X = 4724245.2155 m Y = 1876868.8871 m
	Altitud	583 msnm
	Fuente Hídrica	Rio Tune
	Vereda	Farfán

Tabla 29. Descripción punto de monitoreo C05


<b>PUNTO DE MONITOREO – C05</b>	<b>DETALLE</b>	
	Descripción	Vertimiento Agrícola
	Coordenadas	X = 4726868.3748 m Y = 1877376.9016 m
	Altitud	576 msnm
	Fuente Hídrica	Rio Tune
	Vereda	Farfán

Tabla 30. Descripción punto de monitoreo C06


<b>PUNTO DE MONITOREO – C06</b>	<b>DETALLE</b>	
	Descripción	Vertimiento Agrícola
	Coordenadas	X = 4727088.6411 m Y = 1877632.9547 m
	Altitud	545 msnm
	Fuente Hídrica	Rio Tune
	Vereda	Farfán

Tabla 31. Descripción punto de monitoreo C07


PUNTO DE MONITOREO – C07	DETALLE	
	Descripción	Vertimiento Agrícola
	Coordenadas	X = 4727608.5127 m Y = 1878217.8434 m
	Altitud	547 msnm
	Fuente Hídrica	Rio Tune
	Vereda	Farfán

Tabla 32. Descripción punto de monitoreo C08

PUNTO DE MONITOREO – C08	DETALLE	
	Descripción	Rio Tune Aguas arriba de los vertimientos del casco urbano Palermo (Antecedentes)
	Descripción	Este punto permite conocer las condiciones del agua con las que resulta antes de que descarguen las aguas provenientes de las plantas de tratamiento de agua residuales del casco urbano de Palermo
	Coordenadas	X = 4729038.5008 m Y = 1878594.2868 m
	Altitud	565 msnm
	Fuente Hídrica	Rio Tune
Vereda	San Francisco	

Tabla 33. Descripción punto de monitoreo C09


PUNTO DE MONITOREO – C09	DETALLE	
	Descripción	Vertimiento PTAR
	Coordenadas	X = 4729080.9142 m Y = 1878532.8997 m
	Altitud	549 msnm
	Fuente Hídrica	Rio Tune
	Vereda	San Francisco

Tabla 34. Descripción punto de monitoreo C10

PUNTO DE MONITOREO – C10	DETALLE	
	Vertimiento Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR - MATADERO).	
	Descripción	Este punto permite conocer las características fisicoquímicas en las que son vertidas estas aguas al río y si cumple los estándares de calidad establecidos.
	Coordenadas	X = 4730143.594 m Y = 1878093.421 m
	Altitud	556 msnm
	Fuente Hídrica	Rio Tune
	Vereda	San Francisco

Tabla 35. Descripción punto de monitoreo C11


PUNTO DE MONITOREO – C11	DETALLE
	Rio Tune Aguas abajo de los vertimientos del casco urbano de Palermo (Antecedentes).
	Descripción Este punto permite conocer las condiciones del agua con las que resulta la fuente hídrica después de los descoles provenientes de las 3 plantas de tratamiento de aguas residuales del casco urbano del municipio de Palermo
	Coordenadas X = 4730366.3831 m Y = 1878207.6129 m
	Altitud 556.54 msnm
	Fuente Hídrica Rio Tune
Vereda Porvenir	

Tabla 36. Descripción punto de monitoreo C12


PUNTO DE MONITOREO – C12	DETALLE
	Rio Tune antes de su desembocadura al Rio Bache.
	Descripción Este punto permite conocer en qué estado fisicoquímico el río Tune desemboca al cauce del río Bache, después de los vertimientos agrícolas, piscícolas y domésticos que caen al cauce durante su recorrido; permite, además, hacer un análisis comparativo con los valores registrados en la parte media y baja de la subcuenca del río Tune.
	Coordenadas X = 4730581.9621 m Y = 1879838.075 m
	Altitud 548.16 msnm
	Fuente Hídrica Rio Tune
Vereda Porvenir	

Tabla 37. Descripción punto de monitoreo A01


PUNTO DE MONITOREO – A01	DETALLE
	Quebrada San Juan antes de desembocar al Rio Tune
	Descripción Se tienen en cuenta los vertimientos agrícolas por lo cual los análisis en este punto permitirán conocer afectaciones de este tipo.
	Coordenadas X = 4720167.1477m Y = 1870268.0525m
	Altitud 745.60 msnm
	Fuente Hídrica Qda. San Juan
	Vereda Porvenir

Tabla 38. Descripción punto de monitoreo A02


PUNTO DE MONITOREO – A02	DETALLE
	Quebrada El Nilo antes de desembocar al Rio Tune.
	Descripción Este punto permite conocer las condiciones del agua que esta afluente está aportando al rio Tune; teniendo en cuenta que sobre esta afluente se descargan varios descoles agrícolas.
	Coordenadas X = 4722038.1188 m Y = 1874267.8076 m
	Altitud 685 msnm
	Fuente Hídrica Qda. El Nilo
	Vereda El Nilo

Tabla 39. Descripción punto de monitoreo A03


PUNTO DE MONITOREO – A03	DETALLE	
	Descripción	Vertimiento Pecuario
	Coordenadas	X = 4718414.8345 m Y = 1873939.0443 m
	Altitud	633 msnm
	Fuente Hídrica	Qda. Nilo
	Vereda	Nilo

Tabla 40. Descripción punto de monitoreo A04


PUNTO DE MONITOREO – A04	DETALLE	
	Descripción	Vertimiento Domestico
	Coordenadas	X = 4718197.2543 m Y = 1873908.5806 m
	Altitud	536 msnm
	Fuente Hídrica	Qda. Nilo
	Vereda	Nilo

Tabla 41. Descripción punto de monitoreo A05


PUNTO DE MONITOREO – A05	DETALLE	
	Descripción	Vertimiento Pecuario
	Coordenadas	X = 4718153.4181 m Y = 1873888.9428 m
	Altitud	529 msnm
	Fuente Hídrica	Qda. Nilo
	Vereda	Nilo

Tabla 42. Descripción punto de monitoreo A06


PUNTO DE MONITOREO – A06	DETALLE	
	Descripción	Quebrada La Guagua antes de desembocar al Rio Tune
	Coordenadas	X = 4729867.7234 m Y = 1877933.0905 m
	Altitud	562 msnm
	Fuente Hídrica	Qda. La Guagua
	Vereda	Municipio de Palermo

Tabla 43. Descripción punto de monitoreo A07



PUNTO DE MONITOREO – A07	DETALLE	
	Descripción	Vertimiento Agrícola
	Coordenadas	X = 4729904.3788 m Y = 1877732.0277 m
	Altitud	537 msnm
	Fuente Hídrica	Qda. La Guagua
	Vereda	Municipio de Palermo

Tabla 44. Descripción punto de monitoreo A08

PUNTO DE MONITOREO – A08	DETALLE	
	Quebrada La Guagua antes de la bocatoma del Acueducto de Palermo	
	Descripción	Este punto permite conocer las condiciones del agua en que es aportada para la planta de tratamiento de agua potable del casco urbano del municipio de Palermo
	Coordenadas	X = 4730210.541 m Y = 1875060.6259 m
	Altitud	687 msnm
	Fuente Hídrica	Qda. La Guagua
Vereda	Nazareth	

- **Localización de los puntos de monitoreo sobre el cauce del Rio Tune**

1. **Organización de la información:** Una vez analizada la información existente y los datos recolectados en campo, se presenta a continuación, los puntos de monitoreo que fueron seleccionados para analizar los cambios en la calidad del agua, su variación espacial y de esta manera determinar el impacto del uso del suelo en su calidad. En la Tabla 45 se presentan los detalles de los puntos de monitoreo seleccionados y georreferenciados.

Tabla 45. Localización puntos de monitoreo definidos en el estudio

No.	ID Monitoreo	Tipo	Fuente Hídrica	Este	Norte
1	C01	Rio Tune antes de usos directos sobre el cauce	Rio Tune	4717702.22	1861200.6
2	C02	Rio Tune Puente veredal Tablón. Los Pinos "Estadero Las Locas"	Rio Tune	4720173.48	1870612.91
3	C03	Vertimiento Agrícola	Rio Tune	4723188.01	1876151.36
4	C04	Vertimiento Agrícola	Rio Tune	4724245.22	1876868.89
5	C05	Vertimiento Agrícola	Rio Tune	4726868.37	1877376.9
6	C06	Vertimiento Agrícola	Rio Tune	4727088.64	1877632.95
7	C07	Vertimiento Agrícola	Rio Tune	4727608.51	1878217.84
8	C08	Rio Tune Aguas arriba de los vertimientos del casco urbano Palermo (Antecedentes)	Rio Tune	4729038.5	1878594.29
9	C09	Vertimiento PTAR	Rio Tune	4729080.91	1878532.9
10	C10	Vertimiento Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR - MATADERO)	Rio Tune	4730143.59	1878093.42

No.	ID Monitoreo	Tipo	Fuente Hídrica	Este	Norte
11	C11	Rio Tune Aguas abajo de los vertimientos del casco urbano de Palermo (Antecedentes).	Rio Tune	4730366.38	1878207.61
12	C12	Rio Tune antes de su desembocadura al Rio Bache.	Rio Tune	4730581.96	1879838.08
13	A01	Quebrada San Juan antes de desembocar al Rio Tune	Qda. San Juan	4720167.15	1870268.05
14	A02	Quebrada El Nilo antes de desembocar al Rio Tune	Qda. El Nilo	4722038.12	1874267.81
15	A03	Vertimiento Pecuario	Qda. Nilo	4718414.83	1873939.04
16	A04	Vertimiento Domestico	Qda. Nilo	4718197.25	1873908.58
17	A05	Vertimiento Pecuario	Qda. Nilo	4718153.42	1873888.94
18	A06	Quebrada La Guagua antes de desembocar al Rio Tune	Qda. La Guagua	4729867.72	1877933.09
19	A07	Vertimiento Agrícola	Qda. La Guagua	4729904.38	1877732.03
20	A08	Quebrada La Guagua antes de la bocatoma del Acueducto de Palermo	Qda. La Guagua	4730210.54	1875060.63

De acuerdo con lo anterior, sobre el cauce principal del Rio Tune se identificaron 12 vertimientos y sobre los afluentes principales (Quebrada San Juan, el Nilo y La Guagua) 8 vertimientos. Se establecieron en total 20 puntos de muestreo, 13 aguas arriba del casco urbano del municipio de Palermo, 4 en la zona urbana, 2 aguas abajo del municipio y 1 en la desembocadura del Rio

La ubicación de los puntos seleccionados a lo largo del área de estudio se observa en la Figura 9.

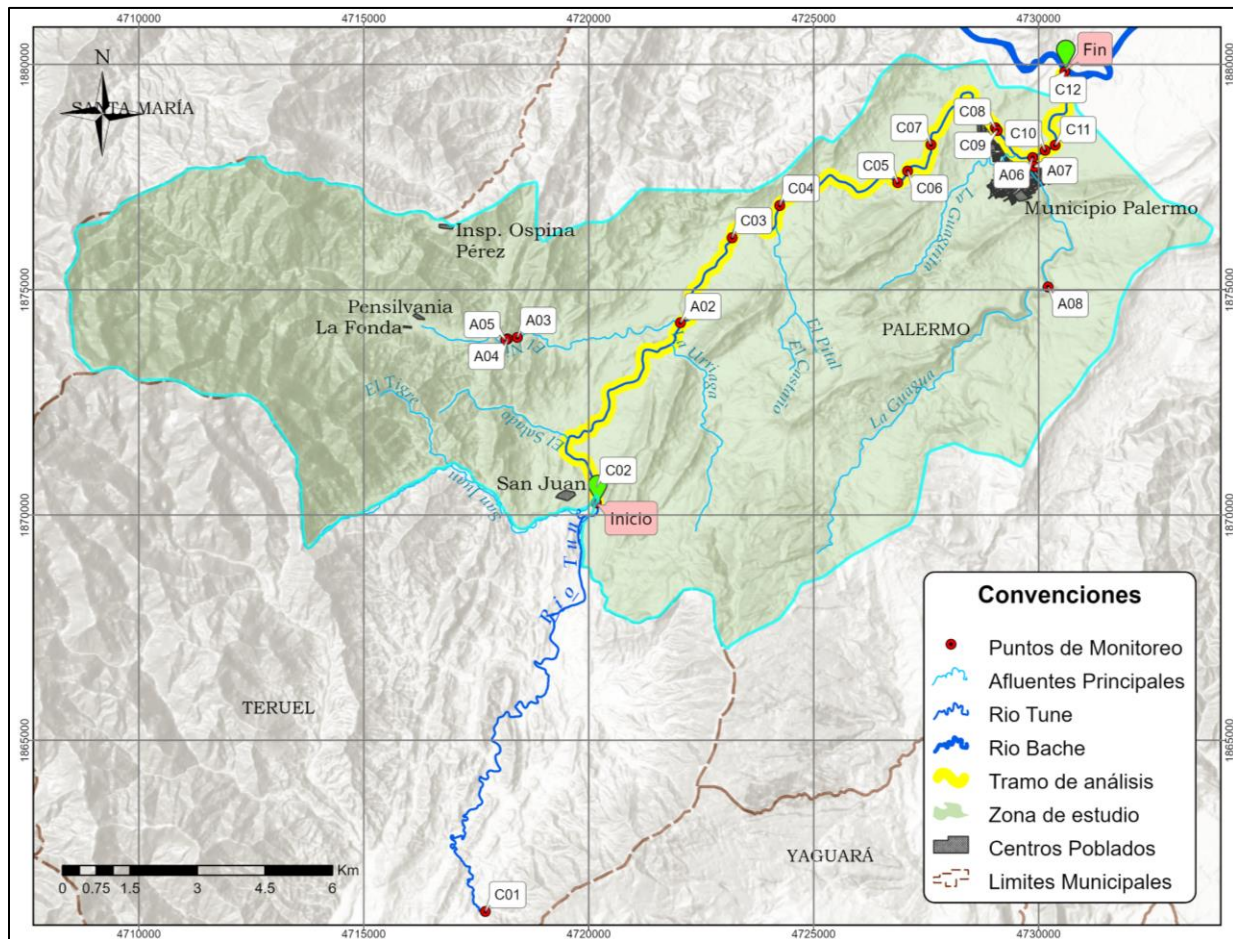


Figura 9. Puntos de monitoreo seleccionados a lo largo del área de estudio

**Fase III:** Analizar los resultados fisicoquímicos e hidrobiológicos del agua del Río Tune.

- **Actividad 1. Recolección de los resultados Fisicoquímicos e hidrobiológicos existentes sobre el cauce principal del Río Tune.**

**1. Revisión de información existente**

La información existente fue extraída de diferentes instrumentos de planificación ambiental como aspecto importante para la línea base del estado en el que se encuentra el Río Tune, sus fuentes principales y el vertimiento representativo del presente proyecto, siendo el

Plan de saneamiento y manejo de vertimientos – PSMV (2017 – 2027) emitido por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena - CAM y la caracterización de aguas residuales emitido por Empresas Públicas de Palermo – Huila, por tanto.

**2. Muestras para determinar la calidad:**

**• Resultados de parámetros In Situ – Agua superficial**

Los parámetros In Situ fueron medidos de forma puntual y fueron aquellos que determinaron el estado inmediato del cuerpo de agua en los sitios en donde se realizó la medición, los parámetros medidos fueron Caudal Promedio, pH, Conductividad Eléctrica, Temperatura del Agua y Oxígeno Disuelto, una vez lo anterior, se presenta a continuación la tabulación de los resultados obtenidos durante las dos campañas de monitoreo realizadas (época seca y época de lluvia) sobre los puntos presentes en el cauce principal y los afluentes principales.

Tabla 46. Datos In Situ Estación C01 - Río Tune

ESTACIÓN C01: Río Tune antes de usos directos sobre el cauce		
PARÁMETROS	PRIMERA CAMPAÑA	SEGUNDA CAMPAÑA
Hora	6:00 p.m.	6:00 p.m.
Temperatura (°C)	24.1	23.6
Oxígeno disuelto (mg/l)	7.02	7.3
%Saturación de Oxígeno	93	96.3
PH (Unidades de pH)	6.56	8.79
Conductividad eléctrica (µs/cm)	120	97
Sólidos Disueltos totales	50	47.1
Caudal (L/s)	5.83	4.65

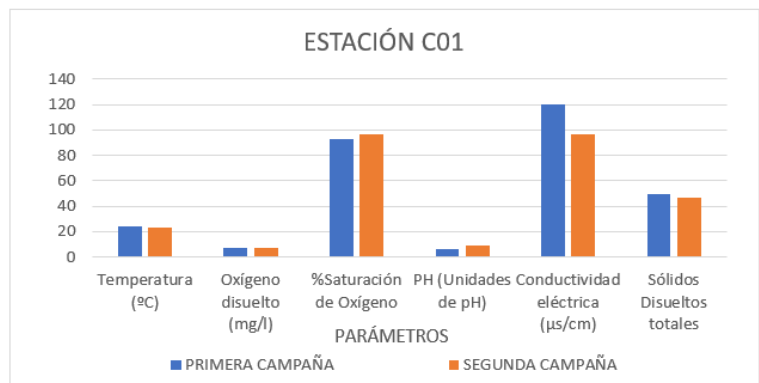


Tabla 47. Datos In Situ Estación C02 - Río Tune

<b>ESTACIÓN C02: Río Tune Puente veredal Tablón, Los Pinos "Estadero Las Locas</b>		
<b>PARÁMETROS</b>	<b>PRIMERA CAMPAÑA</b>	<b>SEGUNDA CAMPAÑA</b>
<b>Hora</b>	7:35 a.m.	7:35 a.m.
<b>Temperatura (°C)</b>	23.2	22.8
<b>Oxígeno disuelto (mg/l)</b>	7.65	7.86
<b>%Saturación de Oxígeno</b>	97.3	99.5
<b>PH (Unidades de pH)</b>	8.01	9.09
<b>Conductividad eléctrica (µs/cm)</b>	110	114.8
<b>Sólidos Disueltos totales</b>	61	56.5
<b>Caudal (L/s)</b>	2152.23	1620.76

Parámetro	Primera Campaña	Segunda Campaña
Temperatura (°C)	23.2	22.8
Oxígeno disuelto (mg/l)	7.65	7.86
%Saturación de Oxígeno	97.3	99.5
PH (Unidades de pH)	8.01	9.09
Conductividad eléctrica (µs/cm)	110	114.8
Sólidos Disueltos totales	61	56.5

Tabla 48. Datos In Situ Estación C03 - Río Tune

<b>ESTACIÓN C08: Río Tune Aguas arriba de los vertimientos del casco urbano Palermo (Antecedentes)</b>		
<b>PARÁMETROS</b>	<b>PRIMER A CAMPAÑA</b>	<b>SEGUNDA A CAMPAÑA</b>
<b>Hora</b>	5:35 p.m.	17:35 p.m.
<b>Temperatura (°C)</b>	23,6	27,85
<b>Oxígeno disuelto (mg/l)</b>	7,29	4,44
<b>%Saturación de Oxígeno</b>	91,91	60,2
<b>PH (Unidades de pH)</b>	9,25	7,90
<b>Conductividad eléctrica (µs/cm)</b>	156	110
<b>Sólidos Disueltos totales</b>	68	60
<b>Caudal (L/s)</b>	1996,86	3213,39

Parámetro	Primera Campaña	Segunda Campaña
Temperatura (°C)	23,6	27,85
Oxígeno disuelto (mg/l)	7,29	4,44
%Saturación de Oxígeno	91,91	60,2
PH (Unidades de pH)	9,25	7,90
Conductividad eléctrica (µs/cm)	156	110
Sólidos Disueltos totales	68	60

Tabla 49. Datos In Situ Estación C04 - Río Tune

<b>ESTACIÓN C11: Río Tune Aguas abajo de los vertimientos del casco urbano de Palermo (Antecedentes).</b>		
PARÁMETROS	PRIMERA CAMPAÑA	SEGUNDA CAMPAÑA
<b>Hora</b>	6:26 p.m.	6:26 p.m.
<b>Temperatura (°C)</b>	27,9	27,85
<b>Oxígeno disuelto (mg/l)</b>	6,67	4,66
<b>%Saturación de Oxígeno</b>	90,87	63,4
<b>PH (Unidades de pH)</b>	8,26	7,61
<b>Conductividad eléctrica (µs/cm)</b>	190	150
<b>Sólidos Disueltos totales</b>	75,5	60
<b>Caudal (L/s)</b>	2424,76	4672,64

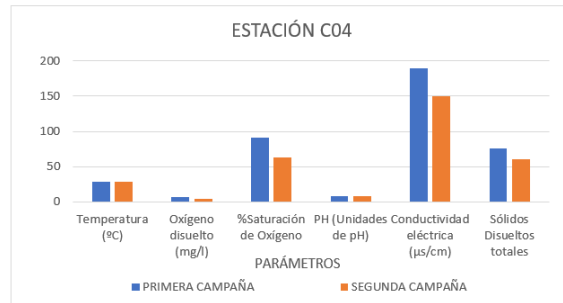


Tabla 50. Datos In Situ Estación C05 - Río Tune

<b>ESTACIÓN C12: Río Tune antes de su desembocadura al Río Bache</b>		
PARÁMETROS	PRIMERA CAMPAÑA	SEGUNDA CAMPAÑA
<b>Hora</b>	7:16 p.m.	7:16 p.m.
<b>Temperatura (°C)</b>	28,7	30,0
<b>Oxígeno disuelto (mg/l)</b>	6,16	7,01
<b>%Saturación de Oxígeno</b>	85,3	100,3
<b>PH (Unidades de pH)</b>	7,81	8,47
<b>Conductividad eléctrica (µs/cm)</b>	130	127,6
<b>Sólidos Disueltos totales</b>	76	55,8
<b>Caudal (L/s)</b>	3792,64	5303,36

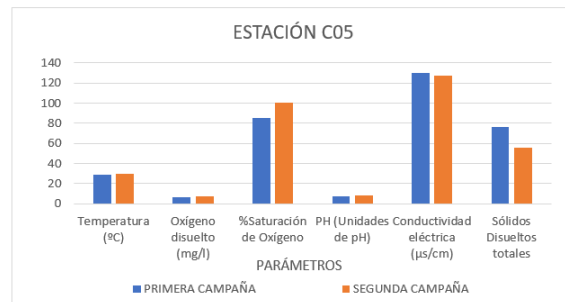


Tabla 51. Datos In Situ Estación A01 – Quebrada San Juan

ESTACIÓN A01: Quebrada San Juan antes de desembocar al Río Tune		
PARÁMETROS	PRIMERA CAMPAÑA	SEGUNDA CAMPAÑA
Hora	10:43 a.m.	10:43 a.m.
Temperatura (°C)	22.3	22.6
Oxígeno disuelto (mg/l)	7.74	7.82
%Saturación de Oxígeno	96.99	98.9
PH (Unidades de pH)	7.88	9.36
Conductividad eléctrica (µs/cm)	90	95.5
Sólidos Disueltos totales	51	47.4
Caudal (L/s)	685.74	215.27

Parámetro	Primera Campaña	Segunda Campaña
Temperatura (°C)	22.3	22.6
Oxígeno disuelto (mg/l)	7.74	7.82
%Saturación de Oxígeno	96.99	98.9
PH (Unidades de pH)	7.88	9.36
Conductividad eléctrica (µs/cm)	90	95.5
Sólidos Disueltos totales	51	47.4

Tabla 52. Datos In Situ Estación A02 – Quebrada El Nilo

ESTACIÓN A02: Quebrada El Nilo antes de desembocar al Río Tune		
PARÁMETROS	PRIMERA CAMPAÑA	SEGUNDA CAMPAÑA
Hora	10:43 a.m.	10:43 a.m.
Temperatura (°C)	24,4	21,8
Oxígeno disuelto (mg/l)	7,14	8,13
%Saturación de Oxígeno	103,3	100,3
PH (Unidades de pH)	8,21	8,30
Conductividad eléctrica (µs/cm)	120	107,6
Sólidos Disueltos totales	64	54,1
Caudal (L/s)	1828,45	3454,57

Parámetro	Primera Campaña	Segunda Campaña
Temperatura (°C)	24,4	21,8
Oxígeno disuelto (mg/l)	7,14	8,13
%Saturación de Oxígeno	103,3	100,3
PH (Unidades de pH)	8,21	8,30
Conductividad eléctrica (µs/cm)	120	107,6
Sólidos Disueltos totales	64	54,1

Tabla 53. Datos In Situ Estación A03 – Quebrada La Guagua

ESTACIÓN A06: Quebrada La Guagua antes de desembocar al Rio Tune		
PARÁMETROS	PRIMERA CAMPAÑA	SEGUNDA CAMPAÑA
Hora	18:15 p.m.	18:15 p.m.
Temperatura (°C)	28	25,6
Oxígeno disuelto (mg/l)	4,33	6,55
%Saturación de Oxígeno	59,4	85,4
PH (Unidades de pH)	7,56	8,47
Conductividad eléctrica (µs/cm)	170	200
Sólidos Disueltos totales	92	100
Caudal (L/s)	444,70	273,03

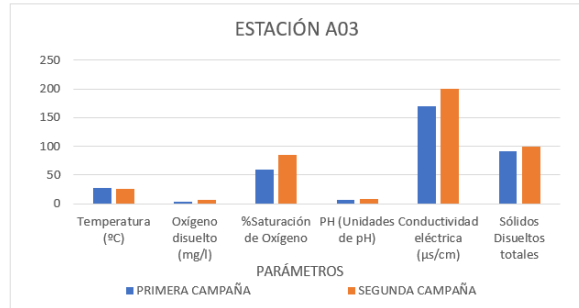
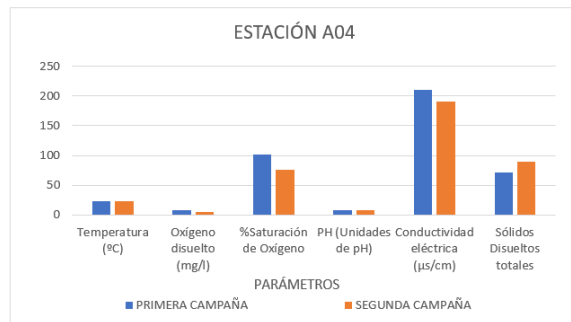


Tabla 54. Datos In Situ Estación A04 – Quebrada La Guagua

ESTACIÓN A08: Quebrada La Guagua antes de la bocatoma del Acueducto de Palermo		
PARÁMETROS	PRIMERA CAMPAÑA	SEGUNDA CAMPAÑA
Hora	7:30 a.m.	7:19 a.m.
Temperatura (°C)	23,2	22,99
Oxígeno disuelto (mg/l)	7,99	5,70
%Saturación de Oxígeno	101,50	75,9
PH (Unidades de pH)	7,79	7,59
Conductividad eléctrica (µs/cm)	210	190
Sólidos Disueltos totales	72	90
Caudal (L/s)	418,23	395,36



- **Resultados de parámetros en laboratorio – Agua superficial**

Corresponden a una serie de parámetros físicos, químicos y microbiológicos que fueron medidos en el laboratorio, siendo los requeridos para determinar si la calidad del agua de la

fuentes hídricas en estudio es apta para cada uno de los usos identificados o si es necesario realizar alguna restricción de uso y/o vertimiento, según los lineamientos contenidos en el Decreto N° 1076 de 2015 y Resolución N° 631 de 2015. Dichos resultados se evidencian en la Tabla 55 y Tabla 56 citadas a continuación.

Tabla 55. Resultados Río Tune y afluentes principales, Campaña 1

N°	PARÁMETROS RESPONSABLE DEL MONITOREO SITIO DE MUESTREO	CAMPAÑA 1 RESULTADOS DE LABORATORIO CONSTRUCCIONES SUMINISTROS LTDA.								UNIDAD	
		C01	C02	C08	C11	C12	A01	A02	A06		A08
FISICOQUÍMICOS BÁSICOS	Alcalinidad Total	48,88	48,98	56,13	57,56	57,56	<0,05	56,33	60,41	47,76	mg/L CaCO <sub>3</sub>
	Dureza Total	54,51	48,7	50,7	67,74	64,33	<0,001	55,31	80,16	76,95	mg/L CaCO <sub>3</sub>
	DBO5 Total	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	0,051	<5,0	5,29	<5,0	mg/L O <sub>2</sub>
	DBO Filtrada	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<0,10	<5,0	<5,0	<5,0	mg/L O <sub>2</sub>
	DBO5 Soluble	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<0,005	<5,0	<5,0	<5,0	mg/L O <sub>2</sub>
	DQO Total	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<0,008	<10,0	19,11	<5,0	mg/L O <sub>2</sub>
	DQO Total /COT	<3,3	<3,3	<3,3	<3,3	<3,3	<0,10	<3,3	<3,3	<3,3	mg/LO <sub>2</sub> /mg/L
	DBO Ultima	<5,0	<5,0	<5,0	5,31	<5,00	<3,00	<5,0	8,34	<5,00	mg/L O <sub>2</sub>
	Sólidos Suspendidos Totales	12,75	<10,0	<10,0	11,33	12,33	<10,0	46,09	41	<10,0	mg/L
	Sólidos suspendidos Volátiles	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	7,15	<10,0	<10,0	<10,0	mg/L
	Sólidos Disueltos Totales	50	61	68	75,5	76	2,53	64	92	72	mg/L
	Turbiedad	13,55	14,7	15,7	19,7	5,25	5,13	5,63	4,8	5,2	NTU
	Nitrógeno Total	<5,0	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	48	<5,0	<5,0	<5,0	mg/L N
	Nitrógeno Amoniacal	<0,02	0,516	<0,02	1,03	0,516	60	<0,02	1,03	<0,02	mg/L N-NH <sub>3</sub>
	Nitritos	<0,005	<0,005	<0,005	0,051	0,03	48	<0,005	0,55	<0,005	mg/L N-NO <sub>2</sub>
	Nitratos	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	12	<0,50	<0,50	<0,50	mg/L N-NO <sub>3</sub>
	Fosforo Total	0,538	0,28	<0,20	0,219	0,263	<0,05	<0,20	0,53	<0,20	mg/L P
	Fosfatos	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,001	<0,20	0,228	<0,20	mg/L PO <sub>4</sub>
	Ortofosfatos	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	0,051	<0,20	0,228	<0,20	mg/L P-PO <sub>4</sub> <sub>3</sub>
	Grasas y Aceites	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<0,10	<10,0	<10,0	<10,0	mg/L
SAAM	0,918	0,696	1,2	1,04	1,13	<0,005	4,11	2,01	1,67	mg/L	
Fenoles	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,008	<0,20	<0,20	<0,20	mg/L	
Hydrocarburos totales del petróleo	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<0,10	<10,0	<10,0	<10,0	mg/L	
Clorofila	0,34	0,39	0,34	0,74	1,13	<3,00	11,82	0,74	0,001	mg/m <sup>3</sup>	
Compuestos Organoclorados	<10	<10	<10	<10	<10	<10,0	<10,0	<10	<10	mg/L	
Compuestos Organofosforados	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	7,15	<0,010	<0,010	<0,010	mg/L	

N°	PARÁMETROS RESPONSABLE DEL MONITOREO SITIO DE MUESTREO	CAMPAÑA 1 RESULTADOS DE LABORATORIO								UNIDAD	
		CONSTRUCSUELOS SUMINISTROS LTDA.									
		C01	C02	C08	C11	C12	A01	A02	A06		A08
METALES Y METALOIDES	Arsénico (As)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	2,53	<0,001	<0,001	<0,001	mg/L
	Bario (Ba)	0,049	0,078	0,054	0,017	0,046	5,13	0,024	0,03	0,004	mg/L
	Cadmio (Cd)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	48	<0,01	<0,01	<0,01	mg/L
	Zinc (Zn)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	60	<0,05	<0,05	<0,05	mg/L
	Cobre (Cu)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	48	<0,10	<0,10	<0,10	mg/L
	Cromo Total (Cr)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	12	<0,10	<0,10	<0,10	mg/L
	Hierro (Fe)	0,424	0,294	0,424	0,194	0,432	<0,05	1,11	0,945	0,152	mg/L
	Manganeso (Mn)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,001	<0,05	0,054	<0,05	mg/L
	Mercurio (Hg)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,051	<0,001	<0,001	<0,001	mg/L
	Níquel (Ni)	0,055	0,03	0,101	0,007	<0,005	<0,10	0,006	0,007	0,207	mg/L
	Plomo (Pb)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,005	<0,10	<0,10	<0,10	mg/L
	Selenio (Se)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,008	<0,005	<0,005	<0,005	mg/L
MICROBIOLÓGICOS	Vanadio (Va)	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,10	<0,008	<0,008	<0,008	mg/L
	Cianuros	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<3,00	<0,10	<0,10	<0,10	mg/L CN
	Cloruros	<3,00	<3,00	<3,00	<3,00	<3,0	<10,0	<3,0	3,06	<3,0	mg/L CL-
	Sulfatos	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	10,88	7,15	<10,0	18,32	17,93	mg/L SO <sub>4-2</sub>
	Calcio	6,95	9,23	9,59	10,21	11,1	2,53	8,65	18,27	17,98	mg/L
	Magnesio	2,14	3,15	3,63	3,38	3,73	5,13	4	2,48	1,63	mg/L
	Sodio	7,23	6,56	6,34	6,93	7,1	48	5,98	6,6	1,59	mg/L
	Coliformes termotolerantes	140	21	430	920	920	60	26	540	21	NMP/100 mL
	Coliformes totales	280	120	540	>1600	1600	48	120	920	63	NMP/100 mL
	Coliformes Fecales	140	21	430	920	920	12	26	540	21	NMP/100 mL
	E. Coli	120	12	280	540	540	<0,05	11	350	12	NMP/100 mL

Tabla 56. Resultados Río Tune y afluentes principales, Campaña 2

N°	PARÁMETROS RESPONSABLE DEL MONITOREO SITIO DE MUESTREO	CAMPAÑA 2 RESULTADOS DE LABORATORIO								UNIDAD	
		CONSTRUCSUELOS SUMINISTROS LTDA.									
		C01	C02	C08	C11	C12	A01	A02	A06		A08
FISICOQUÍMICOS BÁSICOS	Alcalinidad Total	45,69	50,56	44,07	46,5	46,5	<0,10	46,1	56,25	53,2	mg/L CaCO <sub>3</sub>
	Dureza Total	31,58	42,97	41,17	43,57	43,57	<0,20	41,77	62,76	88,94	mg/L CaCO <sub>3</sub>
	DBO5 Total	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10,0	<5,00	<5,00	<5,00	mg/L O <sub>2</sub>
	DBO Filtrada	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	3,46	<5,00	<5,00	<5,00	mg/L O <sub>2</sub>
	DBO5 Soluble	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<10	<5,00	<5,00	<5,00	mg/L O <sub>2</sub>
	DQO Total	<10,0	<10,0	<10,0	12,85	13,96	<0,010	<10,0	15,82	<10,0	mg/L O <sub>2</sub>

	DQO Total /COT	<3,3	<3,30	<3,3	<3,3	<3,3	<0,001	<3,3	<3,3	<3,3	mg/LO2/ mg/L
	DBO Ultima	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	0,038	<5,00	<5,00	<5,00	mg/L O <sub>2</sub>
	Sólidos Suspendidos Totales	12	<10,0	32,8	75,5	80	<0,01	23	48,5	<10,0	mg/L
	Sólidos suspendidos Volátiles	<10,0	<10,0	14	17,5	13,64	<0,05	22,5	18	<10,0	mg/L
	Solidos Disueltos Totales	47,1	73	62	70	64	<0,10	80	89	90	mg/L
	Turbiedad	12,6	10,2	51,8	50,9	62,1	<0,10	141	19,5	5,62	NTU
	Nitrógeno Total	<5,0	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	0,253	<5,00	<5,00	<5,00	mg/L N
	Nitrógeno Amoniacal	0,05	0,12	0,29	0,37	0,34	<0,05	0,2	0,48	0,005	mg/L N- NH <sub>3</sub>
	Nitritos	0,005	0,005	0,006	0,029	0,038	<0,001	0,006	0,144	0,005	mg/L N- NO <sub>2</sub>
	Nitratos	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,005	<0,50	<0,50	<0,50	mg/L N- NO <sub>3</sub>
	Fosforo Total	0,246	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,10	<0,20	0,237	<0,20	mg/L P
	Fosfatos	0,246	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,005	<0,20	0,237	<0,20	mg/L PO <sub>4</sub>
	Ortofosfatos	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,008	<0,20	<0,20	<0,20	mg/L P- PO <sub>4-3</sub>
	Grasas y Aceites	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	0,1	<10,0	<10,0	<10,0	mg/L
	SAAM	<0,10	<0,100	<0,10	<0,10	<0,10	<3,00	<0,10	<0,10	<0,10	mg/L
	Fenoles	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<10,0	<0,20	<0,20	<0,20	mg/L
	Hidrocarburos totales del petróleo	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	6,64	<10,0	<10,0	<10,0	mg/L
	Clorofila	4,09	6,12	5,33	4,49	5,28	2,56	8,04	3,81	3,46	mg/m <sup>3</sup>
	Compuestos Organoclorados	<10	<10	<10	<10	<10,0	5,41	<10	<10	<10,0	mg/L
	Compuestos Organofosforados	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	450	<0,010	<0,010	<0,010	mg/L
	Arsénico (As)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	540	<0,001	<0,001	<0,001	mg/L
	Bario (Ba)	0,016	0,068	0,056	0,055	0,057	450	0,035	0,046	0,027	mg/L
	Cadmio (Cd)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	350	<0,01	<0,01	<0,01	mg/L
	Zinc (Zn)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,10	<0,05	<0,05	<0,05	mg/L
	Cobre (Cu)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,20	<0,10	<0,10	<0,10	mg/L
	Cromo Total (Cr)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<10,0	<0,10	<0,10	<0,10	mg/L
	Hierro (Fe)	0,269	0,275	1,1	1,18	1,29	3,46	2,63	1,22	0,173	mg/L
	Manganeso (Mn)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<10	0,11	0,057	<0,05	mg/L
	Mercurio (Hg)	0,001	<0,001	<0,10	0,001	<0,001	<0,010	<0,001	<0,001	<0,001	mg/L
	Níquel (Ni)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,001	<0,005	<0,005	<0,005	mg/L
	Plomo (Pb)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,038	<0,10	<0,10	<0,10	mg/L
	Selenio (Se)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,01	<0,005	<0,005	<0,005	mg/L
	Vanadio (Va)	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	<0,05	<0,008	<0,008	<0,008	mg/L
MICROBIOLÓGICO	Cianuros	0,1	0,1	<0,10	0,1	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	mg/L CN
	Cloruros	<3,0	<3,0	<3,0	<3,0	<3,00	<0,10	<3,0	<3,00	<3,00	mg/L CL-
	Sulfatos	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	0,253	<10,0	17,64	38,05	mg/L SO <sub>4-2</sub>
	Calcio	6,55	8,99	8,38	9,59	9,92	<0,05	7,48	16,63	26,48	mg/L

METALES Y METALOIDES

Magnesio	2,46	3,19	3,27	3,32	3,43	<0,001	4,27	2,76	2,49	mg/L
Sodio	8	6,85	4,88	5,23	5,54	<0,005	4,56	5,43	1,8	mg/L
Coliformes termotolerantes	540	430	540	1600	540	<0,10	540	540	430	NMP/100 mL
Coliformes totales	920	540	920	>1600	920	<0,005	920	920	540	NMP/100 mL
Coliformes Fecales	540	430	540	1600	450	<0,008	540	540	430	NMP/100 mL
E. Coli	430	350	430	920	430	0,1	430	430	350	NMP/100 mL

• **Resultados de parámetros en laboratorio – Vertimiento representativo C10**

La toma de las muestras y el análisis fue desarrollado por el laboratorio Construcsuelos Suministros LTDA., debido a que este laboratorio cuenta con la mayoría de los parámetros a analizar acreditados por el IDEAM mediante Resolución N.º 0003 del 02 de enero de 2019, por tanto, en la Tabla 57 citada a continuación se presentan los resultados obtenidos en los parámetros fisicoquímicos en el vertimiento representativo (C10) durante las dos campañas de monitoreo realizadas en el mes de enero y marzo del 2023.

Tabla 57. Resultados de laboratorio del Punto C10

Nº	PARÁMETROS CAMPAÑA IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA FECHA	RESULTADOS DE LABORATORIO – C10		UNIDAD
		CAMPAÑA 1	CAMPAÑA 2	
		M239	M967	
		29/01/2021	07/04/2021	
<b>FISICOQUÍMICOS BÁSICOS</b>	Alcalinidad Total	110,2	115,34	mg/L CaCO3
	DBO5 Total	79,46	113,8	mg/L O2
	DBO5 Filtrada	39,9	62,4	mg/L O2
	DBO5 Soluble	39,9	62,4	mg/L O2
	DQO Total	187,96	177,6	mg/L O2
	DQO Total/COT	7,86	<10,0	mg/L O2 /mg/L
	DBO Ultima	131,5	176,4	mg/L O2
	Solidos Suspendidos Totales	58,57	50	mg/L
	Solidos suspendidos Volátiles	47,14	43	mg/L
	Solidos Sedimentables	0,2	0,5	mg/L

N°	PARÁMETROS		RESULTADOS DE LABORATORIO – C10		UNIDAD
	CAMPAÑA	CAMPAÑA 1	CAMPAÑA 2		
	IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	M239	M967		
	FECHA	29/01/2021	07/04/2021		
	Sólidos Disueltos Totales	215	61	mg/L	
	Turbiedad	77,2	96,6	NTU	
	Nitrógeno Total	14,89	18,02	mg/L N	
	Nitrógeno Amoniacal	14,52	15,5	mg/L N	
	Nitritos	0,005	0,01	mg/L N-NH3	
	Nitratos	<0,50	<0,50	mg/L N-NO2	
	Fosforo Total	1,6	1,41	mg/L N-NO3	
	Ortofosfatos	0,812	0,75	mg/L PO <sub>4</sub>	
	Fosfatos	0,812	1,41	mg/L P	
	Grasas y Aceites	19,01	55,06	mg/L P-PO4-3	
	SAAM	23,05	5,16	mg/L	
	Fenoles	<0,20	<0,20	mg/L	
	Hidrocarburos totales del petróleo	<10	<10,0	mg/L	
METALES Y METALOIDES	Arsénico (As)	<0,001	<0,001	mg/L	
	Bario (Ba)	0,045	0,063	mg/L	
	Cadmio (Cd)	<0,01	<0,02	mg/L	
	Zinc (Zn)	0,051	0,126	mg/L	
	Cobre (Cu)	<0,10	<0,10	mg/L	
	Cromo Total (Cr)	<0,10	<0,20	mg/L	
	Hierro (Fe)	0,762	0,746	mg/L	
	Manganeso (Mn)	<0,05	0,064	mg/L	
	Mercurio (Hg)	<0,001	<0,001	mg/L	
	Níquel (Ni)	0,016	<0,005	mg/L	
	Plomo (Pb)	<0,10	<0,20	mg/L	
	Selenio (Se)	<0,005	<0,005	mg/L	
	Vanadio (Va)	<0,008	<0,008	mg/L	
IONES	Cianuros	<0,10	0,1	mg/L CN	
	Cloruros	28,26	45,39	mg/L CL-	
	Sulfatos	37,29	72,92	mg/L SO <sub>4</sub> -2	
MICROBIOLÓGICOS	Coliformes termotolerantes	540	1600	NMP/100 mL	
	Coliformes totales	920	>1600	NMP/100 mL	
	Coliformes Fecales	540	1600	NMP/100 mL	
	E. Coli	430	920	NMP/100 mL	

- **Resultados Físicoquímicos para Uso Agrícola**

Dicho análisis fue enfocado principalmente en la determinación de la calidad del agua para Riego, teniendo en cuenta que el uso agrícola es el principal uso de la subcuenca hidrográfica del Río Tune y sus principales tributarios, por tanto, fue necesario calcular algunos índices de calidad de agua como la conductividad Eléctrica, Salinidad Efectiva y salinidad potencial, A continuación, en la Tabla 58 y

Tabla 59 se presentan los resultados obtenidos de la conversión en la relación de mg/L a meq/L.

Tabla 58. Conversión de mg/L a meq/L Aniones y Cationes – Campaña 1

		CAMPAÑA 1					
ELEMENTOS	CATIONES			ANIONES		OTROS	
	SODIO	MAGNESIO	CALCIO	SULFATOS	CLORUROS	NITRATOS	
PESO ATÓMICO	22.99	24.305	40.078	96.063	35.453	62.05	
VALENCIA	1	2	2	2	1	1	
		<b>PARÁMETRO EN mg/l</b>					
SITIOS DE MUESTREO	C01	7,23	2,14	6,95	<10,0	<3,00	<0,10
	A01	5,13	2,53	7,15	<10,0	<3,00	<0,10
	C02	6,56	3,15	9,23	<10,0	<3,00	<0,10
	A02	5,98	4	8,65	<10,0	<3,0	<0,10
	C08	6,34	3,63	9,59	<10,0	<3,00	<0,10
	A06	6,6	2,48	18,27	18,32	3,06	<0,10
	C11	6,93	3,38	10,21	<10,0	<3,00	<0,10
	C12	7,1	3,73	11,1	10,88	<3,0	<0,10
	A08	1,59	1,63	17,98	17,93	<3,0	<0,10
			<b>PARÁMETRO EN meq/l</b>				
	C01	0,314	0,176	0,347	0,208	0,085	0,008
	A01	0,223	0,208	0,357	0,208	0,085	0,009
C02	0,285	0,259	0,461	0,208	0,085	0,008	
A02	0,260	0,329	0,432	0,208	0,085	0,008	
C08	0,276	0,299	0,479	0,208	0,085	0,008	
A06	0,287	0,204	0,912	0,381	0,086	0,008	
C11	0,301	0,278	0,510	0,208	0,085	0,008	
C12	0,309	0,307	0,554	0,227	0,085	0,008	
A08	0,069	0,134	0,897	0,373	0,085	0,008	

Tabla 59. Conversión de mg/L a meq/L Aniones y Cationes – Campaña 2

ELEMENTOS	CAMPAÑA 2						
	SODIO	CATIONES MAGNESIO	CALCIO	ANIONES SULFATOS	CLORUROS	OTROS NITRATOS	
	22.99	24.305	40.078	96.063	35.453	62.05	
PESO ATÓMICO							
VALENCIA	1	2	2	2	1	1	
<b>PARÁMETRO EN mg/l</b>							
<b>SITIOS DE MUESTREO</b>	C01	8	2,46	6,55	<10,0	<3,0	<0,50
	A01	5,41	2,56	6,64	<10,0	<3,0	0,005
	C02	6,85	3,19	8,99	<10,0	<3,0	<0,50
	A02	4,56	4,27	7,48	<10,0	<3,0	0,006
	C08	4,88	3,27	8,38	<10,0	<3,0	<0,50
	A06	5,43	2,76	16,63	17,64	<3,0	0,144
	C11	5,23	3,32	9,59	<10,0	<3,0	<0,50
	C12	5,54	3,43	9,92	<10,0	<3,0	<0,50
	A08	1,8	2,49	26,48	38,05	<3,0	<0,50
	<b>PARÁMETRO EN meq/l</b>						
	C01	0,348	0,202	0,327	0,208	0,085	0,008
	A01	0,235	0,211	0,331	0,208	0,085	0,00
C02	0,298	0,262	0,449	0,208	0,085	0,008	
A02	0,198	0,351	0,373	0,208	0,085	0,00	
C08	0,212	0,269	0,418	0,208	0,085	0,008	
A06	0,236	0,227	0,830	0,367	0,846	0,002	
C11	0,227	0,273	0,479	0,208	0,085	0,008	
C12	0,241	0,282	0,495	0,208	0,085	0,008	
A08	0,078	0,205	1,321	0,792	0,085	0,008	

Según Quinteros Carabalí et al., (2019) en aguas para uso agrícola la calidad es definida por la concentración de iones específicos  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^{+}$  y  $K^{+}$  como cationes;  $CO_3$ ,  $CL^{-}$  y  $SO_4^{2-}$  como aniones y otros de menor proporción, como el  $B^{3+}$ ,  $I^{-}$  y  $NO_3^{-}$ , la conductividad eléctrica (CE) también es útil para determinar la concentración total de sales solubles. La CE y el  $Na^{+}$  son dos parámetros fundamentales que definen la aptitud del agua para riego. El alto contenido de sales en el agua de irrigación genera un aumento de la presión osmótica en la solución del suelo, disminuyendo la adsorción de agua por parte de las plantas. Asimismo, las sales, además de afectar directamente el crecimiento de las plantas, afecta la constitución del suelo, su permeabilidad y la estructura, afectando el crecimiento de las plantas. Por otro lado, la calidad del agua para riego depende teniendo en cuenta las necesidades hídricas de los cultivos y del

agua que está disponible para los mismos de forma natural, pero, es de mencionar que, a su vez, en las aguas naturales, de las cuales se toma para riego, pueden existir contaminantes de naturaleza inorgánica, especialmente fertilizantes y metales pesados, siendo estos de gran importancia debido al nivel de toxicidad para los organismos vivos.

- **Análisis de acuerdo con el contenido de Sales Solubles**

Dicho análisis se realizó teniendo en cuenta que el efecto nocivo de las sales solubles se debe a que produce presiones osmóticas en la solución del suelo que está en contacto con las raíces de la planta, las cuales, al pasar de ciertos valores producen una disminución en los rendimientos o pérdida total de la cosecha. Estos efectos son diferentes para cada cultivo en distintas etapas de desarrollo (Pérez, 2011).

Por tanto, en la Tabla 60 y

Tabla 61 citadas a continuación se presenta la clasificación de las aguas del Río Tune y sus principales tributarios teniendo en cuenta los valores registrados para el parámetro conductividad eléctrica durante las dos campañas de monitoreo desarrolladas en el mes de enero y abril del 2023.

Tabla 60. Conductividad del Río Tune y sus principales afluentes – Campaña 1

SITIO DE MUESTREO	RESULTADOS CONDUCTIVIDAD	UNIDAD	VALORES PERMISIBLES Pizarro, 1978	CRITERIO
C01	120			
A01	90			
C02	110	μS/cm	0-250	Agua de Baja Salinidad
A02	120			
C08	156			

SITIO DE MUESTREO	RESULTADOS CONDUCTIVIDAD	UNIDAD	VALORES PERMISIBLES Pizarro, 1978	CRITERIO
A06	170			
C11	190			
C12	130			
A08	210			

Tabla 61. Conductividad del Río Tune y sus principales afluentes – Campaña 2

SITIO DE MUESTREO	RESULTADOS CONDUCTIVIDAD	UNIDAD	VALORES PERMISIBLES Pizarro, 1978	CRITERIO
C01	97			
A01	95,5			
C02	114,8			
A02	107,6			
C08	110	μS/cm	0-250	Agua de Baja Salinidad
A06	200			
C11	150			
C12	127,6			
A08	190			

Teniendo en cuenta los resultados citados anteriormente, se tiene que, de acuerdo a la clasificación propuesta por el U.S. Salinity laboratory y los resultados obtenidos en la Conductividad Eléctrica para la primera y segunda campaña realizada sobre el cauce principal y los afluentes principales, se evidencia que el agua que discurre sobre el Río Tune y sus afluentes principales son de baja salinidad, pues según lo indicado por (Beita-Sandí & Barahona-Palomo, 2010) la conductividad es una medida de la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica. A su vez, esta es sensible a las diferentes variaciones de sólidos disueltos, especialmente de sales minerales. Para un cuerpo de agua en específico, se relaciona con los

sólidos totales disueltos y con los iones, la conductividad de la mayoría de las aguas dulces naturales se encuentra entre los  $10\mu\text{S}/\text{cm}$  a los  $350\mu\text{S}/\text{cm}$ ; aunque, por supuesto depende del tipo de geología.

Por otro lado, según Rodier et al., (2009) en su libro Análisis del agua, indica que, una conductividad del agua superior a  $1500\mu\text{S}/\text{cm}$  hace considerar un agua como difícilmente utilizable en zonas irrigadas. Para los usos industriales, la interpretación de los resultados debe hacerse en función de un análisis completo de agua. Es necesario tener presente, para el control de los vertidos industriales, que la conductividad solo refleja una mineralización global y no permite identificar los elementos químicos en cuestión, dicho parámetro indica a su vez, la presencia de sales ionizadas como cloruros o iones de sodio, carbonatos, entre otras, además, dicho parámetro permite relacionar e interpretar resultados con los sólidos disueltos en las descargas o cuerpos de agua.

- **Análisis de acuerdo con el contenido de Elementos Tóxicos**

Dentro de los elementos que contienen en solución las aguas de riego, existen algunos que independientemente de los efectos anteriores, son tóxicos para las plantas, aún en pequeñas cantidades (Pérez, 2011), siendo el Boro (B) y Cloruro ( $\text{Cl}^{-1}$ ) los iones tóxicos más comunes presentes en las aguas residuales, los cuales son absorbidos por las raíces y la absorción a través de las hojas produce una mayor acumulación de estos iones en las plantas. Una vez lo anterior, en la Tabla 62 y Tabla 63 se presentan a continuación los resultados del nivel tóxico según el contenido de Cloruros en los puntos sobre el cauce principal y los afluentes principales.

Tabla 62. Contenido de Cloruros – Río Tune y Afluentes principales – campaña 1

<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>RESULTADOS CLORUROS</b>	<b>VALOR PERMISIBLE Palacios y Aceves, 1970 (mEq/l)</b>	<b>CRITERIO</b>
C01	0,085		
A01	0,085		
C02	0,085		
A02	0,085		
C08	0,085	<4.0	<b>Inexistente</b>
A06	0,086		
C11	0,085		
C12	0,085		
A08	0,085		

Tabla 63. Contenido de Cloruros – Río Tune y Afluentes principales – campaña 2

<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>RESULTADOS CLORUROS</b>	<b>VALOR PERMISIBLE Palacios y Aceves, 1970 (mEq/l)</b>	<b>CRITERIO</b>
C01	0,085		
A01	0,085		
C02	0,085		
A02	0,085		
C08	0,085	<4.0	<b>Inexistente</b>
A06	0,846		
C11	0,085		
C12	0,085		
A08	0,085		

Los resultados citados anteriormente permiten identificar que el río Tune y sus principales afluentes no presentan ningún nivel tóxico por lo cual puede ser empleada para actividades agrícolas, Asimismo, se presentan los resultados obtenidos en el índice de Magnesio

(Img) en los puntos presentes sobre el Río Tune y sus principales afluentes (Tabla 64 y Tabla 65).

Tabla 64. Resultados del Img Río Tune y afluentes principales – campaña 1

SITIO DE MUESTREO	RESULTADOS Img	UNIDADES	VALOR PERMISIBLE Pizarro, 1978	CRITERIO
C01	33,675			
A01	36,848			
C02	36,010			
A02	43,263			
C08	38,430	%	<50	Apto para uso agrícola
A06	18,289			
C11	35,312			
C12	35,655			
A08	13,005			

Tabla 65. Resultados del Img Río Tune y afluentes principales – campaña 2

SITIO DE MUESTREO	RESULTADOS Img	UNIDADES	VALOR PERMISIBLE Pizarro, 1978	CRITERIO
C01	38,245			
A01	38,866			
C02	36,913			
A02	48,489			
C08	39,152	%	<50	Apto para uso agrícola
A06	21,487			
C11	36,341			
C12	36,312			
A08	13,424			

Teniendo en cuenta que el agua para riego se considera peligrosa cuando el índice del Magnesio es superior a 50, en la Tabla 64 y Tabla 65 se evidencia que el agua que discurre sobre las fuentes hídricas en estudio es considerada apta para uso agrícola en los dos monitoreos realizados, puesto que registró resultados por debajo de los 50, razón por la cual, no afecta en caso tal de ser empleada para uso agrícola.

- **Análisis de resultados fisicoquímicos para consumo humano y doméstico**

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) el agua de consumo humano segura, no ocasiona ningún riesgo significativo para la salud cuando se consume a lo largo de toda una vida, teniendo en cuenta las vulnerabilidades diferentes que se pueden presentar en distintas etapas de la vida (Organización Mundial de la Salud, 2011).

Es por tal razón que, el análisis se realizó teniendo en cuenta los lineamientos establecidos en la resolución N.º 2115 de 2007 la cual establece los instrumentos básicos para garantizar la calidad de agua para consumo humano, es así, como se presenta a continuación el análisis fisicoquímico y microbiológico para la Quebrada La Guagua (Afluente del Río Tune) como fuente abastecimiento de agua para consumo humano y doméstico del municipio de Palermo, teniendo en cuenta los resultados registrados en la Tabla 66 para las dos campañas de monitoreo en la estación A08 (Quebrada La Guagua antes de la bocatoma del Acueducto de Palermo) correspondiente a agua cruda.

Tabla 66. Evaluación normativa para uso doméstico y consumo humano – Qda. La Guagua con Resolución N.º 2115 de 2007

EVALUACIÓN NORMATIVA DE LA QUEBRADA LA GUAGUA (A04) RESOLUCIÓN N.º 2115 DE 2007					
PARÁMETRO	UNIDADES	CAMPAÑA 1	CAMPAÑA 2	VALOR MÁXIMO ACEPTABLE	CUMPLIMIENTO
Turbiedad	UNT	5,2	5,62	2	No Cumple

<b>EVALUACIÓN NORMATIVA DE LA QUEBRADA LA GUAGUA (A04) RESOLUCIÓN N.º 2115 DE 2007</b>					
<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>CAMPAÑA 1</b>	<b>CAMPAÑA 2</b>	<b>VALOR MÁXIMO ACEPTABLE</b>	<b>CUMPLIMIENTO</b>
<b>Conductividad</b>	µS/cm	210	190	1000	Cumple
<b>PH</b>	Unidades	7,79	7,59	6,5 – 9,0	Cumple
<b>Arsénico</b>	mg/L	<0,001	<0,001	0,01	Cumple
<b>Bario</b>	mg/L	0,004	0,027	0,7	Cumple
<b>Cadmio</b>	mg/L	<0,01	<0,01	0,003	No Cumple
<b>Cobre</b>	mg/L	<0,10	<0,10	1,0	Cumple
<b>Cromo total</b>	mg/L	<0,10	<0,10	0,05	No Cumple
<b>Mercurio</b>	mg/L	<0,001	<0,001	0,001	Cumple
<b>Níquel</b>	mg/L	0,207	<0,005	0,02	No Cumple
<b>Plomo</b>	mg/L	<0,10	<0,10	0,01	No Cumple
<b>Selenio</b>	mg/L	<0,005	<0,005	0,01	Cumple
<b>Hidrocarburos</b>	mg/L	<10,0	<10,0	0,01	No Cumple
<b>Nitritos</b>	mg/L	<0,005	0,005	0,1	Cumple
<b>Nitratos</b>	mg/L	<0,50	<0,50	10	Cumple
<b>Calcio</b>	mg/L	17,98	26,48	60	Cumple
<b>Alcalinidad Total</b>	mg/L	47,76	53,2	200	Cumple
<b>Cloruros</b>	mg/L	<3,0	<3,0	250	Cumple
<b>Dureza Total</b>	mg/L	76,95	88,94	300	Cumple
<b>Hierro Total</b>	mg/L	0,152	0,173	0,3	Cumple
<b>Magnesio</b>	mg/L	1,63	2,49	36	Cumple
<b>Manganeso</b>	mg/L	<0,05	<0,05	0,1	Cumple
<b>Sulfatos</b>	mg/L	17,93	38,05	250	Cumple
<b>Zinc</b>	mg/L	<0,05	<0,05	3	Cumple
<b>Fosfatos</b>	mg/L	<0,20	<0,20	0,5	Cumple
<b>Coliformes totales</b>	NMP/100 mL	63	540	0	No Cumple
<b>Escherichia coli</b>	NMP/100 mL	12	350	0	No Cumple

Según la evaluación normativa para uso doméstico y consumo humano del Río Tune y sus afluentes principales se llevó a cabo teniendo en cuenta los lineamientos emitidos en la Resolución N° 2115 de 2007 la cual establece los instrumentos básicos para garantizar la Calidad

de agua de las fuentes hídricas, por tanto, se evidencia que no se cumple con los valores aceptables para algunos parámetros como Turbiedad, Cadmio, Cromo Total, Níquel, Plomo, Hidrocarburos, Coliformes Totales y Escherichia coli.

Sin embargo, es de suma importancia aclarar que, las muestras de agua se realizaron directamente en la fuente de estudio, por tanto, corresponde a agua cruda y los valores aceptables según la resolución reglamenta el agua en condiciones de potabilidad para consumo humano y doméstico.

Adicionalmente, como soporte técnico a la calidad del agua de la fuente de abastecimiento del municipio de Palermo se revisó el Boletín de Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano del instituto Nacional de salud del año 2019, donde se presentan un Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano – IRCA con un valor de 11.3 correspondiente a un nivel de Riesgo Bajo (Instituto Nacional de Salud, 2020)

Finalmente, es importante mencionar que el Decreto N.º 1076 de 2015 en el artículo 2.2.3.3.9.3 establece los límites máximos permisibles para consumo humano y domestico con tratamiento convencional y en el artículo 2.2.3.3.9.4 los límites para consumo humano con solo desinfección.

- **Análisis por medio del ICA IDEAM**

Teniendo en cuenta la metodología mencionada anteriormente para la clasificación de la calidad del agua según los valores estimados por el ICA, en las tablas citadas a continuación se evidencian los valores resultantes del ICA para cada uno de los puntos definidos sobre el cauce principal, los afluentes principales y el vertimiento representativo.

### Índice de calidad del agua (ICA) IDEAM – Río Tune

Los valores del índice de calidad del agua (ICA) IDEAM sobre los puntos presentes en el cauce principal del Río Tune durante la primera y segunda campaña de monitoreo, se evidencian en la Tabla 67 y Tabla 68 citadas a continuación.

Tabla 67. Índice de calidad de agua (ICA IDEAM) Río Tune -"campaña 1"

PUNTOS DEL CAUCE PRINCIPAL- RÍO TUNE				
ICA IDEAM - PUNTO C01				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	93	% Sat.	0,930	16%
Coliformes Fecales	140	NMP/100mL	0,896	14%
pH	6,56	Unidades	0,8	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0,91	14%
SST	12,75	mg/L	0,982	14%
Conductividad	120	μS/cm	0,664	14%
NT/PT	9,29	mgN/mgP	0,35	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0,793	Acceptable
ICA IDEAM - PUNTO C02				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	97,3	% Sat.	0,973	16%
Coliformes Fecales	21	NMP/100mL	0,980	14%
pH	8,01	Unidades	1,0	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0,91	14%
SST	10	mg/L	0,990	14%
Conductividad	110	μS/cm	0,701	14%
NT/PT	17,86	mgN/mgP	0,80	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0,908	Buena
ICA IDEAM - PUNTO C08				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	91,91	% Sat.	0,919	16%
Coliformes Fecales	430	NMP/100mL	0,672	14%
pH	9,25	Unidades	0,5	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0,91	14%
SST	10	mg/L	0,990	14%
Conductividad	156	μS/cm	0,523	14%
NT/PT	25	mgN/mgP	0,15	14%
ICA NSF Puntaje total			0,675	Regular
ICA IDEAM - PUNTO C10				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación

PUNTOS DEL CAUCE PRINCIPAL- RÍO TUNE				
Oxígeno Disuelto	85,2	% Sat.	0,852	16%
Coliformes Fecales	540	NMP/100mL	0,603	14%
pH	7,46	Unidades	1,0	14%
DQO	187,96	mgO <sub>2</sub> /L	0,13	14%
SST	58,57	mg/L	0,844	14%
Conductividad	612,2	μS/cm	0,0	14%
NT/PT	9,31	mgN/mgP	0,35	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0,545	Regular
ICA IDEAM - PUNTO C11				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	90,87	% Sat.	0,909	16%
Coliformes Fecales	920	NMP/100mL	0,414	14%
pH	8,26	Unidades	0,9	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0,91	14%
SST	11,33	mg/L	0,986	14%
Conductividad	190	μS/cm	0,378	14%
NT/PT	22,83	mgN/mgP	0,15	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0,665	Regular
ICA IDEAM - PUNTO C12				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	85,3	% Sat.	0,853	16%
Coliformes Fecales	920	NMP/100mL	0,414	14%
pH	7,81	Unidades	1,0	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0,91	14%
SST	12,33	mg/L	0,983	14%
Conductividad	130	μS/cm	0,626	14%
NT/PT	19,01	mgN/mgP	0,80	14%
ICA NSF Puntaje total			0,799	Acceptable

Tabla 68. Índice de calidad de agua (ICA IDEAM) Río Tune "Campaña 2"

PUNTOS DEL CAUCE PRINCIPAL - RÍO TUNE				
ICA IDEAM - PUNTO C01				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	96.3	% Sat.	0.963	16%
Coliformes Fecales	540	NMP/100mL	0.603	14%
pH	8.79	Unidades	0.7	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0.91	14%
SST	12	mg/L	0.984	14%
Conductividad	97	μS/cm	0.747	14%
NT/PT	20.33	mgN/mgP	0.15	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0.722	Acceptable
ICA IDEAM - PUNTO C02				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	99.5	% Sat.	0.995	16%
Coliformes Fecales	430	NMP/100mL	0.672	14%
pH	9.09	Unidades	0.6	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0.91	14%
SST	10	mg/L	0.990	14%

PUNTOS DEL CAUCE PRINCIPAL - RÍO TUNE				
Conductividad	114.8	μS/cm	0.684	14%
NT/PT	25	mgN/mgP	0.15	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0.716	Aceptable
ICA IDEAM - PUNTO C08				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	60.2	% Sat.	0.602	16%
Coliformes Fecales	540	NMP/100mL	0.603	14%
pH	7.9	Unidades	1.0	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0.91	14%
SST	32.8	mg/L	0.922	14%
Conductividad	110	μS/cm	0.701	14%
NT/PT	25	mgN/mgP	0.15	14%
ICA NSF Puntaje total			0.696	Regular
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	33.98	% Sat.	0.340	16%
Coliformes Fecales	1600	NMP/100mL	0.100	14%
pH	7.05	Unidades	1.0	14%
DQO	177.6	mgO <sub>2</sub> /L	0.13	14%
SST	50	mg/L	0.870	14%
Conductividad	459.8	μS/cm	0.00	14%
NT/PT	12.78	mgN/mgP	0.60	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0.696	Mala
ICA IDEAM - PUNTO C11				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	63.4	% Sat.	0.634	16%
Coliformes Fecales	1600	NMP/100mL	0.100	14%
pH	7.61	Unidades	1.0	14%
DQO	12.85	mgO <sub>2</sub> /L	0.91	14%
SST	75.5	mg/L	0.794	14%
Conductividad	150	μS/cm	0.547	14%
NT/PT	25	mgN/mgP	0.15	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0.592	Regular
ICA IDEAM - PUNTO C12				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	100.3	% Sat.	0.997	16%
Coliformes Fecales	540	NMP/100mL	0.603	14%
pH	8.47	Unidades	0.8	14%
DQO	13.96	mgO <sub>2</sub> /L	0.91	14%
SST	80	mg/L	0.780	14%
Conductividad	127.6	μS/cm	0.635	14%
NT/PT	25	mgN/mgP	0.15	14%
ICA NSF Puntaje total			0.700	Aceptable

### Índice de calidad de agua (ICA) IDEAM – Afluentes

Los valores del índice de calidad del agua (ICA) IDEAM sobre los puntos presentes en los afluentes principales durante la primera y segunda campaña de monitoreo, se evidencian en la Tabla 69.

Tabla 69. Índice de calidad de agua (ICA IDEAM) – Afluentes "Campaña 1"

PUNTOS DE LOS AFLUENTES - RÍO TUNE				
ICA IDEAM - PUNTO A01				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	96,9	% Sat.	0,969	16%
Coliformes Fecales	48	NMP/100mL	0,980	14%
pH	7,88	Unidades	1,0	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0,91	14%
SST	20,33	mg/L	0,959	14%
Conductividad	90	μS/cm	0,772	14%
NT/PT	25	mgN/mgP	0,15	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0,823	Acceptable
ICA IDEAM - PUNTO A02				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	103,3	% Sat.	0,967	16%
Coliformes Fecales	26	NMP/100mL	0,980	14%
pH	8,21	Unidades	0,90	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0,91	14%
SST	46,09	mg/L	0,882	14%
Conductividad	120	μS/cm	0,664	14%
NT/PT	25	mgN/mgP	0,15	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0,782	Acceptable
ICA IDEAM - PUNTO A06				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	59,4	% Sat.	0,594	16%
Coliformes Fecales	540	NMP/100mL	0,603	14%
pH	7,56	Unidades	1,0	14%
DQO	19,11	mgO <sub>2</sub> /L	0,91	14%
SST	41	mg/L	0,897	14%
Conductividad	170	μS/cm	0,464	14%
NT/PT	9,43	mgN/mgP	0,35	14%
ICA NSF Puntaje total			0,686	Regular
ICA IDEAM - PUNTO A08				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	101,5	% Sat.	0,985	16%
Coliformes Fecales	21	NMP/100mL	0,980	14%
pH	7,79	Unidades	1,0	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0,91	14%
SST	10	mg/L	0,990	14%
Conductividad	210	μS/cm	0,289	14%
NT/PT	25,0	mgN/mgP	0,15	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0,762	Acceptable

Tabla 70. Índice de calidad de agua (ICA IDEAM) – Afluentes "Campaña 2"

PUNTOS DE LOS AFLUENTES - RÍO TUNE				
ICA IDEAM - PUNTO A01				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	98.9	% Sat.	0.989	16%
Coliformes Fecales	450	NMP/100mL	0.659	14%
pH	9.36	Unidades	0.5	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0.91	14%
SST	10	mg/L	0.990	14%
Conductividad	95.5	μS/cm	0.753	14%
NT/PT	25	mgN/mgP	0.15	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0.712	Acceptable
ICA IDEAM - PUNTO A02				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	100.3	% Sat.	0.997	16%
Coliformes Fecales	540	NMP/100mL	0.603	14%
pH	8.3	Unidades	0.9	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0.91	14%
SST	23	mg/L	0.951	14%
Conductividad	107.6	μS/cm	0.710	14%
NT/PT	25	mgN/mgP	0.15	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0.745	Acceptable
ICA IDEAM - PUNTO A06				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	85.4	% Sat.	0.854	16%
Coliformes Fecales	540	NMP/100mL	0.603	14%
pH	8.47	Unidades	0.8	14%
DQO	15.82	mgO <sub>2</sub> /L	0.91	14%
SST	48.5	mg/L	0.875	14%
Conductividad	200	μS/cm	0.334	14%
NT/PT	21.10	mgN/mgP	0.15	14%
ICA NSF Puntaje total			0.648	Regular
ICA IDEAM - PUNTO A08				
Parámetro	Resultados	Unidades	Q-Valor	ponderación
Oxígeno Disuelto	63.4	% Sat.	0.634	16%
Coliformes Fecales	430	NMP/100mL	0.672	14%
pH	7.61	Unidades	1.0	14%
DQO	10	mgO <sub>2</sub> /L	0.91	14%
SST	10	mg/L	0.990	14%
Conductividad	150	μS/cm	0.547	14%
NT/PT	25	mgN/mgP	0.15	14%
ICA IDEAM Puntaje total			0.699	Regular

Finalmente, en la Tabla 71 citada a continuación se evidencia el compilado de los resultados obtenidos en el índice de calidad de agua ICA propuesto por el IDEAM sobre el cauce principal del Río Tune, sus afluentes principales.

Tabla 71. Índice de calidad de agua (ICA IDEAM) Río Tune, principales afluentes "campaña 1 y 2"

ICA - METODOLOGÍA PROPUESTA POR EL IDEAM				
ESTACIONES	CAMPAÑA 1		CAMPAÑA 2	
	ICA IDEAM	CLASIFICACIÓN	ICA IDEAM	CLASIFICACIÓN
C01	0,793	Aceptable	0,722	Aceptable
A01	0,823	Aceptable	0,712	Aceptable
C02	0,908	Buena	0,716	Aceptable
A02	0,782	Aceptable	0,745	Aceptable
C08	0,675	Regular	0,696	Regular
A06	0,686	Regular	0,648	Regular
C10	0,545	Regular	0,432	Mala
C11	0,665	Regular	0,592	Regular
C12	0,799	Aceptable	0,700	Aceptable
A08	0,762	Aceptable	0,687	Regular
C03	0,758	Aceptable	0,686	Regular
C04	0,744	Aceptable	0,679	Regular
C05	0,686	Regular	0,652	Regular
C06	0,687	Regular	0,651	Regular
C07	0,679	Regular	0,651	Regular
C09	0,674	Regular	0,682	Regular
A03	0,756	Aceptable	0,686	Regular
A04	0,674	Regular	0,686	Regular
A05	0,814	Aceptable	0,597	Regular
A07	0,662	Regular	0,687	Regular

En el Índice de Calidad según la metodología del IDEAM (ver Tabla 71) sobre los puntos presentes en el cauce principal, los afluentes principales y los vertimientos presentes, se tiene que durante la primera campaña sobre los cuerpos de agua en estudio la contaminación osciló entre aceptable y regular en la mayoría de los puntos, exceptuando el C02 ubicado sobre el cauce principal en el puente veredal Tablón, los Pinos “Estadero las locas” cuya clasificación fue buena, por otro lado, los puntos C08, C11, C05, C06, C07 y C09 localizados sobre el cauce principal registraron una calidad Regular debido a que por dichos puntos discurren los

vertimientos del casco urbano de Palermo, entre ellos la PTAR Matadero y algunos descoles agrícolas, situación que se repite nuevamente en el punto A06 del afluente principal Quebrada la Guagua y el C10 de la PTAR Matadero, los demás puntos presentaron una calificación Aceptable.

Mientras que, en los segundos monitoreos los cuales fueron llevados a cabo en época de lluvia, se evidenció una disminución en la calidad del agua del punto C02 el cual se encuentra ubicado sobre el cauce principal del Río Tune debido a que la clasificación pasó de Buena a Aceptable con 0,716 por el aumento en la concentración de Coliformes fecales, dicha situación se evidenció en los puntos C03 y C04 siendo vertimientos de tipo agrícola, el punto A08 siendo esté un afluente principal de la Quebrada la Guagua antes de la bocatoma del acueducto de Palermo pasó de ser Aceptable a una calidad Regular y por último, el punto C10 pasó de ser calidad Regular a Mala con 0,432 ocasionando contaminación a la corriente en el momento de la descarga.

Es de mencionar que, según lo citado por Fernández-Rodríguez & Guardado-Lacaba, (2021), parte de los resultados obtenidos en los Índices de Calidad es consecuencia del desarrollo económico y social de los territorios, debido a que la calidad del agua recibe impactos negativos; siendo un ejemplo clave, el empleo de químicos para las actividades presentes en la agricultura, el mal uso de los suelos y el vertimiento de sustancias químicas contaminantes a ríos y arroyos. Actualmente, los cuerpos de agua superficiales, en su gran mayoría, presentan una alteración en su calidad misma por las descargas que reciben de las actividades domésticas e industriales, que influyen de alguna manera en la salud humana y en aspectos socioeconómicos de las poblaciones adyacentes.

A su vez, según Velázquez-Chávez et al., (2022), el agua pura cuenta con propiedades físicas como la temperatura, la turbidez y la conductividad eléctrica y propiedades químicas como el oxígeno disuelto, con demanda biológica y química de oxígeno (DBO y DQO, respectivamente) siendo parámetros que indican el tipo y la cantidad de contaminantes presentes. Algunos de estos factores incluso controlan la solubilidad de los metales pesados, como lo son el pH y el potencial redox; este último indica el contenido de metales y de carbono orgánico. Por otro lado, se resalta que la calidad del agua es controlada por los cambios en la geología local y de la región, las interacciones entre el agua y las rocas, así como su dilución por el efecto de las lluvias.

Finalmente, en el artículo denominado Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional de la universidad Nacional Autónoma de México (Velázquez-Chávez et al., 2022), mencionan que con base en el monitoreo de la DQO en 2,831 sitios a nivel nacional, tan solo el 20.7% presentó una calidad excelente ( $DQO \leq 10$ ); el 14.7% tuvo una buena calidad ( $10 < DQO \leq 20$ ); el 30.2% de estas cualidades fue categorizada con una calidad aceptable ( $20 < DQO \leq 40$ ), el 28.0% contaminada ( $40 < DQO \leq 200$ ) y el 6.4% muy contaminada ( $DQO > 200$ ) de acuerdo con el Índice de la Calidad del Agua (ICA) de la SEMARNAT (2019). Resulta alarmante que el más alto porcentaje confirme la presencia de contaminantes que provocan afecciones en la seguridad alimentaria, así como en la salud, pues enfermedades como el cólera, la diarrea, disentería y la hepatitis, están estrechamente relacionadas con la contaminación de este recurso.

### **Índice de contaminación ICO's**

En Colombia, adicional a los índices de calidad (ICA), se desarrollaron los índices de contaminación ICO los cuales presentan ventajas al ser más económicos por la utilización de un número menor de variables y al permitir determinar puntualmente el tipo de contaminación presentada (Ramírez et al., 1997).

### Índice de contaminación de materia Orgánica – ICOMO

Teniendo en cuenta la metodología mencionada en el apartado anterior, en la Tabla 72 y Tabla 73 citadas a continuación se evidencian los valores del índice de contaminación por Materia Orgánica – ICOMO para los puntos de monitoreo presentes sobre el cauce principal del Río Tune, afluentes principales y el vertimiento representativo.

Tabla 72. Índice de calidad de agua ICOMO "campana 1"

RESULTADOS CAMPAÑA 1				INDICE DE CONTAMINACIÓN POR MATERIA ORGÁNICA				
ID	DBO5 (mg O2/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	% Sat de OD	I DBO5	I Colif T	I %Sat	ICOMO	Descripción
C01	5	280	93	0.44	0.00	0.07	0,1698	Ninguna
A01	5	60	96,9	0.44	0.00	0.03	0,1568	Ninguna
C02	5	120	97,3	0.44	0.00	0.03	0,1554	Ninguna
A02	5	120	103,3	0.44	0.00	0.00	0,1464	Ninguna
C08	5	540	91,91	0.44	0.09	0.08	0,2034	Baja
A06	5,29	920	59,4	0.46	0.22	0.41	0,3607	Baja
C10	79,46	920	85,2	1.00	0.22	0.15	0,4559	Media
C11	5	1600	90,87	0.44	0.35	0.09	0,2950	Baja
C12	5	1600	85,3	0.44	0.35	0.15	0,3135	Baja
A08	5	63	101,5	0.44	0.00	0.00	0,1464	Ninguna
C03	5	200	93	0.44	0.00	0.07	0.199	Ninguna
C04	5	500	90,60	0.44	0.12	0.09	0.215	Baja
C05	5	1000	80,50	0.44	0.24	0.20	0.286	Baja
C06	5	600	91,91	0.44	0.12	0.08	0.288	Baja
C07	5	800	85,40	0.44	0.19	0.15	0.291	Baja
C09	5	580	93	0.44	0.11	0.07	0.234	Baja
A03	5	100	93,52	0.44	0.00	0.06	0.174	Ninguna
A04	5	120	97,60	0.44	0.00	0.02	0.175	Ninguna

RESULTADOS CAMPAÑA 1				INDICE DE CONTAMINACIÓN POR MATERIA ORGÁNICA				
ID	DBO5 (mg O2/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	% Sat de OD	I DBO5	I Colif T	I %Sat	ICOMO	Descripción
A05	5	120	93,20	0.44	0.00	0.07	0.175	Ninguna
A07	5	120	93	0.44	0.11	0.07	0.362	Baja

Tabla 73. Índice de calidad de agua ICOMO "campana 2"

RESULTADOS CAMPAÑA 2				INDICE DE CONTAMINACIÓN POR MATERIA ORGÁNICA				
ID	DBO5 (mg O2/L)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	% Sat de OD	I DBO5	I Colif T	I %Sat	ICOMO	Descripción
C01	5	920	96,3	0.44	0.22	0.04	0,2320	Baja
A01	5	540	98,9	0.44	0.09	0.01	0,1801	Ninguna
C02	5	540	99,5	0.44	0.09	0.01	0,1781	Ninguna
A02	5	920	100,3	0.44	0.22	0.00	0,2197	Baja
C08	5	920	60,2	0.44	0.22	0.40	0,3523	Baja
A06	5	920	85,4	0.44	0.22	0.15	0,2683	Baja
C10	113,8	1600	33,98	1.00	0.35	0.66	0,6715	Alta
C11	5	1600	63,4	0.44	0.35	0.37	0,3865	Baja
C12	5	920	100,3	0.44	0.22	0.00	0,2197	Baja
A08	5	540	63,4	0.44	0.09	0.37	0,2985	Baja
C03	5	920	97,5	0.44	0.22	0.03	0,268	Baja
C04	5	920	60,80	0.44	0.22	0.39	0,288	Baja
C05	5	1600	100,10	0.44	0.35	0.00	0,355	Baja
C06	5	920	64,5	0.44	0.22	0.36	0,359	Baja
C07	5	920	96,3	0.44	0.22	0.04	0,363	Baja
C09	5	1600	65,2	0.44	0.35	0.35	0,355	Baja
A03	5	920	96,3	0.44	0.22	0.04	0,222	Baja
A04	5	920	97,5	0.44	0.22	0.03	0,222	Baja
A05	5	920	63,4	0.44	0.22	0.37	0,222	Baja
A07	5	920	100,50	0.44	0.22	0.00	0,340	Baja

Asimismo, se registra en la Tabla 74 citada a continuación el compilado de la clasificación obtenida durante las dos campañas de monitoreo en cada uno de los puntos establecidos sobre el cauce principal, afluentes principales y el vertimiento representativo.

Tabla 74. Valores del índice de contaminación - ICOMO “Campaña 1 y 2”

INDICE DE CONTAMINACIÓN POR MATERIA ORGÁNICA - ICOMO				
ESTACIONES	CAMPAÑA 1		CAMPAÑA 2	
	ICOMO	CLASIFICACIÓN	ICOMO	CLASIFICACIÓN
C01	0,1698	Ninguna	0,2320	Baja
A01	0,1568	Ninguna	0,1801	Ninguna
C02	0,1554	Ninguna	0,1781	Ninguna
A02	0,1464	Ninguna	0,2197	Baja
C08	0,2034	Baja	0,3523	Baja
A06	0,3607	Baja	0,2683	Baja
C10	0,4559	Media	0,6715	Alta
C11	0,2950	Baja	0,3865	Baja
C12	0,3135	Baja	0,2197	Baja
A08	0,1464	Ninguna	0,2985	Baja
C03	0,199	Ninguna	0,268	Baja
C04	0,215	Baja	0,288	Baja
C05	0,286	Baja	0,355	Baja
C06	0,288	Baja	0,359	Baja
C07	0,291	Baja	0,363	Baja
C09	0,234	Baja	0,355	Baja
A03	0,174	Ninguna	0,222	Baja
A04	0,175	Ninguna	0,222	Baja
A05	0,175	Ninguna	0,222	Baja
A07	0,362	Baja	0,340	Baja

Según los resultados presentes en el Índice de Contaminación por Materia Orgánica ICOMO (ver Tabla 74), el cual tiene en cuenta los resultados obtenidos en los parámetros demanda biológica de oxígeno (DBO), coliformes totales y el porcentaje de saturación de oxígeno (mg/L O<sub>2</sub>) en cada uno de los sitios monitoreados, registró que durante los primeros monitoreos, el agua que discurre sobre el cauce principal del Río Tune, sus principales tributarios y los vertimientos identificados osciló entre Ninguna y Baja contaminación, excepto en el Vertimiento V01 correspondiente al Matadero del municipio cuya clasificación fue Media con 0,4559, los puntos C08, C11, C12, C04, C05, C06, C07 y C09 ubicados sobre el cauce principal del Río Tune desde aguas arriba de los vertimientos provenientes del casco urbano de Palermo hasta antes de la desembocadura con el Río Bache la clasificación fue Baja y por último, en el

A06 afluente Quebrada la Guagua antes de desembocar al Río Tune y el A07 siendo un vertimiento de tipo agrícola la clasificación nuevamente fue baja.

Por otro lado, durante la segunda campaña de monitoreo llevada a cabo sobre el cauce principal del Río Tune el punto C01 localizado antes de los usos directos sobre el cauce la contaminación del agua pasó de ninguna a Baja con un valor de 0,2320, situación que se evidenció nuevamente en el afluente A02 Quebrada el Nilo antes de desembocar al Río Tune y en el A08 Quebrada la Guagua antes de la bocatoma del acueducto de Palermo mientras que, en el vertimiento C10 Matadero la concentración de Coliformes Totales aumentó a 1600 NMP/100 mL, razón por la cual la clasificación según el ICOMO pasó de media a Alta con un valor de 0,6715.

Según lo plasmado por López Perales 2021, se tiene que, la presencia del Oxígeno Disuelto es fundamental para mantener una variedad de formas de vida biológica en el agua, los niveles de oxígeno disuelto encontrados, cercanos o superiores a 5 ppm, permitirían a los organismos que habitan en estos cuerpos de agua evaluados cubrir sus actividades metabólicas, por otro lado, los agentes contaminantes generados por actividades antrópicas deterioran la calidad del agua y pueden influir en la composición y estructura de las comunidades de macroinvertebrados.

Asimismo, los coliformes son un indicador de contaminación fecal en las aguas, ya que se encuentran exclusivamente en las heces de animales de sangre caliente, en algunos casos, la concentración más alta se presenta durante la época de transición de lluvia a seca, debido a la escorrentía producida por la lluvia, así como también, se pueden presentar correlaciones altas entre los coliformes, y grasas y aceites y los tensoactivos, probablemente relacionados al

metabolismo de los microorganismos, principalmente de la *Escherichia coli*, donde se crean enzimas llamadas lipasas, que son capaces de hidrolizar los triglicéridos en diglicéridos, monoglicéridos, ácidos grasos y glicero (Caho-Rodríguez & López-Barrera, 2017).

Finalmente, indica que las descargas de aguas residuales producto de actividades urbanas y pecuarias influyen de forma negativa en la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos, de allí que la riqueza de especies de macrofauna es altamente dependiente de la calidad del agua, en tanto que la presencia de macroinvertebrados suele estar influenciada por la saturación de oxígeno, mientras que algunos contaminantes influyen negativamente en las concentraciones de oxígeno, asimismo, dan soporte al uso de los macroinvertebrados como indicadores de eutrofización y contaminación por actividades antrópicas.

### Índice de contaminación por mineralización – ICOMI

Siguiendo la metodología mencionada anteriormente para el índice de contaminación por mineralización ICOMI, en la Tabla 75 y

Tabla 76 citadas a continuación se evidencian los resultados obtenidos en el índice para cada uno de los puntos de monitoreo definidos sobre el Río Tune y sus principales afluentes.

Tabla 75. Índice de Contaminación por Mineralización ICOMI "Campaña 1"

RESULTADOS CAMPAÑA 1				INDICE DE CONTAMINACIÓN POR MINERALIZACIÓN				
ID	Conductividad (µS/cm)	Dureza Total (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	Alcalinidad Total (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	I Conductividad	I Dureza	I Alcalinidad	ICOMI	Descripción
C01	120	54,51	48,88	0.336	0.04	0.00	0.124	Ninguna
A01	90	48,7	39,19	0.228	0.02	0.00	0.083	Ninguna
C02	110	48,7	48,98	0.299	0.02	0.00	0.107	Ninguna
A02	120	55,31	56,33	0.336	0.04	0.03	0.135	Ninguna

RESULTADOS CAMPAÑA 1				INDICE DE CONTAMINACIÓN POR MINERALIZACIÓN				
ID	Conductividad (µS/cm)	Dureza Total (mgCaCO3/L)	Alcalinidad Total (mgCaCO3/L)	I Conductividad	I Dureza	I Alcalinidad	ICOMI	Descripción
C08	156	50,7	56,13	0.477	0.03	0.03	0.178	Ninguna
A06	170	80,16	60,41	0.536	0.19	0.05	0.260	Baja
C11	190	67,74	57,56	0.622	0.09	0.04	0.251	Baja
C12	130	64,33	57,56	0.374	0.07	0.04	0.162	Ninguna
A08	210	76,95	47,76	0.711	0.16	0.00	0.291	Baja
C03	120	53,12	50,30	0.336	0.03	0.00	0.147	Ninguna
C04	110	48,90	45,30	0.299	0.02	0.00	0.163	Ninguna
C05	150	67,74	57,56	0.453	0.09	0.04	0.211	Baja
C06	190	68,30	57,56	0.622	0.10	0.04	0.213	Baja
C07	195	54,30	47,80	0.644	0.03	0.00	0.197	Ninguna
C09	120	55,20	48,20	0.336	0.04	0.00	0.178	Ninguna
A03	120	55,30	48,88	0.336	0.04	0.00	0.115	Ninguna
A04	135	65,33	48,70	0.393	0.08	0.00	0.115	Ninguna
A05	110	53,12	55,10	0.299	0.03	0.03	0.115	Ninguna
A07	190	68,20	57,56	0.622	0.10	0.04	0.260	Baja

Tabla 76. Índice de Contaminación por Mineralización ICOMI "Campaña 2"

RESULTADOS CAMPAÑA 1				INDICE DE CONTAMINACIÓN POR MINERALIZACIÓN				
ID	Conductividad (µS/cm)	Dureza Total (mgCaCO3/L)	Alcalinidad Total (mgCaCO3/L)	I Conductividad	I Dureza	I Alcalinidad	ICOMI	Descripción
C01	97	31,58	45,69	0.253	0.00	0.00	0,085	Ninguna
A01	95,5	33,78	39,39	0.247	0.00	0.00	0,084	Ninguna
C02	114,8	42,97	50,56	0.316	0.01	0.00	0,111	Ninguna
A02	107,6	41,77	46,1	0.290	0.01	0.00	0,100	Ninguna
C08	110	41,17	44,07	0.299	0.01	0.00	0,103	Ninguna
A06	200	62,76	56,25	0.666	0.07	0.03	0,254	Baja
C11	150	43,57	46,5	0.453	0.01	0.00	0,155	Ninguna
C12	127,6	43,57	46,5	0.365	0.01	0.00	0,126	Ninguna
A08	150	88,94	53,2	0.453	0.31	0.02	0,258	Baja
C03	97	32,5	45,70	0.253	0.00	0.00	0.124	Ninguna
C04	120,5	40,20	50,80	0.338	0.01	0.00	0.133	Ninguna
C05	110	43,27	45,9	0.299	0.01	0.00	0.162	Ninguna

RESULTADOS CAMPAÑA 1				INDICE DE CONTAMINACIÓN POR MINERALIZACIÓN				
ID	Conductividad (µS/cm)	Dureza Total (mgCaCO3/L)	Alcalinidad Total (mgCaCO3/L)	I Conductividad	I Dureza	I Alcalinidad	ICOMI	Descripción
C06	115,8	43,57	44,08	0.320	0.01	0.00	0.163	Ninguna
C07	110	42,97	35,8	0.299	0.01	0.00	0.155	Ninguna
C09	97,5	31,5	44,09	0.254	0.00	0.00	0.110	Ninguna
A03	120,8	40,8	39,39	0.339	0.01	0.00	0.109	Ninguna
A04	110	60,9	42,69	0.299	0.06	0.00	0.110	Ninguna
A05	95,20	43,57	46,12	0.246	0.01	0.00	0.110	Ninguna
A07	150	90,5	58,30	0.453	0.33	0.04	0.241	Baja

A su vez, en la Tabla 77 citada a continuación, se registra el compilado de la clasificación obtenida en el índice de contaminación por Mineralización ICOMI en cada uno de los puntos de monitoreo sobre el cauce principal y los afluentes principales.

Tabla 77. Valores del índice de contaminación - ICOMI “Campaña 1 y 2”

ESTACIONES	ICOMI			
	CAMPAÑA 1		CAMPAÑA 2	
	ICOMI	CLASIFICACIÓN	ICOMI	CLASIFICACIÓN
C01	0,124	Ninguna	0,085	Ninguna
A01	0,083	Ninguna	0,084	Ninguna
C02	0,107	Ninguna	0,111	Ninguna
A02	0,135	Ninguna	0,100	Ninguna
C08	0,178	Ninguna	0,103	Ninguna
A06	0,260	Baja	0,254	Baja
C11	0,251	Baja	0,155	Ninguna
C12	0,162	Ninguna	0,126	Ninguna
A08	0,291	Baja	0,258	Baja
C03	0,147	Ninguna	0,124	Ninguna
C04	0,163	Ninguna	0,133	Ninguna
C05	0,211	Baja	0,162	Ninguna
C06	0,213	Baja	0,163	Ninguna
C07	0,197	Ninguna	0,155	Ninguna
C09	0,178	Ninguna	0,110	Ninguna
A03	0,115	Ninguna	0,109	Ninguna
A04	0,115	Ninguna	0,110	Ninguna
A05	0,115	Ninguna	0,110	Ninguna
A07	0,260	Baja	0,241	Baja

Teniendo en cuenta los resultados evidenciados en la Tabla 77 citada anteriormente, se tiene que en cuanto al índice de contaminación por Mineralización - ICOMI durante la primera campaña desarrollada en época de verano los resultados oscilaron entre Ninguna y Baja contaminación, por lo tanto, en el punto C11 ubicado sobre el Río Tune aguas abajo de los vertimientos del casco urbano de Palermo se obtuvo una clasificación Baja con 0,251, asimismo, en el C05 y C06 siendo vertimientos de tipo agrícolas con 0.211 y 0.213 respectivamente, mientras que, en los puntos localizados sobre uno de los afluentes principales como el A06 localizado sobre la Quebrada la Guagua antes de desembocar al Río Tune y el A08 nuevamente sobre la Quebrada la Guagua antes de la bocatoma del acueducto de Palermo la clasificación fue Baja.

Mientras que, en la segunda campaña los resultados obtenidos sobre el cauce principal del Río Tune mejoraron la calidad del agua debido a que, en todos los puntos de estudio la contaminación fue Ninguna al tener valores que oscilaron entre 0,085 y 0,155, mientras que la calidad del agua de los puntos sobre los afluentes principales fueron los mismos de la campaña anterior, siendo los puntos A06, A08 y A07 los de baja contaminación según el índice de contaminación por mineralización. Los valores no fueron significativos para hablar de contaminación mineral, debido a que la mayoría de los puntos se encontraron por debajo de 0,2 adicionalmente, se vieron influenciados por la conductividad eléctrica ya que la dureza y la alcalinidad fueron muy bajas, teniendo en cuenta que la Dureza del agua corresponde a la suma de las concentraciones de cationes metálicos a excepción de la de los metales alcalinos y del ion hidrógeno. En la mayoría de los casos la dureza se debe principalmente a los iones calcio y magnesio a los que se añaden algunas veces los iones hierro, aluminio, manganeso y estroncio, según lo plasmado en el libro análisis de agua por Rodier et al., (2009).

La conductividad aumenta en las épocas de menores precipitaciones (transición de seca a lluviosa y seca). Registrando los mayores valores de conductividad en la temporada seca, debido a la fuerte influencia del fenómeno de El Niño, que causa un aumento de temperatura y bajas precipitaciones, promoviendo la mineralización de las sales presentes en el agua, adicionalmente, se puede presentar una correlación moderada entre conductividad y la concentración de sólidos disueltos, sustentada en que la relación entre los dos parámetros es directamente proporcional (Caho-Rodríguez & López-Barrera, 2017).

Finalmente, teniendo en cuenta que los resultados de dicho índice fueron influenciados por las concentraciones del parámetro conductividad eléctrica, Quinteros Carabalí et al., (2019), en su artículo denominado “evaluación de la calidad de agua para riego y aprovechamiento del recurso hídrico de la quebrada Togllahuayco” menciona que, en España, uno de los sistemas más utilizados son los basados en la medida de la conductividad eléctrica del agua para determinar el riesgo de salinización del suelo y en el cálculo de la relación de adsorción de sodio (RAS) para determinar el riesgo de sodificación o alcalinización, pues la conductividad eléctrica es una variable fácilmente medible en laboratorio o con equipos de campo, y con el resultado de esta investigación, al medir esta variable, se puede deducir el comportamiento de la aptitud del agua para riego y la peligrosidad salina y sódica; en el caso de que se tenga valores muy altos de CE se recomienda realizar un muestreo y los análisis de cationes y aniones para determinar la fuente de ese incremento y poder solucionar de manera técnica.

### **Índice de contaminación por Sólidos Suspendidos – ICOSUS**

Siguiendo la metodología para establecer el índice de contaminación por Sólidos Suspendidos – ICOSUS, se presentan a continuación en la Tabla 78 y

Tabla 79 los datos obtenidos sobre los puntos presentes en el cauce principal del Río Tune, afluentes principales y vertimiento representativo durante las dos campañas de monitoreo desarrolladas.

Tabla 78. Índice de Contaminación por Sólidos suspendidos - ICOSUS “Campaña 1”

ID	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	I SST	ICOSUS Puntaje total	Descripción de la contaminación
C01	12,75	0,02	0,02	Ninguna
A01	20,33	0,04	0,04	Ninguna
C02	10	0,00	0,00	Ninguna
A02	46,09	0,12	0,12	Ninguna
C08	10	0,00	0,00	Ninguna
A06	41	0,10	0,10	Ninguna
C10	58,57	0,16	0,16	Ninguna
C11	11,33	0,01	0,01	Ninguna
C12	12,33	0,02	0,02	Ninguna
A08	10	0,00	0,00	Ninguna
C03	10	0,080	0,080	Ninguna
C04	10	0,072	0,072	Ninguna
C05	12,20	0,055	0,055	Ninguna
C06	11,26	0,056	0,056	Ninguna
C07	12,05	0,051	0,051	Ninguna
C09	40,10	0,015	0,015	Ninguna
A03	42,15	0,054	0,054	Ninguna
A04	30,25	0,052	0,052	Ninguna
A05	20,15	0,052	0,052	Ninguna
A07	10	0,097	0,097	Ninguna

Tabla 79. Índice de Contaminación por Sólidos suspendidos - ICOSUS “Campaña 2”

ID	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	I SST	ICOSUS Puntaje total	Descripción de la contaminación
C01	12	0,02	0,02	Ninguna
A01	10	0,00	0,00	Ninguna
C02	10	0,00	0,00	Ninguna
A02	23	0,05	0,05	Ninguna
C08	32,8	0,08	0,08	Ninguna
A06	48,5	0,13	0,13	Ninguna
C10	50	0,13	0,13	Ninguna
C11	75,5	0,21	0,21	Baja
C12	80	0,22	0,22	Baja
A08	10	0,00	0,00	Ninguna
C03	40,30	0,069	0,069	Ninguna
C04	20,45	0,00	0,00	Ninguna

ID	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	I SST	ICOSUS Puntaje total	Descripción de la contaminación
C05	30,04	0.114	0.114	Ninguna
C06	30,50	0.113	0.113	Ninguna
C07	20,10	0.115	0.115	Ninguna
C09	10	0.084	0.084	Ninguna
A03	15	0.069	0.069	Ninguna
A04	30,60	0,00	0,00	Ninguna
A05	40,20	0.114	0.114	Ninguna
A07	30,50	0.113	0.113	Ninguna

Asimismo, en la Tabla 80 citada a continuación, se registra el compilado de la clasificación obtenida por el Índice de Contaminación por Sólidos suspendidos totales ICOSUS en cada uno de los puntos de monitoreo sobre el Río Tune, sus principales tributarios y el vertimiento representativo.

Tabla 80. Valores del índice de contaminación - ICOSUS “Campaña 1 y 2”

ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR SÓLIDOS SUSPENDIDOS - ICOSUS				
ESTACIONES	CAMPAÑA 1		CAMPAÑA 2	
	ICOSUS	CLASIFICACIÓN	ICOSUS	CLASIFICACIÓN
C01	0,02	Ninguna	0,02	Ninguna
A01	0,04	Ninguna	0,00	Ninguna
C02	0,00	Ninguna	0,00	Ninguna
A02	0,12	Ninguna	0,05	Ninguna
C08	0,00	Ninguna	0,08	Ninguna
A06	0,10	Ninguna	0,13	Ninguna
C10	0,16	Ninguna	0,13	Ninguna
C11	0,01	Ninguna	0,21	Baja
C12	0,02	Ninguna	0,22	Baja
A08	0,00	Ninguna	0,00	Ninguna
C03	0.080	Ninguna	0.069	Ninguna
C04	0.072	Ninguna	0	Ninguna
C05	0.055	Ninguna	0.114	Ninguna
C06	0.056	Ninguna	0.113	Ninguna
C07	0.051	Ninguna	0.115	Ninguna
C09	0.015	Ninguna	0.084	Ninguna
A03	0.054	Ninguna	0.069	Ninguna
A04	0.052	Ninguna	0	Ninguna
A05	0.052	Ninguna	0.114	Ninguna
A07	0.097	Ninguna	0.113	Ninguna

Según el índice de contaminación por Sólidos suspendidos ICOSUS el agua que discurre sobre el cauce principal, los principales tributarios y los vertimientos identificados durante la primera campaña realizada en época de sequía en el mes de enero, no presentaron contaminación ocasionada por los Sólidos Suspendidos Totales - SST.

Por otro lado, durante la segunda campaña realizada en época de lluvia en el mes de abril, los resultados obtenidos en los puntos C11 sobre el Río Tune Aguas abajo de los vertimientos del casco urbano de Palermo y el C12 antes de su desembocadura al Río Bache pasaron de ninguna contaminación a Baja contaminación debido al incremento de los SST por las lluvias que se registraron días antes de dar cumplimiento a los monitoreos.

Finalmente, los Sólidos Suspendidos Totales se deben principalmente a causa de procesos erosivos y reducción en los niveles de agua que aumenta la cantidad de minerales en la misma, es por esto que, en las temporadas de transición de seca a lluviosa, y seca se observan los valores más altos de este parámetro (Caho-Rodríguez & López-Barrera, 2017).

### Índice de contaminación por pH – ICOpH

En la Tabla 81 y

Tabla 82 citadas a continuación se reportan los valores obtenidos en el índice de contaminación por pH para cada uno de los puntos de monitoreo del Río Tune, sus principales tributarios y el vertimiento representativo.

Tabla 81. Índice de contaminación por pH ICOpH “Campaña 1”

ID	PH (Unidades de Ph)	I pH	ICOpH Puntaje total	Descripción de la contaminación
C01	6,56	0,00021	0,00021	Ninguna
A01	7,88	0,01996	0,01996	Ninguna
C02	8,01	0,03090	0,03090	Ninguna

ID	PH (Unidades de Ph)	I pH	ICOpH Puntaje total	Descripción de la contaminación
A02	8,21	0,05978	0,05978	Ninguna
C08	9,25	0,69688	0,69688	Alta
A06	7,56	0,00671	0,00671	Ninguna
C10	7,46	0,00476	0,00476	Ninguna
C11	8,26	0,07024	0,07024	Ninguna
C12	7,81	0,01574	0,01574	Ninguna
A08	7,79	0,01471	0,01471	Ninguna
C03	7,05	0,06555	0,06555	Ninguna
C04	7,25	0,08888	0,08888	Ninguna
C05	9,20	0,42555	0,42555	Media
C06	8,70	0,37444	0,37444	Baja
C07	9,07	0,59666	0,59666	Media
C09	9,35	0,69777	0,69777	Alta
A03	7,20	0,03999	0,03999	Ninguna
A04	8,10	0,03999	0,03999	Ninguna
A05	7,60	0,03999	0,03999	Ninguna
A07	8,30	0,00777	0,00777	Ninguna

Tabla 82. Índice de contaminación por pH ICOpH “Campaña 2”

ID	PH (Unidades de Ph)	I pH	ICOpH Puntaje total	Descripción de la contaminación
C01	8,79	0,31984	0,31984	Baja
A01	9,36	0,77065	0,77065	Alta
C02	9,09	0,56967	0,56967	Media
A02	8,3	0,07980	0,07980	Ninguna
C08	7,9	0,02135	0,02135	Ninguna
A06	8,47	0,13488	0,13488	Ninguna
C10	7,05	0,00116	0,00116	Ninguna
C11	7,61	0,00796	0,00796	Ninguna
C12	8,47	0,13488	0,13488	Ninguna
A08	7,61	0,00796	0,00796	Ninguna
C03	8,45	0,13577	0,13577	Ninguna
C04	7,51	0,14555	0,14555	Ninguna
C05	7,40	0,13444	0,13444	Ninguna
C06	8,20	0,07222	0,07222	Ninguna
C07	7,08	0,07222	0,07222	Ninguna
C09	8,25	0,06222	0,06222	Ninguna
A03	8,80	0,38777	0,38777	Baja
A04	8,83	0,39111	0,39111	Baja
A05	8,50	0,39000	0,39000	Baja
A07	7,62	0,10333	0,10333	Ninguna

A su vez, en la Tabla 83 se reporta el compilado de la clasificación obtenida por el Índice de Contaminación por pH en cada uno de los puntos de monitoreo sobre el Río Tune, sus principales tributarios y el vertimiento representativo durante las dos campañas de monitoreo realizadas.

Tabla 83. Valores del índice de contaminación ICOpH “Campaña 1 y 2”

ESTACIONES	ICOpH			
	CAMPAÑA 1		CAMPAÑA 2	
	ICOpH	CLASIFICACIÓN	ICOpH	CLASIFICACIÓN
C01	0,00021	Ninguna	0,31984	Baja
A01	0,01996	Ninguna	0,77065	Alta
C02	0,03090	Ninguna	0,56967	Media
A02	0,05978	Ninguna	0,07980	Ninguna
C08	0,69688	Alta	0,02135	Ninguna
A06	0,00671	Ninguna	0,13488	Ninguna
C10	0,00476	Ninguna	0,00116	Ninguna
C11	0,07024	Ninguna	0,00796	Ninguna
C12	0,01574	Ninguna	0,13488	Ninguna
A08	0,01471	Ninguna	0,00796	Ninguna
C03	0.06555	Ninguna	0.14555	Ninguna
C04	0.08888	Ninguna	0.13444	Ninguna
C05	0.42555	Media	0.07222	Ninguna
C06	0.37444	Baja	0.07222	Ninguna
C07	0.59666	Media	0.06222	Ninguna
C09	0.69777	Alta	0.02777	Ninguna
A03	0.03999	Ninguna	0.38777	Baja
A04	0.03999	Ninguna	0.39111	Baja
A05	0.03999	Ninguna	0.39000	Baja
A07	0.00777	Ninguna	0.10333	Ninguna

Según los resultados obtenido en el índice de contaminación ICOpH (ver Tabla 83) se tiene que, la calidad del agua que discurre sobre el área de estudio durante el primer monitoreo en la mayoría de los puntos se obtuvo una contaminación Nula, excepto el punto C08 siendo sobre el Río Tune aguas arriba de los vertimientos del casco urbano de Palermo y el punto C09 siendo un vertimiento de la PTAR, los cuales arrojaron una contaminación alta por pH, los

puntos C05 y C07 siendo vertimientos agrícolas, una contaminación media y el punto C06 una contaminación Baja.

Mientras que, en el segundo monitoreo desarrollado en el mes de abril la situación desmejoró con respecto a la primera campaña puesto que, los puntos ubicados sobre el Río Tune como es el caso del C01 antes de los usos directos sobre el cauce pasó de ninguna contaminación a una Baja contaminación y el C02 en el puente veredal Tablón, Los Pinos "Estadero las Locas" la contaminación por pH pasó de Nula a media con un ICOpH de 0,56967, sin embargo, los puntos C05, C06, C07 y C09 pasaron de calidad media, baja y alta a ninguna contaminación. Por otro lado, en el punto A01 localizado sobre el afluente Quebrada San Juan antes de desembocar al Río Tune la calidad pasó a ser Alta con un ICOpH de 0,77065 indicando contaminación por pH. Es de mencionar que, estos cambios son atribuidos a situaciones propias del día del monitoreo como posibles aportes de vertimientos de descoles agrícolas que aumentaron el Ph por encima de 9 unidades en estas estaciones.

El pH en buenas condiciones está asociado a la proliferación y desarrollo de vida acuática, ya que se prefieren rangos de pH entre 6.5 a 8.0, fuera de este rango se reduce a la diversidad por estrés fisiológico y la reproducción (Moreno & Grey, 2021), por otro lado, las descargas residuales directas en los ríos representan una causa importante de contaminación, los ríos son sistemas abiertos y sus aguas circulan a fin de que los organismos que dependen de él tengan cierto equilibrio. Varios indicadores constituyen una medida de la calidad del agua en un río. Estas medidas incluyen el oxígeno disuelto, la temperatura y el pH, siendo este un indicador de la concentración de iones de hidrógeno y a su vez, conocido como un indicador de calidad de agua (García et al., 2019).

**Índice BMWP/Col**

Una vez mencionada la metodología empleada para establecer el índice BMWP/Col en el apartado anterior, en la Tabla 84 se registran los resultados obtenidos durante la primera y segunda campaña en los puntos de monitoreo ubicados sobre el Río Tune y sus principales afluentes, además, es importante mencionar que las estaciones C04 (Río Tune aguas debajo de los vertimientos del casco urbano de Palermo), C05 (Río Tune antes de desembocar al Río Bache) y A03 (Quebrada la Guagua antes de desembocar al Río Tune) no registraron individuos durante el primer monitoreo.

Tabla 84. Resultados del índice BMWP registrado en el Río Tune y sus principales afluentes en la campaña 1 y 2

Campaña	Estaciones	Índice BMWP/Col				
		Valor	Clase	Calidad	Significado	Color
1	C01	50	III	Dudoso	Aguas moderadamente contaminadas	Yellow
	A01	19	IV	Crítica	Aguas muy contaminadas	Orange
	C02			N/D		
	A02	20	IV	Crítica	Aguas muy contaminadas	Orange
	C08	49	III	Dudoso	Aguas moderadamente contaminadas	Yellow
	A06			N/D		Yellow
	C11			N/D		
	C12			N/D		
	A08	78	II	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas	Green
2	C01	36	III	Dudoso	Aguas moderadamente contaminadas	Yellow
	A01	61	II	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas	Green
	C02	34	IV	Crítica	Aguas muy contaminadas	Orange
	A02	21	IV	Crítica	Aguas muy contaminadas	Orange
	C08	54	III	Dudoso	Aguas moderadamente contaminadas	Yellow
	A06	38	III	Dudoso	Aguas moderadamente contaminadas	Yellow
	C11	50	III	Dudoso	Aguas moderadamente contaminadas	Yellow
	C12	48	III	Dudoso	Aguas moderadamente contaminadas	Yellow
	A08	37	III	Dudoso	Aguas moderadamente contaminadas	Yellow

Nota: Las estaciones C02, C11, C12 y A06 no registraron individuos durante el primer monitoreo (N/D).

Teniendo en cuenta los resultados registrados en la Tabla 84 citada anteriormente, se evidencia que la calidad del agua que discurre sobre el cauce principal del Río Tune y sus afluentes principales según el índice BMWP/Col oscilan entre aguas ligeramente contaminadas a aguas muy contaminadas, sin embargo, la mayoría de los sitios fueron clasificados como “aguas moderadamente contaminadas” y desde este punto de vista la calidad del agua está comprometida desde un nivel moderado a crítico, finalmente, es importante mencionar que las estaciones C02 (Río Tune puente veredal Tablón, los pinos " Estadero las locas"), C11 (Río Tune aguas debajo de los vertimientos del casco urbano de Palermo), C12 (Río Tune antes de desembocar al Río Bache) y A06 (Quebrada la Guagua antes de desembocar al Río Tune) no registraron individuos durante el primer monitoreo.

### Índice Promedio Ponderado Hidrobiológico – IPPH

Siguiendo la metodología mencionada en el apartado anterior para establecer el índice Promedio Ponderado Hidrobiológico – IPPH, en la Tabla 85 citada a continuación se presentan los resultados obtenidos durante las dos campañas de monitoreo desarrolladas sobre el cauce principal y los afluentes principales.

Tabla 85. Resultados del Índice Promedio Ponderado Hidrobiológico (IPPH) campaña 1 y campaña 2

Estación	IPPH – C1	IPPH – C2
C01	2.99	3.61
A01	4.01	4.06
C02	1.10	3.70
A02	4.23	2.81
C08	4.68	3.31
A06	7.80	5.70
C11	6.04	4.71

C12	4.22	4.60
A08	5.76	4.65

Según los resultados obtenidos durante la primera y segunda campaña de monitoreo (ver Tabla 85) ejecutada sobre los puntos presentes en el cauce principal y los afluentes principales del Río Tune en el municipio de Palermo citadas en las tablas presentes anteriormente, se tiene que, las estaciones presentaron aguas entre moderadamente contaminadas y aguas limpias, a excepción de las estaciones C02 y A02 en el primer y segundo muestreo respectivamente, las cuales presentaron una condición de aguas muy contaminadas.

La ponderación de cada índice es requerida para darle un valor de importancia de acuerdo con las respuestas entre los factores bióticos y abióticos, esto se debe a que los organismos de cada una de las comunidades presentan respuestas distintas a las variables fisicoquímicas, de esta manera, se da más peso a los valores que mejor respuesta presenten a la calidad, pretende darle una ponderación a cada índice de acuerdo con el ajuste en una regresión lineal entre el índice fisicoquímico (ICA) y cada índice hidrobiológico (Cornare, 2021).

**Fase IV:** Identificar los sectores que generan mayor deterioro de la calidad del agua del Río Tune.

- **Actividad 1. Realizar un análisis estadístico espacial para determinar la correlación entre los índices de calidad y el uso actual del suelo**

**Estandarización de los datos:** Evaluados los supuestos de normalidad de los datos de los índices de calidad de agua del Río Tune, mediante la prueba de Normalidad de Shapiro

Wilks, con un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 0.05; se obtuvieron los siguientes resultados para cada uno de los parámetros.

Tabla 86. Resultados de Prueba de Shapiro Wilks

Variable	Estadístico	p_value
ICA_C1	0.94	0.279
ICOMI_C1	0.95	0.326
ICOMO_C1	0.89	0.028
ICOSUS_C1	0.93	0.132
ICOpH_C1	0.67	0.000
ICA_C2	0.76	0.000
ICOMI_C2	0.82	0.002
ICOMO_C2	0.80	0.001
ICOSUS_C2	0.93	0.148
ICOpH_C2	0.81	0.001
BMWP_C1	0.86	0.010
BMWP_C2	0.98	0.928
IPPH_C1	0.97	0.687
IPPH_C2	0.93	0.149

Teniendo en cuenta que se establece que:

*Si  $p\text{-valor} > \alpha$ : No se rechaza la hipótesis nula.*

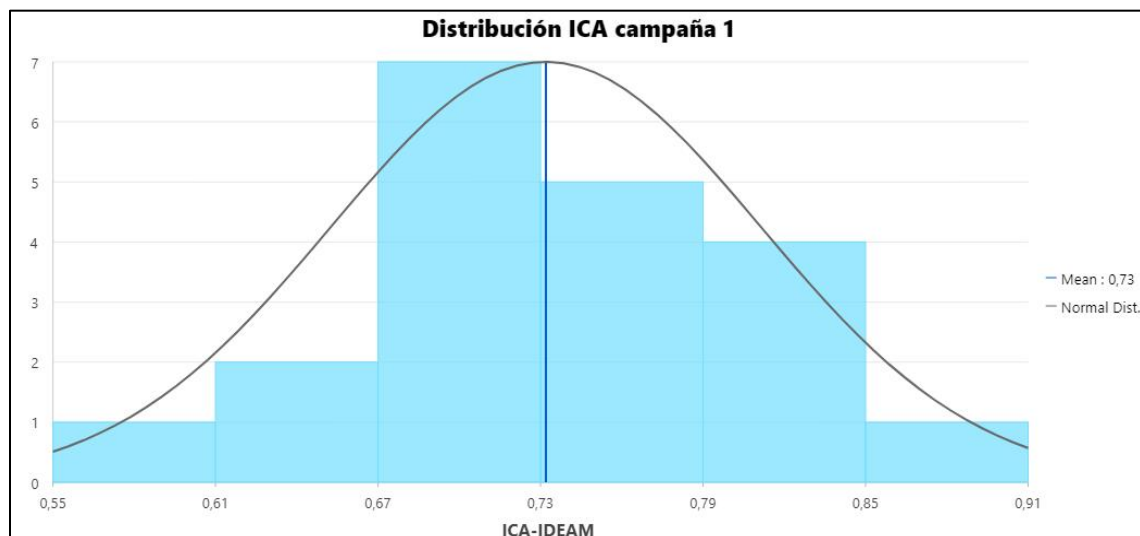
*Si  $p\text{-valor} \leq \alpha$ : Se rechaza la hipótesis nula.*

Entonces, observamos que los únicos parámetros que presentan una distribución normal según la prueba de Shapiro Wilks son el BMWP realizado en la campaña 2 y el IPPH de la campaña 1. Para validar la distribución de los datos y ajustar los parámetros a una distribución

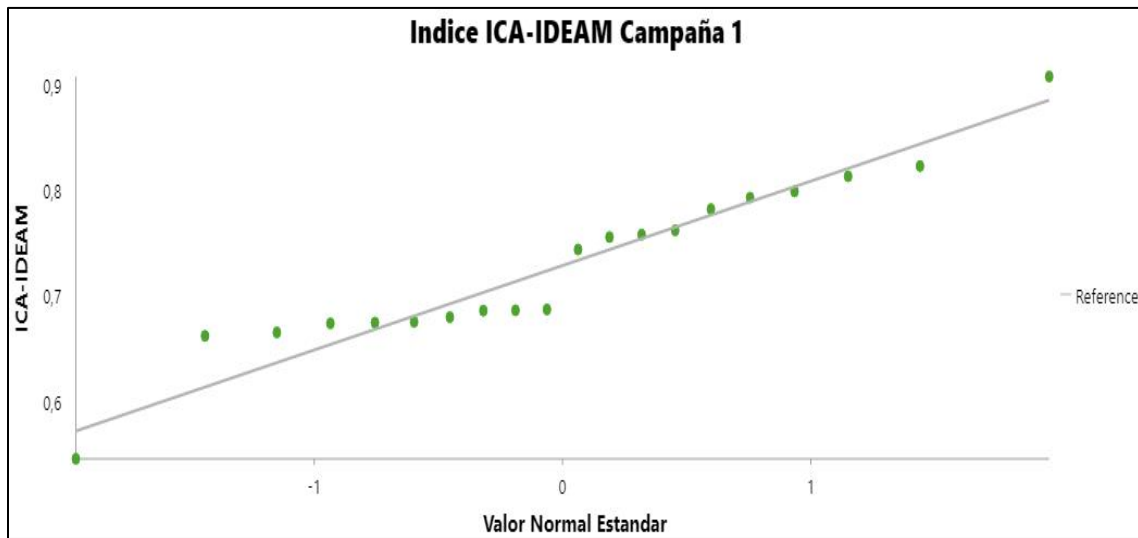
normal se aplicó métodos visuales como Histograma y gráficos Q.-Q plot, teniendo los siguientes resultados.

- **Parámetro ICA-IDEAM**

Para evaluar la normalidad de los datos del índice de calidad de agua ICA, se realizó un Histograma, en el cual se aplicó a los datos de ICA de la primera campaña de monitoreo una transformación Box-Cox con un valor de lambda de 0.8 para ajustar los valores a una distribución normal. En la Gráfica 3, se evidencia el comportamiento de los datos una vez aplicada la transformación, presentan una media de 0.73. Por otro lado, en la Gráfica 4, se visualiza la distribución de los datos en el gráfico QQPlot, el conjunto de datos presenta una distribución cerca a la Normal, ya que a pesar de la transformación presenta algunos valores que no se ajustan completamente, pero que se encuentra dentro de los rangos normales, por lo cual no se consideran valores atípicos.

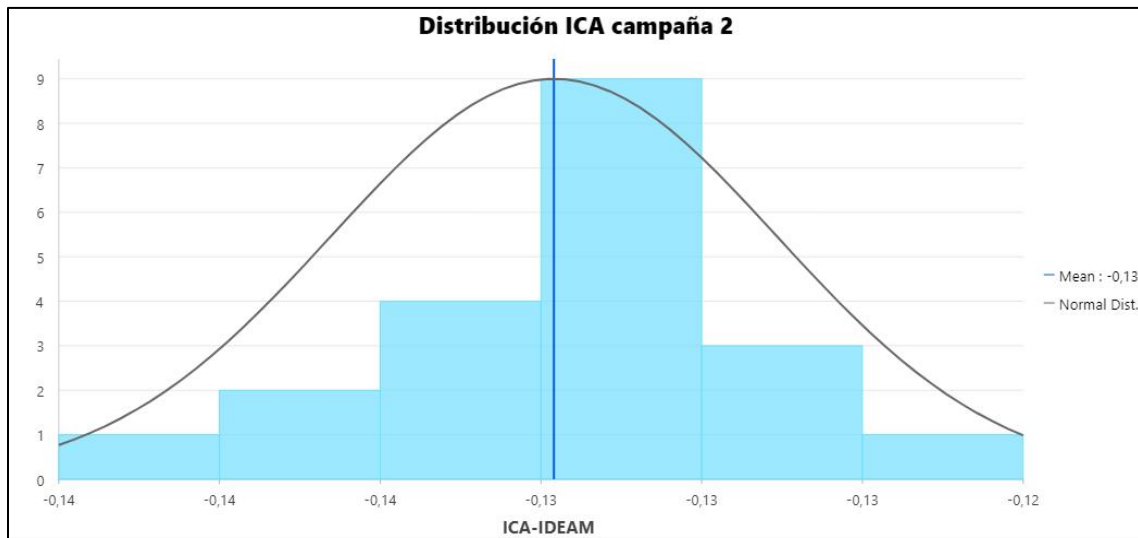


Gráfica 3. Histograma Parámetro ICA-IDEAM campaña 1 de monitoreo.

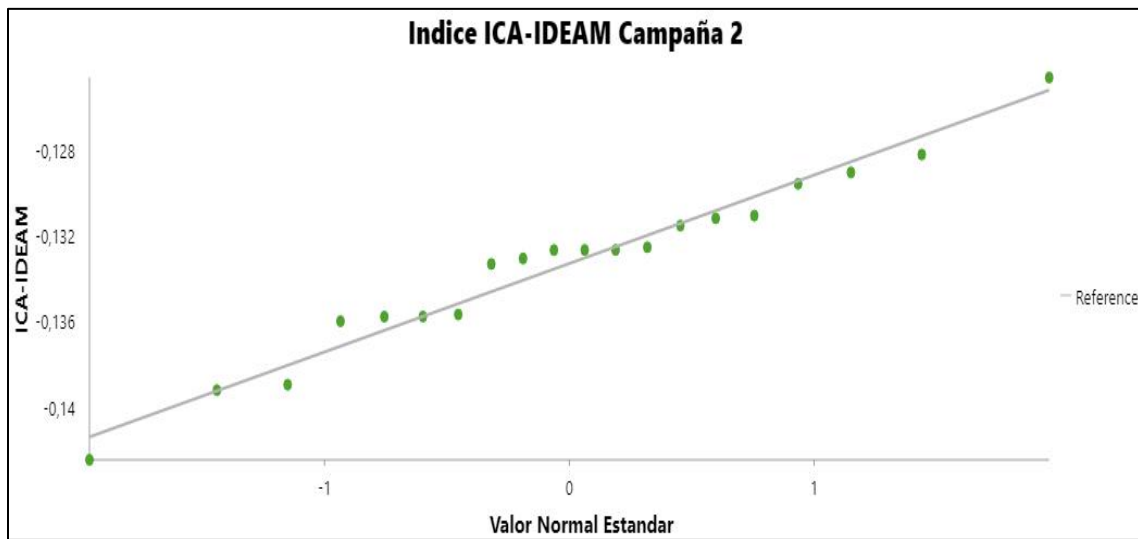


Gráfica 4. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICA-IDEAM campaña 1 de monitoreo.

Para la serie de datos correspondiente a la campaña 2 del índice ICA, se aplicó una transformación Box – Cox con un valor de Landa de 7, teniendo como resultado una media de -0.13 y una desviación estándar de 0.004, en el histograma se evidencia como la totalidad de los datos presentan un comportamiento similar a la campana de Gauss. El en diagrama de dispersión QQPlot, los datos de la campaña 2 presentan un mejor ajuste con la distribución normal que los datos de la campaña anterior.



Gráfica 5. Histograma Parámetro ICA-IDEAM campaña 2 de monitoreo.

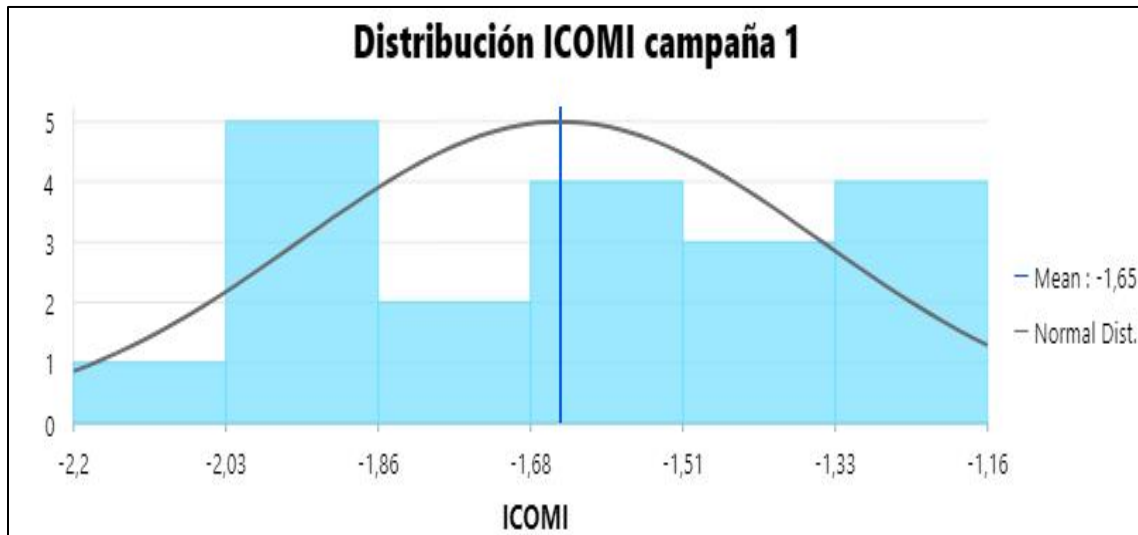


Gráfica 6 Gráfico QQ-Plot Parámetro ICA-IDEAM campaña 2 de monitoreo.

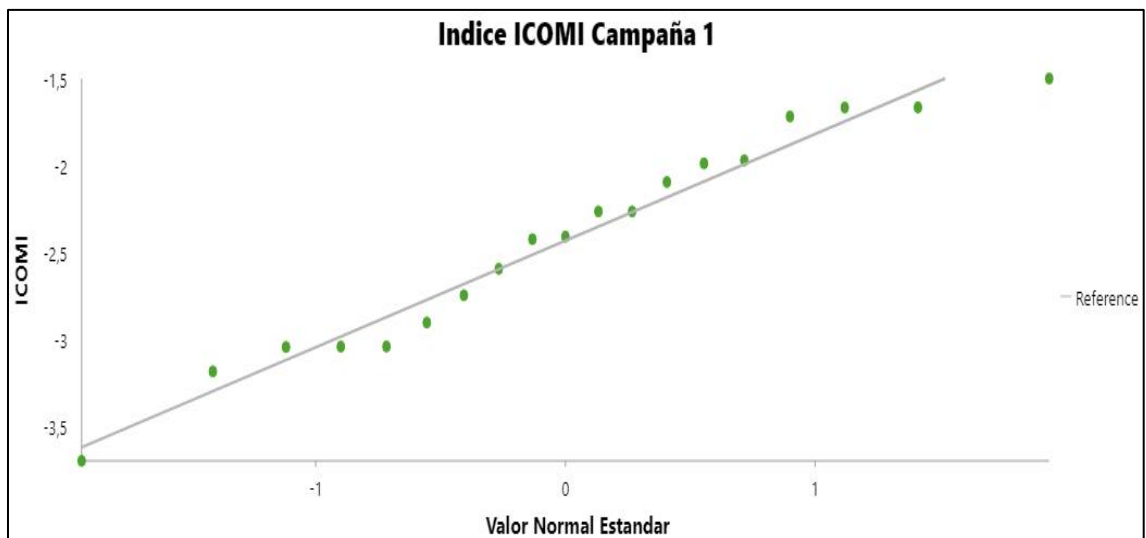
- **Parámetro ICOMI**

Para obtener una distribución lo más cercana a la normal, los datos del parámetro ICOMI de la primera campaña de monitoreo fueron sometidos a una transformación Box-Cox con un valor lambda de 0.1, presentando una desviación estándar de 0.29, como también un valor de

Skewness (Sk) de -0.024, por lo cual se puede afirmar que los datos presentan una distribución normal ya que le Sk está cerca a cero. En cuanto al grafico de dispersión, se observa que los datos extremos presentan una mayor dispersión que el resto de datos, pero aun así conservan la tendencia normal.

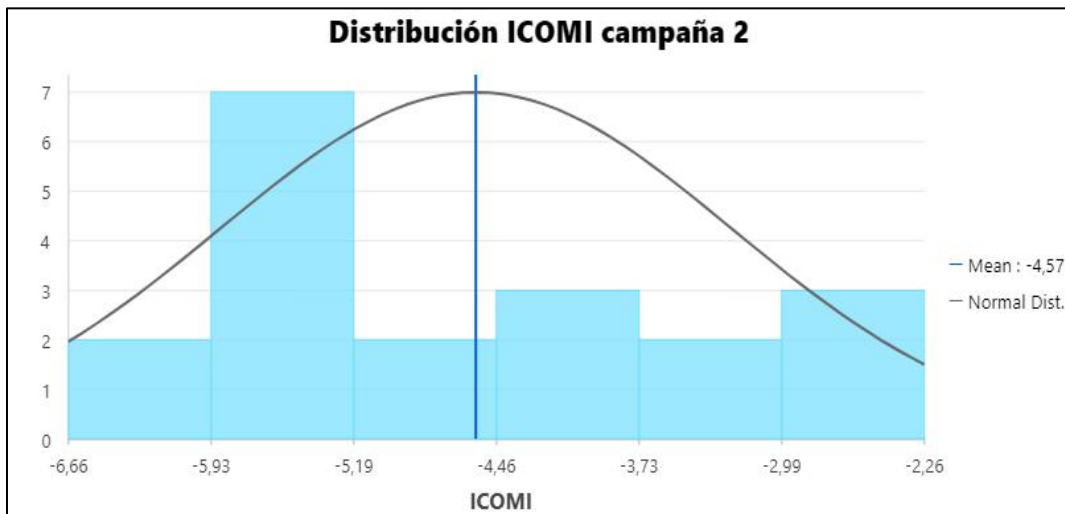


Gráfica 7. Histograma Parámetro ICOMI campaña 1 de monitoreo.

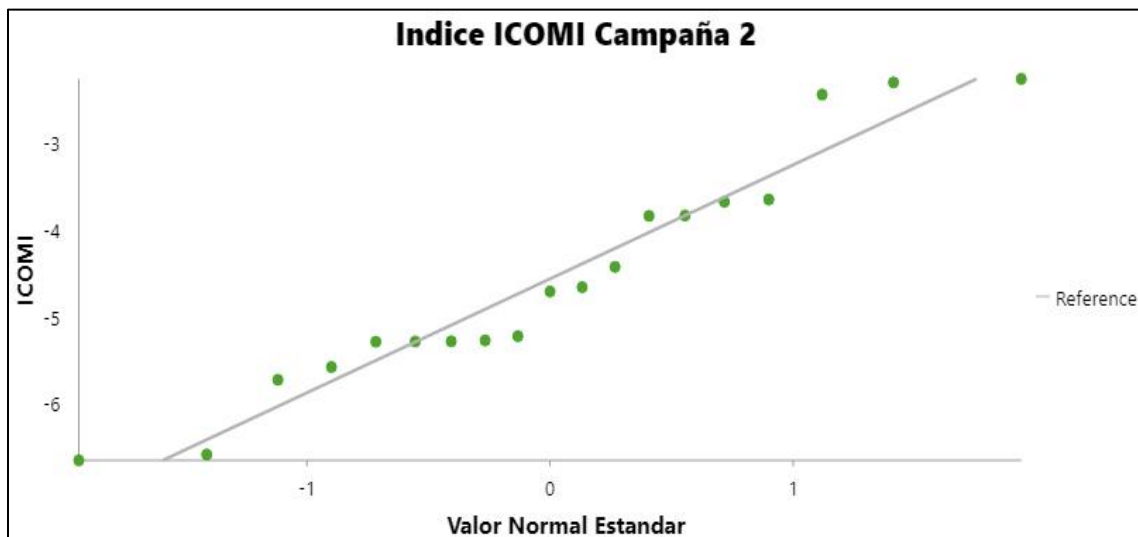


Gráfica 8. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOMI campaña 1 de monitoreo.

En la campaña 2, A los datos del índice ICOMI, se les aplicó una transformación Box - Cox con lambda -0.7, arrojando un valor Sk de 0.35, valor que se encuentra en el rango permisible de este parámetro estadístico,



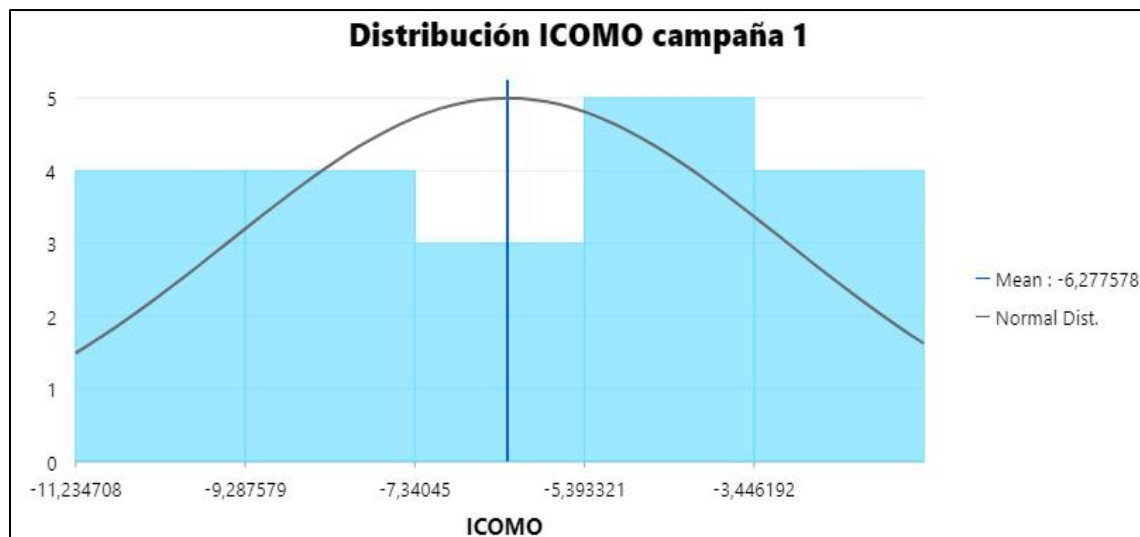
Gráfica 9. Histograma Parámetro ICOMI campaña 2 de monitoreo.



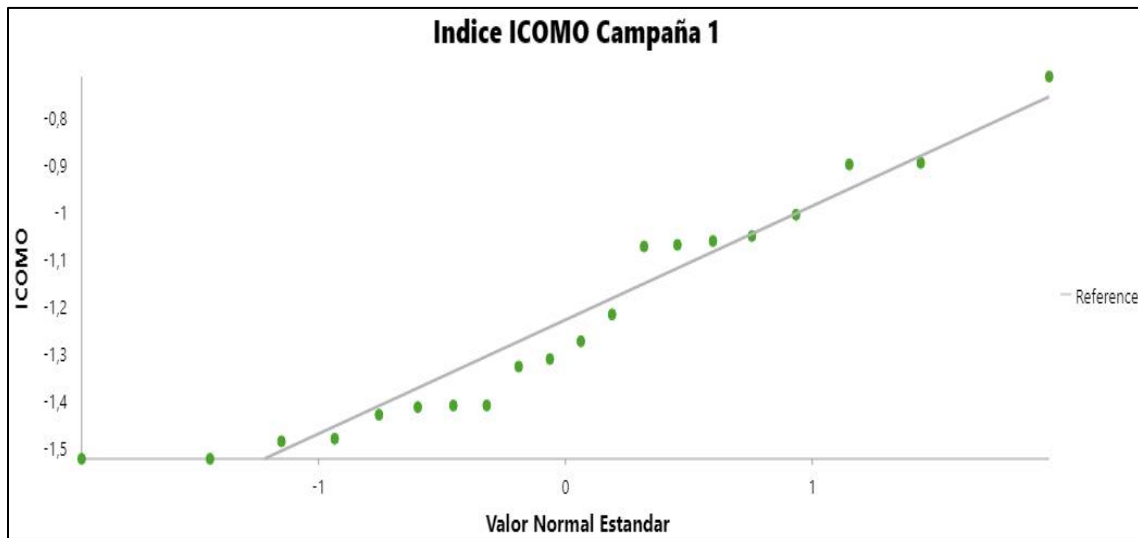
Gráfica 10. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOMI campaña 2 de monitoreo.

- **Parámetro ICOMO**

Para el índice ICOMO se empleó un valor de lambda de -1.5, logrando así un valor de Sk igual a -0.12, valor cercano a cero, por lo cual se verifica que la transformación Box – Cox ajustan los datos a una distribución normal. Esta serie de datos, no presenta una gráfica de Histograma donde se evidencie con certeza la distribución normal. Por otro lado, la gráfica QQPlot representa de mejor manera la distribución de los datos, registrando solo un valor que se encuentra distante de la línea de referencia.

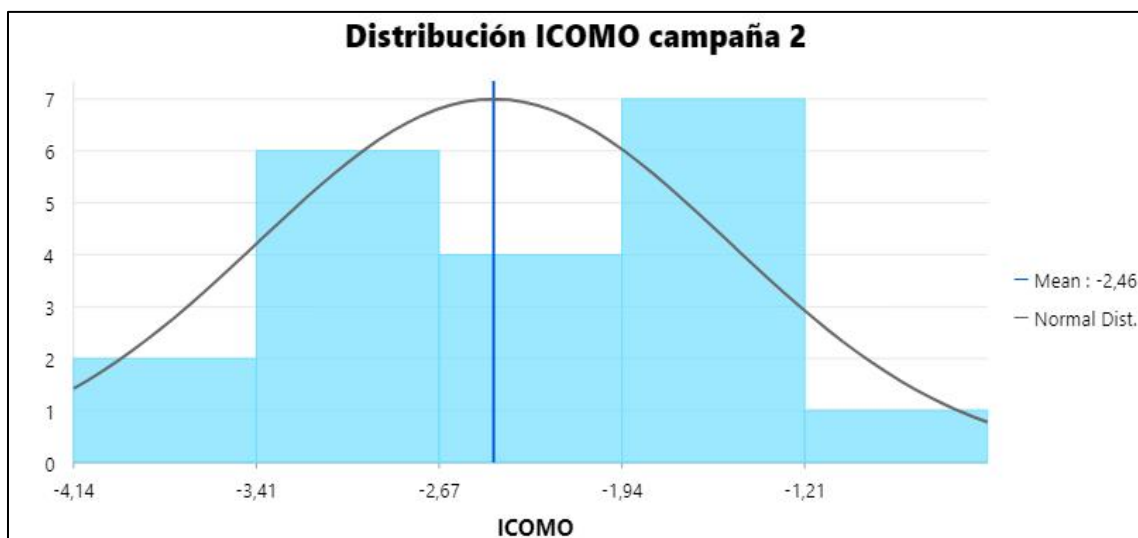


Gráfica 11. Histograma Parámetro ICOMO campaña 1 de monitoreo.

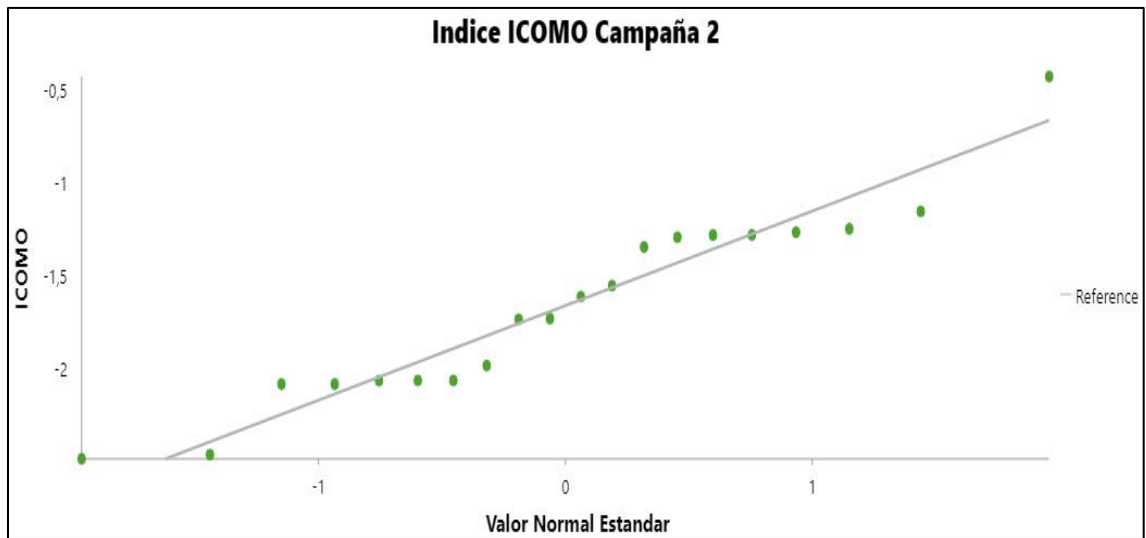


Gráfica 12. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOMO campaña 1 de monitoreo.

Para la segunda campaña se empleó un valor de landa de -0.9 con una transformación Box -Cox, la serie de datos ajustada presentó un valor de Skewness de -0.023. Por otro lado, en el grafico QQPlot se evidencia la distribución normal de los datos como lo corrobora el índice Sk.



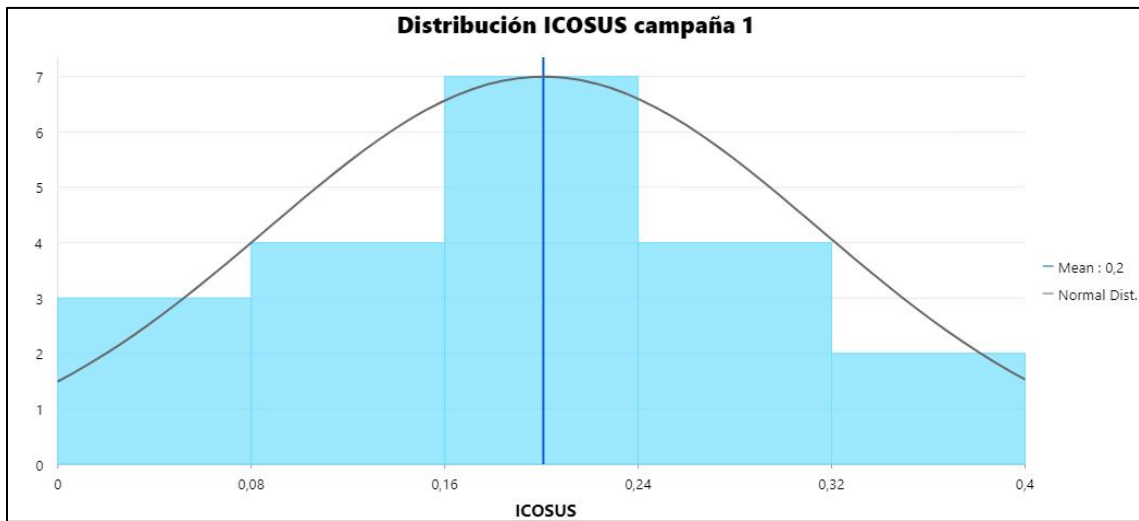
Gráfica 13. Histograma Parámetro ICOMO campaña 2 de monitoreo.



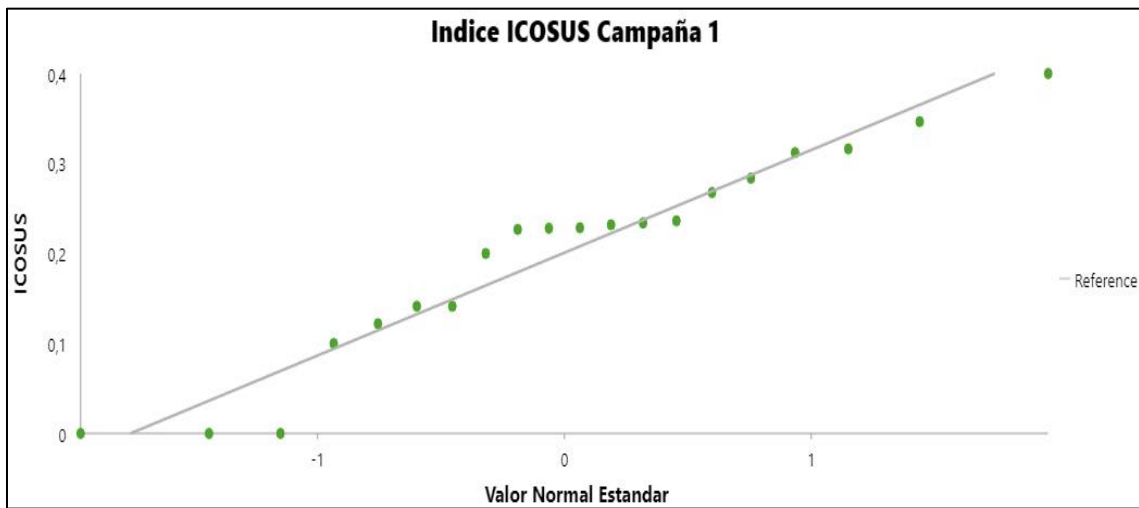
Gráfica 14. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOMO campaña 2 de monitoreo.

- **Parámetro ICOSUS**

En el índice ICOSUS se aplicó para los datos de la campaña primera de monitoreo una transformación Box -Cox con un valor de  $\lambda$  de 0.5. En la gráfica del histograma se evidencia como los datos se ajustan a la campana de Gauss, igualmente en el gráfico de dispersión la nube de puntos presenta una tendencia similar a la línea de referencia de la distribución normal,

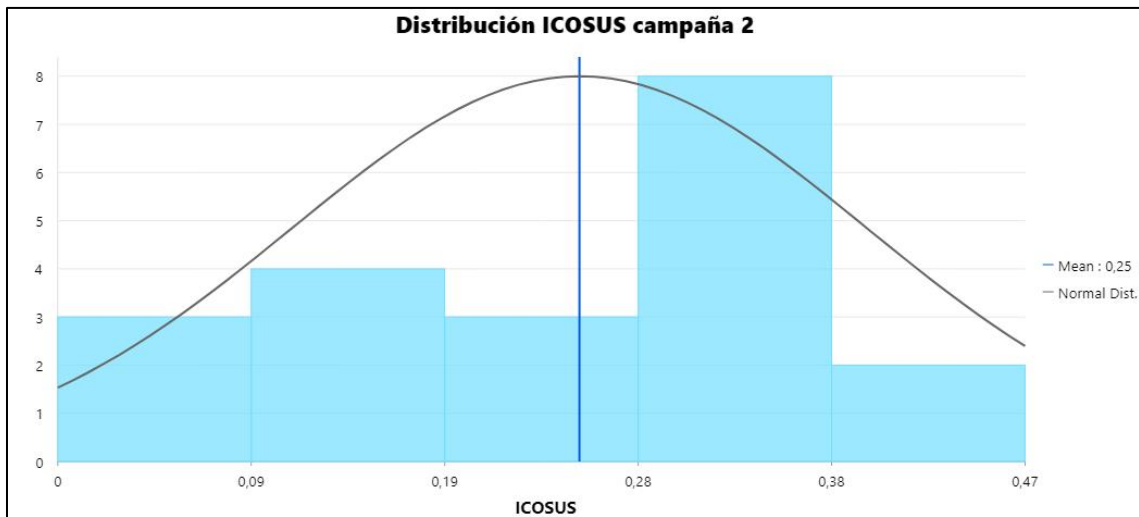


Gráfica 15. Histograma Parámetro ICOSUS campaña 1 de monitoreo.

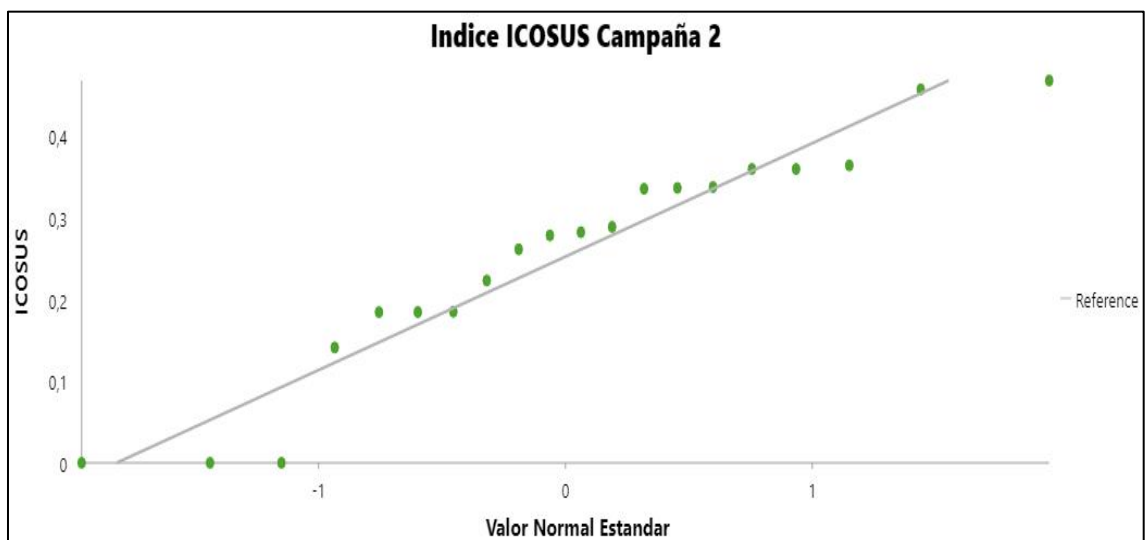


Gráfica 16. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOSUS campaña 1 de monitoreo.

Para ajustar a una distribución normal, los datos de la campaña 2 se ajustaron con un valor de lambda de 0.4, presentando como resultado un valor de  $S_k$  de -0.74.



Gráfica 17. Histograma Parámetro ICOSUS campaña 2 de monitoreo.

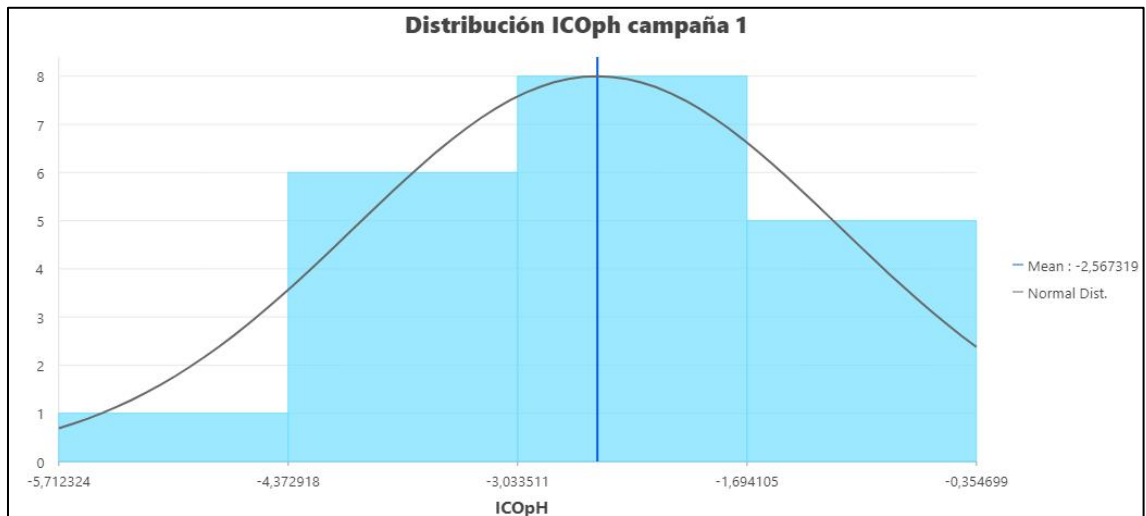


Gráfica 18. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOSUS campaña 2 de monitoreo.

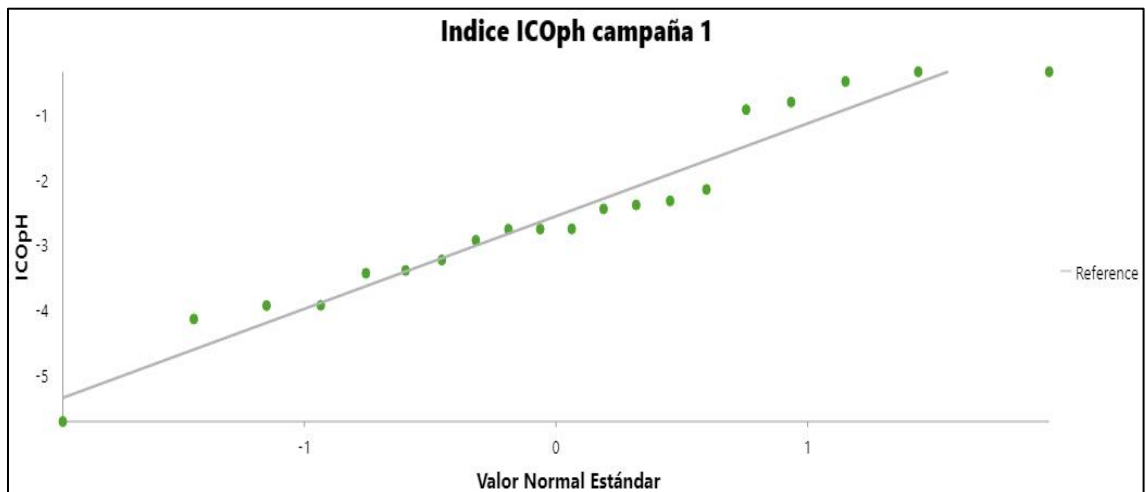
- **Parámetro ICOpH**

Para el parámetro ICOpH se empleó una transformación Box – Cox con una landa de 0.1, para lograr una distribución normal, como resultado se tuvo un valor de Skewness de -0.03, lo

cual nos indica que los datos presentan una distribución muy cerca a la normal. Dicho comportamiento se verifica en el gráfico de dispersión.

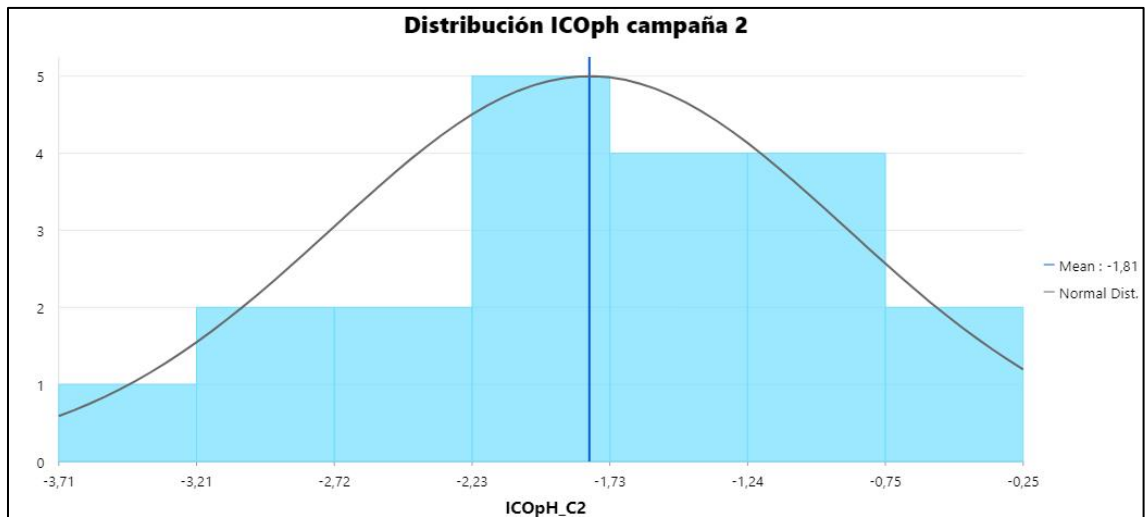


Gráfica 19. Histograma Parámetro ICOpH campaña 1 de monitoreo.

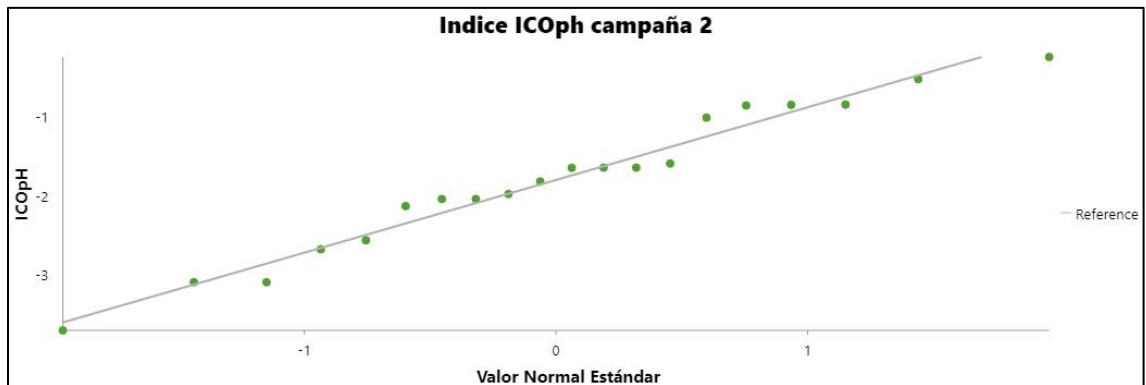


Gráfica 20. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOpH campaña 1 de monitoreo.

Para los datos de la campaña de monitoreo 2, se aplicó una transformación Box -Cox con un valor de lambda de 0.2, con el objetivo de ajustar los datos a una distribución normal.



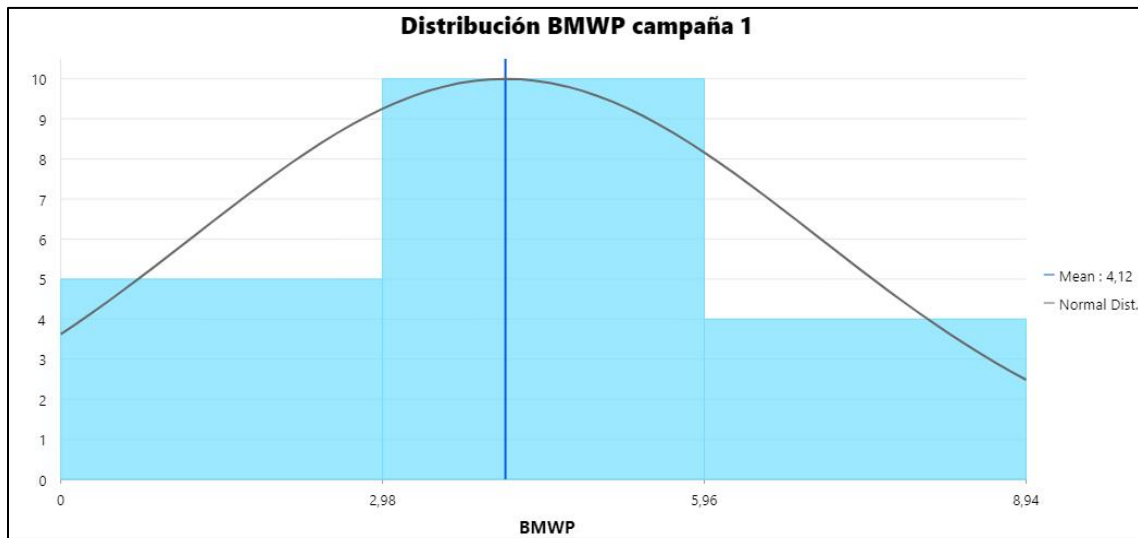
Gráfica 21. Histograma Parámetro ICOpH campaña 2 de monitoreo.



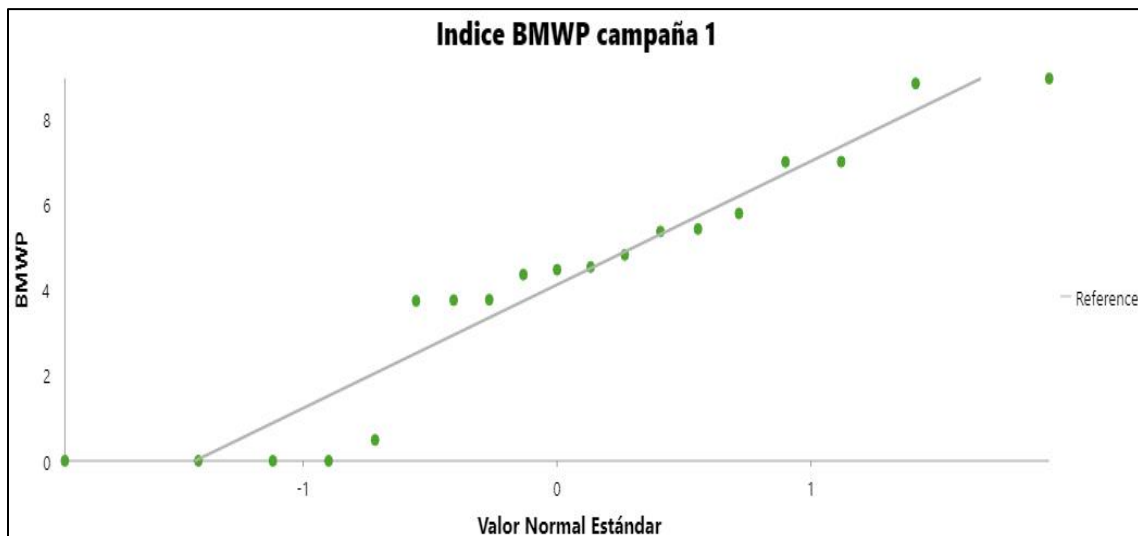
Gráfica 22. Gráfico QQ-Plot Parámetro ICOpH campaña 2 de monitoreo.

- **Parámetro BMWP**

Para el índice BMWP, se aplicó una transformación Box – Cox con landa igual a -0.34, con un valor medio de los datos de 4.12, ajustándose los datos a la distribución de normalidad, presenta una desviación en la parte inferior de la nube de puntos en el grafico QQPlot.

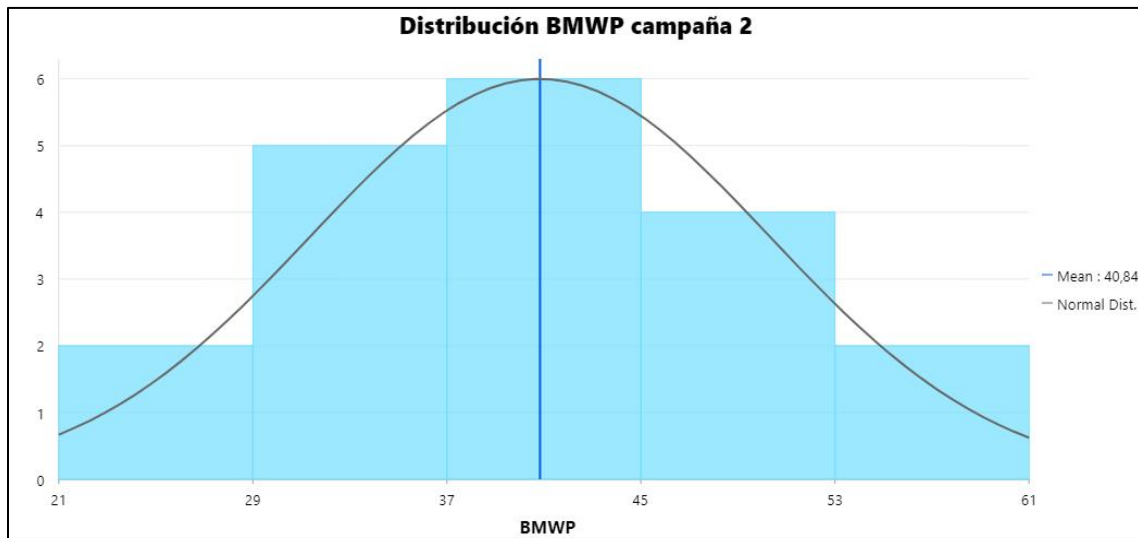


Gráfica 23. Histograma Parámetro BMWP campaña 1 de monitoreo.

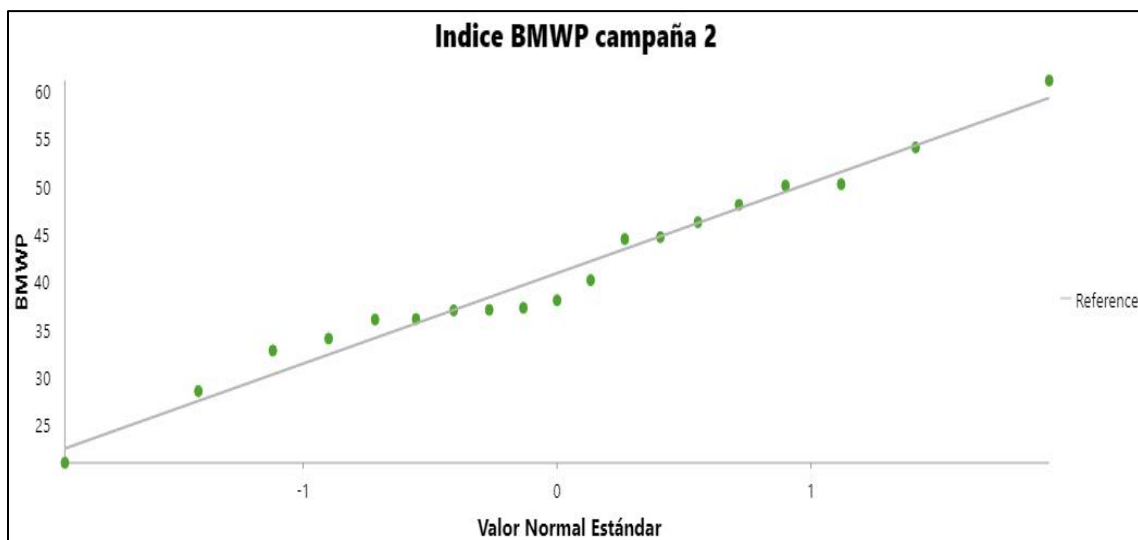


Gráfica 24. Gráfico QQ-Plot Parámetro BMWP campaña 1 de monitoreo.

Los datos de la campaña de monitoreo para el índice de calidad de agua BMWP, una vez graficados se pudo evidenciar que presentan una distribución normal como se ve en la Gráfica 25 y Gráfica 26, por lo tanto, estos datos no fueron sometidos a ningún ajuste o transformación.



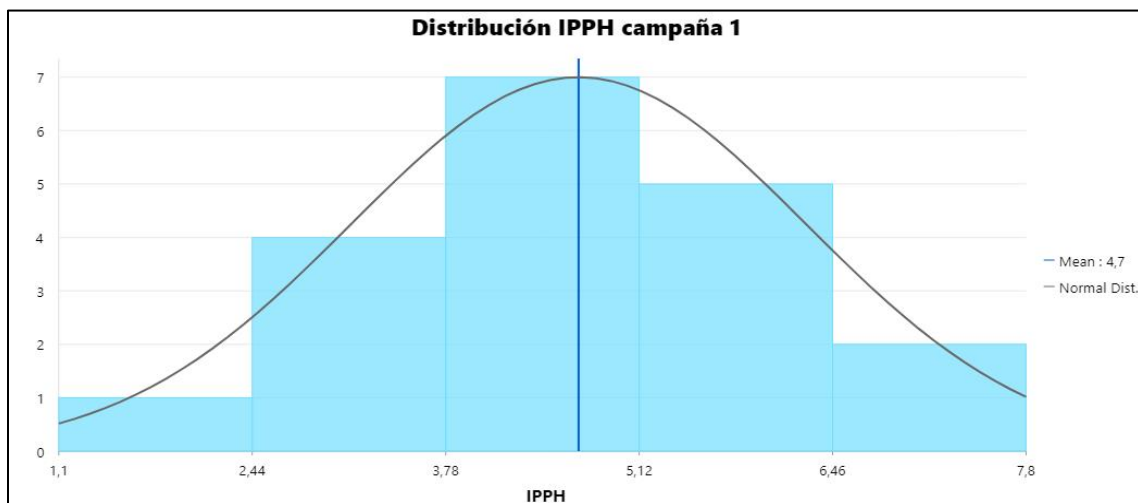
Gráfica 25. Histograma Parámetro BMWP campaña 2 de monitoreo.



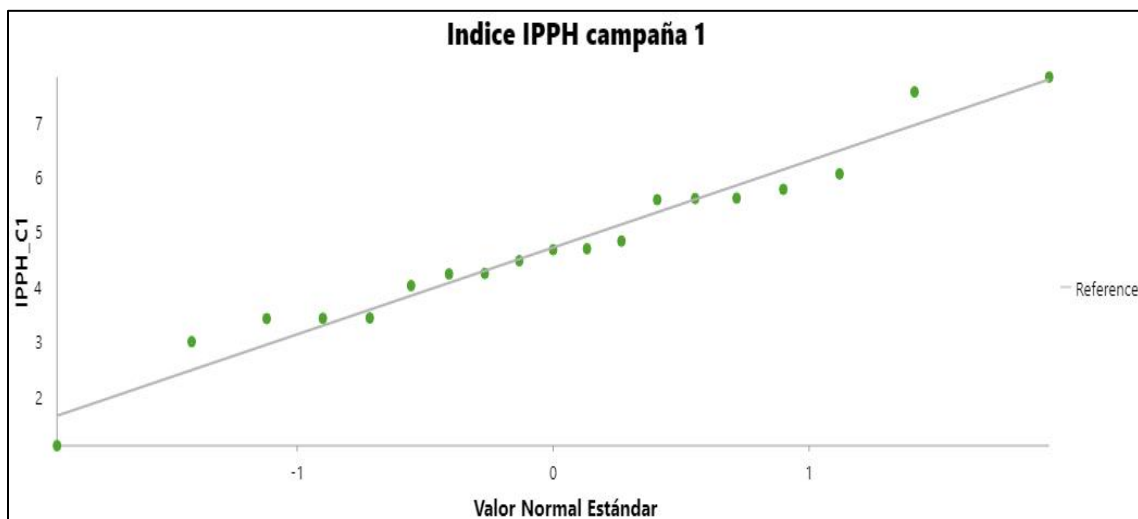
Gráfica 26. Gráfico QQ-Plot Parámetro BMWP campaña 2 de monitoreo.

### 3. Parámetro IPPH

Al igual que los datos del índice BMWP de la segunda campaña, los datos del índice IPPH de la primera campaña presentaron una distribución normal, siguiendo la tendencia de la campana de Gauss, presentando un valor de Sk de 0.01 y una Kurtosis de 3.3. Este comportamiento se evidencia en la Gráfica 27 y Gráfica 28.

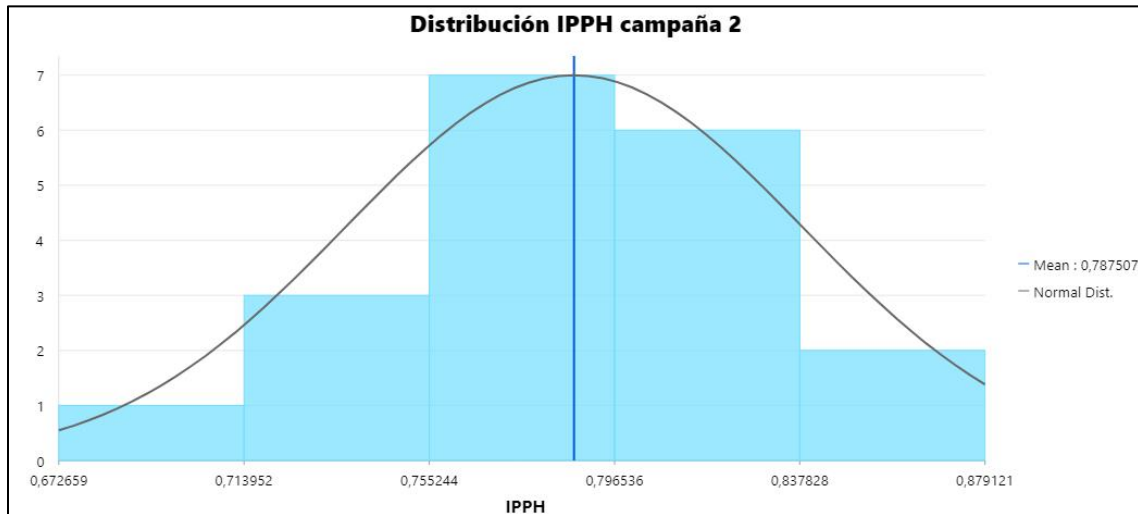


Gráfica 27. Histograma Parámetro IPPH campaña 1 de monitoreo.

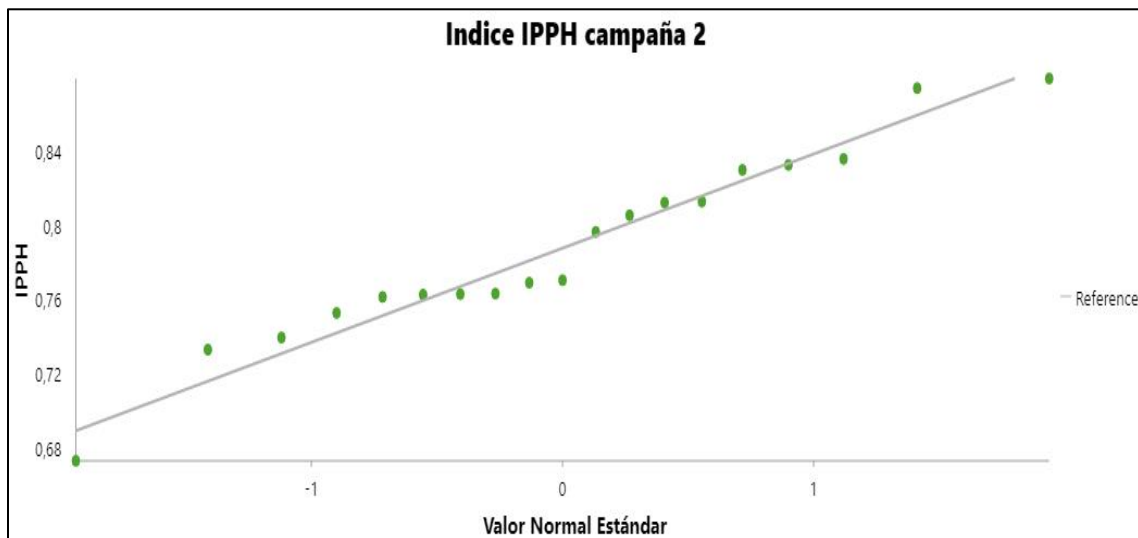


Gráfica 28. Gráfico QQ-Plot Parámetro IPPH campaña 1 de monitoreo.

Por su parte, el conjunto de datos de la campaña 2 se sometió a una transformación Box – Cox con un valor de lambda de -0.7, teniendo como resultado un Sk igual a 0.01 y una Kurtosis de 2.88.



Gráfica 29. Histograma Parámetro IPPH campaña 2 de monitoreo.



Gráfica 30. Gráfico QQ-Plot Parámetro IPPH campaña 2 de monitoreo.

**Análisis de Componentes Principales - ACP:** Con el objetivo de establecer una correlación entre los índices de calidad de agua se ejecutó el ACP para cada campaña de monitoreo, en dicho análisis se tuvo como resultado inicialmente los componentes principales, obteniendo siete componentes para cada campaña de monitoreo, en el caso de la campaña 1 se observa que los dos principales componentes principales representan el 66% de la variabilidad de los datos, representando el componente principal el 34% de la variabilidad; la variabilidad explicada por estos dos componentes no es estadísticamente significativa, ya que no supera el 70%, por lo cual se considera emplear un tercer componente para representar de manera más confiable la variabilidad de los datos. Por su parte, para la campaña 2, los 2 componentes principales representan una mayor variabilidad de los datos con un 77% de variabilidad, por lo cual para el análisis de los datos es suficiente estos dos componentes.

Tabla 87. Componentes Importantes del ACP campaña 2

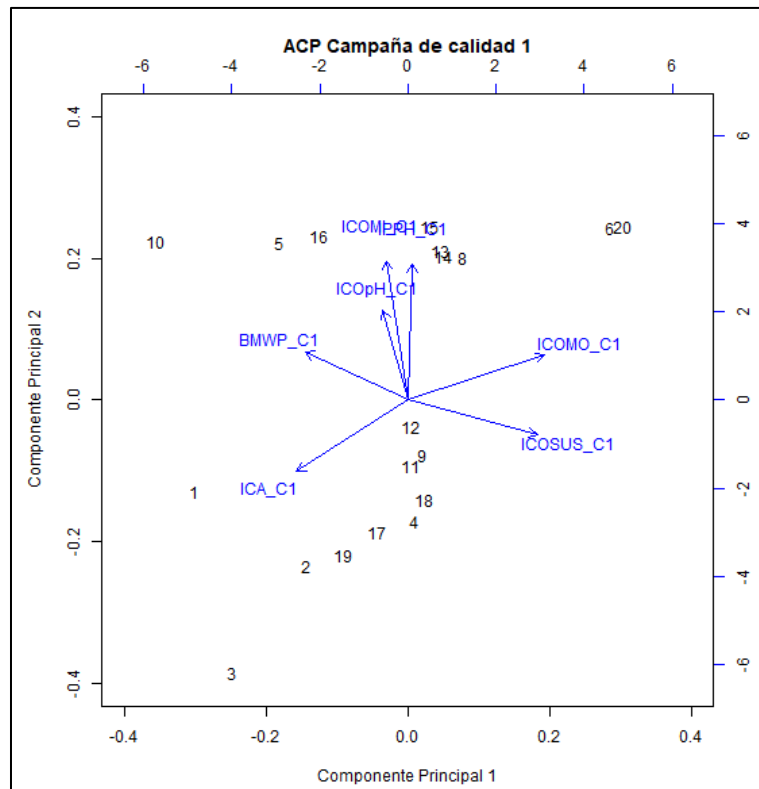
	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PC4</b>	<b>PC5</b>	<b>PC6</b>	<b>PC7</b>
<b>Desviación Estándar</b>	1.55	1.51	1.09	0.75	0.60	0.40	0.23
<b>Proporción de variación</b>	0.34	0.32	0.17	0.08	0.05	0.02	0.01
<b>Proporción acumulada</b>	0.34	0.67	0.84	0.92	0.97	0.99	1.00

Tabla 88. Componentes Importantes del ACP campaña 2

	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PC4</b>	<b>PC5</b>	<b>PC6</b>	<b>PC7</b>
<b>Desviación Estándar</b>	1.79	1.49	0.85	0.70	0.59	0.10	0.08
<b>Proporción de variación</b>	0.46	0.32	0.10	0.07	0.05	0.00	0.00
<b>Proporción acumulada</b>	0.46	<b>0.77</b>	0.88	0.95	1.00	1.00	1.00

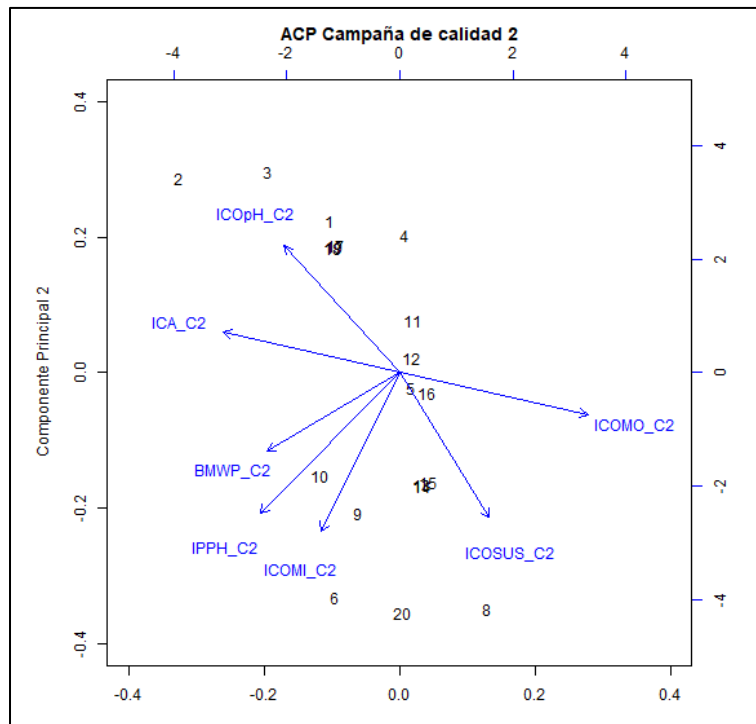
Para facilitar el análisis de la correlación de los parámetros se realizaron los gráficos Biplot para cada campaña de monitoreo de la calidad del agua.

En la campaña 1 se evidencia que existe una correlación positiva entre las variables ICOpH, ICOMI y IPPH, de igual manera se puede observar una correlación inversa entre las variables ICA y ICOMO, como también entre el índice ICOSUS y BMWP. Con respecto a los resultados del gráfico Biplot, se puede considerar reducir las variables a estudiar, pero teniendo en cuenta el porcentaje de variabilidad que representan los principales componentes, se considera pertinente continuar con la totalidad de las variables.



Gráfica 31. ACP campaña de monitoreo 1

Para la campaña 2, se evidencia una variación notoria en la correlación de las variables con respecto a la evidenciada en la campaña 1. Se observa que las variables ICOPH, ICOMI y IPPH no presenta una correlación entre sí, para este caso, la variable ICOPH presenta una correlación inversamente proporcional con la variable ICOSUS, al igual que el índice ICOMO y el índice ICA, estos últimos son las únicas variables que conservan la misma correlación en las dos campañas de monitoreo, por lo cual las estimaciones se puede mejorar considerando otras variables externas, por ejemplo por condiciones climáticas, usos industriales en la zona de estudio, entre otras, no contempladas en este estudio.



Gráfica 32. ACP Campaña de monitoreo 2

Teniendo en cuenta que se presenta bastante variabilidad entre las variables y no se evidencia una correlación positiva marcada se determinó realizar el análisis espacial con todos los parámetros medidos en campo.

**4. Actividad 2. Identificar los principales sectores que generan mayor contribución de cargas contaminantes una vez analizados los resultados obtenidos en los Índice de Calidad - ICA.**

**Distribución Espacial:** Para Evaluar la distribución espacial de los datos inicialmente se calcularon los RMSE de cada orden polinomial para cada variable, este proceso se realizó en el software R Studio, obteniendo como resultado Tabla 89, en donde se puede observar que para la totalidad de las variables el orden polinomial que más se ajusta a los datos el grado 3, ya que presenta el menor error en comparación con el orden 1 y orden 2.

Tabla 89. Error Cuadrático Medio (RMSE)

Índice de calidad de agua	Error Cuadrático Medio (RMSE)		
	Orden_1	Orden_2	Orden_3
ICA_C1	0.078	0.077	<b>0.075</b>
ICOMI_C1	0.058	0.052	<b>0.047</b>
ICOMO_C1	0.085	0.083	<b>0.082</b>
ICOSUS_C1	0.042	0.042	<b>0.040</b>
ICOpH_C1	0.218	0.218	<b>0.207</b>
ICA_C2	0.065	0.064	<b>0.064</b>
ICOMI_C2	0.052	0.049	<b>0.047</b>
ICOMO_C2	0.107	0.103	<b>0.101</b>
ICOSUS_C2	0.062	0.057	<b>0.056</b>
ICOpH_C2	0.206	0.175	<b>0.162</b>
BMWP_C1	23.650	23.515	<b>23.065</b>
BMWP_C2	9.116	9.104	<b>8.718</b>
IPPH_C1	1.535	1.465	<b>1.429</b>
IPPH_C2	0.701	0.686	<b>0.669</b>

Posteriormente, se aplicó Kriging Ordinario, como resultado se presenta una capa Raster para cada uno de los índices de calidad de agua en las dos campañas de monitoreo, en dicho archivo se puede evaluar la distribución espacial y el comportamiento de los datos en el espacio, determinando así las zonas con mayor grado de contaminación hídrica.

- **Índice ICA-IDEAM**

Este índice presenta una calidad aceptable y buena en las zonas aledañas del río Tune, esta característica se conserva en ambas campañas de monitoreo, presentado mayor calidad durante la época seca, de igual manera se evidencia que la zona baja del área de estudio presenta

una disminución de la calidad pasando de Regular a Mala en la campaña 2, correspondiente a la época de lluvias.

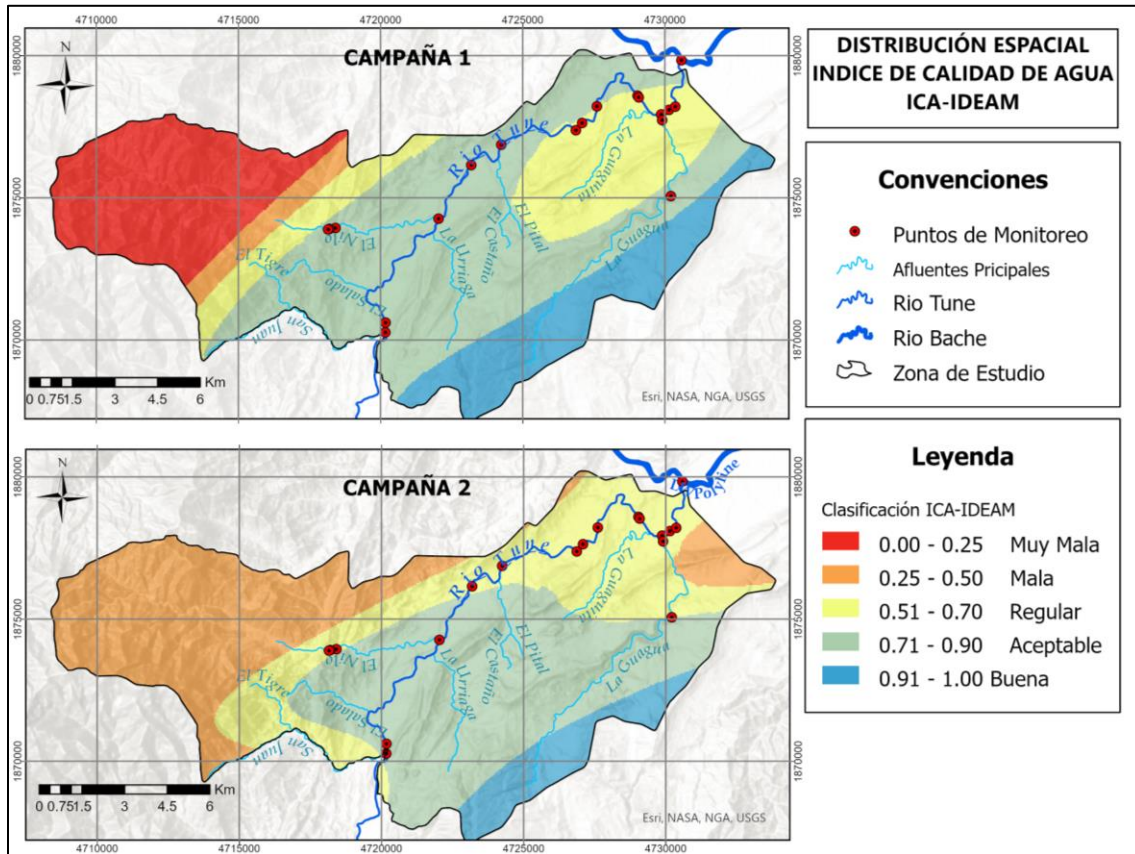


Figura 10. Distribución Espacial Índice ICA-IDEAM

• **Índice ICOMI**

La distribución espacial del índice ICOMI no presenta variación teniendo como referencia las dos campañas de monitoreo, a lo largo del cauce del río Tune no se presenta contaminación por mineralización ni alteración del potencial de hidrógeno del agua. Se presenta una contaminación baja en la zona baja del área de estudio.

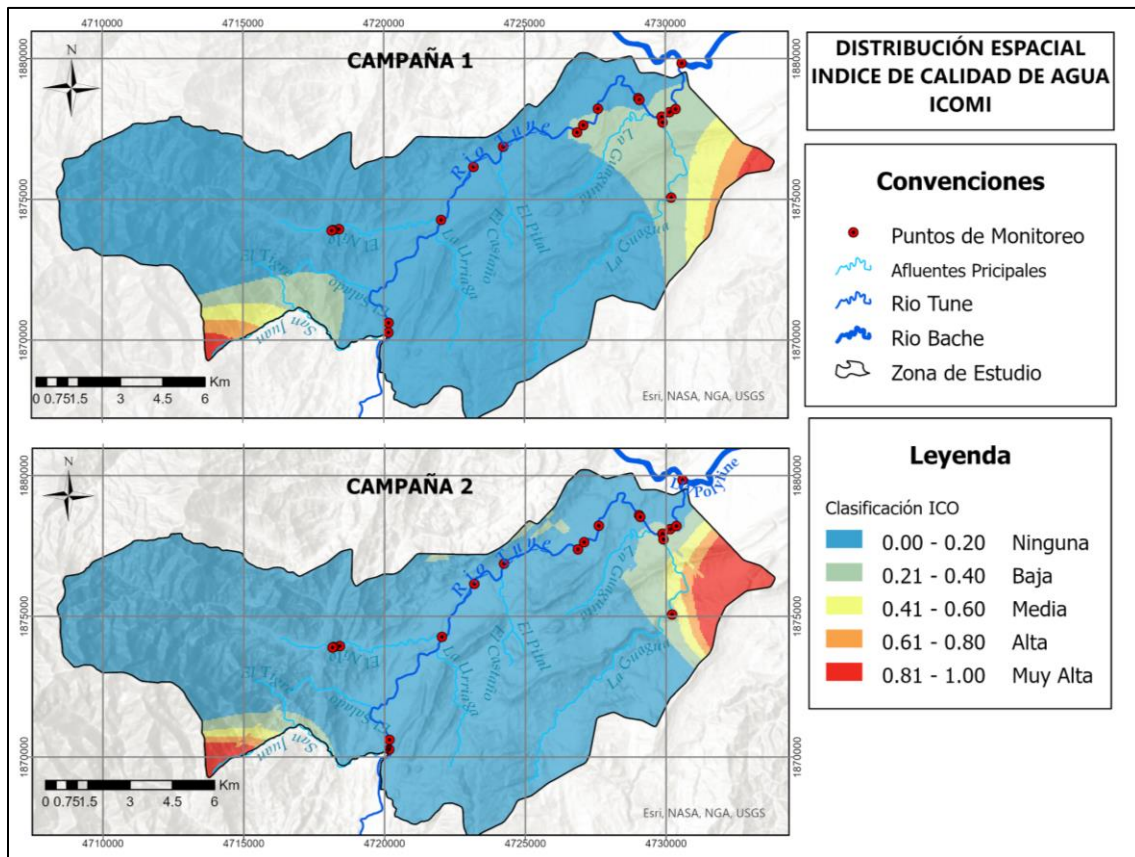


Figura 11. Distribución Espacial Índice ICOMI

● **Índice ICOMO**

La calidad del índice ICOMO varía entre las dos campañas de monitoreo, durante la primera campaña se evidencia ninguna contaminación en la parte alta de la zona de estudio, mientras que en la parte baja se presenta un nivel de contaminación baja. De igual manera, se observa un incremento en la contaminación en la zona aledañas a las quebradas El Pital y La Urriaga. Por otro lado, para la campaña de monitoreo 2 se presenta una contaminación uniforme durante todo el tramo del cauce principal del río tune, con un nivel de contaminación bajo.

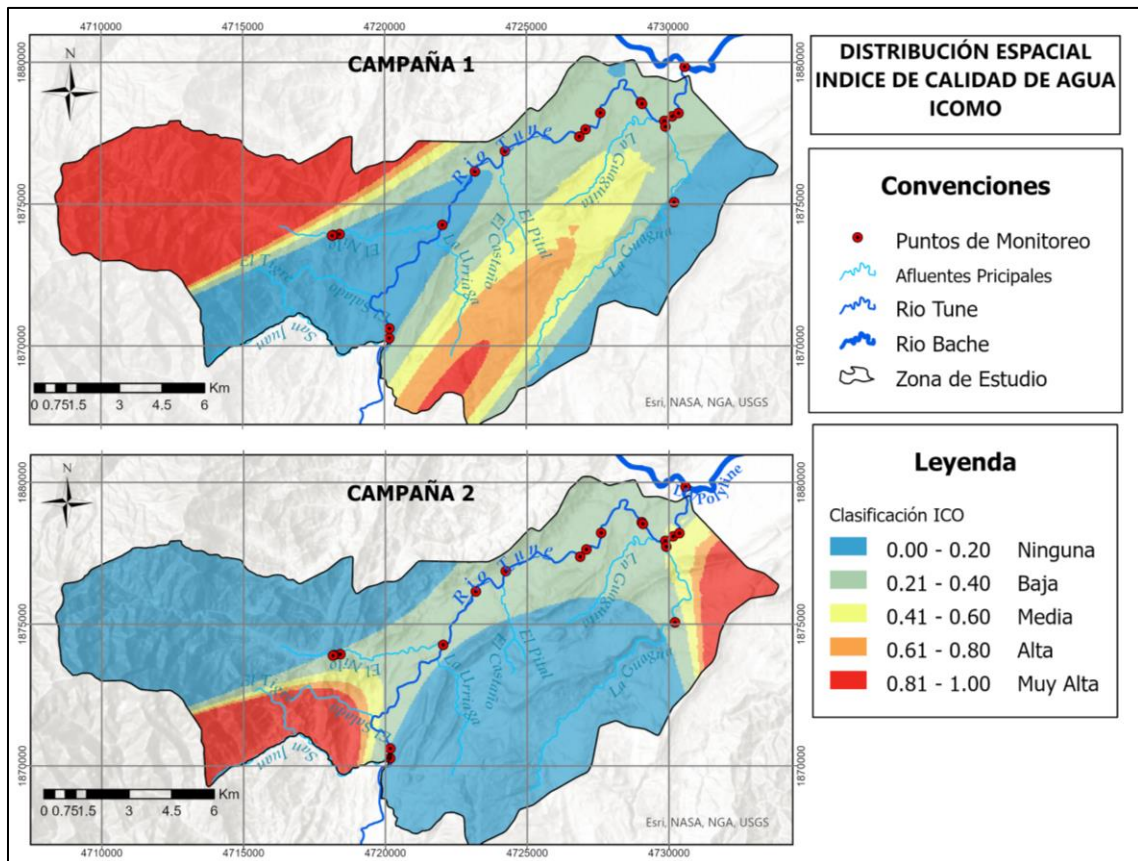


Figura 12. Distribución Espacial Índice ICOMO

- **Índice ICOSUS**

A pesar de no presentar variación de la calidad del índice ICOSUS en el trayecto que comprende el cauce principal del río Tune para las dos campañas, se evidencia un marcado incremento en la contaminación sobre el curso de la quebrada la Guagua en la campaña de monitoreo 1, presentando una calidad de contaminación Muy Alta.

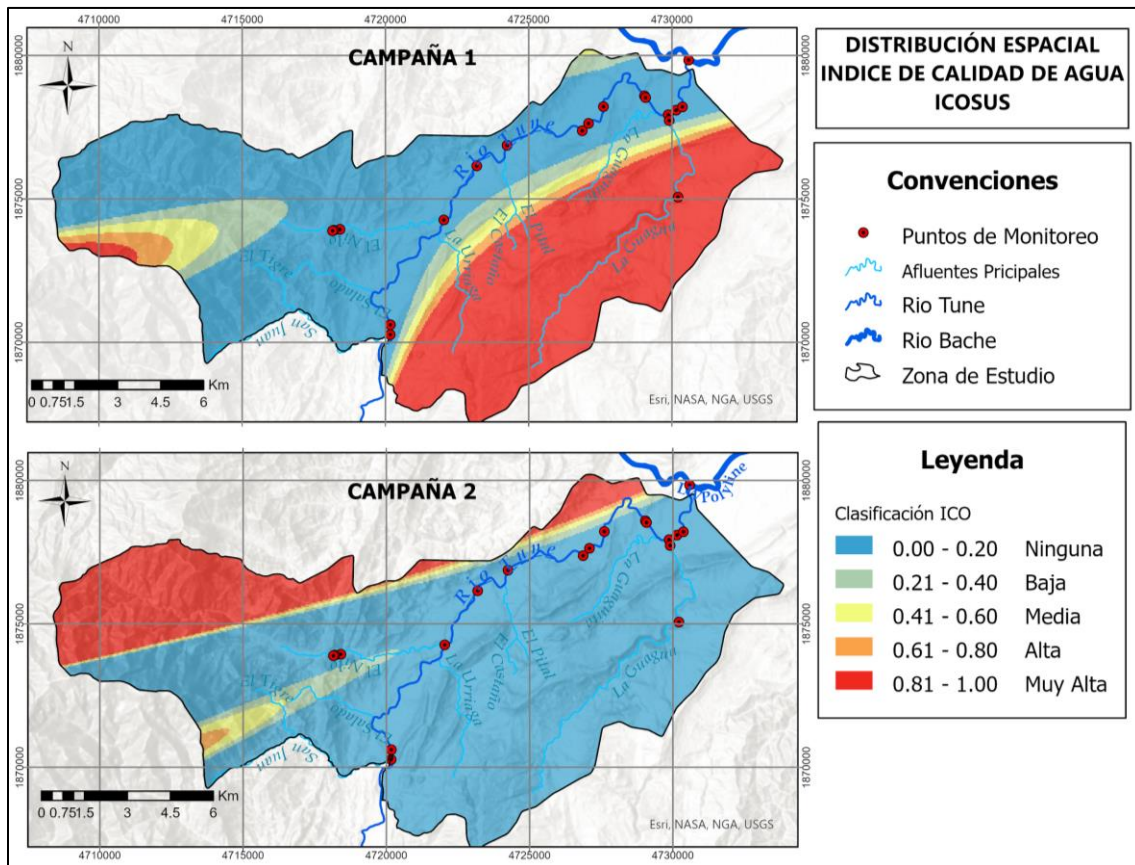


Figura 13. Distribución Espacial Índice ICOSUS

• **Índice ICOpH**

El comportamiento de la calidad de agua relacionada con el índice ICOpH varía entre las dos campañas de monitoreo, registrando un cambio muy marcado en la campaña 2, en donde se evidencia un incremento de la contaminación del recurso hídrico en gran parte de la zona de estudio, pero con niveles nulos de contaminación en la zona baja. Por su parte, durante la campaña 1 se evidencia incremento de contaminación en la zona baja y descenso en el área correspondiente a la quebrada la Guagua.

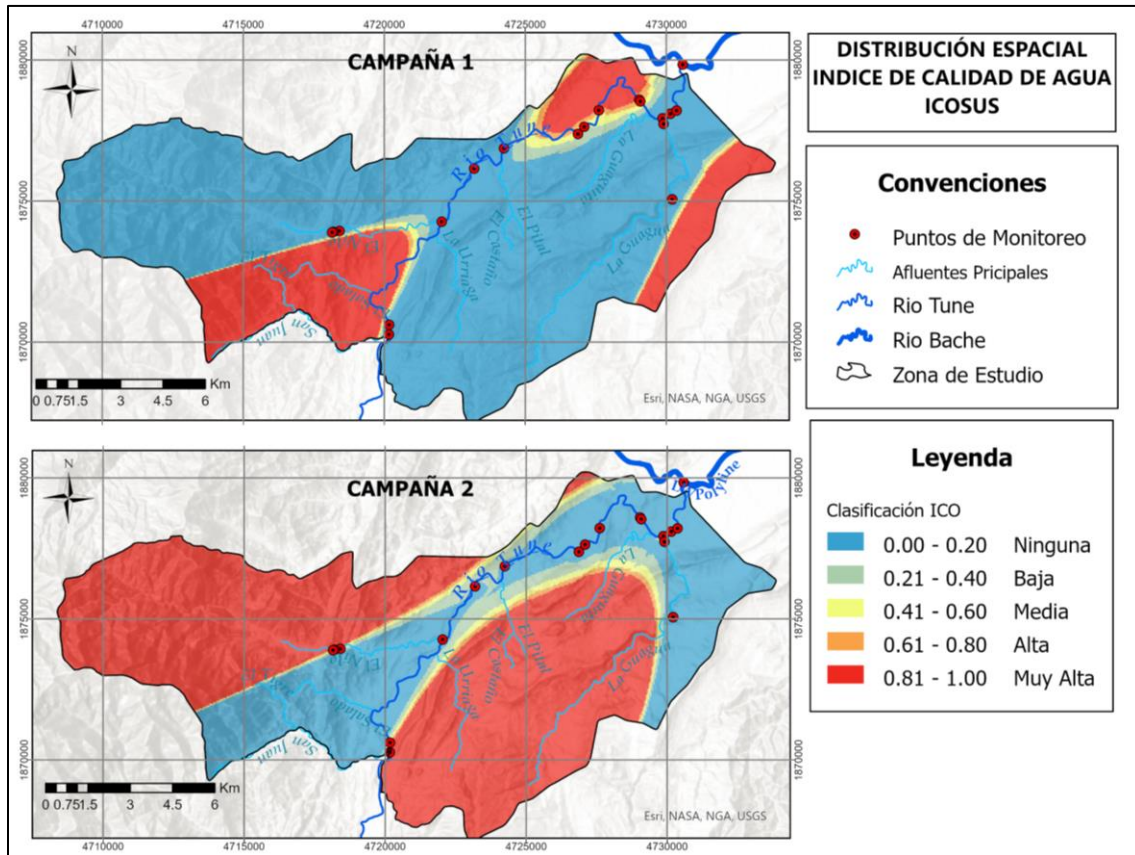


Figura 14. Distribución Espacial Índice ICOPH

• **Índice IPPH**

La calidad de agua según el índice IPPH, no presenta variación significativa entre las dos campañas de monitoreo a lo largo del cauce principal del río Tune, pero si registra variación de la contaminación, en la parte alta registra aguas muy contaminadas, en la zona central y baja dicha contaminación disminuye a moderadamente contaminada.

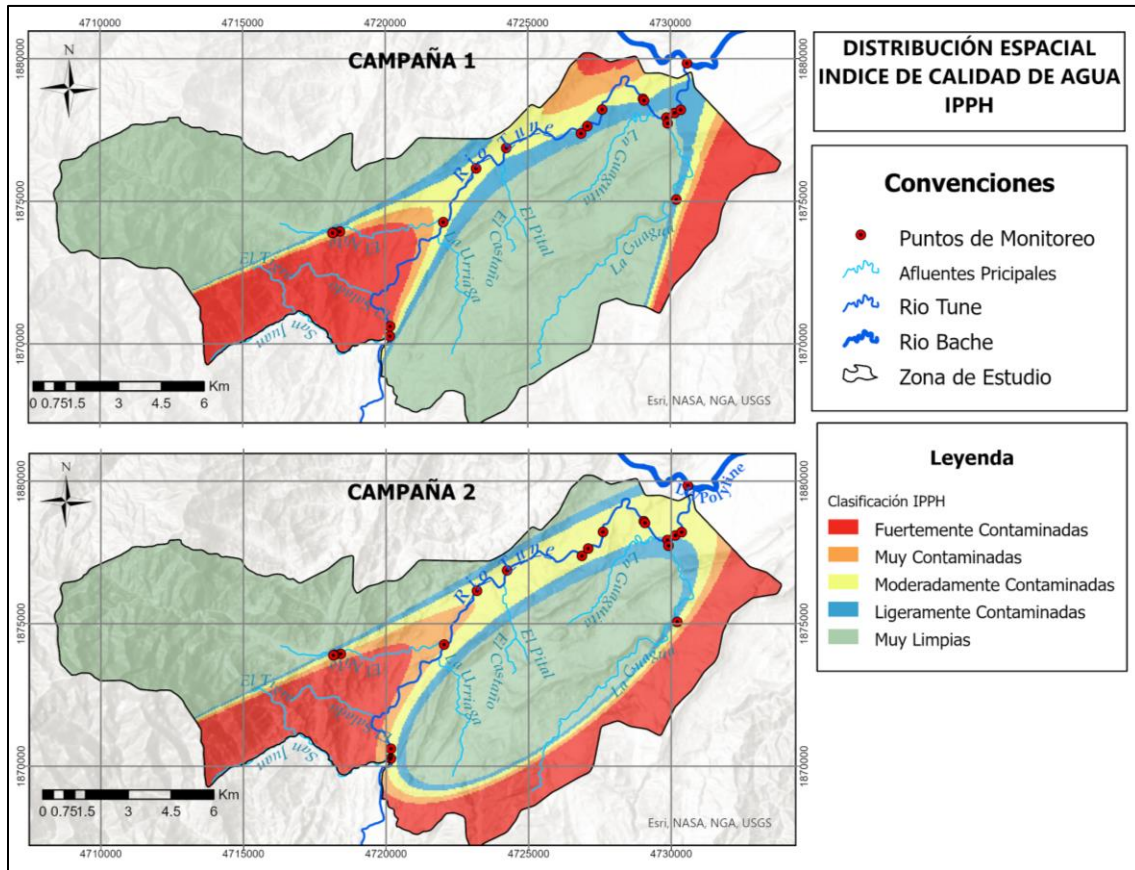


Figura 15. Distribución Espacial Índice IPPH

● **Índice BMWP**

La calidad de agua según el índice BMWP se presenta entre los niveles Dudosa, crítica y muy crítica a lo largo del cauce del río Tune para las dos campañas, este índice no registra calidad de agua aceptable ni buena en el área de estudio.

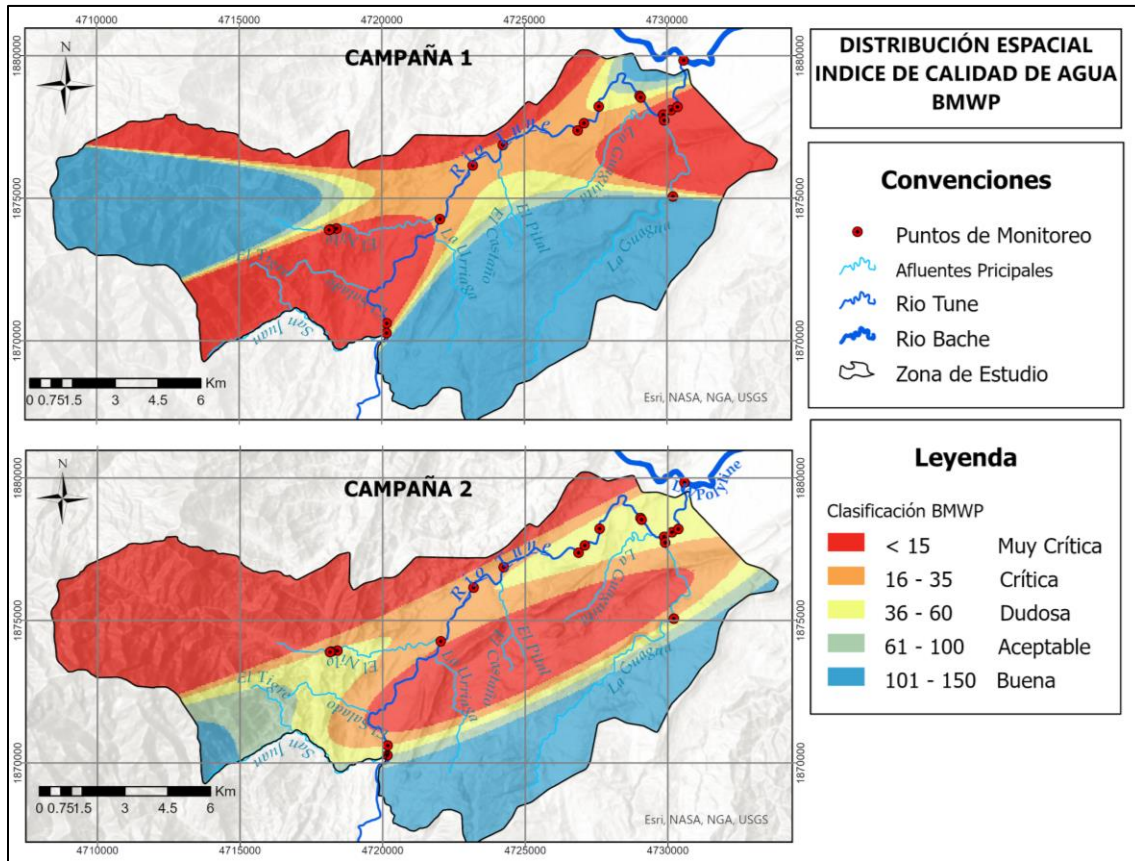


Figura 16. Distribución Espacial Índice BMWP

**Asociación espacial:**

Una vez realizada la relación espacial entre la capa Raster del Método de Kriging y los predios productivos del área de estudio, se determinó un valor medio del cada uno de los índices para cada predio, de esta manera se puede analizar el comportamiento de cada parámetro en las fincas estudiadas. A continuación, se presenta la distribución espacial de los índices en los predios.

Para el parámetro ICA se evidenció un incremento en el deterioro de la calidad del agua en la zona baja pasando de aceptable a regular, de igual manera en los predios ubicados sobre la

quebrada San Juan, se observa el mismo comportamiento. Por otro lado, los predios sobre la quebrada el pital presenta mejoría en el índice ICA pasando de regular a aceptable.

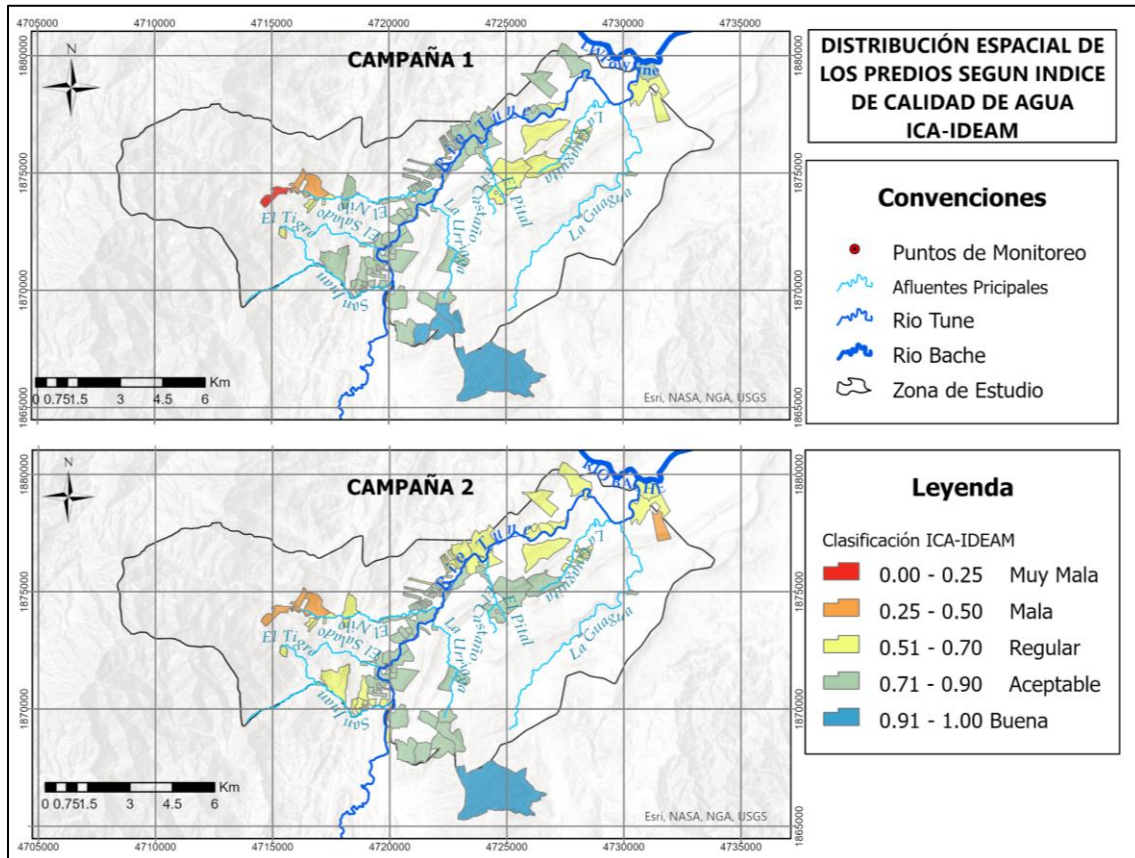


Figura 17. Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua ICA-IDEAM

La calidad de agua según el índice ICOMI se presenta constante en la mayoría de los predios, registrando ningún nivel de contaminación, solamente en la zona baja cerca a la desembocadura del rio Tune al rio bache se presenta dos predios con una calidad media y baja incrementando en la segunda campaña.

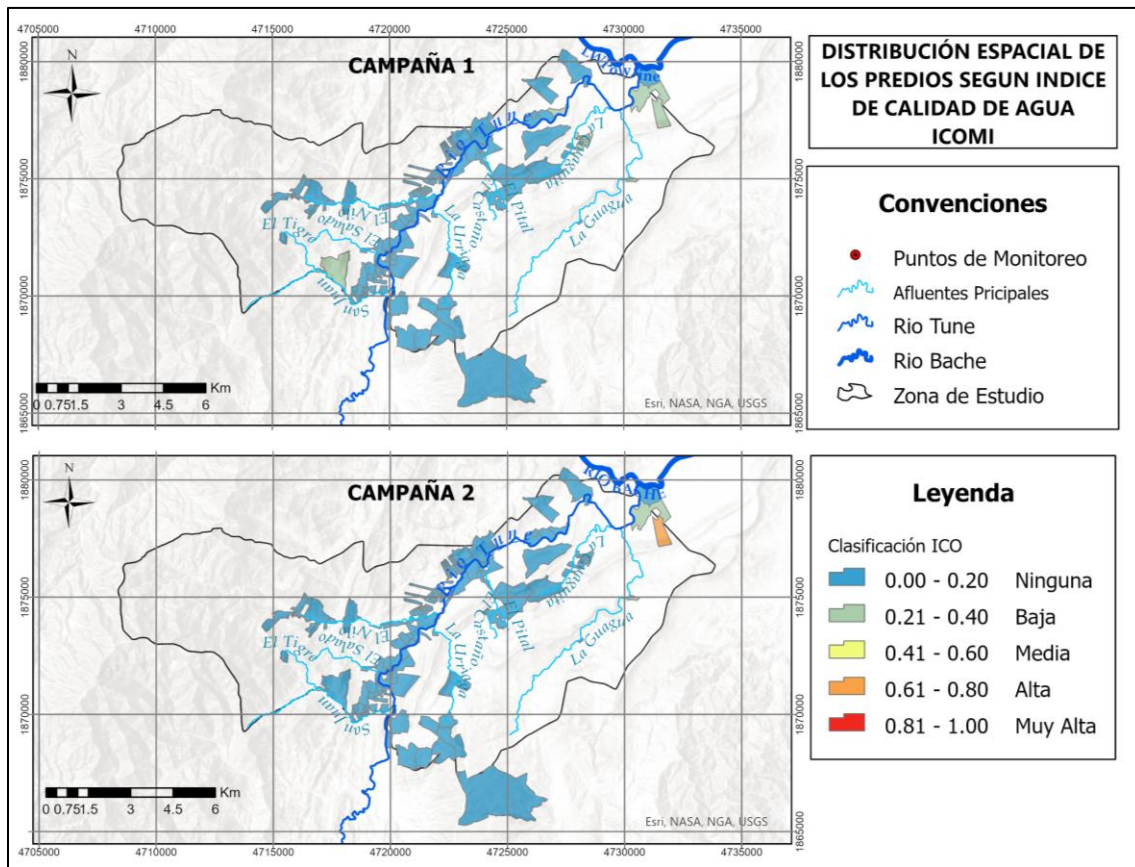


Figura 18. Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua ICOMI

El índice de calidad de agua ICOMO presenta un incremento en los predios localizados en el margen izquierdo del rio Tune, para la campaña de monitoreo 2; comportamiento contrario se evidencia en la zona alta del área de estudio donde se reduce el índice ICOMO pasando de Muy alta, alta y media a ninguna, esta tendencia se presenta también en los predios localizados sobre la quebrada El Nilo.

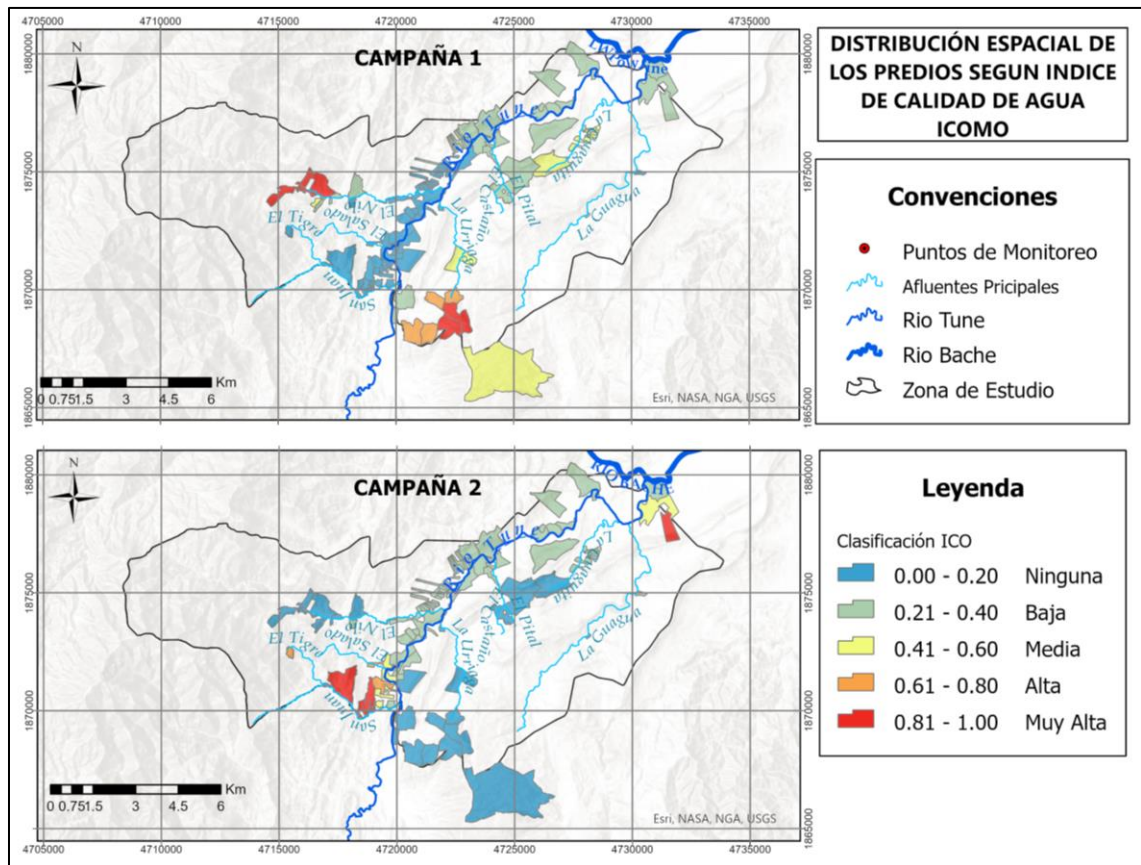


Figura 19, Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua ICOMO.

El índice ICOPH presenta una variabilidad marcada entre la campaña 1 y la campaña 2, se observa el incremento del índice en los predios durante la campaña dos pasando de no presentar contaminación a tener niveles altos, este incremento puede verse afectado por la temporada de lluvia.

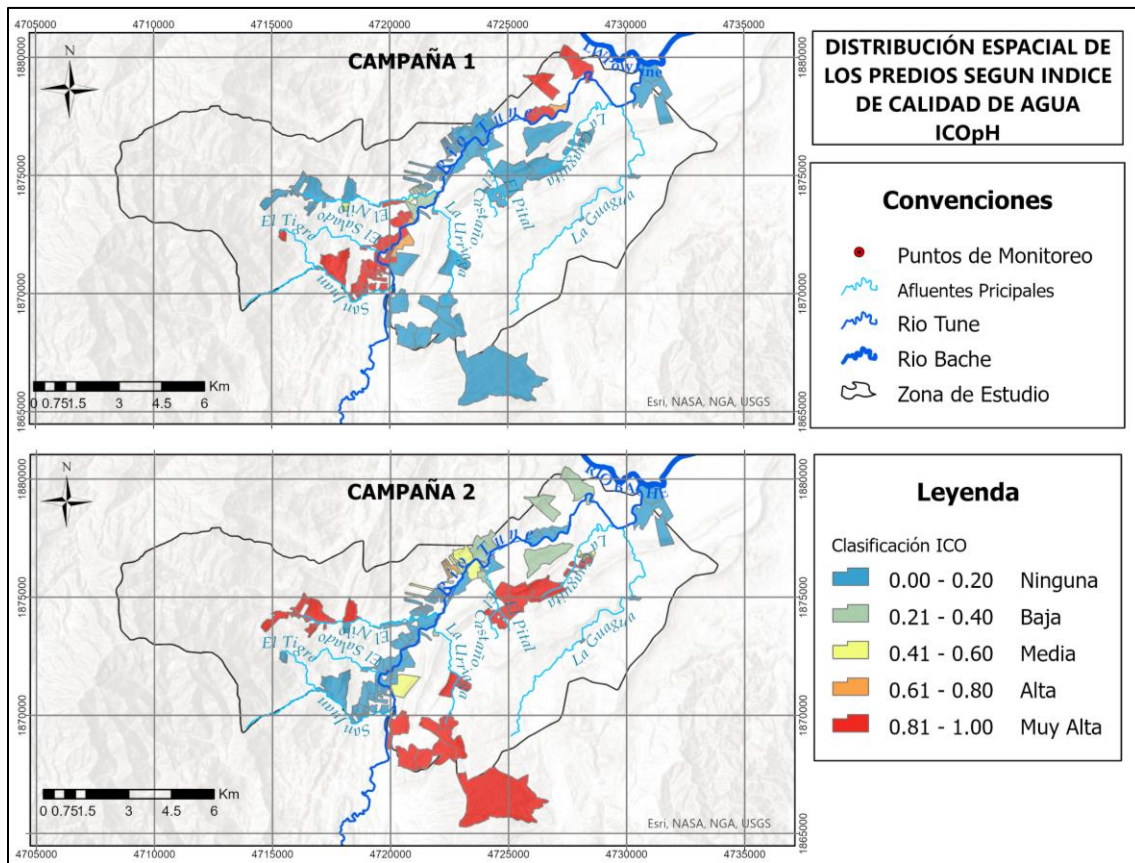


Figura 20. Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua ICOpH

El índice ICOSUS presenta una variabilidad muy marcada entre las dos campañas de monitoreo, registrando predios con un mayor índice ICOSUS en el margen derecho del río Tune durante la temporada seca, por el contrario, la mayoría de los predios registran un índice nulo para la temporada de lluvia que corresponde a la campaña de monitoreo 2.

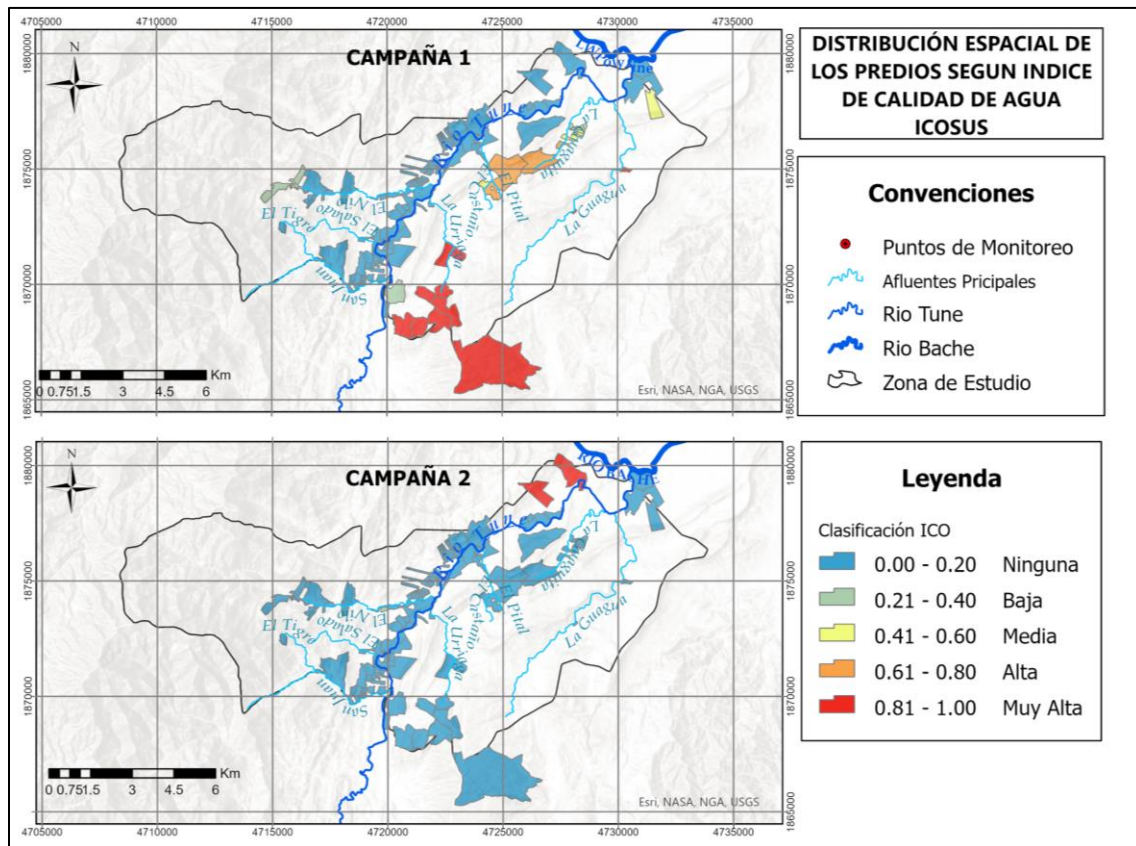


Figura 21. Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua ICOSUS

La zona alta del área de estudio es la que presenta mayor nivel de contaminación según el índice de calidad IPPH, esta tendencia se evidencia tanto en la campaña 1 como en la campaña 2, con niveles más bajos en la zona baja también presenta contaminación entre ligeramente contaminada y moderadamente contaminada. Por otro lado, los predios localizados sobre la quebrada San Juan, La Guaguita y El Pital presentan agua muy limpia en ambas campañas de monitoreo.

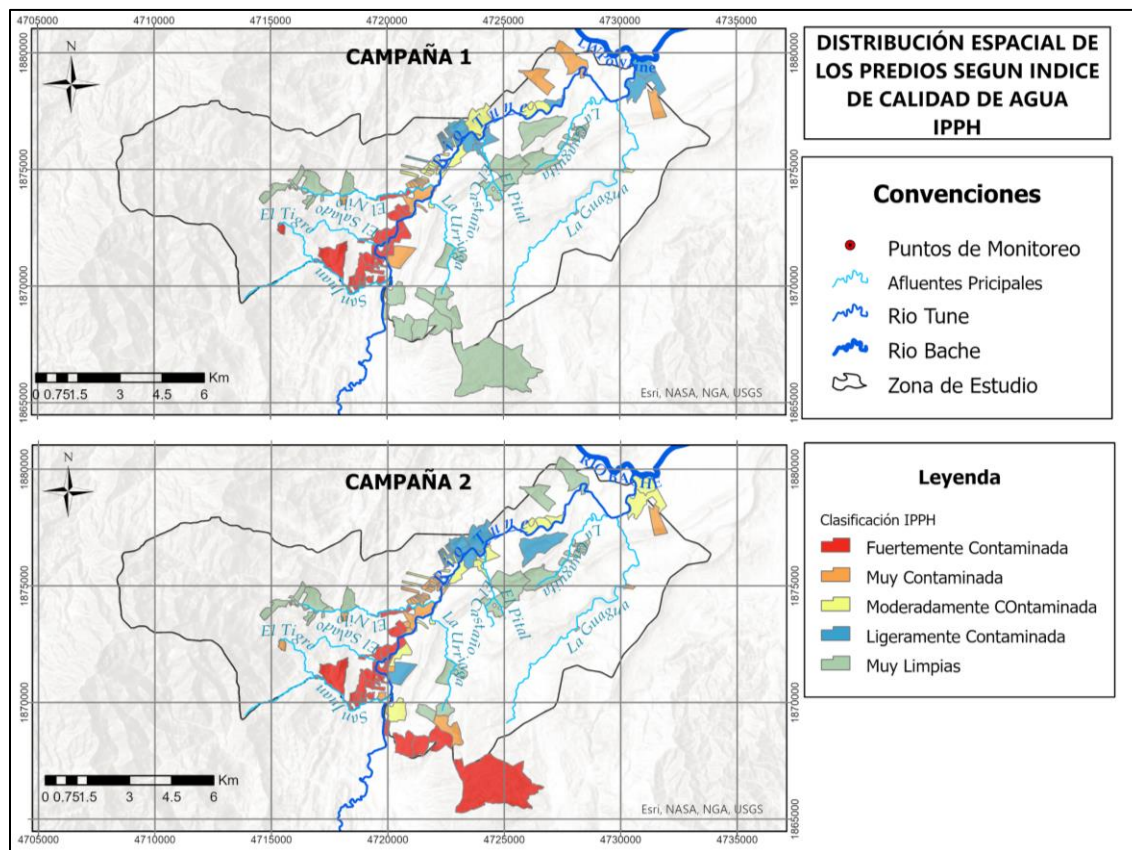


Figura 22. Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua IPPH. Este índice presenta en la mayoría de los predios una clasificación negativa, entre Crítica y Muy crítica, este comportamiento se presenta en las dos campañas de monitoreo, solo en la zona sur oriente del área de estudio se presenta una calidad buena del agua.

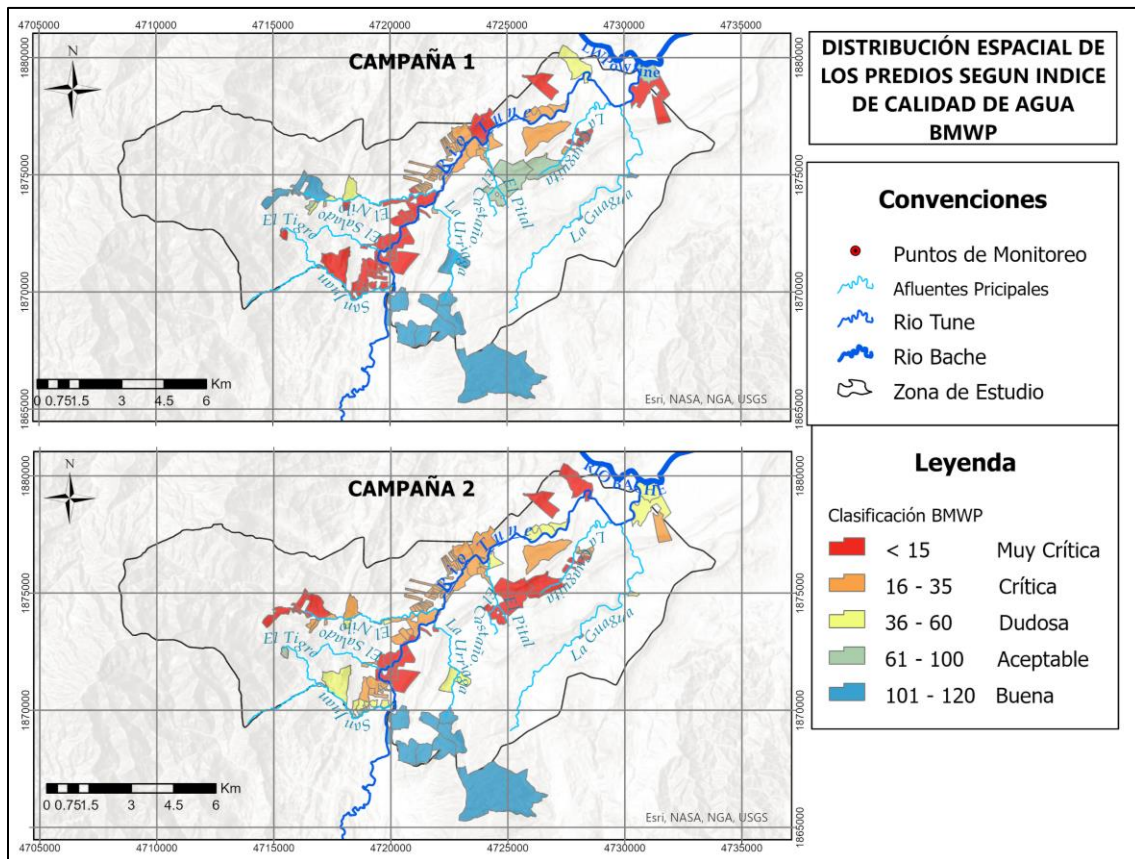


Figura 23. Distribución espacial de los predios según índice de calidad de agua BMWP

• **Análisis de Varianza (ANOVA)**

Con el fin de determinar si el tipo de actividad afecta los índices de calidad de agua se realizó un análisis de varianza para cada campaña de monitoreo. En la Tabla 90, se aprecia como el índice ICOMI presenta un valor P igual a 0.02 el cual es menor que el nivel de significancia 0.05, rechazando de esta manera la hipótesis nula, por lo cual nos indica que existe diferencia significativa entre los grupos.

Para el caso de los otros índices, debido que sus valores P son mayores que el nivel de significancia, podemos afirmar que con la información analizada no existe diferencia entre los grupos establecidos por lo cual no hay un efecto significativo del tipo de actividad sobre la calidad de agua. Finalmente, debemos resaltar el resultado obtenido para el índice BMWP, el cual tiene un valor P de 0.08, un valor cerca de 0.05, por lo cual indica que presenta una tendencia hacia la significancia, por lo tanto, para poder determinar si existe afectación del tipo de actividad sobre el índice BMWP, se considera se debe realizar un estudio con un número de muestras mayor.

Tabla 90. Resultados ANOVA campaña 1

Índice	Grados de libertad (Df)	Suma de Cuadrados (Sum Sq)	Cuadrado Medio (Mean Sq)	Valor F	Valor P	Evaluación Hipótesis
ICA_1	3	0.025271	0.008424	0.368343	0.78	Se Acepta Ho
ICOMI_1	3	0.04008	0.01336	3.299911	0.02	Se Rechaza Ho
ICOMO_1	3	0.264739	0.088246	1.127374	0.34	Se Acepta Ho
ICOpH_1	3	0.313053	0.104351	0.608661	0.61	Se Acepta Ho
ICOSUS_1	3	0.326032	0.108677	1.450491	0.23	Se Acepta Ho
IPPH_1	3	63.54026	21.18009	1.16398	0.33	Se Acepta Ho
BMWP_1	3	19229.64	6409.879	2.308832	0.08	Se Acepta Ho

Como resultado de la Prueba de Tukey se puede afirmar que no existe diferencia significativa entre los diferentes tipos de actividades ya que en primer lugar se aprecia que el intervalo de confianza presenta valores de cero, lo que es un indicativo de que no hay diferencia significativa entre los grupos, adicionalmente al comparar el valor de P ajustado con el nivel de significancia

de 0.05, evidenciamos que todo los valores superan este valor, por lo cual no hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula.

Tabla 91. Resultados Prueba de Tukey para índice ICOMI

Tipo de Actividad	Diferencia entre las medias	Límite Inferior del intervalo de confianza	Limite Superior del intervalo de confianza	Valor P ajustado
2-1	0.08	-0.09	0.25	0.60
4-1	0.05	-0.12	0.22	0.85
5-1	0.12	-0.06	0.31	0.31
4-2	-0.03	-0.06	0.00	0.08
5-2	0.04	-0.04	0.13	0.54
5-4	0.07	-0.01	0.16	0.14

Para la campaña dos se aplicó el mismo procedimiento, obteniendo la Tabla 92 como resultado. Podemos observar que para este caso también solo un índice presenta diferencia significativa entre los tipos de actividad, con un valor P de 0.01, el índice BMWP, es el único índice que presenta afectación por el tipo de actividad económica en temporada de lluvia.

Tabla 92. Tabla 93. Resultados ANOVA campaña 2

Índice	Grados de libertad (Df)	Suma de Cuadrados (Sum Sq)	Cuadrado Medio (Mean Sq)	Valor F	Valor P	Evaluación Hipótesis
ICA_2	3	0.007481	0.002494	0.22706	0.88	Se Acepta Ho
ICOMI_2	3	0.027595	0.009198	2.257177	0.08	Se Acepta Ho
ICOMO_2	3	0.310507	0.103502	1.812406	0.15	Se Acepta Ho
ICOpH_2	3	1.238762	0.412921	2.531388	0.06	Se Acepta Ho
ICOSUS_2	3	0.039678	0.013226	0.939887	0.42	Se Acepta Ho
IPPH_2	3	12.11586	4.038622	0.264048	0.85	Se Acepta Ho
BMWP_2	3	14593.97	4864.658	4.243837	0.01	Se Rechaza Ho

Con el objetivo de verificar los resultados se aplicó la prueba de Tukey para el índice BMWP, como resultado de esta prueba se presenta la Tabla 94, la cual se aprecia que la comparación entre las actividades 2 (Agrícola) y la actividad 1 (Acuícola) presenta un valor P ajustado menor que el nivel de significancia al igual que la comparación entre las actividades 4 (Pecuario) y la actividad 1 (Acuícola). De manera más detallada observamos que la diferencia entre las medias de las actividades 2 y 1 es de -101,77 lo cual nos indica que la media del índice BMWP de la actividad 2 es significativamente menor que la media del nivel 1, estas dos actividades presentan diferencias significativas en su índice de BMWP, ya que presenta un valor de P de  $0.02 < 0.05$ , presentando la actividad 2 un impacto negativo en el índice BMWP. De igual manera, la comparación entre la actividad 4 y la actividad 1 presentan un valor P ajustado de 0,45, siendo menor que el nivel de significancia, por lo cual estos niveles presentan diferencias significativas entre sí; también, se analiza la diferencia entre las medias la cual es igual a -90.11, presentado el mismo comportamiento de la comparación 2-1, en este caso la actividad 4 presenta un valor medio de BMWP menor que la actividad 1, indicando que presenta un impacto negativo sobre la calidad del BMWP.

Tabla 94. Resultados Prueba de Tukey para índice BMWP

Tipo de Actividad	diferencia entre las medias	Límite Inferior del intervalo de confianza	Limite Superior del intervalo de confianza	Valor P ajustado
2-1	-101.77	-190.48	-13.06	0.02
4-1	-90.11	-179.10	-1.12	0.05
5-1	-79.56	-178.10	18.97	0.16
4-2	11.66	-4.29	27.62	0.23
5-2	22.21	-23.00	67.42	0.58
5-4	10.55	-35.21	56.31	0.93

## 8. Conclusiones

Con el presente estudio se ha logrado identificar la importancia de las actividades productivas en la zona de estudio, destacando que estas son la fuente principal de ingresos económicos para los usuarios del recurso hídrico del río Tune. Sin embargo, es fundamental ser conscientes que estas actividades, se deben desarrollar con buenas prácticas que permitan reducir impactos ambientales significativos en el ecosistema.

Se determinó que la actividad que más predomina en la zona de estudio es la agricultura, contando que la mayoría de los predios estudiados. Dentro de esta categoría, se destacan cultivos como arroz, cacao y cítricos, que son fundamentales tanto para el sustento local como para la economía regional. Como segundo tipo de actividad, se encuentra la pecuaria, en la cual los predios se dedican principalmente a la actividad bovina. Esto sugiere una dependencia significativa de esta actividad, lo que puede aumentar la presión sobre los recursos hídricos y el medio ambiente si no se gestionan adecuadamente. Por su parte, la presencia de actividades acuícolas y pesqueras en la zona es muy mínima, lo que indica una oportunidad para diversificar las fuentes de ingresos y promover un uso más sostenible de los recursos hídricos.

La red de monitoreo establecida se distribuyó a lo largo del cauce principal del río Tune y en sus principales afluentes, cada punto de muestreo se localizó en áreas estratégicas, lo que permitió obtener un panorama completo de la situación hídrica en términos de calidad de agua en el tramo analizado, identificando las zonas más vulnerables a la contaminación y las áreas con mejor conservación del recurso hídrico, así como también las fuentes de contaminación que más se presentan en la zona.

De acuerdo con el proceso de caracterización de la zona de estudio y establecimiento de los puntos de monitoreo, se identificó que la contaminación de manera puntual y difusa se concentra en la zona baja del área de estudio, debido a los vertimientos correspondientes de uso doméstico y las plantas de tratamiento de aguas residuales tanto del municipio como del matadero municipal. De igual manera, se identificó que la zona media presenta contaminación de los cuerpos Hídricos principalmente por las actividades agrícolas y en menor grado por las actividades pecuarias.

Las estaciones de monitoreo propuestas sirven de guía para el establecimiento de una red de monitoreo completa para toda la cuenca hidrográfica del Río Tune. Asimismo, la metodología utilizada sirve como modelo para aplicar en las otras cuencas que hacen parte de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena – CAM, contribuyendo así a una gestión más eficiente y sostenible de los recursos hídricos de la región.

En cuanto al índice de calidad del agua ICA propuesto por el IDEAM, el cual tiene en cuenta las concentraciones de los parámetros Oxígeno Disuelto, Coliformes Fecales, pH, Demanda Química de Oxígeno – DQO, Sólidos Suspendidos Totales – SST, Conductividad y la relación entre el Nitrógeno Total y el Fosforo Total se obtuvo que, en el tramo de estudio del Río Tune durante la primera campaña el índice de calidad osciló entre aceptable y regular en la mayoría de los puntos, siendo regular en los puntos C08, C11, C05, C06, C07 y C09 debido a la presencia de vertimientos de tipo industrial, durante la segunda campaña se logró evidenciar un comportamiento similar en la mayoría de los puntos a excepción del punto C10, el cual presentó una clasificación mala debido a la ubicación colindante con la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales provenientes del Centro de sacrificio animal del municipio, por tanto, las cargas

contaminantes que inciden en las características del tramo en estudio son debido a actividades diferentes a las contempladas para el presente estudio tanto para la campaña 1 como para la campaña 2, siendo en este caso las de tipo industrial.

En cuanto a los índices de contaminación ICO's los cuales presentan ventajas al ser más económicos por la utilización de un número menor de variables y al permitir determinar puntualmente el tipo de contaminación presentada, se tiene que en el índice de contaminación por materia Orgánica el cual depende de la concentración de la Demanda Biológica de Oxígeno – DBO5, Coliformes Totales y el Porcentaje de Saturación de Oxígeno durante ambas campañas de monitoreo se presentó una clasificación que osciló entre Ninguna y Baja contaminación a excepción del punto C10, el cual presentó clasificación Alta en las dos campañas, evidenciando una vez más que la calidad del agua que discurre sobre el tramo de análisis que va desde el kilómetro 15.64 hasta la desembocadura al Río Baché es debido a los vertimientos de tipo industrial más no a los de tipo agropecuarios, por ende, los usos contemplados no inciden en las características que presenta el Río Tune.

El índice de contaminación por mineralización ICOMI el cual contempla los resultados obtenidos en la Conductividad Eléctrica, la Dureza Total y la Alcalinidad arrojó una variación del nivel de contaminación en los puntos A06, A07, A08, C05, C06 y C11 con respecto a los demás puntos de monitoreo durante la primera campaña presentando una clasificación baja, la calidad de estos índices se vio afectada principalmente por vertimientos agrícolas, seguido por vertimientos domésticos, para la segunda campaña se redujo el número de puntos afectados, registrando solo los puntos A06, A07 y A08, los cuales presentan las mismas fuentes de afectación. Sin embargo, los valores no fueron significativos para hablar de contaminación

mineral, debido a que la mayoría de los puntos se encontraron por debajo de 0,2 adicionalmente, se vieron influenciados por la conductividad eléctrica ya que la dureza y la alcalinidad fueron muy bajas.

En cuanto a los índices de contaminación empleados tales como el ICOSUS, ICOpH se presentaron niveles bajos de contaminación de tipo orgánica, mineral y por sólidos suspendidos, a su vez, se evidenciaron que las cargas contaminantes registradas son ocasionadas por diferentes factores, el más relevante para la campaña 1, se presentó en el punto C09 con una clasificación Alta en la concentración de pH, punto que se localiza en el vertimiento de las aguas provenientes de la planta de tratamiento, presentando una contaminación de origen doméstico, comportamiento similar se presenta en el punto C08, este punto se localiza aguas abajo de vertimientos agrícola y de vertimientos difusos de origen doméstico, por otro lado, para la campaña 2 se presentó en el punto A01 una clasificación Alta en la concentración de pH, este parámetro presentó afectación por vertimientos difusos de la actividad agrícola.

Se evidenció que los índices de calidad de agua estudiados presentan una correlación entre ellos, una correlación positiva para los índices ICOpH, ICOMI y IPPH y una correlación inversa para los índices ICOSUS, BMWP, ICA y ICOMO, este comportamiento se debe a que los índices comparten parámetros de estudio, como pH, materia orgánica, sólidos solubles entre otros, De igual manera, se determinó que a pesar de presentar correlación positiva y debido a la representación de la variabilidad de los datos todas las variables son importantes para realizar un estudio completo de la calidad de agua del río Tune.

Se estableció que no existen diferencias significativas entre la media de los índices de calidad (ICA, ICOMO, ICOSUS, ICOpH, IPPH y BMWP) para cada tipo de actividad durante la

temporada seca (Primera campaña de monitoreo), esto sugiere que no hay un impacto significativo de las actividades productivas en la calidad del agua durante este período. Esta tendencia se debe a que, durante la temporada seca, los vertimientos difusos provenientes de las actividades productivas tienden a reducirse debido al aumento de la demanda del recurso hídrico disminuyendo así el impacto sobre la calidad de las fuentes hídricas.

El índice ICOMI mostró una diferencia significativa en el valor medio del índice durante la campaña de monitoreo 1. No obstante, al realizar un análisis más detallado no se presentaron diferencias significativas entre los grupos, por lo cual dichos resultados no son concluyentes, razón por lo que se requiere un análisis más profundo que permita evaluar otras variables que puedan afectar la calidad del índice y un mayor número de muestras. Es de gran importancia considerar factores como condiciones climáticas detalladas, actividades industriales, recreativas, entre otras que pueda afectar los resultados de calidad, así como también incrementar los puntos de monitoreo para contar con mayor información de la zona.

Durante la campaña de monitoreo 2, coincidente con la temporada de lluvias, se observó que las actividades agrícolas y pecuarias tienen un impacto significativo en los niveles del índice BMWP. La calidad del agua, reflejada en este índice, se ve afectada principalmente por la concentración de residuos de agroquímicos provenientes del cultivo de arroz, lo que deteriora las condiciones para el desarrollo de los macroinvertebrados. Asimismo, la presencia de desechos bovinos en las zonas aledañas a la fuente hídrica genera una alteración en el índice, ya que estos desechos pueden influir en el mismo a través de vertimientos directos y difusos de agua de escorrentía sobre el cauce del río y su afluente.

## 9.Recomendaciones

Se recomienda implementar una red de monitoreo más amplia que abarque todos los afluentes principales e incluya variables externas, como los usos industriales, recreativos, domésticos y condiciones climáticas. Así como también, se sugiere monitorear la cantidad del recurso hídrico, ya que esto puede alterar las concentraciones de contaminantes en el río en época de bajo caudal. Esta red de monitoreo deberá realizarse continuamente de manera que permita evaluar la variación temporal y estacional de los índices.

Aunque no se observa un impacto significativo en los índices de calidad del agua por parte de las actividades productivas, es importante implementar prácticas de manejo y recolección de residuos agrícolas y pecuarios, así como también un plan de tratamiento de aguas residuales provenientes de estas actividades. De igual manera, implementar prácticas sostenibles en las actividades productivas, con el objetivo de mitigar los impactos ambientales y garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales a largo plazo.

El uso de tecnologías avanzadas, como sensores en tiempo real y sistemas de información geográfica (SIG), puede mejorar la precisión y rapidez de la recopilación de datos. Asimismo, es crucial involucrar a las autoridades locales, organizaciones ambientales y comunidades afectadas para garantizar una gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos.

## 10. Referencias

- Ahmed, U., Mumtaz, R., Anwar, H., Mumtaz, S., & Qamar, A. M. (2020). Water quality monitoring: From conventional to emerging technologies. *Water Supply*, 20(1), 28-45. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.144>
- Al-Madhhachi, A.-S. T., Rahi, K. A., & Leabi, W. K. (2020). Hydrological Impact of Ilisu Dam on Mosul Dam; the River Tigris. *Geosciences*, 10(4), 120. <https://doi.org/10.3390/geosciences10040120>
- Álvarez-Rogel, Y., & Conesa García, C. (2018). Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España). *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 101-118. <https://doi.org/10.21138/GF.536>
- Balakrishnan, P. (2011). Groundwater quality mapping using geographic information system (GIS): A case study of Gulbarga City, Karnataka, India. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 5(12). <https://doi.org/10.5897/AJEST11.134>
- Beita-Sandí, W., & Barahona-Palomo, M. (2010). Físico-química de las aguas superficiales de la Cuenca del río Rincón, Península de Osa, Costa Rica. *UNED Research Journal*, 2(2), 157-179. <https://doi.org/10.22458/urj.v2i2.156>
- Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D., & Ramos, S. (2018). Determinación de calidad de agua en el Lago Vichuquén, con imágenes de satélite Landsat 8, sensor OLI, año 2016, Chile. *Revista de Teledetección*, 52, 67. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.10126>

- 
- Buzai, G., & Baxendale, C. (2010). *Análisis Espacial con Sistemas de Información geográfica. Aportes de la geografía para la elaboración del diagnóstico en el ordenamiento territorial*. Congreso Internacional sobre Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica, Argentina.
- Buzai, G., & Montes Galbán, E. (2021). *Estadística Espacial: Fundamentos y aplicación con Sistemas de Información Geográfica* (1a ed.). Impresiones Buenos Aires.  
<https://revistasipgh.org/index.php/rcar/article/view/1388>
- Caho-Rodríguez, C. A., & López-Barrera, E. A. (2017). Determinación del Índice de Calidad de Agua para el sector occidental del humedal Torca-Guaymaral empleando las metodologías UWQI y CWQI. *Producción + Limpia*, 12(2), 35-49.  
<https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a3>
- Calixto, N., Becerra Moreno, D., & Cárdenas-Gutiérrez, J. (2023). *Causas y consecuencias de la contaminación de aguas* (Primera). Ediciones Nueva Jurídica.
- Calvi, C. M., Dapeña, C., & Martínez, D. E. (2018). Fondo actual de nitrato como metodología en la relación agua superficial – subterránea aplicado en el sudeste Bonaerense, Argentina. *DYNA*, 85(207), 288-296. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.72543>
- Calvo-Brenes, G. (2019). Nuevo índice para valorar la calidad de aguas superficiales en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i4.4796>
- CAM. (2016). *Evaluación Regional del Agua Superficial—ERA*. Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena – CAM. [https://pirma.cam.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/ERA\\_Huila\\_2016.pdf](https://pirma.cam.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/ERA_Huila_2016.pdf)

- 
- Camacho Botero, L. A. (2020). La paradoja de la disponibilidad de agua de mala calidad en el sector rural Colombiano. *Revista de Ingeniería, 49*, 38-51.  
<https://doi.org/10.16924/revinge.49.6>
- Castañeda Villanueva, A. A., Flores López, H. E., & Cuevas-Villanueva, R. A. (2019). Diagnóstico de la calidad de las aguas superficiales en la región de Los Altos Norte de Jalisco, México. *Acta Universitaria, 28*(6), 1-13. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1843>
- Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA. (2017). *Informe de Avance, Misión Crecimiento Verde* (p. 243). Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA.
- Cerón-Vivas, A., & Peñuela Mesa, G. A. (2024). Environmental risk assessment of pharmaceutical pollutants in the Oro River Sub-basin (Colombia). *Environmental Research, 252*, 118951. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118951>
- Chacha, M. E. C., & Zambrano, P. V. M. (2022). *Evaluation of water quality through the identification of benthic macroinvertebrates, in the Arapicos River. 7*(7).
- Charles, A. C., Armstrong, A., Nnamdi, O. C., Innocent, M. T., Obiageri, N. J., Begianpuye, A. F., & Timothy, E. E. (2024). Review of Spatial Analysis as a Geographic Information Management Tool. *American Journal of Engineering and Technology Management*.  
<https://doi.org/10.11648/j.ajetm.20240901.12>
- Chigbu, U. E., Paradza, G., Nghitevelekwa, R. V., & Klaus, M. (2024). Current research and opinion on land governance for societal development in and on the global south. *Land Use Policy, 141*, 107112. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107112>

- 
- Cian, U., Frezzia, S., Protti, L., Quignard, I., Zamboni, P., & Sione, W. (2020). *Utilización de geoinformación en la cuenca del arroyo Ensenada (entre rios, Argentina): Aportes para la gestión territorial*.
- Conceição, K. Z. D., Boas, M. A. V., Sampaio, S. C., Remor, M. B., & Bonaparte, D. I. (2018). Statistical control of the process applied to the monitoring of the water quality index. *Engenharia Agrícola*, 38(6), 951-960. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n6p951-960/2018>
- Construcsuelos Suministros. (2023). *Informe técnico de monitoreos y análisis fisicoquímico, microbiológico e hidrobiológicos de agua superficial y agua residual doméstica*. (p. 68).
- Cornare. (2021). *Determinación de la Calidad Ecológica del río Negro y Afluentes con base en la comunidad de macroinvertebrados acuáticos, ficoperifiton, macrofitas y peces*. Corporación Académica Ambiental Universidad de Antioquia.
- Corrales Ramírez, L. C., Santamaria Mosquera, Y. N., Luccioli Peña, D. A., & Castañeda Casas, M. A. (2021). Evaluación de la calidad del agua de la vereda Río Suárez de Puente Nacional, Santander. *Nova*, 19(37), 79-98. <https://doi.org/10.22490/24629448.5497>
- Dadi, D., Mengistie, E., Terefe, G., Getahun, T., Haddis, A., Birke, W., Beyene, A., Luis, P., & Van Der Bruggen, B. (2018). Assessment of the effluent quality of wet coffee processing wastewater and its influence on downstream water quality. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 18(2), 201-211. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.10.007>
- DANE. (2022). *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de Todas las Actividades Económicas, Revisión 4* (p. 683). Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

- 
- Derbalah, A., Chidya, R., Jadoon, W., & Sakugawa, H. (2019). Temporal trends in organophosphorus pesticides use and concentrations in river water in Japan, and risk assessment. *Journal of Environmental Sciences*, 79, 135-152.  
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.11.019>
- DNP. (2022). *Recuperación de cobertura vegetal en áreas disturbadas* [Proyecto]. Departamento Nacional de Planeación.
- Donato-Rondón, J. C. (2022). *Decálogo de impactos ambientales: Geografía de las transformaciones en sistemas acuáticos de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ewaid, S., Abed, S., Al-Ansari, N., & Salih, R. (2020). Development and Evaluation of a Water Quality Index for the Iraqi Rivers. *Hydrology*, 7(3), 67.  
<https://doi.org/10.3390/hydrology7030067>
- FAO. (2018). *More people, more food, worse water? A global review of water pollution from agriculture*. International Water Management Institute.
- FAO. (2020). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2020, Superar los desafíos relacionados con el agua en la agricultura*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1447es>
- FAO. (2022). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021 – Systems at breaking point*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9910en>
- Fernández-Rodríguez, M., & Guardado-Lacaba, R. M. (2021). Evaluación del Índice de Calidad del Agua (ICAsup) en el río Cabaña, Moa-Cuba. *Minería y Geología*, 37(1), 105-119.
- Fornari, M. R., Camotti Bastos, M., De Medeiros Silveira, F., Paranhos Rosa De Vargas, J., Fernandes, G., Santanna Dos Santos, M. A., & Rheinheimer Dos Santos, D. (2018).

- Efluentes urbanos na água do Rio Marau (Brasil). *Bitácora Urbano Territorial*, 28(3), 121-130. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v28n3.68152>
- García, S. L., Arguello, A., Parra, R., & Pincay Pilay, M. (2019). Factores que influyen en el pH del agua mediante la aplicación de modelos de regresión lineal. *INNOVA Research Journal*, 4(2), 59-71. <https://doi.org/10.33890/innova.v4.n2.2019.909>
- Gule, T. T., Lemma, B., & Hailu, B. T. (2023). Implications of land use/land cover dynamics on urban water quality: Case of Addis Ababa city, Ethiopia. *Heliyon*, 9(5), e15665. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15665>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación* (5a edición). McGrawHill.
- Hernández-Moreno, M. M., Téllez Valdés, O., Martínez Meyer, E., Islas-Saldaña, L. A., Salazar-Rojas, V. M., & Macías-Cuéllar, H. (2021). Distribución de la cobertura vegetal y del uso del terreno del municipio de Zapotitlán, Puebla, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92(0), 923649. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2021.92.3649>
- Hu, H., Tian, G., Wu, Z., & Xia, Q. (2023). Cross-regional ecological compensation under the composite index of water quality and quantity: A case study of the Yellow River Basin. *Environmental Research*, 238, 117152. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117152>
- IAEA. (2023). *Gestión del agua con fines agrícolas*. Organismo Internacional de Energía Atómica. Gestión del agua con fines agrícolas
- Ibana-Lopez, K., Sihuay-Perales, M., Garate-Quispe, J., Araújo-Florez, J., Herrera-Machaca, M., Alarcón Aguirre, G., & Rodriguez-Achata, L. (2021). Contaminación de agua superficial de la periferia urbana de Puerto Maldonado, al sureste de la amazonia peruana. *Revista de*

- Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(6), e20365.  
<https://doi.org/10.15381/rivep.v32i6.20365>
- IDEAM. (2020). *Hoja metodológica del Índice de calidad de agua (Versión 1,1)*. (p. 12 p.).  
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- IDEAM. (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*. Ideam.
- Iglesias, G. Y., & Basílico, G. O. (2022). *Uso del suelo y calidad del agua en la cuenca del Arroyo las Piedras, RMBA*.
- Instituto Nacional de Salud, M. L. O. (2020). *Boletín de Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano* (p. 29).
- Jiménez-González, D. M., Murillo-García, K., & Ríos-Pulgarín, M. I. (2021). Caracterización físicoquímica e hidrobiológica de tres ecosistemas kársticos de la cuenca del río Magdalena (Antioquia, Colombia) durante el ciclo hidrológico 2016-2017. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.  
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.1260>
- Kaplan, G., & Avdan, U. (2017). Object-based water body extraction model using Sentinel-2 satellite imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 137-143.  
<https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1297540>
- Koncagül, E., & Connor, R. (2023). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023, Alianzas y cooperación por el agua*. UNESCO. [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384659\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384659_spa)
- Kowe, P., Ncube, E., Magidi, J., Ndambuki, J. M., Rwasoka, D. T., Gumindoga, W., Maviza, A., De Jesus Paulo Mavaringana, M., & Kakanda, E. T. (2023). Spatial-temporal variability

- analysis of water quality using remote sensing data: A case study of Lake Manyame. *Scientific African*, 21, e01877. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01877>
- Larrea Murrel, J. A., Romeu Alvarez, B., Lugo Moya, D., & Rojas Badía, M. M. (2022). Aspectos fundamentales del monitoreo de calidad de las aguas: El río almendares como caso de estudio. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 53(2), 148-159.
- Lateef, Z. Q., Al-Madhhachi, A.-S. T., & Sachit, D. E. (2020). Evaluation of Water Quality Parameters in Shatt AL-Arab, Southern Iraq, Using Spatial Analysis. *Hydrology*, 7(4), 79. <https://doi.org/10.3390/hydrology7040079>
- Leija, E. G., Mendoza, M. E., Rodríguez-Soto, C., López-Granados, E., & Salinas-Melgoza, V. (2023). Análisis espacial de los cambios en la cobertura vegetal y conectividad estructural del paisaje del bosque de niebla en el Occidente de México. *Revista de geografía Norte Grande*, 86, 0-0. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022023000300109>
- Lesmes, A. R., Lázaro Palacio, L. R., Tautiva Merchán, L. A., Villota Caicedo, C. P., Galvis Rojas, M. D. M., Molano Bernal, L. C., Santana Medina, J. J., Amado Saavedra, G. M., Lores Medina, A., Tovar Bohórquez, M. O., Zúñiga Reyes, S. A., Riomaña Trigueros, O. F., & Tibaduiza Castañeda, L. P. (2019). *Marco Nacional de Cualificaciones Colombia. Área de Cualificación Agropecuaria (Primera)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.institutional.7403138>
- Levin, J. C., Curtis, C. J., & Woodford, D. J. (2024). A multi-spatial scale assessment of land-use stress on water quality in headwater streams in the Platinum Belt, South Africa. *Science of The Total Environment*, 927, 172180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172180>

ley 99 de 1993 (30 de diciembre de 1993).

Li, H., Smith, C. D., Wang, L., Li, Z., Xiong, C., & Zhang, R. (2019). Combining Spatial Analysis and a Drinking Water Quality Index to Evaluate Monitoring Data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(3), 357.

<https://doi.org/10.3390/ijerph16030357>

Liu, J., Cade-Menun, B. J., Yang, J., Hu, Y., Liu, C. W., Tremblay, J., LaForge, K., Schellenberg, M., Hamel, C., & Bainard, L. D. (2018). Long-Term Land Use Affects Phosphorus Speciation and the Composition of Phosphorus Cycling Genes in Agricultural Soils. *Frontiers in Microbiology*, *9*, 1643.

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01643>

López Mendoza, S., Huertas Pineda, D. F., Jaramillo Londoño, Á. M., Calderón Rivera, D. S., & Díaz Arévalo, J. L. (2022). Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua del río Teusacá (Cundinamarca, Colombia). *Ingeniería y Desarrollo*, *37*(02), 269-288. <https://doi.org/10.14482/inde.37.2.6281>

Ma, B., Wu, C., Jia, X., Zhang, Y., & Zhou, Z. (2023). Predicting water quality using partial least squares regression of land use and morphology (Danjiangkou Reservoir, China).

*Journal of Hydrology*, *624*, 129828. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129828>

Madrid Soto, A. G., & Ortiz López, L. María. (2005). *Análisis y síntesis en cartografía: Algunos procedimientos*. Universidad Nacional de Colombia.

Medrano Pérez, O. R., Payano Almánzar, R., & López-Jiménez, L. N. (2022). Caracterización geomorfológica e hidroclimatológica de la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, México. *Acta Universitaria*, *31*, 1-19. <https://doi.org/10.15174/au.2021.2846>

- 
- Moreno, E., & Grey, A. (2021). Determinación de índice de calidad del agua superficial a partir de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos en periodo seco y lluvioso, área recreativa del lago Gatún, provincia de Colón. *Actas del V Congreso de Investigación Desarrollo e Innovación de la Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología*, 152-165.  
<https://doi.org/10.47300/978-9962-5599-8-6-08>
- Murray, A. T. (2021). Spatial Analysis and Modeling: Advances and Evolution. *Geographical Analysis*, 53(4), 647-664. <https://doi.org/10.1111/gean.12263>
- Nuño-Velasco, R., Hernández Alvarez, E., NuñoRomero, R., & Morales Orozco, A. (2022). *Gestión de los recursos hídricos en apoyo a la producción agropecuaria y conservación forestal*. Amaya ediciones.
- ONU-Hábitat, & OMS. (2021). *Progresos en el tratamiento de las aguas residuales. Estado mundial y necesidades de aceleración del indicador 6.3.1. De los ODS*. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat) y Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Organización Mundial de la Salud. (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*.
- Perdomo, S., Ruiz, M. S., Walhmann, A., Ainchil, J. E., & Kruse, E. E. (2020). Problemática de nitratos en el agua subterránea de zonas urbanas: Caso de estudio Pergamino-Argentina. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 44-52.
- Pérez, L. J. M. (2011). *Manual para determinar la calidad del agua para riego agrícola*. facultad de Ciencias Agrícolas.
- Pizarro, F. (1985). *Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*. Agricultura Española.

---

Presidencia de la República. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales

Renovables y de Protección al Medio Ambiente., Pub. L. No. 2811 (1974).

Presidencia de la República. Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa

e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones, Pub. L. No. 2667 (2012).

Presidencia de la República. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de

1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos, Pub. L. No. 1594 (1984).

Presidencia de la República. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de

1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones, Pub. L. No. 3930 (2010).

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Por la cual se adopta el Plan Nacional de Cartografía

Básica de Colombia, Pub. L. No. 853 (2022).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Por la cual adoptan los Términos de Referencia

para la Elaboración del Plan de Gestión de Riesgo para el Manejo de Vertimientos, Pub. L. No. 1514 (2012).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Por la cual se adoptan disposiciones

relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas, Pub. L. No. 1207 (2014).

---

El Congreso de Colombia. Por la cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y protección al medio ambiente y se dictan otras disposiciones, Pub. L. No. 23, Artículo 1, 3 (1973).

El Congreso de Colombia. Por la cual se dictan Medidas Sanitarias, Pub. L. No. 9 (1979).

El Congreso de Colombia. Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua, Pub. L. No. 373 (1997).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones, Pub. L. No. 631 (2015).

El Congreso de Colombia. Por la cual se provee a la conservación del agua y se dictan otras disposiciones, Pub. L. No. 79 (1986).

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, & Ministerio de la Protección Social. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano, Pub. L. No. 2115 (2007).

Presidencia de la República. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, Pub. L. No. 1076 (2015).

Quinteros Carabalí, J. A., Gómez-García, J., Solano, M., Llumiquinga, G., Burgos, C., & Carrera-Villacrés, D. (2019). Evaluación de la calidad de agua para riego y aprovechamiento del recurso hídrico de la quebrada Togllahuayco. *Siembra*, 6(2), 046-057. <https://doi.org/10.29166/siembra.v6i2.1641>

- 
- Ramírez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). *Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación. 1.*
- Rice, E. W., Bridgewater, L., & American Public Health Association. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Vol. 10). American public health association.
- Rico Calvano, F., & Rico Fontalvo, H. M. (2014). El uso del suelo, ¿Un problema de capacidad productiva y de políticas públicas? *Revista Logos, Ciencia y tecnología*, 5(2), 213-231.
- Rincón-Bello, M. T., Soler-Romero, F. Y., Calderón-Rivera, D. S., & Sierra-Parada, R. J. (2021). *Macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores de calidad de agua en el río Chicú, Cundinamarca, Colombia Aquatic macroinvertebrates as water quality bioindicators in Chicú river, Cundinamarca, Colombia*. 31(1).
- Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009). *Análisis del agua*. Omega SA.
- Ruíz-Sevilla, G., & Ortiz-Paniagua, C. F. (2021). Implicaciones de la Producción de Aguacate en el Balance Hídrico desde una Perspectiva de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), 2011-2019. *Revista Cimexus*, 16(2), 11-35.  
<https://doi.org/10.33110/cimexus160201>
- Sandoval, J. J., Suarez, X., Molina, D. C., Fontecha-Tarazona, H. D., Aldaya, M., Campos, D. F., & Barreto, S. (2021). Estudio preliminar de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para el tratamiento de aguas superficiales del río Magdalena-Cuenca Alta y efectos del tratamiento combinado de filtro de arena y lámpara UV. *Ciencias Agropecuarias*, 7(2), 7-21.

- 
- Simanca, F., Rubiano Gárzon, D., Garrido Blanco, F., Hernández Carreño, P., Polo v, S., Romero, J., & Gómez-Charris, Y. (2020). Evaluation of water quality state through regulations and physicochemical indicators for the administration of water resources in the Integrated Management District of Salto del Tequendama. *Procedia Computer Science*, 177, 300-307. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.041>
- Strokal, M., & Kroeze, C. (2020). Water, society and pollution in an urbanizing world: Recent developments and future challenges. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 46, 11-15. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.10.003>
- Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2018). Development of a water quality index for rivers in West Java Province, Indonesia. *Ecological Indicators*, 85, 966-982. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.049>
- Ureta Valdez, R., Mendez, P., & Cazar, E. (2019). *Influencia de la zona urbana de Madcas en el Índice de Calidad de Agua del río Jurumbaino*. 3(3.1), 102-114.
- Vazquez, V. H. L., Plata, M. A. B., Mejía, M. C. C., Pérez, J. I. J., & Cedillo, J. G. G. (2015). Socioeconómicas en un área mazahua. *V o l.*
- Velázquez-Chávez, L. D. J., Ortiz-Sánchez, I. A., Chávez-Simental, J. A., Pámanes-Carrasco, G. A., Carrillo-Parra, A., & Pereda-Solís, M. E. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>

---

Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020).

Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua.

*Idesia (Arica)*, 38(4), 99-107. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099>

Wang, H., Xiong, X., Wang, K., Li, X., Hu, H., Li, Q., Yin, H., & Wu, C. (2023). The effects of land use on water quality of alpine rivers: A case study in Qilian Mountain, China.

*Science of The Total Environment*, 875, 162696.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162696>

Zhang, J., Li, S., Dong, R., Jiang, C., & Ni, M. (2019). Influences of land use metrics at multi-spatial scales on seasonal water quality: A case study of river systems in the Three

Gorges Reservoir Area, China. *Journal of Cleaner Production*, 206, 76-85.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.179>

## **A.Anexo: Carta de Aval**

Neiva, 24 de mayo de 2024



Señores

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES**

**Asunto:** Carta de aval

Por medio de la presente, la **FUNDACION DESARROLLO DE LAS INGENIERIAS Y LAS CIENCIAS DE LA SALUD PARA LA PROYECCIÓN SOCIAL "FUNDISPROS"** identificada con NIT 900.200.106 – 5, representada legalmente por **OSCAR EDUARDO GUTIERREZ OLAYA**, de manera atenta informa que:

1. Nuestra entidad tiene conocimiento y avala el desarrollo del trabajo de grado titulado **"Determinación del impacto de los usos del suelo para identificar la calidad del agua de un tramo del Rio Tune del Municipio de Palermo, Departamento del Huila"**, que adelantan las ingenieras **Paola Andrea Ramírez Quiroga, Natali García Betancurt y Camila Cerquera Valderrama**, en calidad de estudiantes del programa académico de **ESPECIALIZACION EN SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA** de la **UNIVERSIDAD DE MANIZALES**.

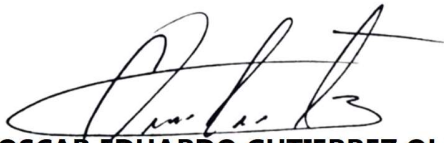
El mencionado proyecto, tiene como objetivo evaluar el impacto de los usos del suelo para identificar la calidad del agua del Rio Tune del municipio de Palermo, departamento del Huila en el tramo comprendido desde el kilometro 15 hasta su desembocadura en el rio Bache. Mediante este estudio, se busca identificar los principales factores que influyen en la degradación de la calidad del agua del rio Tune. Consideramos que los resultados obtenidos contribuirán significativamente en la concientización de la comunidad que integra la subcuenca del Rio Tune, así como en la implementación de prácticas de conservación sostenibles del recurso hídrico que contribuyan con la reducción de las cargas contaminantes del agua del rio.

Los datos derivados de la investigación serán valiosos para comprender la dinámica del recurso hídrico y los impactos generados por las actividades antrópicas, los cuales serán claves para desarrollar estrategias de conservación y uso sostenible del agua y servirán como base para la toma de decisiones informadas en materia de gestión ambiental, razón por la cual otorgamos nuestro respaldo para su ejecución.

FUNDISPROS, reconoce el compromiso del equipo investigador y la metodología planteada para alcanzar los objetivos propuestos en el proyecto.

Sin otro en particular, reafirmamos nuestro apoyo y disposición para colaborar en todas las etapas del proyecto.

Cordialmente,



**OSCAR EDUARDO GUTIERREZ OLAYA**

Representante Legal