



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
GEOLOGÍA AMBIENTAL
Curso 2021-2022**

**Evaluación Geoambiental del Agua
Superficial de las Cuencas Binacionales
Transfronterizas Puyango–Tumbes y
Catamayo–Chira entre Perú y Ecuador**

Geoenvironmental evaluation of the surface water of the Puyango –
Tumbes and Catamayo – Chira Transboundary Binational Basins
between Peru and Ecuador

KARLA PAMELA CORDOVA MORALES

TUTORA DEL TRABAJO: ESPERANZA MONTERO GONZALEZ



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
GEOLOGÍA AMBIENTAL**

Curso 2021-2022

**Evaluación Geoambiental del Agua
Superficial de las Cuencas Binacionales
Transfronterizas Puyango–Tumbes y
Catamayo–Chira entre Perú y Ecuador**

Geoenvironmental evaluation of the surface water of the Puyango –
Tumbes and Catamayo – Chira Transboundary Binational Basins
between Peru and Ecuador

KARLA PAMELA CORDOVA MORALES

TUTORA DEL TRABAJO: ESPERANZA MONTERO GONZALEZ

Fdo.: Firmado por MONTERO GONZALEZ MARIA
ESPERANZA - DNI 00394293G el día 28/07/2022
con un certificado emitido por AC Sector
Público



Facultad de Ciencias Geológicas Universidad Complutense de Madrid DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

KARLA PAMELA CORDOVA MORALES con NIE Y8865305S, estudiante de Máster en Geología Ambiental en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2021 -2022, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado Evaluación Geoambiental de la Cuenca Transfronteriza del Río Puyango – Tumbes (sector peruano) y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo tutor es: Esperanza Montero González.

DECLARO QUE: El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 27 de julio de 2022

Fdo.:

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del estudiante Karla Pamela Cordova Morales.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por regalarme la oportunidad de estudiar y descubrir su creación.

A mis padres Nazario y Dina, y a mis hermanos Yuri y Yair por llenar de alegría cada uno de mis días.

A mi tutora Esperanza Montero por todas las muestras de apoyo antes y durante el desarrollo del periodo académico, y por haber proporcionado aportes importantes para la culminación del presente trabajo.

A mis amigos que formaron parte de mi extraordinaria experiencia académica en Madrid.

Asimismo, este trabajo no habría sido posible sin el apoyo del Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC) del Ministerio de Educación, entidad que brinda la oportunidad de seguir creciendo a muchos jóvenes profesionales peruanos.

ÍNDICE

1. ASPECTOS GENERALES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Definición del problema.....	2
1.3. Objetivos	4
2. ÁMBITO DE ESTUDIO.....	5
2.1 Cuenca Hidrográfica del río Puyango-Tumbes.....	5
2.2 Cuenca Hidrográfica del río Catamayo-Chira.....	5
2.3 Climatología	7
2.3 Marco geológico.....	8
2.4 Marco hidrogeológico.....	10
3. ANTECEDENTES	12
3.1. Revisión de antecedentes científicos	12
4. ASPECTOS METODOLÓGICOS	14
4.1 Recopilación de información	14
4.2. Identificación de focos de contaminación	14
4.3. Calidad del agua superficial	15
4.3.1. Red de monitoreo de agua de la cuenca Tumbes.....	15
4.3.2. Red de monitoreo de agua de la cuenca Chira.....	16
4.4. Análisis estadístico	17
4.5. UCL95 (límite de control superior)	18
4.6. Relación ECA para Agua y UCL95 (REU).....	22
4.7. Caracterización hidroquímica.....	22
5. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	24
5.1. Síntesis de los focos de contaminación antrópica.....	24
5.1.1. Cuenca del río Tumbes.....	24
5.1.2. Cuenca del río Chira	25
5.2. Evaluación de la calidad del agua superficial de las dos cuencas	26
5.2.1. Cuenca del río Tumbes	26
5.2.2. Cuenca del río Chira.....	29
5.2.3. Relación ECA para Agua y UCL95 (REU)	31
5.3. Caracterización hidroquímica	32
5.3.1. Cuenca del río Tumbes	32
5.3.2. Cuenca del río Chira.....	37
6. DISCUSIÓN	42
7. CONCLUSIONES.....	44
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

RESUMEN

Las cuencas transfronterizas Puyango-Tumbes y Catamayo-Chira conforman una parte importante del territorio binacional entre los países de Perú y Ecuador. En ambos casos, las zonas altas de las cuencas pertenecen al dominio ecuatoriano y las zonas medias y bajas forman parte de la soberanía peruana. El predominio de las actividades antrópicas y sus efectos sobre la calidad ambiental en las zonas altas es sustancialmente diferente; en la primera cuenca se han registrado más de 80 plantas de procesamiento de minerales, dedicadas principalmente a la obtención aurífera artesanal y a pequeña escala. En la segunda cuenca, se priorizan las actividades de conservación, agricultura y ganadería. En tanto, los focos de contaminación en las zonas bajas de las dos cuencas se relacionan con el vertido de aguas residuales y residuos sólidos de los grandes núcleos urbanos establecidos.

En el presente trabajo se ha evaluado la calidad del agua superficial del lado peruano de las dos cuencas transfronterizas, a partir del registro de más de 20 monitoreos efectuados en cada una de ellas entre los años 2010 y 2021, mediante la diferenciación temporal y el cálculo del UCL95 para su comparación con los estándares de la calidad del agua (ECA) establecidos por la regulación de Perú. Además, se ha realizado la caracterización hidroquímica de las redes de monitoreo en base a criterios de variación espacial y temporal de los iones macro constituyentes del agua.

A través de este documento, se expone la situación geoambiental de las dos cuencas transfronterizas y se destaca la afectación por metales pesados y metaloides (Al, As, Fe, Mn, Pb y Zn) en el componente hídrico de la cuenca media y baja del río Puyango-Tumbes. Respecto a la cuenca Catamayo-Chira, la recurrencia del incumplimiento de la legislación ambiental peruana es significativamente menor, sin embargo, se encontraron concentraciones elevadas de Al, Fe y P. Asimismo, la caracterización hidroquímica permitió determinar la influencia de la litología en la composición iónica del agua; en ambas cuencas las variaciones espaciales se ajustan a los factores de variación locales, tales como la litología predominante de rocas metamórficas, volcánicas y sedimentarias, dando facies hidroquímicas de tipo sulfatadas sódico-cálcico-magnésicas y bicarbonatadas sódico-cálcicas en la zona fronteriza, sulfatadas-cloruradas cálcicas en el curso medio de la cuenca, y cloruradas sódicas en la proximidad de la desembocadura, influenciadas por el mar.

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. Introducción

La humanidad depende de flujos constantes de materiales y energía, uno de ellos es el agua. La compleja red de sistemas urbanos y rurales se sostienen en la constante circulación de agua, sin su flujo ininterrumpido, sería imposible la vida, y el tejido de actividades que constituyen la esencia de los sistemas antrópicos (Pinos & Malo-Larrea, 2018).

Sin embargo, las actividades antrópicas sobre los recursos del planeta han generado ineludibles problemas ambientales a escala local, regional y global. Durante las últimas décadas, los impactos negativos han agudizado la capacidad de respuesta de los complejos y frágiles sistemas ambientales, por lo tanto, las alteraciones graves del recurso hídrico pueden modificar las condiciones para atacar los retos de salud de las poblaciones y poner en peligro a los ecosistemas.

La minería es una actividad importante del desarrollo económico en Latinoamérica. Países como Perú y Ecuador dinamizan su economía a partir de la explotación de sus recursos minerales. Si bien, la regulación y el fomento de las prácticas ambientales suelen ser cada vez más rigurosos en esta parte del mundo, la minería informal, y en muchos casos ilegal, aún constituye una fuente importante de contaminación ambiental, de conflictos por los usos del territorio y de serias afectaciones a la biodiversidad. A esta problemática se suma la existencia de remanentes de operaciones mineras desarrolladas en el pasado, es decir, antes de la promulgación de las regulaciones ambientales sustentadas en criterios internacionales, a principios de los años noventa. Dichos pasivos ambientales, que no fueron remediados oportunamente, generalmente se localizan próximos a los cursos de aguas naturales, y ahora conforman sitios contaminados capaces de liberar materiales o residuos peligrosos.

La contaminación del recurso hídrico dificulta la utilización del agua para cualquiera de sus propósitos. Por ello, es una necesidad evaluar la situación de la calidad ambiental de los cuerpos naturales de agua mediante criterios técnicos, tales como el uso prioritario del recurso, el registro histórico de datos ambientales y de los controles analíticos, la época del muestreo, influenciada por la presencia o ausencia de lluvias, y las características geológicas predominantes en el área de estudio.

Como ejemplo, la regulación peruana establece cuatro categorías de los cursos de agua asociados principalmente a su uso: 1) Poblacional y recreacional, 2) Extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales, 3) Riego de vegetales y bebida de animales y 4) Conservación del ambiente acuático (MINAM, 2017).

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) realiza monitoreos periódicos de la calidad del agua superficial en gran parte de las cuencas del territorio peruano, esto permite disponer de información pública de la calidad del agua en períodos de hasta diez años de antigüedad (ANA, 2022)

Por otro lado, estudios como los de Rascón et al., (2021), Custodio et al., (2020) y Delgado et al., (2021) destacan la influencia de la variación estacional de las precipitaciones en diferentes zonas andinas del Perú, debido a que podrían aumentar la carga de los contaminantes que llegan a los ríos a través de las escorrentías que transportan los desechos mineros o por el contrario, el aporte de grandes volúmenes de agua no contaminada podría disminuir la concentración de contaminantes por un efecto de dilución.

Las características geológicas cumplen un rol determinante en el quimismo del agua. La interacción agua-roca puede aportar estimaciones relativas a las facies hidroquímicas en función de la litología de los acuíferos por los que circulan (Fernandez, 2006). Investigaciones desarrolladas en zonas aledañas a la Cordillera de los Andes de Perú han verificado afectaciones ambientales por el impacto directo de la actividad minera (Molloy et al., 2020) y por efectos naturales de la exposición masiva de material sulfuroso a condiciones atmosféricas en zonas de montaña (Grande et al., 2019).

La relevancia del presente trabajo radica en la aplicación detallada de los criterios indicados en la evaluación de la calidad del agua de dos cuencas transfronterizas contiguas entre Perú y Ecuador: Puyango-Tumbes y Catamayo-Chira. En la primera, se reportó un histórico conjunto de operaciones mineras ubicadas en la parte alta de la cuenca, perteneciente al territorio ecuatoriano, cuyos efectos negativos por el incumplimiento de la normativa ambiental son demandados por la población peruana en las zonas media y baja de la cuenca.

La segunda cuenca, Catamayo-Chira, a pesar de compartir el contexto binacional y gran parte de las características fisiográficas con la primera, ha presentado menor afectación de la calidad del agua en los monitoreos de la calidad del agua realizados en el territorio de Perú, siendo su mayor problema el de origen orgánico por la contaminación urbana.

Por tanto, el contraste de la situación geoambiental de la calidad del agua de ambas cuencas permite relacionar las actividades antrópicas predominantes y las características del entorno con el origen de la problemática de contaminación ambiental, en un espacio de especial atención internacional de la frontera entre dos países sudamericanos.

1.2. Definición del problema

Las cuencas hidrográficas de los ríos Puyango-Tumbes y Catamayo-Chira conforman dos de los espacios geográficos transfronterizos más importantes entre los países de Perú y Ecuador, sobre los cuales se han establecido núcleos urbanos y se desarrollan diversas actividades económicas.

El origen de la problemática de contaminación ambiental en ambas cuencas se debe a focos puntuales y localizados de contaminación provenientes de vertidos de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales, lixiviados de vertederos y letrinas sanitarias, los cuales son atribuidos prioritariamente a la insuficiente y heterogénea gestión de los territorios de dos

sistemas administrativos distintos. Sin embargo, la problemática ambiental comprende un componente de manejo aún más complejo que involucra a la actividad minera artesanal y a pequeña escala desarrollada en la parte alta de la cuenca Puyango-Tumbes, situada en Ecuador.

Las regiones mineras ubicadas desde hace varias décadas en las estribaciones de la Cordillera Occidental de los Andes, en el sur de Ecuador, se han relacionado con eventos de contaminación ambiental debido a las ineficientes formas de producción-procesado de los yacimientos mineros y, en consecuencia, a la generación y dispersión de grandes cantidades de residuos ricos en sulfuros (colas o relaves). Un problema grave es la dispersión fluvial de desechos de procesamiento de minerales, compuestos por elementos potencialmente tóxicos tales como As, Cd, Cu, Pb y Zn (Appleton et al., 2001), que suelen ser depositados en las zonas circundantes o liberados a los ríos Calera y Amarillo, dos afluentes importantes del río Puyango-Tumbes situados en el territorio ecuatoriano. Estos últimos, presentaron las mayores concentraciones de metales pesados de la cuenca alta y los resultados se relacionaron con la ubicación de más de 80 plantas de beneficio de minerales dispuestas en las riberas de dichos ríos (García et al., 2012).

A pesar de las medidas de control tomadas por la administración ecuatoriana, como la construcción de la relavera o embalse de residuos mineros de baja ley comunitaria El Tablón en el período 2012-2014, para recibir los residuos mineros de las plantas de beneficio, el problema continúa ante la insuficiente gestión de las actividades y la informalidad (Acurio & Montero, 2020).

En tanto, en la cuenca media y baja, circunscrita en el departamento peruano de Tumbes, que a su vez conforma el área de estudio del presente trabajo, se ha identificado el frecuente incumplimiento de la regulación ambiental vigente. Estos resultados se materializaron a través de herramientas matemáticas en los resultados de los Índices de la Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS) que califican como pésima la calidad del agua del 70% de los puntos que conforman la red de muestreo.

La contaminación del recurso hídrico de la cuenca Puyango-Tumbes afecta a tres sectores de la misma. A partir de las categorías de la clasificación de los cuerpos de agua continentales del Perú, en la parte alta del lado peruano de la cuenca predomina la categoría de Conservación, debido a la existencia de tres espacios naturales, Parque Nacional de Cerros de Amotape, Reserva Nacional de Tumbes y el área regional Angostura Faical; en la parte media se asentaron los grandes núcleos urbanos y el agua es destinada principalmente al abastecimiento, correspondiendo a la categoría Poblacional, mientras que en la zona baja de la cuenca se desarrollan actividades agrícolas y la producción de especies hidrobiológicas como langostinos, calamares, cangrejos y conchas negras, por tanto se categoriza como agua para riego de vegetales y bebida de animales.

Por otro lado, en la cuenca transfronteriza Catamayo-Chira, la problemática ambiental es asociada a la inadecuada gestión de los residuos sólidos y de las aguas residuales poblacionales. Asimismo, en la parte alta de esta cuenca, correspondiente al territorio ecuatoriano, las actividades económicas de mayor relevancia son la agricultura y la ganadería. Durante los últimos años se ha evidenciado la expansión agrícola a través de las transformaciones de la cobertura del suelo de bosque nativo a agricultura y la deforestación para establecer nuevas áreas de producción sumado al sobrepastoreo (Arteaga et al., 2020). En comparación con la primera cuenca descrita, el sector minero en el ámbito de Catamayo-Chira, no representa una actividad predominante, por lo que la afectación ambiental es menor a la de la cuenca Puyango-Tumbes.

Finalmente, la intervención administrativa en las áreas de frontera representa un conjunto de dificultades para Perú y Ecuador, tanto a nivel técnico como jurídico, por lo que, a lo largo de los años se ha generado incertidumbre y controversia respecto al origen de los altos niveles de metales pesados, metaloides y variables ambientales de origen orgánico hallados en los monitoreos de la calidad del agua del lado peruano de la cuenca Puyango-Tumbes.

1.3. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar la calidad del agua superficial de dos cuencas transfronterizas entre los países de Perú y Ecuador (Puyango-Tumbes y Catamayo-Chira), centrando el foco de análisis en el ámbito peruano de las referidas cuencas. Asimismo, establecer su relación con las características geológicas; y contrastar el estado geoambiental entre ambas cuencas transfronterizas colindantes.

En ese sentido, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Sintetizar la información relacionada con los focos de contaminación de origen antrópico en el ámbito peruano de las dos cuencas transfronterizas.
- Analizar la información de la calidad del agua superficial del ámbito peruano de las dos cuencas transfronterizas.
- Caracterizar hidroquímicamente el agua superficial del ámbito peruano de las dos cuencas transfronterizas.
- Comparar la calidad del agua de las dos cuencas transfronterizas y su relación con el contexto geológico.

2. ÁMBITO DE ESTUDIO

Las cuencas hidrográficas binacionales de los ríos Puyango-Tumbes y Catamayo-Chira se localizan en la frontera entre los países de Perú y Ecuador. Ambos países comparten bajo derecho internacional el uso de las aguas de dichas unidades hidrográficas. Los ríos de estas cuencas tienen sus nacientes en la República de Ecuador, donde toman los nombres de Puyango y Catamayo respectivamente. Aguas abajo, atraviesan el territorio peruano y cambian su denominación a Tumbes y Chira respectivamente, hasta su desembocadura en el mar, por lo que pertenecen al gran sistema hidrográfico de la vertiente del Pacífico (Figura 1).

2.1 Cuenca Hidrográfica del río Puyango-Tumbes

La cuenca hidrográfica transfronteriza Puyango-Tumbes está conformada por los límites políticos del Departamento de Tumbes, en el norte del Perú, y las Provincias de Loja y El Oro, al sureste de Ecuador (Figura 1). Abarca una superficie de 5638 km², de los cuales, el 33 % (1806 km²) pertenece al territorio peruano (ANA, 2008).

Numerosas quebradas que discurren principalmente desde los terrenos montañosos de la Cordillera Chilla y Cerro Negro en Ecuador conforman la cabecera de la cuenca, ubicada sobre los 3500 msnm, posteriormente confluyen con el río Yaguachi y forman el río Puyango. Entre los tributarios más importantes del río Puyango se encuentran los ríos Calera, Amarillo y Ambocas. Más adelante, el Puyango recibe a la quebrada Cazaderos, uno de los afluentes de mayor aporte durante la temporada de avenidas, para formar el río Tumbes en el territorio de Perú y atravesar un ecosistema de manglares hasta desembocar en el mar.

La longitud total de la red hidrográfica principal del río Puyango-Tumbes es de aproximadamente 950 km, de los cuales 230 km discurren en territorio peruano. Su densidad de drenaje es de 1,81 km/km² y la pendiente promedio del río es de 1,5 %, aunque su variación es mayor en la cuenca alta y menor en la baja (0,5%).

El río Tumbes tiene un régimen permanente de agua. Los caudales mensuales fluctúan entre 7,7 y 1244,2 m³/s, con una media de 116 m³/s (ANA, 2015b). La aportación de agua asciende a 213 hm³/año (ANA, 2022). Los usos más significativos son poblacional, agrícola, industrial y acuícola.

2.2 Cuenca Hidrográfica del río Catamayo-Chira

La cuenca Catamayo-Chira se ubica dentro de los límites políticos del Departamento de Piura en el norte de Perú y la Provincia de Loja, al sur de Ecuador, es colindante por el norte con la cuenca del río Puyango-Tumbes (PBDRF, 2021) (Figura 1). La superficie de la cuenca es de aproximadamente 17199 km² (PBDRF, 2021) y según las estimaciones realizadas por la ANA (2008), el 61% del total de la cuenca abarca territorio peruano (10535 km²).

El río nace en la Cordillera Occidental de los Andes de Ecuador con el nombre de Catamayo, alimenta su curso primordialmente con las precipitaciones estacionales que ocurren en la parte alta, cuyo rango altitudinal llega alrededor de la cota 3700 msnm (PBCCH, 2005), y después de recorrer aproximadamente 150 km se une con el río Macará para ingresar al territorio peruano, donde toma el nombre de río Chira hasta su desembocadura en el Océano Pacífico (DIGESA, 2007). La longitud total del curso de agua es de 315 km de los cuales 119 km están en territorio peruano (PBCCH, 2005).

La red hidrográfica de régimen permanente tiene características dendríticas. El río Chira presenta caudales medios mensuales que fluctúan entre 1,95 y 26 m³/s con una media anual de 98 m³/s (ANA, 2015a). La pendiente media del cauce principal es de 0,6% y su aportación hídrica es de 1151 hm³/año (ANA, 2022).

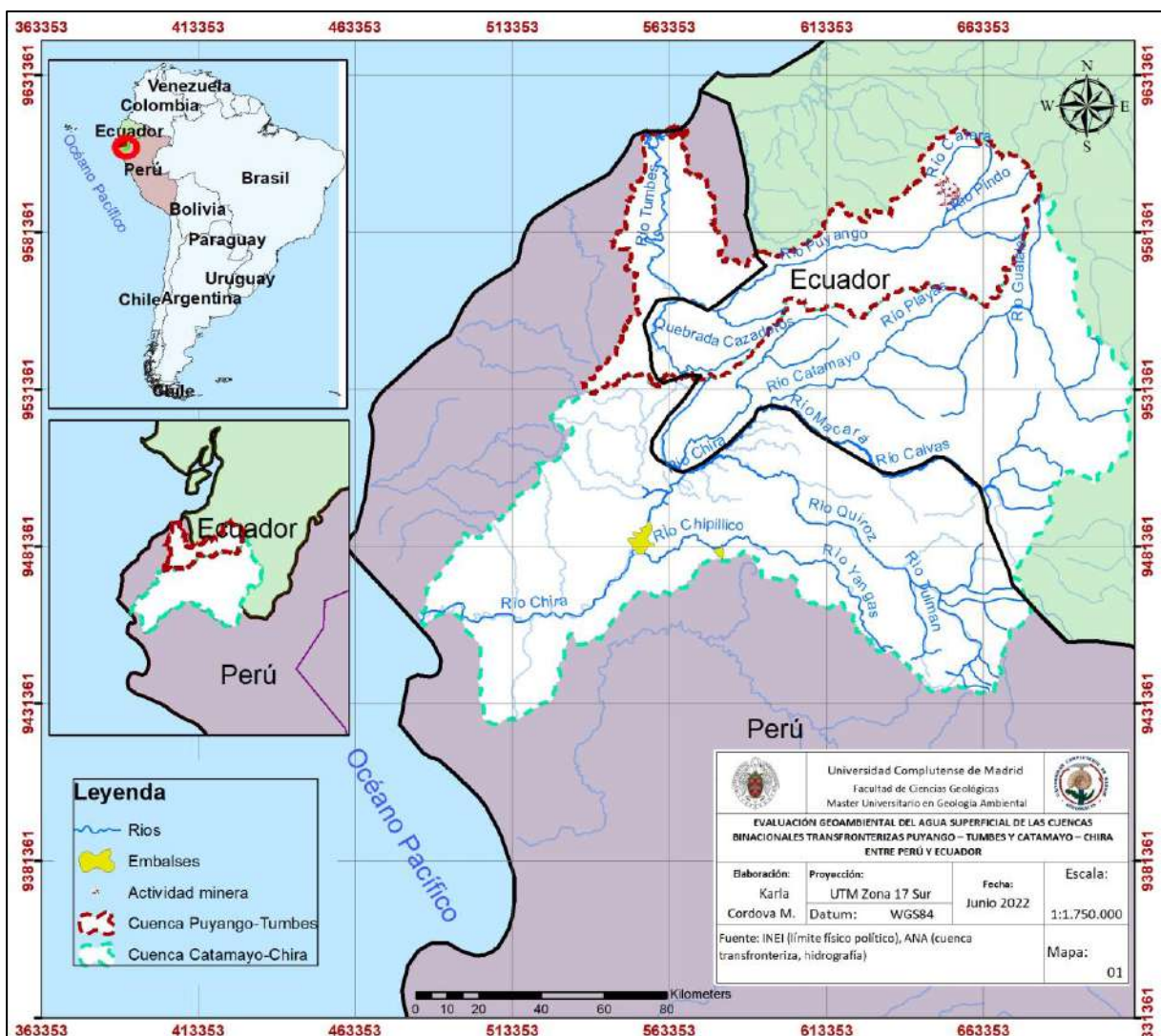


Figura 1. Mapa de ubicación de las Cuenca Transfronterizas de los ríos Puyango-Tumbes y Catamayo-Chira

2.3 Climatología

El área de las dos cuencas de estudio comprende una región de transición entre el clima desértico de la costa peruana y la región tropical subhúmeda del Ecuador (Linares-Palomino & Alvarez, 2005). Las características climáticas de las regiones comprendidas entre el sur de Ecuador y el norte de Perú son muy variadas. Los factores fundamentales que determinan estas fluctuaciones son: la geografía (latitud) y el complejo relieve–altitud, dominado por la Cordillera de los Andes y la proximidad al Océano Pacífico. Asimismo, en periodos cíclicos de entre dos y siete años se desencadena uno de los fenómenos climáticos de mayor importancia a nivel planetario: El Niño Oscilación del Sur (ENSO), por la interacción de componentes atmosféricos y oceánicos, que provocan el incremento significativo de la lluvia precipitada que supera a la media normal (Aguirre et al., 2015).

En la mayor parte de la zona de estudio, el régimen de precipitaciones y, en consecuencia, la descarga fluvial se caracteriza por presentar una marcada estacionalidad. El período de lluvia se produce durante el verano-otoño austral, entre diciembre y mayo, con un pico entre febrero y abril en relación con la posición más al sur de la Zona de Convergencia Intertropical (Moquet et al., 2020).

Las precipitaciones acumuladas tienden a incrementarse con la altitud, al contrario que la temperatura. Por ejemplo, entre las cotas 0 y 300, la zona de estudio presenta un clima semiárido, cálido y seco, el promedio anual de las temperaturas máximas es de 31 a 33°C y de las mínimas de 19 a 21°C, con acumulados anuales de lluvias que oscilan entre los 200 y los 500 mm aproximadamente. Asimismo, entre los 700 y 1200 msnm, el promedio de las temperaturas máximas anuales es de 27 a 29°C, las mínimas de 17 a 21°C y la precipitación anual acumulada de entre 700 y 1200 mm (SENAMHI, 2021).

Por ejemplo, la zona baja de la cuenca Puyango-Tumbes se caracteriza por registrar bajas cantidades de precipitaciones durante la mayor parte del año. La temperatura promedio en la ciudad de Tumbes es 24,4 °C. y la precipitación anual promedio de alrededor de 656 mm (Figura 2).

En tanto, en la cuenca alta ubicada en los Andes de Ecuador, predomina el clima de inviernos relativamente secos debido a la pérdida de humedad de las masas de aire al colisionar con los flancos de la cordillera. En estas zonas, las precipitaciones anuales promedio varían de 600 a 2000 mm, y en las partes más altas de la montaña se han registrado valores de hasta 6700 mm año (Aguirre et al., 2015).

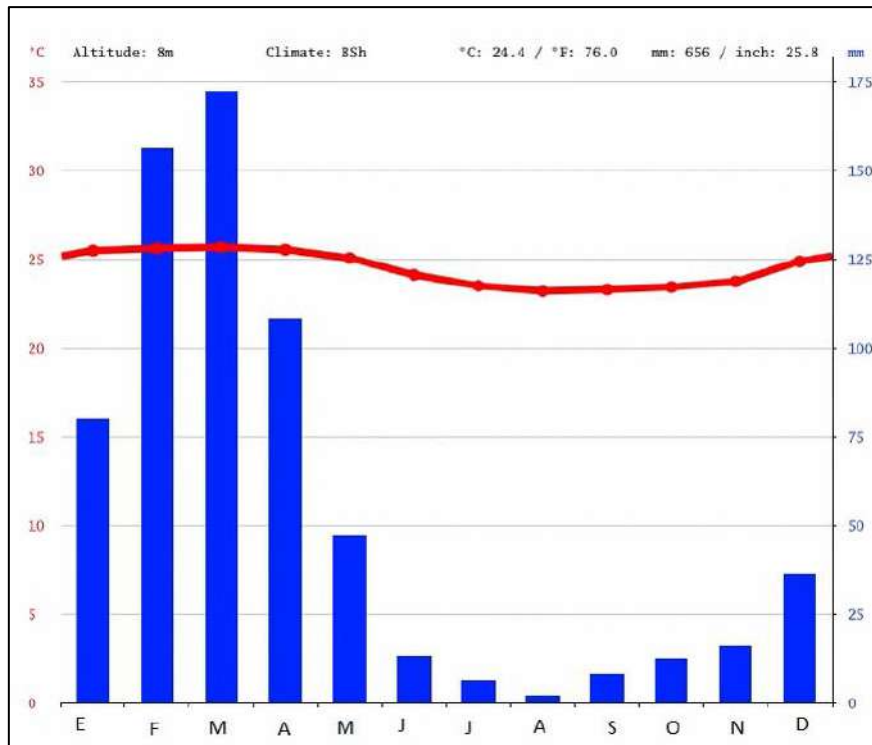


Figura 2. Climograma de Tumbes, zona baja de la cuenca Puyango-Tumbes

2.3 Marco geológico

Las cuencas costeras del Pacífico suelen presentar características geológicas homogéneas, con rocas volcánicas en las regiones elevadas y rocas plutónicas y metamórficas en regiones más bajas. Las formaciones sedimentarias resultarían de sus respectivos procesos erosivos. Las dos cuencas de estudio están compuestas por tres principales dominios geológicamente contrastados: uno volcánico (cuenca alta), otro plutónico/metamórfico (media altura o zona de frontera) y un dominio sedimentario, que es el que domina en las zonas peruanas de ambas cuencas. En la cuenca Puyango-Tumbes se ha estimado que los referidos dominios representan respectivamente el 17, 25 y 58% del área (Moquet et al., 2020).

La información geológica integrada a detalle de las dos cuencas de estudio aún forma parte de los esfuerzos gubernamentales de ambos países. Para fines del presente estudio se ha considerado relevante describir la zona fronteriza de empalme binacional, que comprende los cuadrángulos de Tumbes y Las Playas del territorio peruano y las hojas geológicas de Huaquillas, Puyango, Alamor y Zapotillo de Ecuador, que comprende una parte importante del área en estudio (Figura 3).

Geológicamente, la zona fronteriza de las dos cuencas de estudio está constituida por rocas metamórficas del Macizo Amotape-Tahuín, y rocas de las cuencas sedimentarias Tumbes-Progreso y Lancones-Celica.

El Macizo Amotape-Tahuín es una secuencia estratigráfica indiferenciada del Paleozoico. Está integrada por sedimentos con leve metamorfismo, donde se aprecian laminaciones

paralelas, estructuras en flama y *slumps*, probablemente del Devónico, cuarcitas, pizarras y filitas del Devónico, anfibolitas, esquistos y serpentinas del Triásico y del Jurásico superior-Cretácico inferior (Ingemmet-IIIGE, 2021)

La cuenca sedimentaria Tumbes-Progreso presenta un relleno constituido por secuencias de conglomerados, areniscas y lutitas del Paleoceno, comprende conglomerados, areniscas, bloques de gran tamaño incluidos dentro de lutitas y limolita (Eoceno), areniscas abigarradas, conglomerados a veces con contenido de carbón y concreciones ferruginosas (Oligoceno), lutitas e incluso manchas limoníticas por oxidación (Mioceno superior).

La cuenca Lancones, estratigráficamente se ha dividido en dos sectores, sector occidental y sector oriental. El sector occidental corresponde a una secuencia sedimentaria constituida, principalmente, por conglomerados, areniscas cuarzosas y delgados niveles de lutitas (Aptiano Albiano); sobreyaciendo concordante se tiene areniscas feldespáticas intercaladas con limo arcillas (Cenomaniano superior-Turoniano); alternancias de areniscas, limos turbidíticos (Cenomaniano inferior); sobre esta y en discordancia, conglomerados y areniscas cuarzosas (Campaniano-Maastrichtiano) y cerrando la cuenca lutitas con nódulos calcáreos (Maastrichtiano-Daniano).

En el sector oriental, el vulcanismo hace su inicio con una secuencia bimodal de lavas basálticas, autobrechas de ambiente marino profundo (Albiano medio a superior). Continúa el vulcanismo con 2000 m de una secuencia de andesitas basálticas porfiríticas y delgados niveles de ignimbritas (Albiano superior). Posteriormente hay secuencias con efusiones de basaltos, andesitas basálticas, riolitas, calizas lodolitas (Albiano superior-Turoniano inferior). Cerrando la cuenca se presentan cenizas poco consolidadas (Neógeno) y, finalmente, cubriendo a todas las secuencias antiguas se depositan materiales aluviales y fluviales.

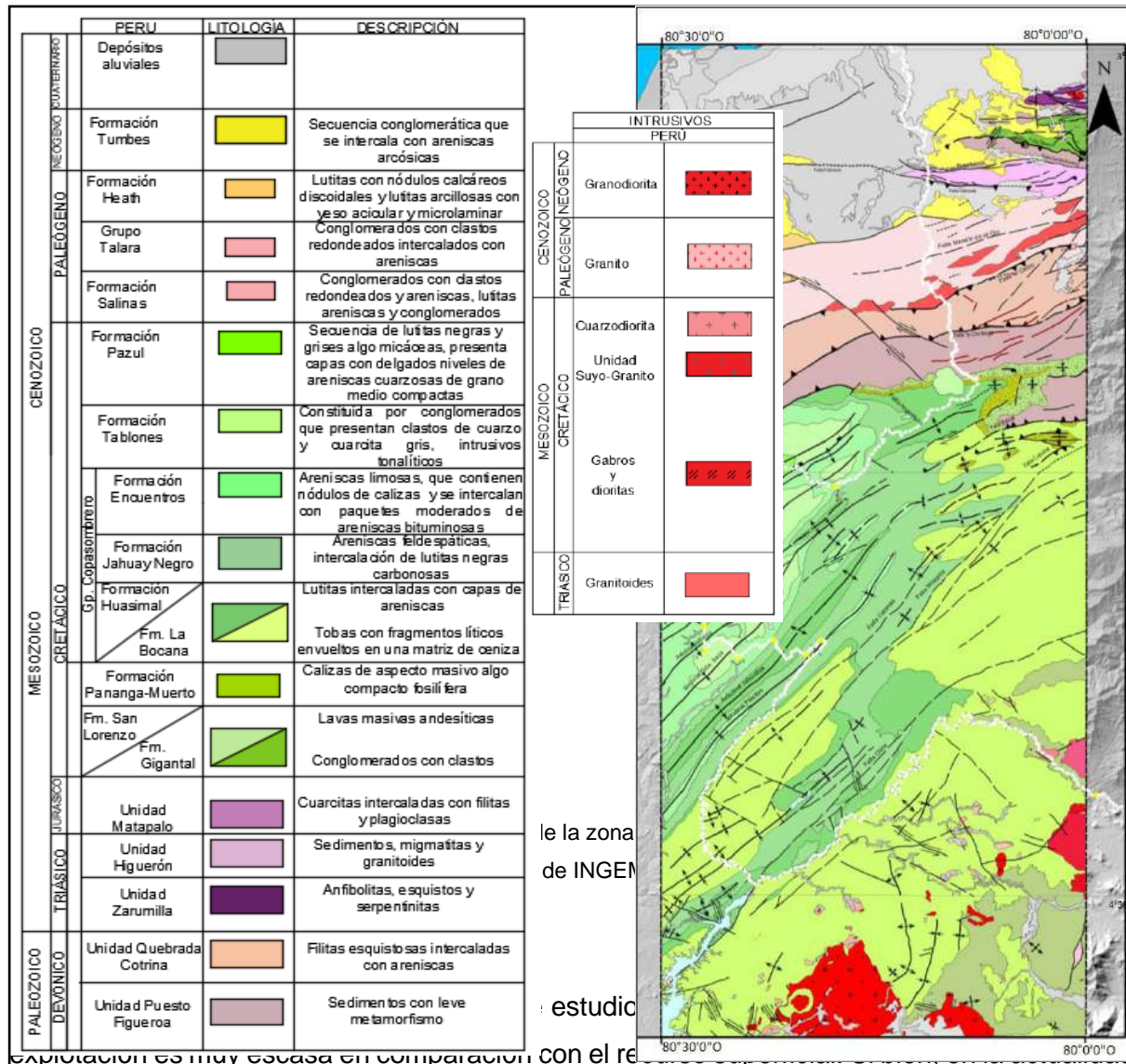
Las rocas plutónicas corresponden a granitoides del Triásico superior, gabros, dioritas, granodioritas y monzogranitos (70.84 ± 1.9 Ma.), granodioritas (93 ± 1.1 Ma.), pequeños cuerpos aislados indiferenciados de cuarzodioritas y cuerpos subvolcánicos correspondientes a andesitas, brechas y stock silíceo del (Cretácico superior), también pórfidos asociados principalmente a procesos mineralizantes de pulsos posteriores, posiblemente asociados al emplazamiento de la Granodiorita de Tangula.

Estructuralmente, presenta dos dominios: Occidental y Oriental, que se caracterizan por presentar pliegues y fallas de dirección NO-SE, que afectan a rocas sedimentarias y a secuencias volcánicas y volcanosedimentarias.

Metagenéticamente, el área de frontera presenta ocurrencias no metálicas de sal, lignito y bentonita y sulfuros masivos volcanogénicos, pórfidos y epitermales, en el sector oriental de la Cuenca Lancones-Celica. La zona alta del área de estudio forma parte de la faja de mineralización aurífera polimetálica Zaruma-Portovelo, que comprende sistemas de filones aurífero-polimetálicos longitudinales del tipo epitermal de sulfuración con brechas

freatomagmáticas. Los filones tienen geometría sigmoide y diseminaciones subordinadas relacionadas con un estilo pórfido cuprífero. Cubre aproximadamente 4.256 km² entre los 2° 36' y 3° 14' de latitud S, y 80° 6' y 80° 50' de longitud O (Bonilla, 2009).

Geomorfológicamente, el área se caracteriza por presentar una plataforma costera, talud continental zona litoral, cordillera de la costa, llanura costera y cordillera occidental (Carrasco et al., 2020).



la información detallada de las unidades hidrogeológicas predominantes y los parámetros asociados al nivel dinámico del agua subterránea aún es escasa, el Perú viene ejecutando diversos estudios, demandados por un sector importante de la población con los fines prioritarios de abastecimiento y agricultura.

En la región ecuatoriana de las dos cuencas de estudio, se ha delimitado la Demarcación Hidrográfica Puyango-Catamayo, que comprende dos sistemas acuíferos, uno poroso (Chira) y otro fisurado (Puyango). El volumen medio anual de los recursos hídricos subterráneos en estos sistemas es equivalente a 535 hm³/año (CISPDR, 2016).

En la cuenca baja del Puyango-Tumbes se ha identificado el acuífero del valle de Tumbes. Está conformado por horizontes sedimentarios del Terciario y depósitos sueltos del Cuaternario. Respecto al acuífero del Terciario, se ubica en ambos márgenes del río del mismo nombre, es poco accidentado aunque presenta colinas y quebradas de cierta profundidad, además de superficies llanas. En tanto, el acuífero superficial está formado por depósitos aluviales y está delimitado por el norte con extensas áreas verdes cultivadas (arroz), por el este, aguas arriba, con la presencia de numerosas quebradas, por el sur, con áreas de cultivo de arroz y por el oeste por una zona de manglares. El nivel freático se ubica entre 0,4 y 38 m de profundidad (INRENA, 2007).

La recarga de estos sistemas de acuíferos procede principalmente de las lluvias, seguida de las infiltraciones de la irrigación y del agua superficial (ríos y lagos, etc.). Se ha estimado una recarga del orden de 20 hm³, proveniente de la precipitación, considerando una superficie útil para la infiltración de 100 km², (Benavent et al., 2009), aunque las explotaciones actuales del acuífero no superan los 12 hm³ (ANA, 2022).

El referido estudio hidrogeológico del valle de Tumbes estimó que el volumen total de agua explotado del acuífero fue de 1,82 hm³, que corresponde a un caudal continuo de explotación de 0,057 m³/s, el 96% del total se destinaba al consumo doméstico y la diferencia al uso agrícola. En el período de este estudio, la explotación se realizaba mayoritariamente mediante pozos tubulares (INRENA, 2007). A la fecha, el Observatorio del Agua de la (ANA, 2022), ha inventariado 147 pozos en la zona, de los cuales, 18 son pozos tubulares, 126 a rajo abierto y 3 mixtos, y según el estado de los pozos, 63 son considerados utilizables, 54 no utilizables y solo 30 son utilizados.

Por otro lado, según el CISPDR (2016), la calidad del agua del sistema acuífero Puyango es buena y apta para el consumo doméstico, mientras que el agua en el sistema acuífero Chira es apta sólo para la agricultura y la ganadería, en referencia a la norma de calidad del agua para consumo humano, agricultura, utilización ecológica, industria y servicio vigente en el Ecuador.

3. ANTECEDENTES

3.1. Revisión de antecedentes científicos

Diversas investigaciones desarrolladas en el área de estudio del presente trabajo describen la problemática de la afectación ambiental por efectos antrópicos. La minería artesanal y a pequeña escala que se realiza desde hace varias décadas en la parte alta de la cuenca Puyango-Tumbes ha sido motivo de estudio para relacionar las elevadas concentraciones de metales pesados y metaloides (As, Cu, Zn, Cd, Hg, Pb, Mn y Ni) halladas en muestras de agua y sedimento con las descargas de lixiviados mineros hacia los principales tributarios del río Puyango (ríos Calera, Amarillo y Pindo) (Appleton et al., 2001), (Mora et al., 2016), (Oviedo et al., 2017) y (Mondal et al., 2020).

De acuerdo con Appleton et al. (2001), los elementos potencialmente tóxicos As, Cu, Zn y Cd superaron por amplio margen los valores de la Guía de Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1981). La mayor parte de los contaminantes del ambiente acuático se transportó en asociación con la carga suspendida. Además, el As y Cu de los sedimentos del fondo del río excedieron el umbral de efectos tóxicos de las Pautas Canadienses de Sedimentos para la Protección de la Vida Acuática de 1992. Estos últimos resultados concuerdan con Mora et al., (2016) que encontró en muestras de sedimento de la sección media y baja del río Puyango una contaminación severa por metales pesados (factores de enriquecimiento normalizados ≥ 3) de Hg, Cu, Pb, Mn y Zn atribuidos al proceso de molienda del mineral para la extracción de oro.

El estudio realizado por Marshall *et al.* (2018), a partir del análisis de isótopos vinculó el Hg usado durante el procesamiento de oro en la zona minera de Portovelo como fuente de contaminación encontrada a 160 km de distancia aguas abajo, en el delta de Tumbes,. Además, reportó concentraciones elevadas de As, Cd, Cu, Pb y Zn que superaron los umbrales canadienses (Canadian Council of Ministers of the Environment CCME, 1998). Las concentraciones totales disueltas de estos metales excedieron los umbrales entre 156 y 3567 veces en las aguas superficiales y entre 19 y 740 veces en los sedimentos. Los resultados coinciden con Mondal et al., (2020), que aduce que el incremento de As registrado en la zona de Tumbes es proveniente de la cuenca alta (Distrito Portovelo).

Otra metodología aplicada para evaluar la influencia de la minería aurífera en la contaminación del río Puyango se basó en la comparación estacional de las concentraciones de muestras de agua superficial de los ríos Calera y Amarillo (cuenca alta del río Puyango-Tumbes). El estudio muestra altos valores de As, Hg, Mn y Pb en puntos correspondientes a las zonas mineras. Se encontraron concentraciones de 159 $\mu\text{g/L}$ en aguas superficiales, siendo 100 $\mu\text{g/L}$ el límite máximo aceptable según la legislación del Ministerio del Ambiente de Ecuador del año 2003. El Pb tuvo una tendencia similar, alcanzó 63 $\mu\text{g/L}$, siendo el límite de 50 $\mu\text{g/L}$, y el Mn alcanzó valores de 970 $\mu\text{g/L}$ en época de lluvias, superando unas diez veces los valores de referencia.

Las zonas sin afectación minera presentaron mejores condiciones de la calidad del agua (García et al., 2012).

De otro lado, los estudios científicos relacionados con el impacto minero sobre la cuenca hidrográfica del río Catamayo–Chira son sustancialmente menores a la de los efectuados en la cuenca Puyango–Tumbes. Esto se debería, entre otros aspectos, a la diferenciada magnitud de operaciones mineras establecidas entre ambas cuencas, mucho menor en Catamayo-Chira. La priorización de actividades económicas no mineras (conservación, agricultura y ganadería) en la zona alta de la cuenca Catamayo-Chira genera impactos diferentes.

Un estudio técnico de la cuenca del río Catamayo-Chira desarrollado por DIGESA (2007) mediante esfuerzos conjuntos entre Perú y Ecuador, indica que en los monitoreos de la calidad del agua superficial efectuados entre los años 2003 y 2007, los parámetros de metales y metaloides tales como As, Cd, Cu, Cr, Pb, Hg, Zn, Cn WAD (complejos de metal-cianuro disociables en ácidos débiles) fueron menores a los límites máximos permisibles de los Criterios de Calidad para Aguas de uso Agrícola o de Riego de la norma de calidad ambiental ecuatoriana vigente durante el periodo de estudio y a los valores límite establecidos en la Ley General de Aguas del Perú, en la mayoría de monitoreos. Sin embargo se detectó el incumplimiento de Fe y Mn en un monitoreo realizado en el año 2006

Loaiza (2016), describe la existencia de operaciones mineras artesanales en el lado peruano de la cuenca Catamayo–Chira y evaluó muestras de sedimento aplicando el método de extracción secuencial y el análisis de las formas químicas de elementos en áreas próximas a dichas zonas mineras. No se encontraron evidencias para afirmar la existencia del riesgo ambiental por metales pesados generados por la actividad minera artesanal en los ríos Quiroz y Chira y descartó la existencia de material biodisponible en las muestras de la zona de estudio. Los resultados distan de los obtenidos por Nima (2020), que encontró puntos críticos de contaminación por cianuro (0.0809mg/l) y Hg (0.089mg/l) asociados a la minería artesanal, cuyas concentraciones incumplieron la regulación ambiental peruana (MINAM, 2017) en tramos de las Quebradas Alvarado y El Carrizo, afluentes del río Quiroz que, a su vez, es uno de los tributarios más relevantes del río Chira.

4. ASPECTOS METODOLÓGICOS

4.1 Recopilación de información

La fase inicial del trabajo consistió en la búsqueda y consulta de información de carácter ambiental y geológico a partir de fuentes oficiales de organismos gubernamentales de Perú y Ecuador, artículos científicos, tesis, libros electrónicos y resúmenes, entre otros. Estos datos fueron incorporados principalmente en los capítulos I, II y III del presente trabajo.

Los datos del registro histórico de la calidad del agua del lado peruano de las dos cuencas de estudio (Tumbes y Chira) y la identificación de focos de contaminación fueron obtenidos del portal virtual del Observatorio del Agua (ANA, 2022). Otros focos de contaminación asociados a los residuos sólidos se obtuvieron de la consulta en el Portal interactivo de Fiscalización Ambiental del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental del Perú (OEFA, 2022a). Asimismo, la información geológica de referencia fue consultada en los boletines e informes técnicos del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET).

4.2. Identificación de focos de contaminación

Se ha consolidado la información procedente de dos entidades públicas dedicadas a generar información referida a las fuentes de contaminación ambiental según el marco de sus competencias, la Autoridad Nacional del Agua de Perú (ANA) y el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental de Perú (OEFA).

La ANA, en atención a los lineamientos para la identificación y seguimiento de fuentes contaminantes relacionadas con los recursos hídricos, aprobado mediante la Resolución Jefatural N° 136-2018-ANA ha realizado el inventario de focos de contaminación (IFC) en el lado peruano de las dos cuencas de estudio (Tumbes y Chira), estos datos inventariados se uniformizaron en el año 2021.

La IFC en la cuenca Tumbes indica que se encontraron 17 fuentes contaminantes en total, 10 de los cuales están asociados con el vertido de aguas residuales municipales y domésticas, 6 con la disposición inadecuada de residuos sólidos y 1 con el lavado de vehículos (ANA, 2019). Respecto a la cuenca Chira, se registraron 55 fuentes de contaminación en total, 33 de los cuales se relacionan con el vertido de aguas residuales, 11 con la disposición de residuos sólidos y otros 11 con sustancias provenientes del lavado de ropas y vehículos.

El OEFA, en atención a la Resolución de Consejo Directivo N° 010-2022-OEFA/CD, se encarga del registro de los lugares donde se realiza o se realizó la acumulación permanente de residuos sólidos, sin contar con autorización ni las consideraciones técnicas establecidas en la normativa vigente, estos espacios se denominan áreas degradadas por residuos sólidos. De acuerdo con la información actualizada, en la cuenca Tumbes se han registrado 6 áreas degradadas por residuos sólidos (vertederos) (OEFA, 2022c) y 23 en la cuenca Chira (OEFA, 2022b)

Finalmente, para la representación gráfica de los focos de contaminación se han georreferenciado los puntos de la IFC y las áreas degradadas en un sistema de información geográfica (ArcGIS) para evitar superposiciones o la duplicidad de los focos identificados y se elaboraron los mapas de focos de contaminación antrópica para el lado peruano de las dos cuencas de estudio.

4.3. Calidad del agua superficial

El análisis de la calidad del agua se ha basado en la evaluación de las series de información histórica sobre los resultados de 26 monitoreos de la calidad del agua de la cuenca del río Tumbes y 24 monitoreos de la cuenca del río Chira, en el periodo comprendido entre los años 2011 y 2021. Estas series de datos se han organizado según dos criterios: la estacionalidad de los monitoreos (avenida y estiaje) y la categoría asignada a los cuerpos de agua superficial por la legislación peruana para su aplicación referencial con los estándares de la calidad ambiental para agua (ECA para Agua). Las categorías de los cuerpos de agua son: 1) Poblacional y recreacional, 2) Extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales, 3) Riego de vegetales y bebida de animales y 4) Conservación del ambiente acuático (MINAM, 2017)

Los ECA para Agua se definen como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente.

Al considerar la aplicación de los dos criterios indicados, se generaron 6 series de datos para el procesamiento de la información de la cuenca Tumbes y 4 para la cuenca Chira:

- Cuenca Tumbes: Avenida-Categoría 1, Avenida-Categoría 3, Avenida-Categoría 4, Estiaje -Categoría 1, Estiaje-Categoría 3 y Estiaje-Categoría 4.
- Cuenca Chira: Avenida-Categoría1, Avenida-Categoría 3, Estiaje-Categoría1 y Estiaje-Categoría 3.

De acuerdo con los antecedentes revisados respecto a la recurrencia del incumplimiento de algunas variables de la calidad del agua y el propósito geoambiental del estudio, se priorizó el análisis de los siguientes parámetros: Pb, Mn, As, Fe, Zn, Hg, Cu, Al y P. Si bien, en el análisis no se detallarán resultados de variables de origen orgánico o nutrientes, dicha información ha formado parte del proceso analítico complementario al estudio.

4.3.1. Red de monitoreo de agua de la cuenca Tumbes

La red de monitoreo oficial de la calidad del agua superficial está constituida por 13 puntos, de acuerdo con el tipo de recurso de ríos y quebradas de la cuenca del río Tumbes. La distribución de los puntos de monitoreo abarca extensiones de áreas de conservación (RPuya1, RPuya2, QCaza1, RTumb1 y RTumb2) y se clasifican en la categoría “conservación

del ambiente acuático”. Asimismo, los puntos de la parte media de la cuenca se caracterizan por su proximidad a los núcleos urbanos de los distritos de Pampas de Hospital, San Jacinto y San Juan de la Virgen (RTumb11, QCabu1, RTumb3, RTumb9, RTumb5) y se clasifican en la categoría “poblacional”. Los puntos de la zona baja de la cuenca (RTumb6, RTumb7, RTumb8) ubicados en los distritos de Tumbes y Corrales se clasifican en la categoría “Riego de vegetales y bebida de animales” (ANA, 2022) (Figura 4).

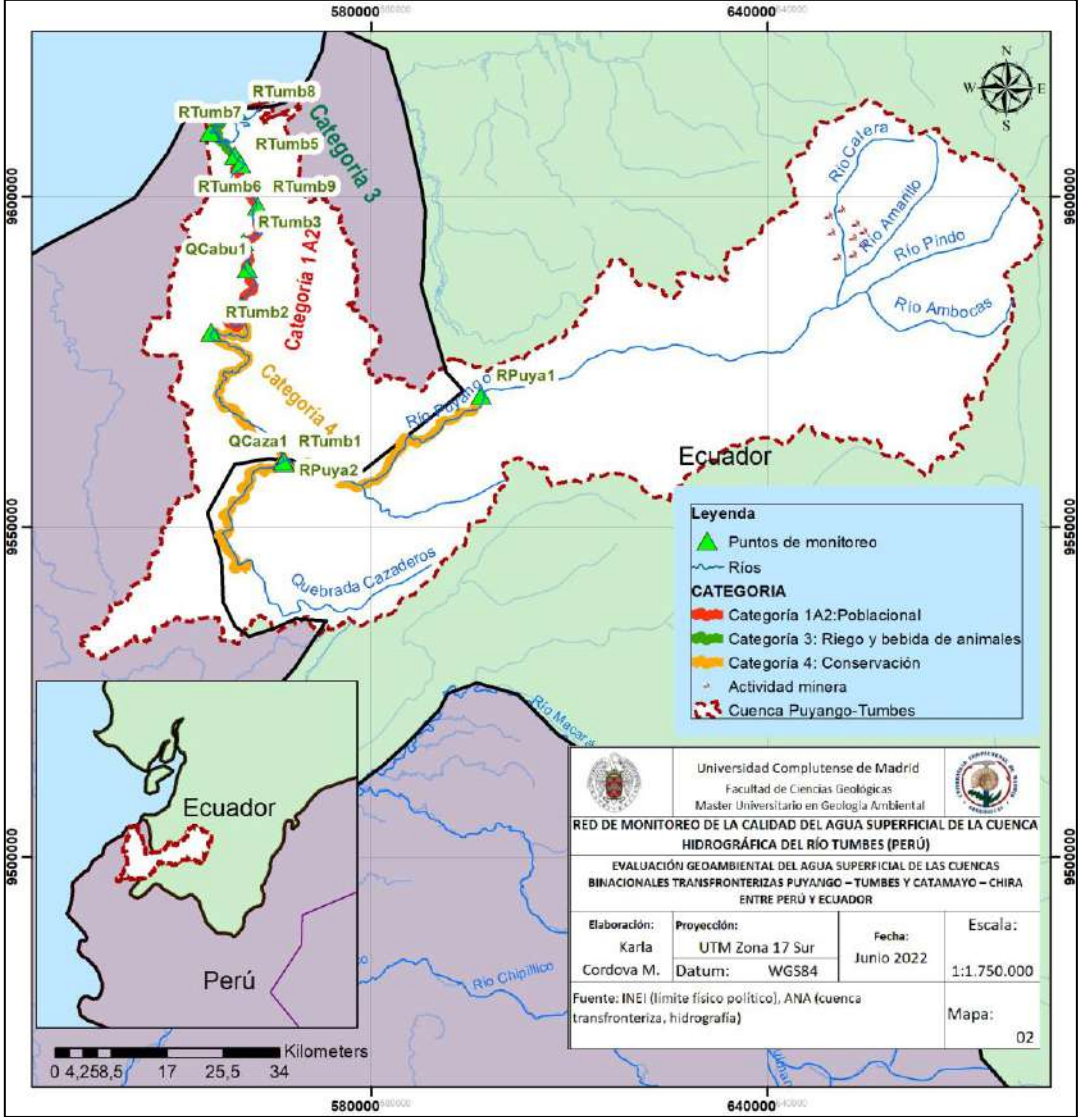


Figura 4. Red de monitoreo de la calidad del agua superficial de la cuenca hidrográfica del río Tumbes

4.3.2. Red de monitoreo de agua de la cuenca Chira

La red de monitoreo oficial de la calidad del agua superficial está formada por 18 puntos, de acuerdo con el tipo de recurso de ríos y quebradas de la cuenca del río Chira, 13 de los puntos de muestreo (RPbla1, RSpab1, RMaca1, RQuir1, RQuir2, RQuir3, RMaca4, RChir2, RChir3, RChir4, RChir5, RChir6 y RChir7) abarcan extensiones destinadas al abastecimiento y se clasifican en la categoría “poblacional”. Los 5 puntos restantes (RChip1, RChip2, QTimb1,

RChip3 y RChir8) se clasifican en la categoría “Riego de vegetales y bebida de animales” (Figura 5).

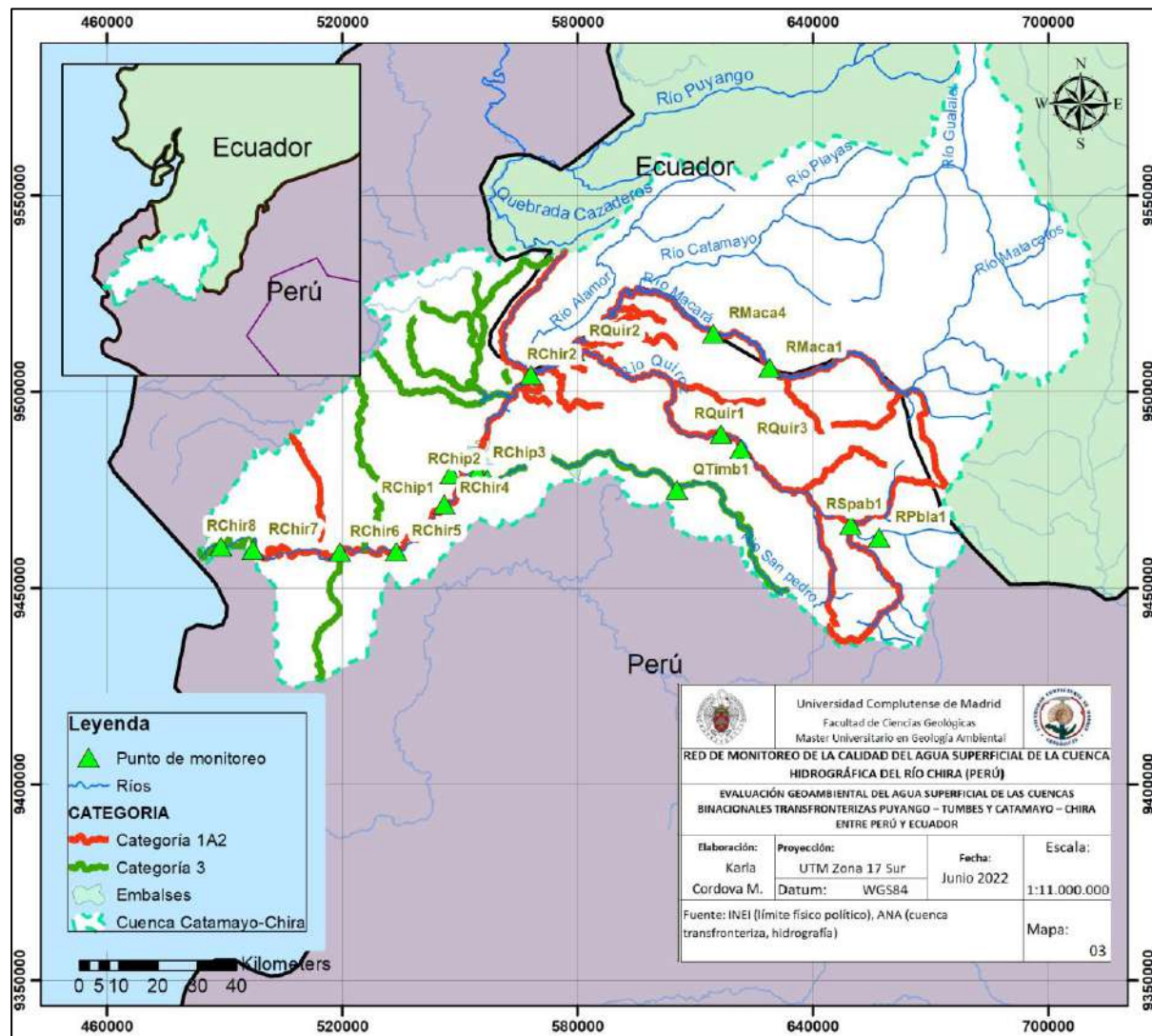


Figura 5. Red de monitoreo de la calidad de agua superficial de la cuenca hidrográficas del río Chira

4.4. Análisis estadístico

Para comprender las características de las 6 series de la cuenca Tumbes y de las 4 de la cuenca Chira, conformadas con base en la estacionalidad del monitoreo y la categoría de la clasificación del agua (apartado 4.3), se calcularon los estadísticos descriptivos de tendencia central y variabilidad más relevantes (número de observaciones o datos, máximo valor, media aritmética y desviación estándar). Estos valores son recursos a utilizar en el cálculo del valor límite de control superior (UCL) en función del método de cálculo aplicado a la distribución de los datos (normal, log normal, etc.), para tal efecto, se utilizó la herramienta “*general statistics on uncensored data*” del programa ProUCL 5.1 (USEPA, 2022), que permite analizar series con valores detectados y no detectados por el método de ensayos de laboratorio de origen, como sucede en el presente estudio.

4.5. UCL95 (límite de control superior)

Para la evaluación de la afección de la calidad del agua de las dos cuencas de estudio por los elementos metales, metaloides y otros priorizados (Pb, Mn, As, Fe, Zn, Hg, Cu, Al y P) se calculó el valor límite de control superior UCL (siglas en inglés, *upper confidence limit*) de todos los elementos que conforman las series de datos.

El valor UCL95 es el límite superior del intervalo de confianza estadística de la media aritmética, es decir, es un valor que cuando se calcula repetidamente para subconjuntos de datos extraídos al azar, iguala o supera la media real el 95 por ciento de las veces. El UCL95 se consideró como la concentración representativa de las existentes en las zonas de afección o cuencas por las variables priorizadas (Comunidad de Madrid, 2011). Aunque el UCL95 proporciona una estimación conservadora no debe confundirse con un percentil 95 de los datos ni con una media aritmética de las concentraciones.

El primer paso para el cálculo del UCL95 consistió en hallar los estadísticos descriptivos más relevantes (apartado 4.4), seguido del análisis del ajuste de los datos para determinar la normalidad, log normalidad, gamma u otras distribuciones. Después, se analizó la pertinencia del uso del UCL sugerido respecto al método considerado, a la media aritmética y el valor máximo observado.

Es importante precisar que tradicionalmente se ha aplicado de forma útil el cálculo del UCL para series de datos normales y log normales, sin embargo, las evaluaciones ambientales suelen no abordar las series de datos que no son ninguna de las mencionadas (distribuciones gamma, no paramétricas, etc.).

En ese sentido, se ha utilizado el programa estadístico *ProUCL 5.1* (USEPA, 2022) que sugiere métodos convencionales y alternativos para calcular el valor UCL de distribuciones normales y no normales.

A continuación se describen las fórmulas de cálculo de UCL para las distribuciones específicas de datos reconocidas en el presente estudio, según las consideraciones de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) (USEPA, 2005):

- Para las distribuciones normales de datos, se ha calculado el UCL con base en la estadística *t* de *Student*:

$$UCL_{95\%} = \bar{X} + t_{\alpha, n-1} \times S/\sqrt{n}$$

Donde \bar{X} es la media aritmética, n el número de muestras y t el estadístico de *Student* obtenido de la tabla de cuantiles con $n-1$ grados de libertad, S la desviación estándar.

- Para las distribuciones log normales se usó el método Land:

$$UCL_{95\%} = \exp(\overline{\ln X} + S_{\ln X}^2/2 + H_{1-\alpha} S_{\ln X}/\sqrt{n-1})$$

Donde $\overline{\ln X}$ es la media aritmética de los datos transformados logarítmicamente, s la desviación estándar de los referidos datos transformados, H el estadístico de Land

y n el número de muestras (USEPA, 2002). El enfoque de Land es sensible a las desviaciones de la log normalidad, la fórmula comúnmente puede sobrestimar el UCL cuando las series no son realmente logarítmicas normales si la varianza o la asimetría es grande (USEPA, 2002). Este método requiere que haya un único nivel de detección para todos los valores de datos.

- Otro método de cálculo del UCL95 para las distribuciones log normales, siempre que la asimetría no sea muy grande, es la desigualdad de Chebyshev del estimador insesgado de varianza mínima (MVUE):

$$UCL_{95\%} = \widehat{u}_{ln} + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha} - 1\right) \sigma_u^2}$$

Donde \widehat{u}_{ln} es hallado mediante el MVUE: $\widehat{u}_{ln} = \exp(\overline{\ln X})g_n(S_{lnX}^2/2)$, al respecto, $\overline{\ln X}$ es la media aritmética de los datos transformados logarítmicamente, g es una función estadística tabular, S^2 la varianza.

Asimismo, $\sigma_u^2 = \exp(2\overline{\ln X}) \left(\left(g_n(S_{lnX}^2/2)^2 \right) - g_n\left(\frac{n-2}{n-1} S_{lnX}^2\right) \right)$

- Para las distribuciones gamma se utilizó el método Wong. El UCL puede ser el UCL gamma ajustado por el nivel de significancia (cuando $0,1 \leq k < 0,5$) o UCL gamma aproximado de chi-cuadrado (cuando $k \geq 0,5$) ya que estos UCL proporcionan aproximadamente el 95 % de cobertura especificado para la media de la población, k es el parámetro de forma de una distribución gamma.
- Para el cálculo del UCL de series no paramétricas o de datos sin distribución se utilizó el método Chebyshev (utilizando la media y la desviación estándar de la muestra).

$$UCL_{1-\alpha} = \bar{X} + \sqrt{\frac{1}{\alpha} - 1} (S/\sqrt{n})$$

Donde \bar{X} es la media aritmética, α el nivel de significancia (95%), S la desviación estándar, n el número de muestras. El estudio realizado por Singh et al., (1997), indica que este método proporciona mejor aporte en las evaluaciones ambientales, especialmente cuando el número de muestras es treinta o menos o cuando el valor del coeficiente de variación excede 1.

Por otro lado, el trabajo de gabinete realizado para la determinación de los valores UCL95 consistió en organizar columnas de datos para cada variable que compone las 10 series conformadas en ambas cuencas.

Los datos de partida se organizaron en formato Excel y se exportaron al programa ProUCL 5.1, la tabulación incluyó la incorporación de una columna descriptiva binaria para cada parámetro (encabezado "d_parámetro"), se asignó el valor de 1 a los datos detectados por la

analítica de origen y 0 a los resultados menores al límite de detección específico (< L.D) (Figura 6).

	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
	Sn	d_Sn	Fe	d_Fe	Li	d_Li	Mg	d_Mg	Mn	d_Mn	Hg	d_Hg	Mo
1	0,0042	0	6,302	1	0,0223	1	19,2	1	0,0586	1	0,0001	0	0,00261
2	0,0042	0	20,687	1	0,0106	1	8,317	1	0,446	1	0,0001	0	0,00211
3	0,0042	0	13,665	1	0,0123	1	9,94	1	0,3017	1	0,0001	0	0,002
4	0,0042	0	26,386	1	0,0119	1	12,557	1	0,3788	1	0,0001	0	0,00127
5	0,0042	0	0,093	1	0,0258	1	30,776	1	0,0068	1	0,0001	0	0,00455
6	0,0042	0	9,398	1	0,0042	1	4,265	1	0,469	1	0,00013	1	0,00044
7	0,0042	0	129,042	1	0,0363	1	16,647	1	3,435	1	0,00115	1	0,01145
8	0,0042	0	114,547	1	0,0349	1	20,791	1	3,0927	1	0,00129	1	0,0112
9	0,0042	0	77,536	1	0,0288	1	14,633	1	2,4092	1	0,00023	1	0,00729
10	0,0051	1	0,0709	1	0,0262	1	22,37	1	0,011	1	0,0001	0	0,006
11	0,0034	1	1,431	1	0,0032	1	2,163	1	0,1389	1	0,0001	0	0,0019
12	0,0087	1	3,384	1	0,0043	1	3,421	1	0,3849	1	0,0001	0	0,0051
13	0,0004	1	3,215	1	0,0036	1	3,164	1	0,3439	1	0,0001	0	0,0002
14	0,0004	0	0,02488	1	0,0195	1	22,6226	1	0,0054	1	0,0001	0	0,005
15	0,0007	1	1,99718	1	0,0032	0	2,7003	1	0,2869	1	0,0003	1	0,001
16	0,0006	1	1,98397	1	0,0032	0	3,2317	1	0,1924	1	0,0001	0	0,001
17	0,0019	1	1,9353	1	0,0032	0	3,0285	1	0,1869	1	0,0001	0	0,001
18	0,0021	1	0,01604	1	0,0249	1	26,7754	1	0,0029	1	0,0001	0	0,0031
19	0,0008	1	6,13563	1	0,0033	1	2,7759	1	0,4918	1	0,0004	1	0,001
20	0,0031	1	5,23175	1	0,0032	0	2,7591	1	0,3605	1	0,0001	0	0,0002
21	0,0013	1	4,77296	1	0,0032	0	2,6942	1	0,4118	1	0,0001	0	0,0002
22	0,0014	1	0,05839	1	0,0241	1	19,2736	1	0,0042	1	0,0001	0	0,0043
23	0,0037	1	11,32007	1	0,0061	1	3,8294	1	1,4154	1	0,0001	0	0,0002
24	0,00099	1	0,67724	1	0,0228	1	21,353	1	0,0343	1	0,0002	1	0,0079
25	0,0004	0	4,97706	1	0,0038	1	3,4832	1	0,213	1	0,0001	1	0,0027
26	0,003	0	0,475	1	0,016	1	13	1	0,015	1	0,0001	0	0,002
27	0,003	0	54,04	1	0,016	1	13,96	1	2,774	1	0,0005	1	0,002
28	0,003	0	1,694	1	0,016	1	12,42	1	0,087	1	0,0001	0	0,002
29	0,00003	0	0,2017	1	0,0279	1	24,65	1	0,02127	1	0,00003	0	0,00556
30	0,00003	0	1,311	1	0,0017	1	2,29	1	0,09875	1	0,00003	0	0,00084
31	0,00003	0	1,823	1	0,0025	1	3,77	1	0,09876	1	0,00003	0	0,00002

Figura 6. Caracterización binaria para datos ambientales detectados y no detectados

Mediante el uso de la herramienta *Stats/Samples Sizes* se calcularon los estadísticos descriptivos de cada serie de datos (rango, desviación estándar, media aritmética, etc) (Figura7).

ProUCL 5.1 - [UCLsNoNDsAll_a.xls]												
File Edit Stats/Sample Sizes BIS Simulator Graphs Statistical Tests Upper Limits/BTVs UCLs/EPCs Windows Help												
Navigation Panel												
Name	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Avenidas-CAT1A2.xls	10											
UCLwNDsNormal.xls	11	As										
Avenida_cat4.xls	12											
UCLsNoNDsAll.xls	13											
sistematización_Chira.xls	14						General Statistics					
BTVsNoNDsNormal.xls	15						Total Number of Observations	33,00			Number of Distinct Observations	33,00
BTVsNoNDsAll.xls	16										Number of Missing Observations	1,000
UCLsNoNDsAll_a.xls	17						Minimum	0,00290			Mean	0,0767
	18						Maximum	0,733			Median	0,0399
	19						SD	0,148			Std. Error of Mean	0,0257
	20						Coefficient of Variation	1,925			Skewness	3,763
	21											
	22						Normal GOF Test					
	23						Shapiro-Wilk Test Statistic	0,463			Shapiro-Wilk GOF Test	
	24						5% Shapiro-Wilk Critical Value	0,931			Data Not Normal at 5% Significance Level	
	25						Lilliefors Test Statistic	0,352			Lilliefors GOF Test	
	26						5% Lilliefors Critical Value	0,152			Data Not Normal at 5% Significance Level	
	27						Data Not Normal at 5% Significance Level					
	28						Assuming Normal Distribution					
	29						95% Normal UCL			95% UCLs (Adjusted for Skewness)		
	30						95% Student's-t UCL	0,120			95% Adjusted-CLT UCL (Chen-1995)	0,137
	31										95% Modified-t UCL (Johnson-1978)	0,123

Figura 7. Estadísticos descriptivos del As (categoría Poblacional, temporada de lluvias de la cuenca Tumbes)

Posteriormente, a través de la herramienta *Upper Limits/BTVs* se calculó el valor UCL95 de cada variable ambiental constituyente de las series de datos (Figura 8).

ProUCL 5.1 - [UCLwNDsAll.xls]												
File Edit Stats/Sample Sizes BIS Simulator Graphs Statistical Tests Upper Limits/BTVs UCLs/EPCs Windows Help												
Navigation Panel												
Name	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Avenidas-CAT1A2.xls	85											
UCLwNDsNormal.xls	86						Lilliefors Test Statistic	0,160			Lilliefors GOF Test	
Avenida_cat4.xls	87						5% Lilliefors Critical Value	0,154			Detected Data Not Lognormal at 5% Significance Level	
UCLsNoNDsAll.xls	88						Detected Data appear Approximate Lognormal at 5% Significance Level					
sistematización_Chira.xls	89						Lognormal ROS Statistics Using Imputed Non-Detects					
BTVsNoNDsNormal.xls	90						Mean in Original Scale	0,0766			Mean in Log Scale	-3,467
BTVsNoNDsAll.xls	91						SD in Original Scale	0,148			SD in Log Scale	1,348
UCLsNoNDsAll_a.xls	92						95% t UCL (assumes normality of ROS data)	0,120			95% Percentile Bootstrap UCL	0,124
UCLwNDsAll.xls	93						95% BCA Bootstrap UCL	0,143			95% Bootstrap t UCL	0,248
	94						95% H-UCL (Log ROS)	0,154				
	95						Statistics using KM estimates on Logged Data and Assuming Lognormal Distribution					
	96						KM Mean (logged)	-3,477			KM Geo Mean	0,0309
	97						KM SD (logged)	1,341			95% Critical H Value (KM-Log)	2,882
	98						KM Standard Error of Mean (logged)	0,237			95% H-UCL (KM-Log)	0,150
	99						KM SD (logged)	1,341			95% Critical H Value (KM-Log)	2,882
	100						KM Standard Error of Mean (logged)	0,237				
	101											
	102						DL/2 Statistics					
	103						DL/2 Normal			DL/2 Log-Transformed		
	104						Mean in Original Scale	0,0766			Mean in Log Scale	-3,484
	105						SD in Original Scale	0,148			SD in Log Scale	1,372
	106						95% t UCL (Assumes normality)	0,120			95% H-Stat UCL	0,160
	107						DL/2 is not a recommended method, provided for comparisons and historical reasons					
	108						Nonparametric Distribution Free UCL Statistics					
	109						Detected Data appear Approximate Lognormal Distributed at 5% Significance Level					
	110						Suggested UCL to Use					
	111						KM H-UCL	0,150				
	112											
	113											
	114											
	115											
	116						Note: Suggestions regarding the selection of a 95% UCL are provided to help the user to select the most appropriate 95% UCL.					
Log Panel	LOG: 10:42:16	>[Information] Generated Normal Background BTV results for uncensored data!										
	LOG: 10:43:40	>[Information] Generated All Background BTV results!										
	LOG: 10:45:26	>[Information] Generated All UCLs results for uncensored data!										
	LOG: 10:46:50	>[Information] Generated All UCLs with NDs results!										

Figura 8. Cálculo del valor UCL95 del As (serie de datos de la categoría Poblacional, temporada de lluvias o avenidas de la cuenca Tumbes)

4.6. Relación ECA para Agua y UCL95 (REU)

Tiene interés para caracterizar la afectación ambiental de las variables priorizadas según los criterios de estacionalidad y categoría de los cuerpos de agua. Se calculó la relación entre el valor de referencia establecida como ECA para Agua (MINAM, 2017) indicado por la regulación peruana y el UCL calculado para cada variable de la calidad del agua, usando la siguiente ecuación adaptada de Na et al., (2019):

$$\text{REU} = \text{UCL95 (mg/L)} / \text{ECA (mg/L)}$$

Los valores de REU superiores a 1 indican la afectación ambiental en la salud de las personas y los ecosistemas, mientras que los inferiores a 1 indican baja afectación.

4.7. Caracterización hidroquímica

Los ríos de las dos cuencas transfronterizas de estudio presentan una diversidad litológica e hidrológica que influye en el quimismo del agua. Cuantificar las sales que pueden aportar los distintos tipos de rocas podría considerarse un proceso complejo, pues influyen numerosos factores tales como el clima, el grado de alteración, la composición, el tiempo de contacto agua-roca, la permeabilidad, etc., sin embargo, se pueden aportar estimaciones relativas a las facies hidroquímicas (Fernandez, 2006).

La caracterización hidroquímica de las cuencas de estudio ha consistido en evaluar la evolución temporal y espacial de la composición química del agua de las dos redes de monitoreo de los ríos Tumbes y Chira. Para tal efecto, se ha utilizado el programa INAQUAS (Moreno & De la Losa, 2009), una herramienta de análisis cuyas funciones y cálculos incluyen transformaciones de unidades y balances de carga que se complementan con la generación de gráficos para representar las características químicas de los datos de la calidad del agua. Se ha utilizado la información de los monitoreos de la calidad del agua superficial realizados entre los años 2017-2021, debido a que en este período se incluyó la analítica de los cationes y aniones macro constituyentes (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3H^- y NO_3^-).

El primer paso consistió en tabular las concentraciones de los iones constituyentes del agua (mg/l) siguiendo el criterio de la estacionalidad de los monitoreos (avenidas y estiaje) (Figura 9), estos valores se expresaron en unidades de meq y se calculó el balance iónico para su posterior análisis y relación con otros parámetros analizados tales como la conductividad, dureza, sólidos disueltos, etc.

RESULTADOS ANALITICOS																		
var_01	var_02	var_03	Grupo	Num	F. Toma	Muestra	DQO	Cl	SO4	HCO3	CO3	NO3	Na	Mg	Ca	K	pH	C.E.
			1	1		QCabu1	1,9	75,39	87,28	0,1	0	0,317	80,03	16,66	34,3	2,1		702,8
			1	2		QCaza1	1,9	37,23	178,2	0,1	0	0,009	50,67	20,84	72,14	1,63	8,23	744,3
			1	3		RPlaya1	1,9	2,217	17,55	0,1	0	2,446	6,946	4,78	14,15	2,33	8,01	146,9
			1	4		RTumb1	1,9	4,119	23,09	0,1	0	1,82	10,17	4,522	17,68	1,39		206
			1	5		RTumb11	1,9	5,588	27,62	0,1	0	2,76	12,53	6,179	20,83	2,79		203,6
			1	6		RTumb5	1,9	12,98	33,28	0,1	0	1,628	17,19	5,821	23,34	1,55		296
			1	7		RTumb6	1,9	0	33,69	88,7	0	1,734	17,53	5,967	23,75	1,61		218
			1	8		RTumb8	1,9	0	117,2	96,3	0	1,485	352	46,05	37,75	13,63		2321
			2	9		QCabu1	1,9	75,39	87,28	0,1	0	0,317	80,03	16,66	34,3	2,1		702,8
			2	10		QCaza1	1,9	37,23	178,2	0,1	0	0,009	50,67	20,84	72,14	1,63	8,23	744,3
			2	11		RPlaya1	1,9	2,217	17,55	0,1	0	2,446	6,946	4,78	14,15	2,33	8,01	146,9
			2	12		RTumb1	1,9	4,119	23,09	0,1	0	1,82	10,17	4,522	17,68	1,39		206
			2	13		RTumb11	1,9	5,588	27,62	0,1	0	2,76	12,53	6,179	20,83	2,79		203,6
			2	14		RTumb5	1,9	12,98	33,28	0,1	0	1,628	17,19	5,821	23,34	1,55		296
			2	15		RTumb6	1,9	0	33,69	88,7	0	1,734	17,53	5,967	23,75	1,61		218
			2	16		RTumb8	1,9	0	117,2	96,3	0	1,485	352	46,05	37,75	13,63		2321
			3	17		QCabu1	1,9	151,5	174,3	0,1	0	0,008	143,7	28,52	66,14	1,43	7,899	85,09
			3	18		RTumb11	3	4,187	33,31	0,1	0	7,784	13,36	4,455	21,94	1,96	8,114	256,3
			3	19		RTumb5	1,9	29,45	49,88	0,1	0	5,037	31,5	7,249	37,06	1,69	8,072	534,1
			3	20		RTumb6	67	44,62	66,76	0,1	0	0,008	46,23	8,616	41,44	4,28	7,56	775,8
			3	21		QCaza1	5	0	28,86	62,8	0	4,929	71,54	27,99	118,7	1,42	8,253	1759
			3	22		RPlaya1	8	0	31,15	63,1	0	7,711	11,6	3,801	22,26	1,43	8,05	223,7
			3	23		RPlaya2	1,90	0,00	278,40	259,10	0,00	0,01	9,92	4,44	19,38	1,86	7,91	89,20
			3	24		RTumb1	1,90	0,00	29,52	62,60	0,00	5,02	8,87	4,45	18,79	1,89	8,25	108,30
			4	25		QCabu1	1,90	176,80	218,20	0,1	0,00	0,01	158,80	31,04	71,12	1,89	7,68	1447
			4	26		RTumb11	1,90	3,84	26,89	0,1	0,00	4,64	9,96	5,45	21,14	2,09	8,72	176,50

Figura 9. Interfaz del programa INAQUAS con los datos de los iones macro constituyentes del agua, temporada de estiaje, cuenca Tumbes.

El segundo paso consistió en la elaboración de los diagramas de Piper-Hill-Langelier para la población seleccionada, ya que estos diagramas permiten representar, comparar y relacionar un gran número de análisis entre diferentes muestreos para establecer un análisis temporal. Como tercer paso, se representaron los diagramas de Stiff sobre los mapas de base, este proceso permitió ver las facies y la evolución espacial del agua en los puntos que conforman las redes de monitoreo de las cuencas estudiadas. En la representación espacial de los diagramas se diferenció la longitud de los ejes y escalas en función de la concentración de los iones.

5. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

5.1. Síntesis de los focos de contaminación antrópica

Se presenta la síntesis de la consolidación informativa y las representaciones gráficas en mapas temáticos desarrollados para el lado peruano de las dos cuencas de estudio.

5.1.1. Cuenca del río Tumbes

En el lado peruano de la cuenca Puyango-Tumbes se han reconocido 22 focos de contaminación de los recursos hídricos, 11 se asocian al vertido de aguas residuales sobre el cauce del río Tumbes y sus afluentes, y otros 11 tienen relación con la disposición inadecuada de residuos sólidos en vertederos o botaderos (Figura 10).

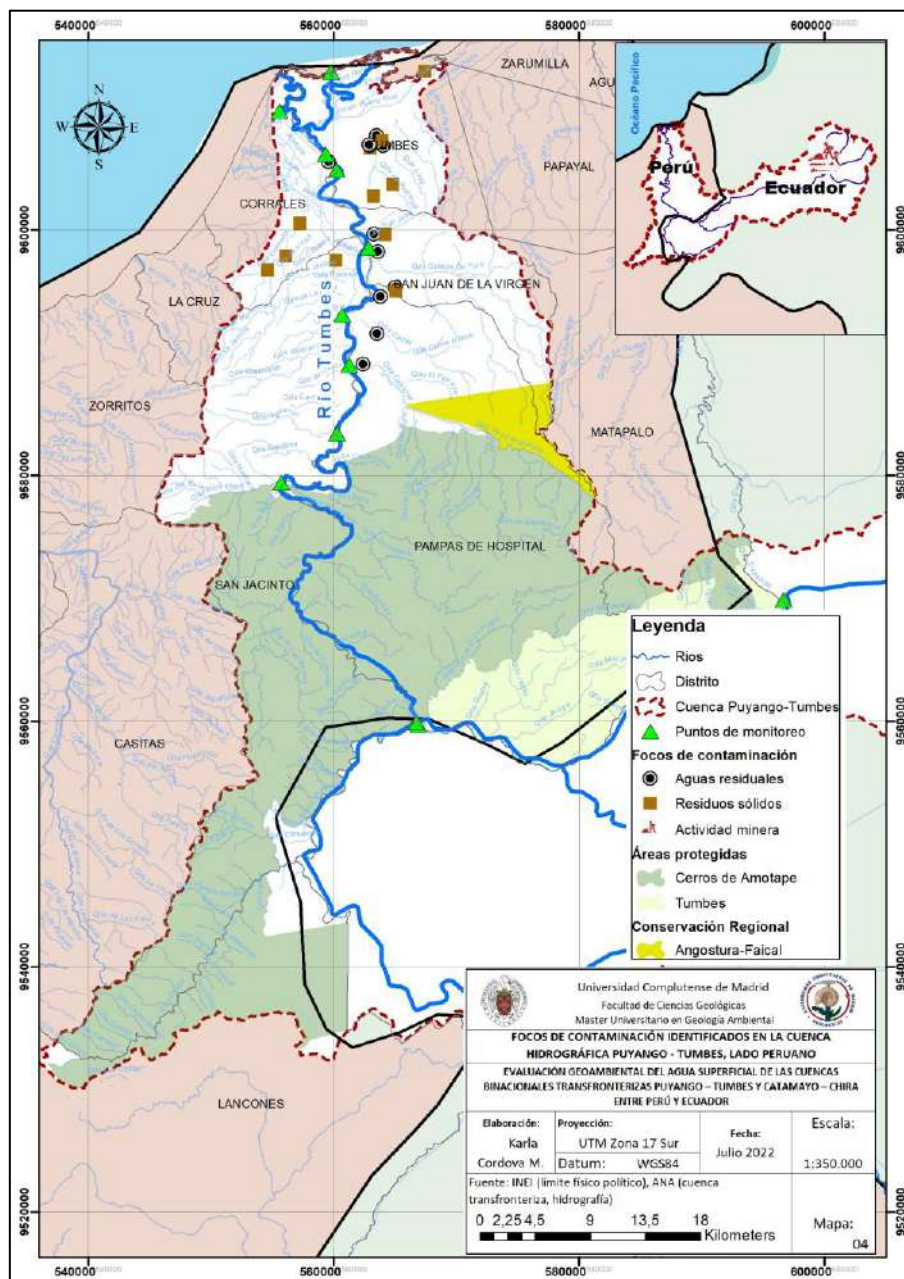


Figura 10. Focos de contaminación antrópica en el lado peruano de la cuenca Puyango - Tumbes

Respecto al vertido de aguas residuales, se encontraron 4 del tipo municipal (plantas de tratamiento, incluye mezclas de aguas de drenaje pluvial e industriales), 6 domésticos (residencial, comercial e institucional) y 1 descarga del lavado de vehículos. El vertido diario solo entre los dos distritos con más descargas supera el caudal de 420 l/s. En cuanto a la acumulación inadecuada de los residuos sólidos, se encontraron del tipo de gestión municipal (de origen doméstico, comercial y aseo urbano) y desechos de la construcción y demolición.

5.1.2. Cuenca del río Chira

En la cuenca alta Catamayo-Chira, los focos de contaminación más representativos se vinculan con las actividades agrícola y ganadera no intensiva.

En el ámbito peruano, se reconocieron 75 focos de contaminación de los recursos hídricos, 44 se asocian al vertido de aguas residuales sin previo tratamiento sobre el cauce del río Chira y sus afluentes, y otros 31 tienen relación con la disposición inadecuada de residuos sólidos poblacionales en vertederos o botaderos (Figura 11).

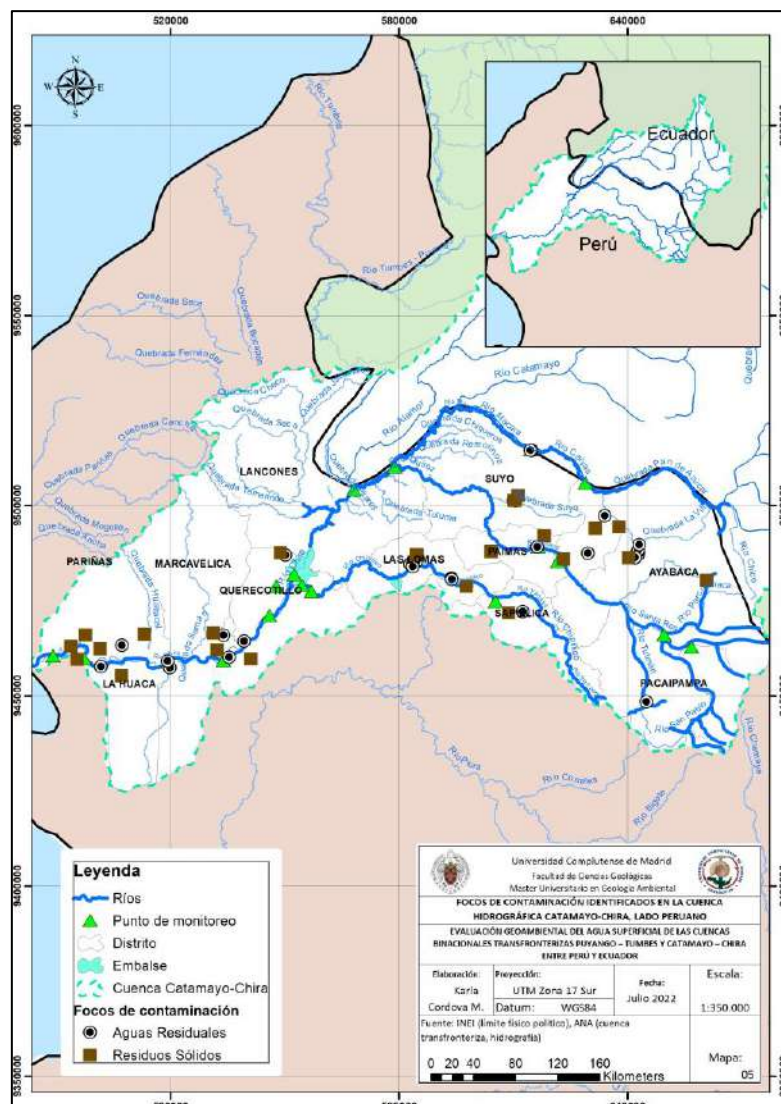


Figura 11. Focos de contaminación antropogénica en el lado peruano de la cuenca Catamayo - Chira

Respecto al vertido de aguas residuales, se encontraron 10 del tipo municipal (provenientes de plantas de tratamiento, pueden incluir mezclas de aguas de drenaje pluvial e industriales), 21 domésticos (residencial, comercial e institucional), 2 agropecuarios (aguas de drenaje de riego o procedentes de granjas) y 11 descargas en las orillas de los ríos (lavado de vehículos y ropas). El vertido total diario supera el caudal de descarga de 600 l/s.

En cuanto a la acumulación inadecuada de los residuos sólidos, se encontraron 24 del tipo de gestión municipal (de origen doméstico, comercial y aseo urbano), 7 no peligroso de gestión no municipal (desechos de la construcción, aparatos eléctricos y electrónicos). Las áreas degradadas por residuos sólidos de la cuenca Chira acumulan diariamente alrededor de 64 t.

5.2. Evaluación de la calidad del agua superficial de las dos cuencas

La evaluación de la calidad del agua del lado peruano de las dos cuencas estudiadas se ha realizado a partir del análisis de las series de datos conformadas previamente con la aplicación de dos criterios, la estacionalidad de los monitoreos y la categoría del uso del agua (apartado 4.3). Del registro de monitoreos de la calidad del agua de la cuenca Tumbes, 16 se realizaron en el período de estiaje y 10 en el de avenida. En cuanto al registro de la cuenca Chira, 8 se llevaron a cabo en la temporada de avenida y 16 en estiaje.

Se elaboraron 3 gráficos de resultados para la cuenca Tumbes y 2 para la cuenca Chira, los cuales integran los resultados más relevantes del análisis estadístico de cada parámetro evaluado (promedio aritmético y máximo valor detectado), además se representa el valor UCL95 calculado en los dos periodos de análisis, para la comparación con el valor del ECA para Agua (MINAM, 2017). Debido a la variación significativa de las concentraciones de los parámetros evaluados, se ha utilizado la escala logarítmica.

5.2.1. Cuenca del río Tumbes

Para la evaluación del tramo del río Tumbes que comprende la categoría 1 (poblacional), se analizaron los registros de cinco puntos (QCabu1, RTumb11, RTumb3, Rtumb5 y RTumb9) en los dos periodos de evaluación (avenida y estiaje) (Figura 12).

Los métodos de cálculo de UCL95 utilizados para datos de las variables, según la distribución de los datos analizados fueron: Ajuste Gamma (Al en avenida), Aproximación Gamma (Hg en estiaje), Chebyshev (Cu, Ni y Zn en avenida y Pb en estiaje), y t de Student (Hg en avenida y Al, P y Ni en estiaje).

En la Figura 12, los resultados del cálculo de los valores UCL95 y los estadísticos descriptivos, muestran que el As, Pb y P calculados superaron los ECA para Agua establecidos por la categoría de referencia en las temporadas de avenida y estiaje. Los valores UCL95 de Al, Fe y Mn superaron los ECA para Agua únicamente en la temporada de lluvias o avenida.

El UCL95 calculado para el Hg indica que supera ampliamente al máximo detectado en la serie, esto se relacionaría con el método de cálculo utilizado (Aproximación Gamma), en este

caso, se recomienda el uso de la referencia UCL considerando el máximo valor detectado (USEPA, 2002).

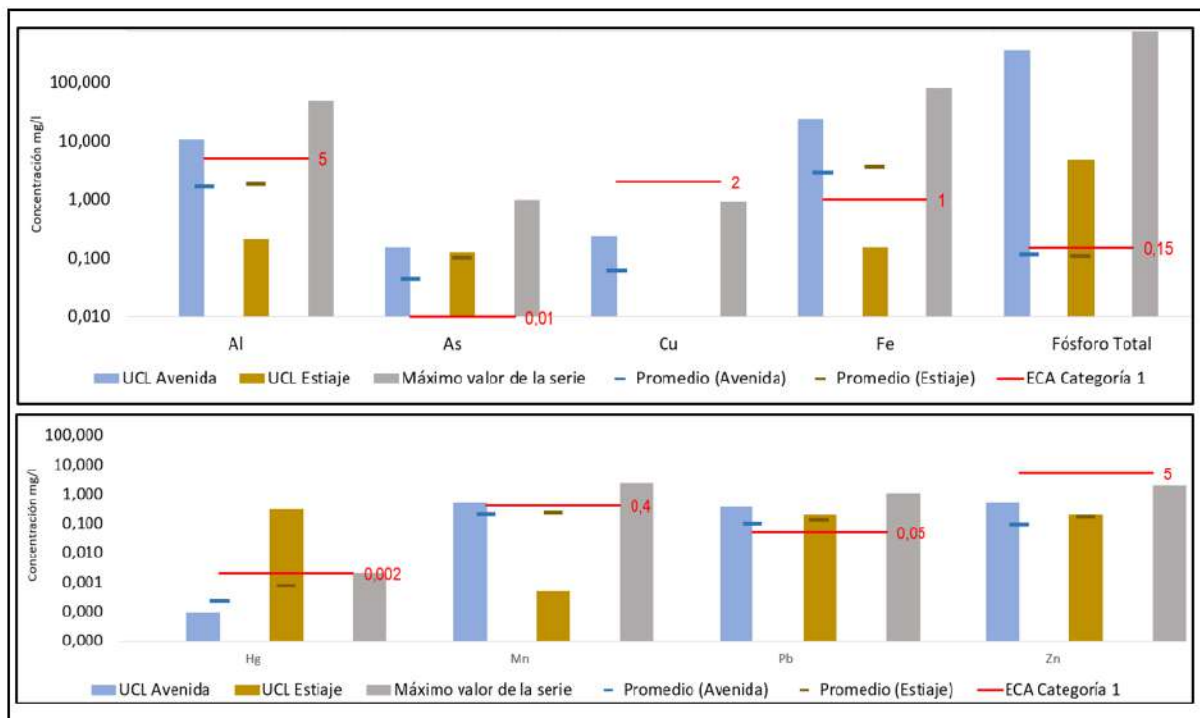


Figura 12. Valores UCL 95 durante las temporadas de avenida y estiaje, promedios y máximo valor detectado en comparación al ECA para Agua de la Categoría 1 (Poblacional)

En el tramo del río Tumbes que comprende la categoría 3 (riego de vegetales y bebida de animales), se analizaron los registros de los puntos RTumb6, RTumb7 y RTumb8 en los dos periodos de evaluación (avenida y estiaje) (Figura 13).

Los métodos de cálculo de UCL95 utilizados según la distribución de los datos analizados fueron: Land (Cu en estiaje), Gamma ajustado (P en avenida), Gamma aproximado (Hg en estiaje), Chebyshev (P en estiaje), t de Student (Hg en avenida) y Chebyshev utilizando la media y desviación estándar (Al, Cu y Pb en avenida y Al y Pb en estiaje).

En la Figura 13, los valores UCL95 calculados en las temporadas de avenida y estiaje para las series de datos de Al, As, Fe, Mn y Pb superaron los ECA para Agua de la categoría correspondiente. Los valores UCL95 del Hg y Zn superaron los ECA para Agua en la temporada de estiaje.

Se observa que en todos los casos, excepto el Cu, los valores UCL95 calculados en la temporada de estiaje superan a su homólogo en la temporada de avenidas.

En ninguno de los casos, el valor de UCL95 supera el máximo detectado en la serie.

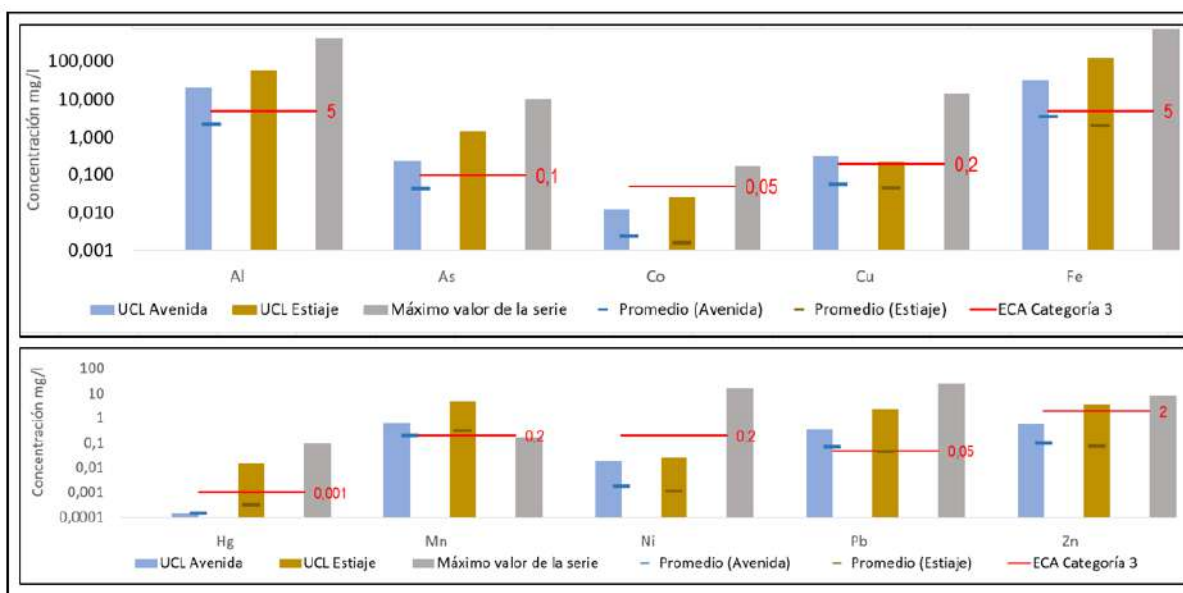


Figura 13. Valores UCL 95 durante las temporadas de avenida y estiaje, promedios y máximo valor detectado en comparación al ECA para Agua de la Categoría 3 (Bebida de animales y riego de vegetales)

En el tramo del río Tumbes que comprende la categoría de la categoría 4 (Conservación de ambiente acuático), se analizaron los registros de los puntos RPuya1, RPuya2, QCaza1, RTumb1 y RTumb2.

Los métodos de cálculo de UCL95 utilizados según la distribución de los datos analizados fueron: Land (Ni en avenida), Gamma ajustado (Pb en avenida), Chebyshev (As, Cu, Zn en avenida y Pb y Zn en estiaje), t de Student (P y Hg en avenida y As, Cu y P en estiaje) y Chebyshev utilizando la media y desviación estándar (Fe y Mn en avenida y estiaje).

En la Figura 14 se aprecia que los valores UCL95 del Cu, P, Hg, Pb y Zn superaron los ECA para Agua de la categoría 4 durante las temporadas de avenida y de estiaje. El UCL95 del As superó el ECA en la temporada de lluvia y el UCL95 del Ni no superó el ECA en ninguna temporada de evaluación.

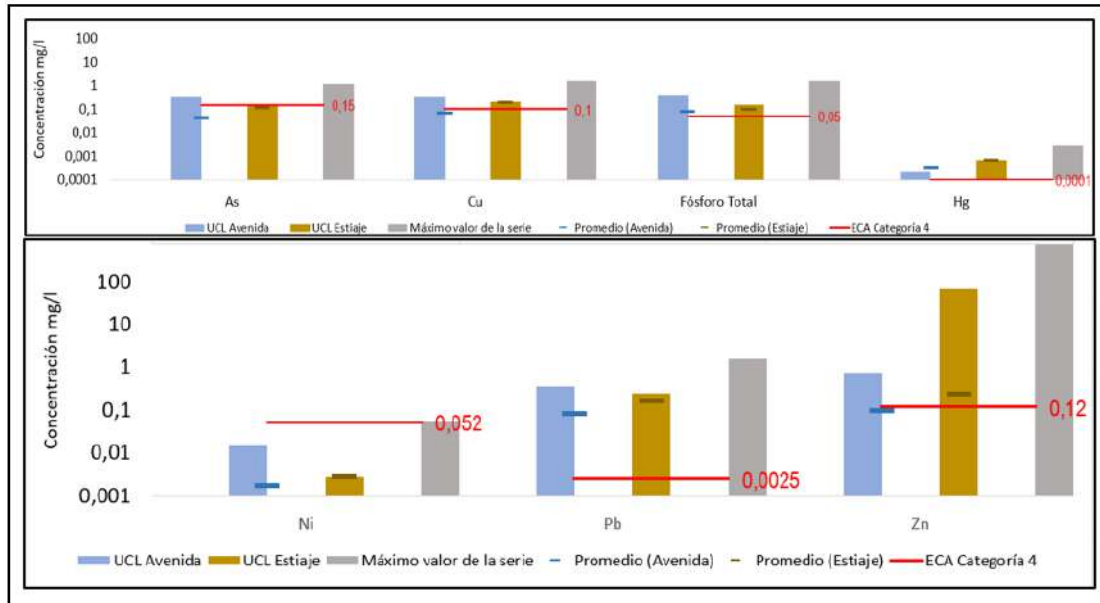


Figura 14. Valores UCL 95 durante las temporadas de avenida y estiaje, promedios y máximo valor detectado en comparación al ECA para Agua de la Categoría 4 (Conservación)

5.2.2. Cuenca del río Chira

Para la evaluación del tramo del río Chira que comprende la categoría 1 (poblacional), se analizaron los registros de trece puntos (RPbla1, RSpab1, RMaca1, RQuir1, RQuir2, RQuir3, RMaca4, RChir2, RChir3, RChir4, RChir5, RChir6 y RChir7) en los dos periodos de evaluación (avenida y estiaje) (Figura 15).

La Figura 15 muestra que los valores UCL95 del Al, Fe y fosfatos superaron los ECA para Agua de la categoría correspondiente durante la temporada de avenida. Los valores UCL95 del As, Cu, Hg, Pb y Zn no superaron los ECA para Agua en ninguna de las temporadas de evaluación. Así como, ninguno de los parámetros superó los ECA para Agua durante la temporada de estiaje.

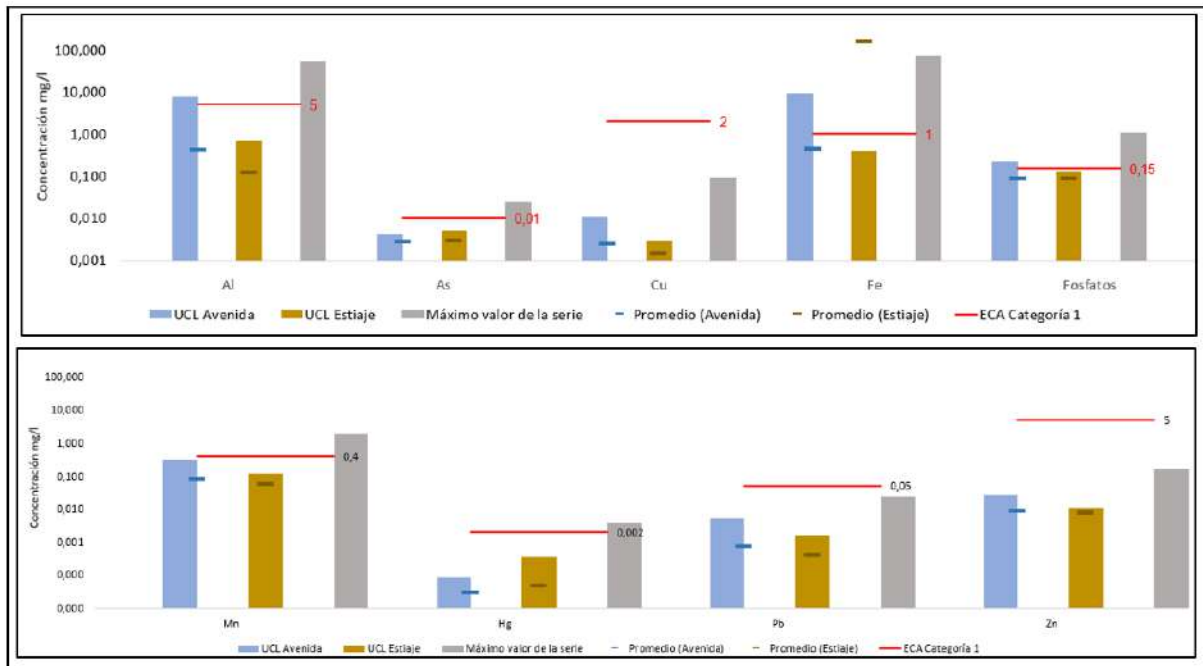


Figura 15. Valores UCL 95 durante las temporadas de avenida y estiaje, promedios y máximo valor detectado en comparación al ECA para Agua de la Categoría 1 (Poblacional)

En el tramo del río Chira que comprende la categoría de la categoría 3 (riego de vegetales y bebida de animales), se analizaron los datos de los 5 puntos (RChip1, RChip2, QTimb1, RChip3 y RChir8) en los dos periodos de evaluación (avenida y estiaje) (Figura 16).

La Figura 16 muestra que los valores UCL95 del Al, Fe y Mn superaron los ECA para Agua de la categoría 3 (Riego de Vegetales y Bebida de Animales) durante la temporada de avenida o lluvias. Los valores UCL95 de As, Co, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn no superaron los ECA para Agua en ninguna de las temporadas de evaluación y ninguno de los valores UCL95 de los parámetros evaluados superó los ECA durante la temporada de estiaje, excepto el Fe.

Los métodos de cálculo de UCL95 de los parámetros evaluados en la cuenca de Chira variaron entre Chebyshev (utilizando la media y la desviación estándar de la muestra) y Land.

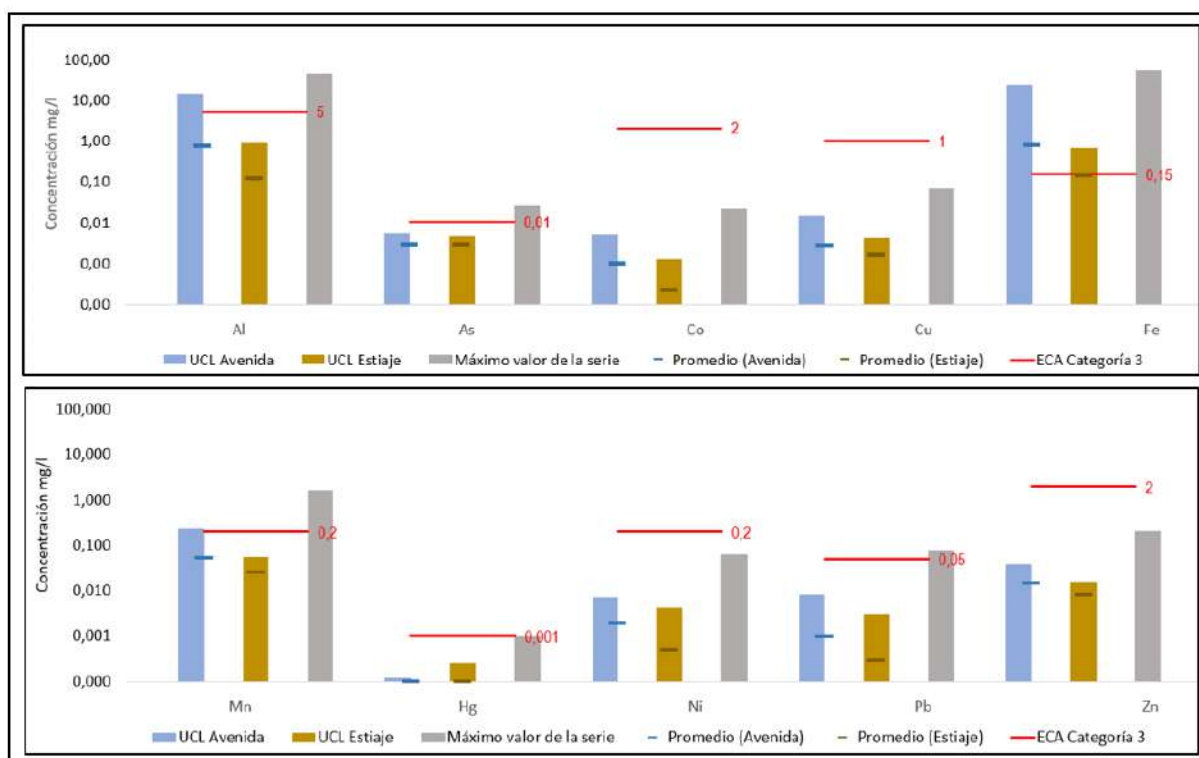


Figura 16. Valores UCL 95 durante las temporadas de avenida y estiaje, promedios y máximo valor detectado en comparación al ECA para Agua de la Categoría 3 (bebida de animales y riego de vegetales)

5.2.3. Relación ECA para Agua y UCL95 (REU)

En el anexo de este TFM se detallan los resultados de la REU calculados en cada categoría y temporadas del monitoreo de las variables de la calidad ambiental del agua en las dos cuencas estudiadas. De los resultados, se observa:

- En la zona alta de la cuenca Tumbes (categoría de conservación), que comprende el área de frontera con Ecuador y las áreas de reserva natural, se ha encontrado la afectación de la calidad del agua por As, Cu, P, Hg, Pb y Zn en la temporada de avenida y Cu, P, Hg, Pb y Zn en estiaje.
- En la zona media de la cuenca Tumbes (categoría poblacional), que a su vez, colinda con los núcleos urbanos más grandes del lado peruano de la cuenca Puyango-Tumbes, se ha encontrado la afectación de la calidad del agua por As, Fe, P, Mn, Pb, As y Al en la temporada de avenida o lluvias, y por As, P, Hg y Pb en estiaje.
- En la zona baja de la cuenca Tumbes (categoría de riego de vegetales y bebida de animales), que comprende áreas de producción agrícola e hidrobiológica, próxima a la desembocadura, se ha encontrado la afectación de la calidad del agua por Al, As, Cu, Fe, Mn, y Pb en la temporada de avenida, y por Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn en estiaje.
- Según el cálculo del valor UCL95 del As, afecta recurrentemente a la calidad del agua del río Tumbes en las dos temporadas de evaluación, con valores que superan hasta

en 15 veces el valor del ECA. Así mismo, el Pb superó el valor del ECA para Agua hasta en 144 veces.

- En la cuenca Chira, la mayor extensión de sus cursos de agua se categorizan como poblacionales, comprende principalmente los ríos Macará, Quiróz Alamor y San Pedro. En estas zonas se ha encontrado afectación ambiental por P, Al y Fe en la temporada de avenida y no se encontró afectación ambiental en estiaje. En los cursos de la categoría 3 (riego de vegetales y bebida de animales), se ha encontrado afectación ambiental por Al, Fe y Mn en la temporada de avenida y no se encontró afectación ambiental en estiaje.

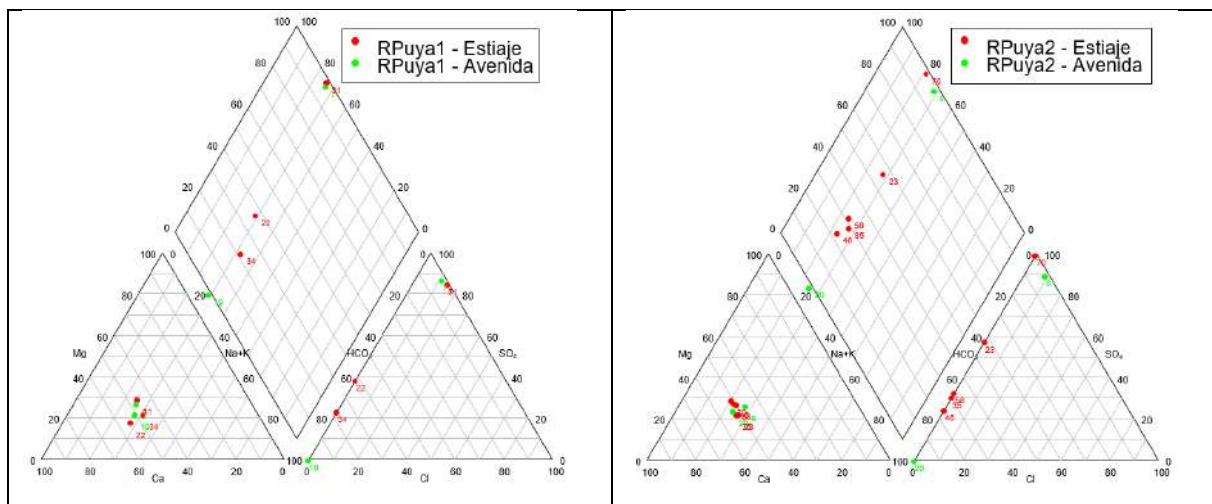
5.3. Caracterización hidroquímica

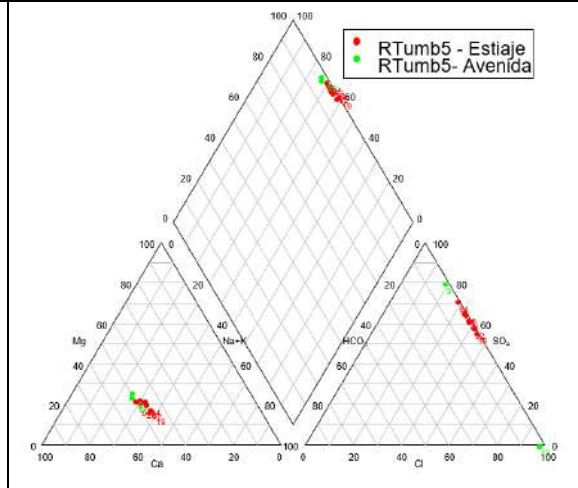
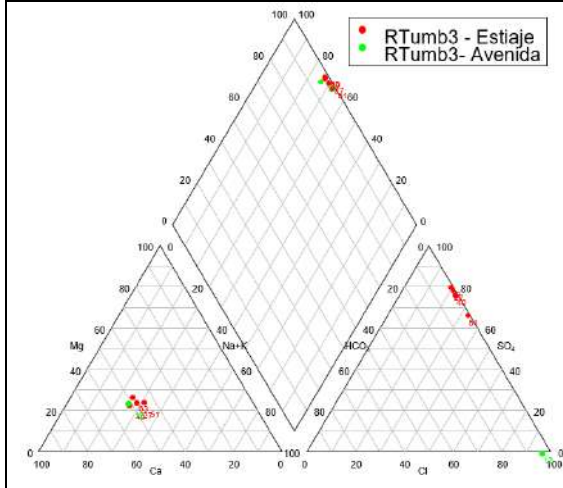
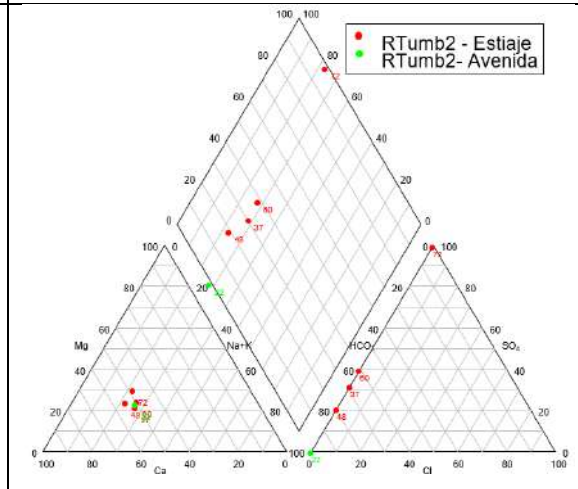
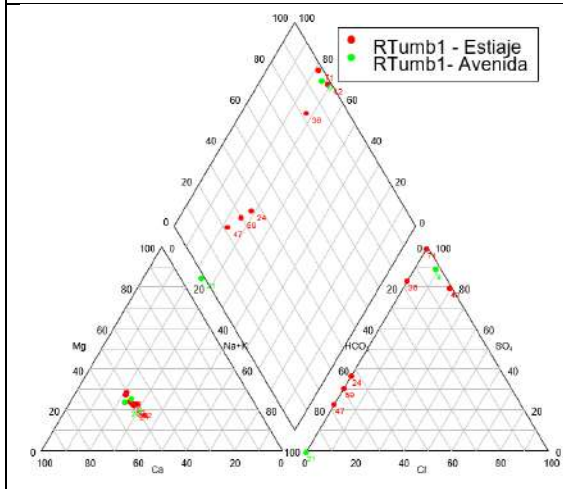
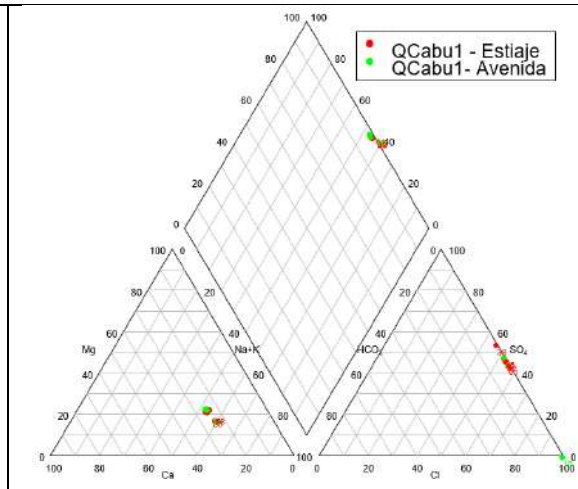
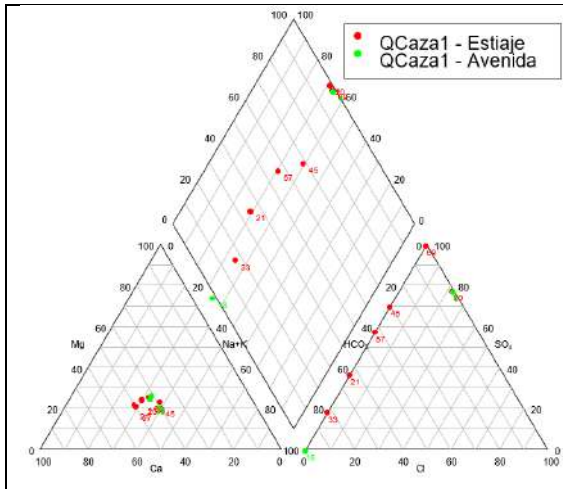
Se han elaborado 13 (cuenca Tumbes) y 18 (cuenca Chira) diagramas de Piper-Hill-Langelier para representar las facies hidroquímicas predominantes en cada punto de muestreo en épocas de avenida y estiaje.

Además, para cada cuenca, se ha realizado un mapa en el que se han representado diagramas de Stiff representativos de la facies hidroquímica de cada punto de muestreo con el fin de analizar su distribución espacial.

5.3.1. Cuenca del río Tumbes

La Figura 17 muestra la representación de las facies hidroquímicas predominantes en cada punto de muestreo para los dos períodos de monitoreo (estiaje y avenida).





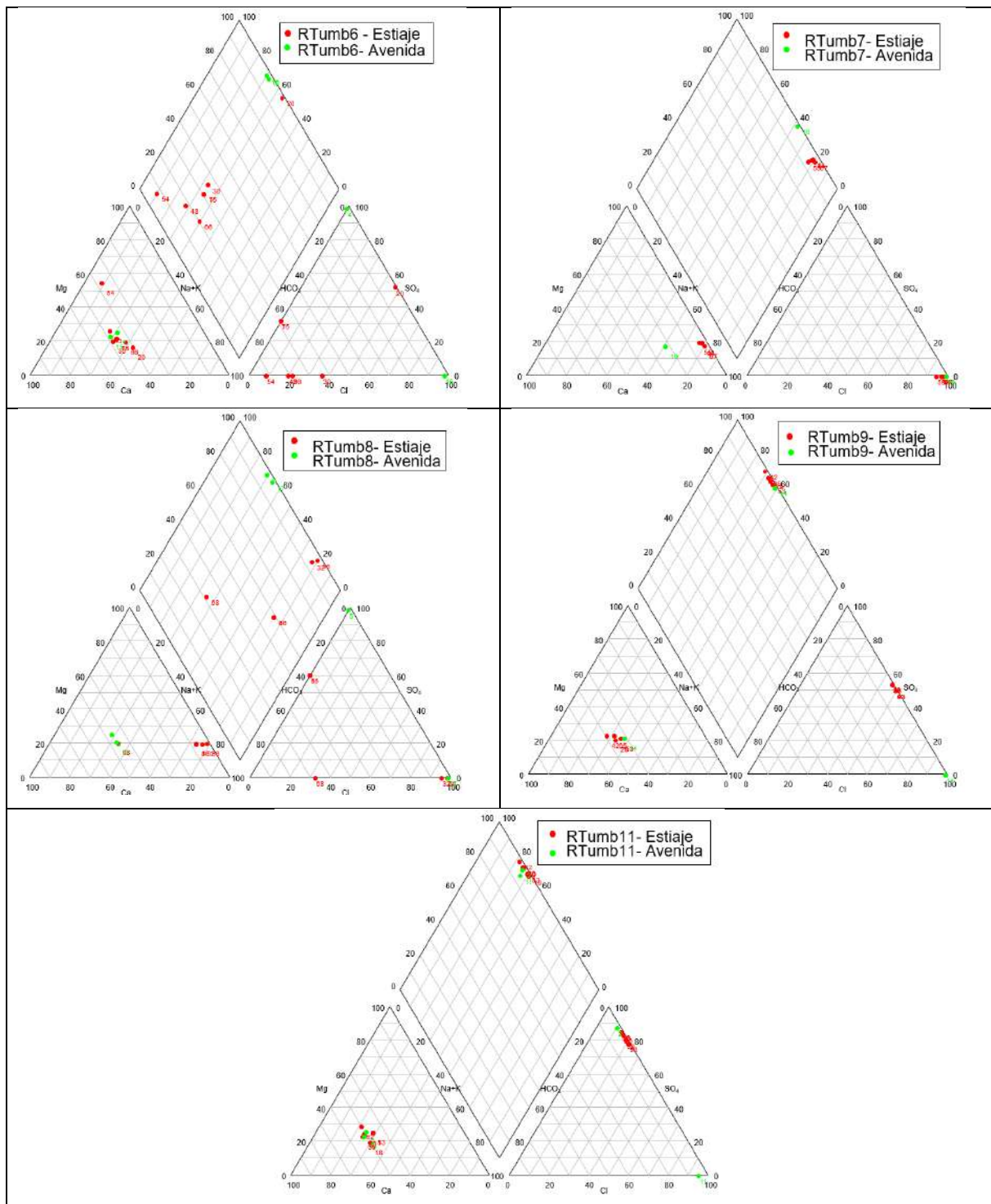


Figura 17. Diagramas de Piper-Hill-Langelier de la cuenca Tumbes según la variación temporal (avenida y estiaje)

En la Figura 17 se observa que las agrupaciones de los puntos (RTumb3, RTumb5, RTumb9 y RTumb11) y (RPuya1, RPuya2, RTumb1 y RTumb2) no presentaron una variación temporal significativa y conforman facies hidroquímicas similares. El primer grupo presenta facies sulfatadas sódico-cálcico-magnésicas y el segundo presenta dos facies predominantes: bicarbonatadas sódico-cálcico-magnésicas y sulfatadas sódico-cálcico-magnésicas (Figura

18). Los bicarbonatos conforman la fase más estable para los pH menores de 10, tal como ocurre en la cuenca de estudio y proceden fundamentalmente de la disolución de los carbonatos, esencialmente de las rocas calcáreas del Mesozoico. En cuanto a los sulfatos, procederían de la disolución de rocas evaporíticas existentes en el dominio sedimentario de la zona media de la cuenca Tumbes.

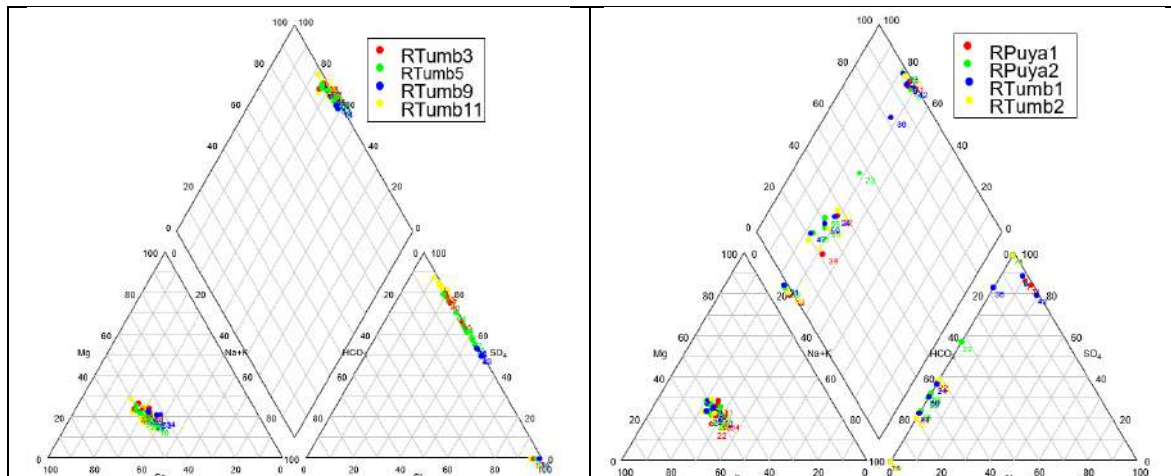


Figura 18. Agrupaciones de puntos por facies hidroquímicas, cuenca Tumbes

A partir del análisis de la variación temporal de las facies del agua en cada uno de los puntos y la agrupación de los que presentan facies predominantes similares, se han seleccionado las muestras para la representación de los diagramas de Stiff.

Los criterios para la elección de los puntos representativos consistieron en determinar si existía o no una variación significativa de la composición del agua (avenida y estiaje). Por otra parte, se realizó la verificación del diagrama de Piper para determinar una muestra ubicada en el interior de la nube de las facies predominantes. Finalmente, si los puntos presentaron variaciones, se seleccionaron muestras por cada periodo (avenida y estiaje), y si no presentaron variación se escogieron muestras únicas para cada punto. Si bien, todos los datos seleccionados no pertenecen a un mismo periodo de monitoreo, se priorizaron los datos de los últimos muestreos realizados entre los años 2019 y 2021.

En la Figura 19 se representan las facies hidroquímicas predominantes en cada punto de la red de monitoreo de la cuenca Tumbes. Se representa un solo diagrama de Stiff rojo (estiaje) o verde (avenida) cuando no se identifica variación temporal relevante.

Como consecuencia de la gran variación en la concentración iónica de las muestras, se eligieron distintas escalas para la representación de los diagramas de Stiff: RTumb7 (150 meq), en los puntos de las quebradas QCaza1 y QCabu1 (10 meq) y en todos los puntos restantes (2 meq). El mapa permite evidenciar el importante aporte de macro constituyentes del agua de las quebradas tributarias al río Tumbes, así como, la influencia del agua de mar en los puntos próximos a la desembocadura (RTumb7 y RTumb8).

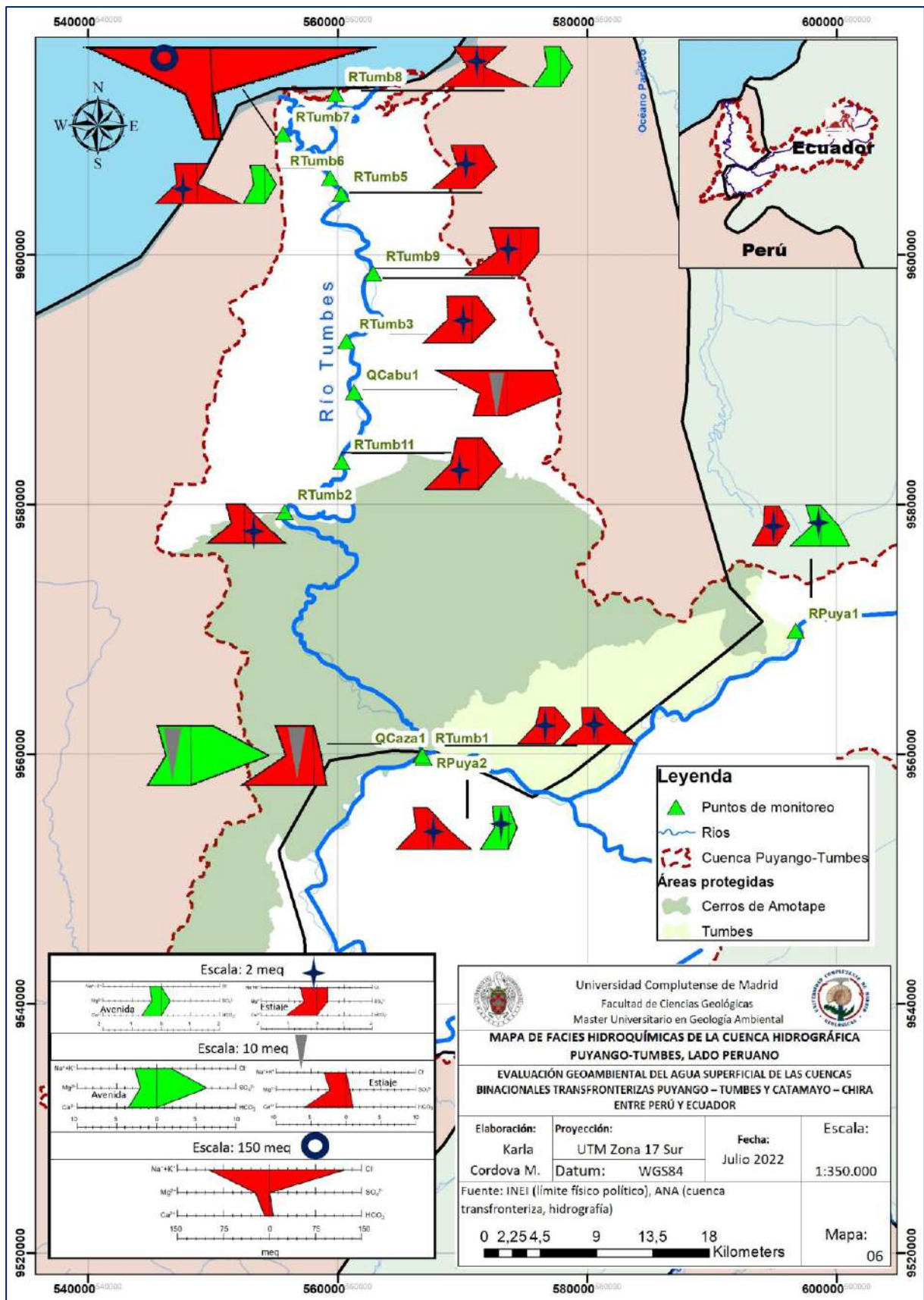
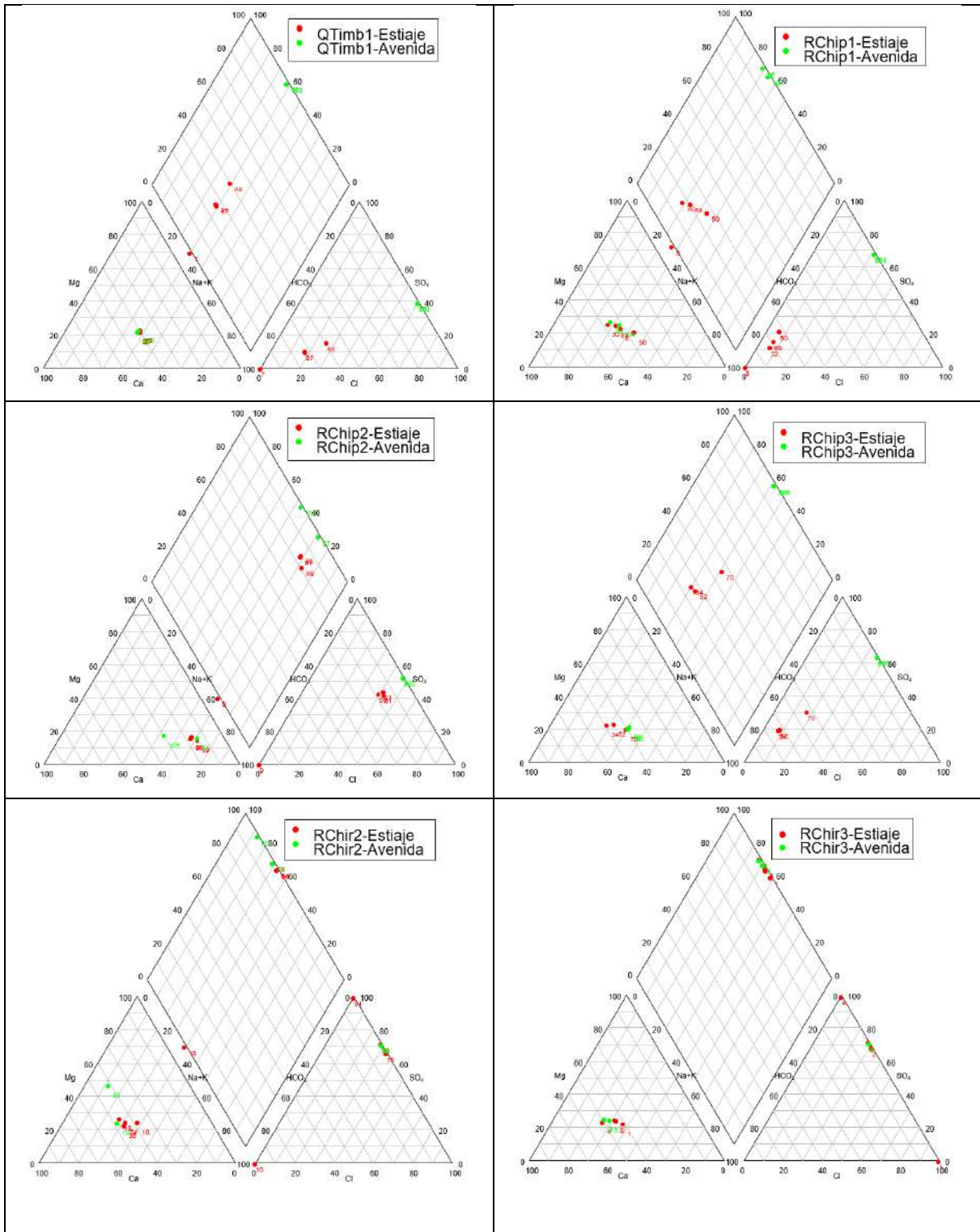
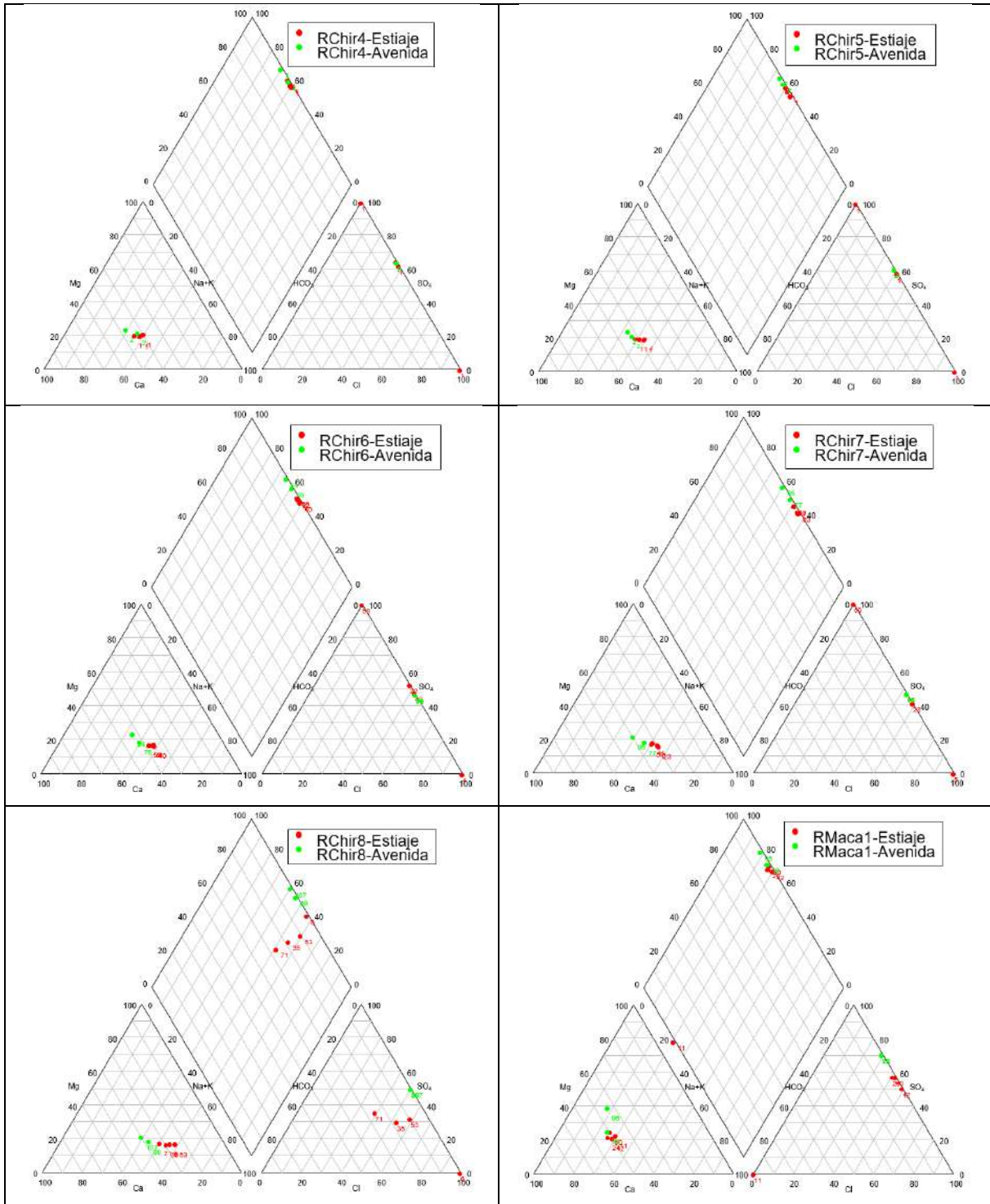


Figura 19. Distribución de facies hidroquímicas en el lado peruano de la cuenca Puyango-Tumbes

5.3.2. Cuenca del río Chira

La Figura 20 muestra la representación de las facies hidroquímicas predominantes en cada punto para los dos períodos de monitoreo (estiaje y avenida).





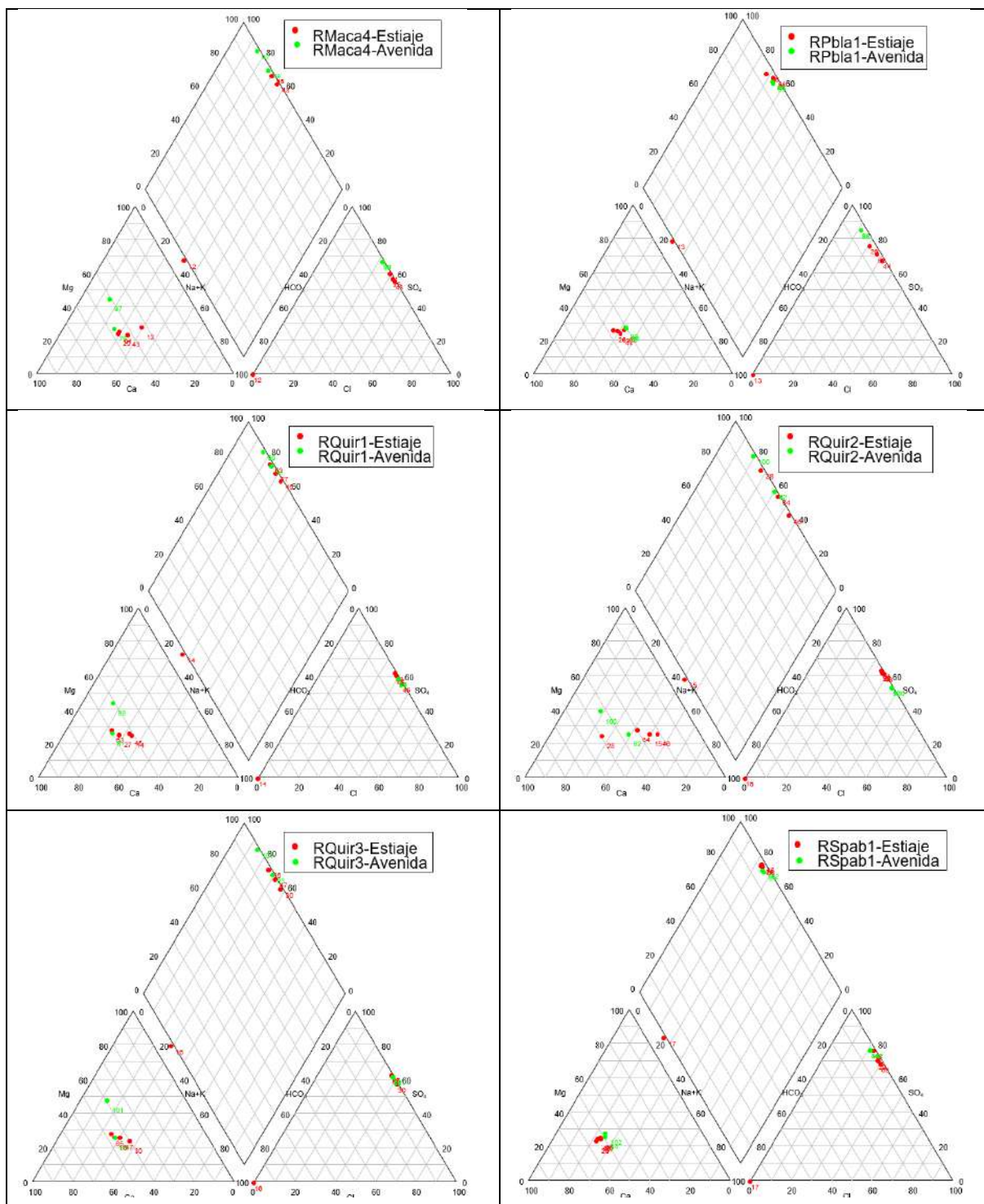


Figura 20 Diagramas de Piper-Hill-Langelier de los puntos de control de la cuenca Chira para los periodos de avenida y estiaje

En la Figura 20 se observa que las agrupaciones de los puntos (RChir2, RChir3, RChir4, RChir5, RChir6, RChir7, RMaca1, RMaca4, RQuir2, RQuir3 y RSpab1) y (QTimb1, RChip1 y Rchip3) no presentaron una variación temporal significativa y conforman facies hidroquímicas similares. El primer grupo presenta un carácter sulfatado cálcico-sódico-magnésico y el

segundo grupo presenta dos facies predominantes: sulfatada magnésico- sódico-cálcica y bicarbonatada magnésico-sódico-cálcica (Figura 21).

El dominio aniónico de los sulfatos se debería a la existencia de secuencias de estratos suavemente plegados de rocas sedimentarias marinas constituidas por areniscas, limolitas con presencia de yeso que afloran principalmente en la parte baja de la cuenca y los bicarbonatos procederían fundamentalmente de la disolución de los carbonatos de las rocas de las formaciones Pananga y Las Playas, esta última aflora en la parte ecuatoriana de la cuenca y está constituidas de calizas y limoarcillitas (Vilchez et al., 2006).

Asimismo, en el punto RChip2 predomina el carácter sulfatado-clorurado sódico en ambas temporadas y el punto RChir8 presenta un dominio clorurado sódico en la temporada de estiaje y sulfatado sódico-cálcico en el período de lluvias; se explica por su proximidad a la zona de confluencia e intercambio del agua del río Chira con el agua de mar.

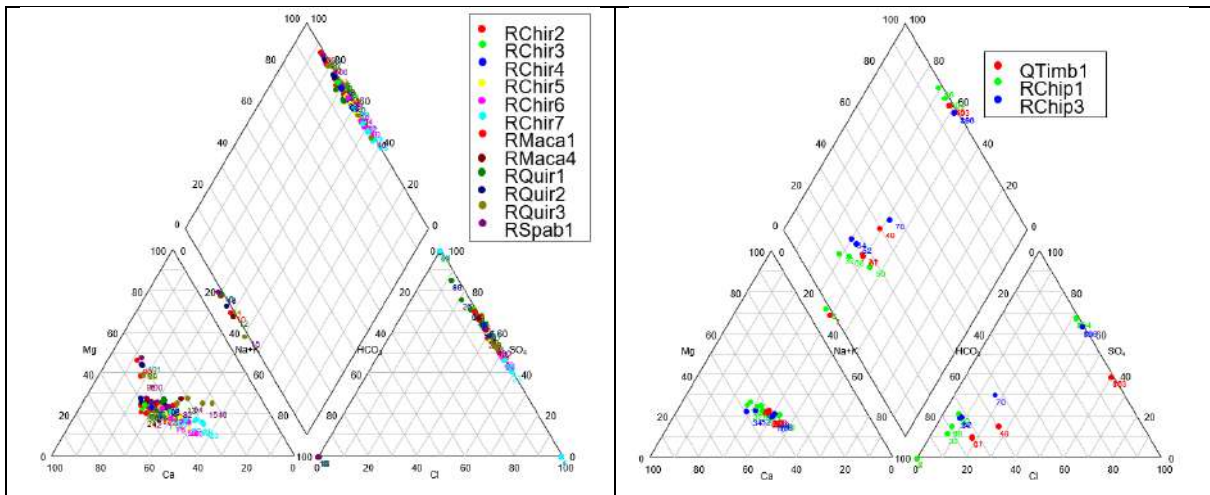


Figura 21 Agrupaciones de puntos por facies hidroquímicas, cuenca Chira

Una vez realizado el análisis temporal de la composición química del agua, se seleccionaron las muestras representativas por cada punto, en este caso se aplicaron los criterios descritos y aplicados en la cuenca Tumbes (apartado 5.3.1).

En la Figura 22 se representan las facies hidroquímicas predominantes en cada punto de la red de monitoreo de la cuenca Chira. Se presenta un solo diagrama de Stiff rojo (estiaje) o verde (avenida) cuando no se identifica una variación temporal.

Como en la cuenca anterior, como consecuencia de la fuerte variación en la concentración iónica de las muestras, se eligieron distintas escalas para la representación de los diagramas de Stiff: RChir8 (40 meq), RChir6 y RChip2 (10 meq), y en todos los puntos restantes (4 meq). Por las dimensiones de los diagramas, se evidencia que la carga iónica de los afluentes Macará y Quiroz se incrementa en su recorrido hacia la confluencia que origina el río Chira. Posteriormente, se refleja la influencia y marina en los puntos RChir7 y RChir8.

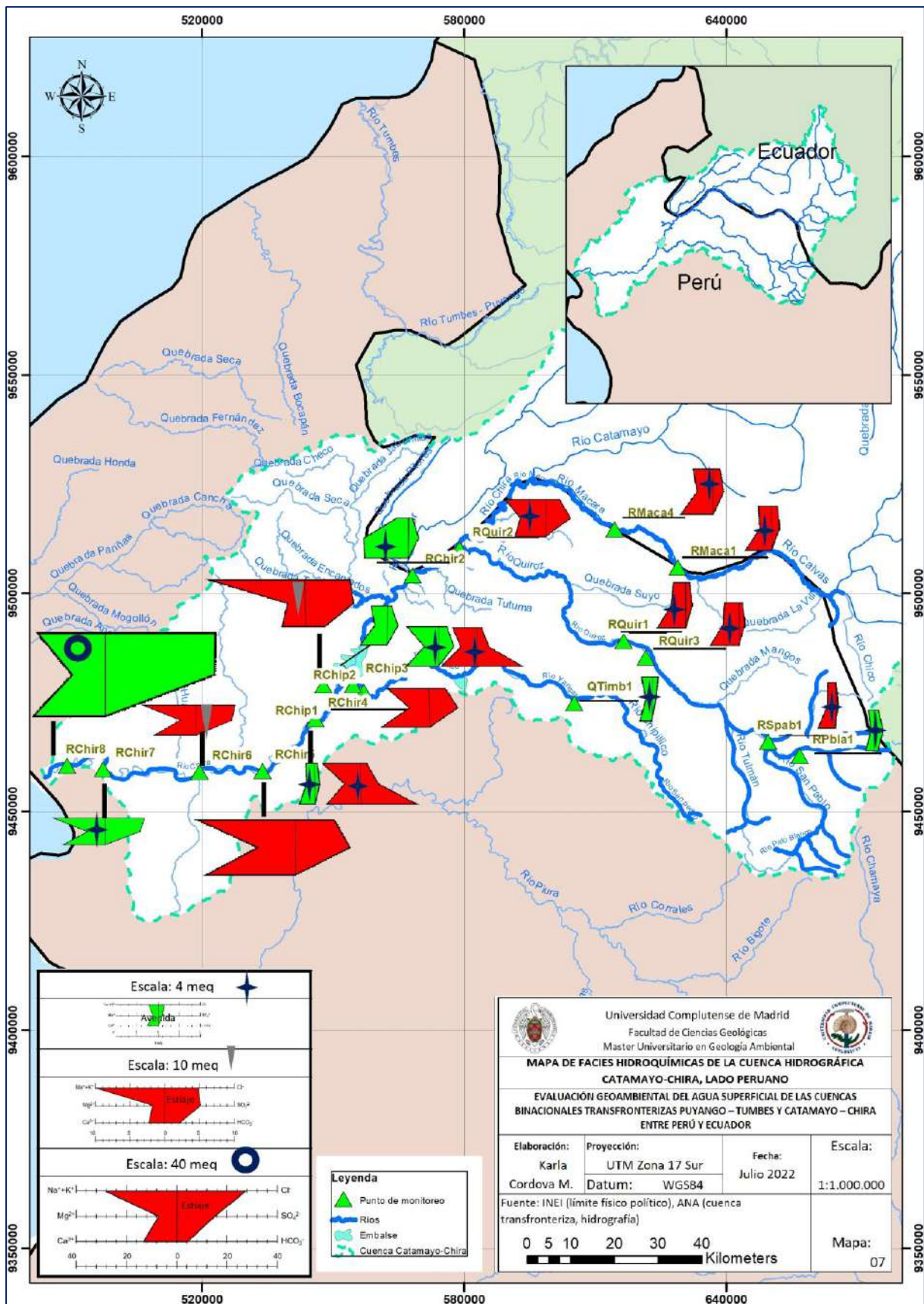


Figura 22. Distribución de facies hidroquímicas en el lado peruano de la cuenca Catamayo-Chira

6. DISCUSIÓN

A partir de los resultados presentados se pudo establecer que la calidad ambiental del agua superficial de las cuencas transfronterizas Puyango-Tumbes y Catamayo-Chira tiene relación con las actividades humanas que se desarrollan en toda la extensión de estas unidades hidrográficas, debido a que generan focos de contaminación puntuales y difusos en los que los contaminantes producidos por dichas actividades, y contenidos en sus descargas, no siempre tienen un punto único de entrada a los cuerpos de agua receptores. A través de los mapas de focos de contaminación antrópica que se elaboraron para ambas cuencas, se visualizan las numerosas fuentes puntuales identificadas en el territorio de Perú, las cuales tienen el potencial de alterar las características naturales de los recursos hídricos de forma directa y difusa. Estos resultados se ajustan a lo indicado por Escobar (2002), que menciona que las fuentes fijas y difusas de contaminación producidas por actividades que tienen lugar en tierra y que por el efecto de captación del agua que tienen las cuencas hidrográficas, generan efectos concentrados en las desembocaduras de los ríos en el mar y en las zonas costeras aledañas.

En la cuenca transfronteriza Puyango-Tumbes, los focos de contaminación se vinculan principalmente con el vertido de aguas residuales y la disposición inadecuada de residuos sólidos por los núcleos urbanos en continuo crecimiento, además de la actividad minera desarrollada en la zona alta de la cuenca. J. Delgado et al.(2018) respalda los hallazgos de los focos de contaminación al precisar que los embalses de residuos mineros de baja ley son una fuente de contaminación derivada de la oxidación de sulfuros diseminados, pues han causado impactos ambientales negativos en la cuenca del río Puyango-Tumbes.

En la cuenca Catamayo-Chira, los focos de contaminación de origen antrópico en la parte media y baja se vinculan principalmente con el vertido de aguas residuales domésticas y agrícolas, y con la disposición inadecuada de residuos sólidos, además con actividades menores de agricultura y ganadería desarrolladas en la zona alta. Estos resultados se alinean con lo informado por PBCCH (2005), que destaca el aprovechamiento hídrico de las actividades productivas agropecuarias en el lado peruano y la protección de los recursos naturales (Parque Nacional Podocarpus) en la zona alta de la cuenca.

Respecto a la calidad del agua superficial del lado peruano de la cuenca Puyango-Tumbes, se ha encontrado que los valores de UCL95 del Pb y P superan los ECA para agua en la categoría 1 (Poblacional) y 4 (Conservación) independientemente de las temporadas evaluadas. Además, los valores UCL95 del Al, As, Fe, Hg, Mn y Zn superaron dos o más categorías de evaluación de los ECA para agua, hecho que ocurrió con mayor frecuencia durante las temporadas de avenidas o lluvias. Estos resultados se relacionan con los encontrados por Mondal et al. (2020) respecto a la presencia del As en la zona de Tumbes, proveniente de la cuenca alta (distrito Portovelo), y por Marshall et al. (2018), que encontró

concentraciones de metales (As, Cu, Pb y Zn) que excedieron los umbrales entre 156 y 3567 veces en las aguas superficiales de del río Puyango-Tumbes.

Respecto a la calidad del agua superficial del lado peruano de la cuenca Catamayo-Chira, los valores UCL95 de los parámetros Hg, Zn, Ni, Pb, Mn, Cu y As no superaron los ECA para Agua en ninguno de los casos evaluados. Asimismo, los valores UCL95 del Al, Fe y P total superaron los ECA para Agua únicamente en las temporadas de lluvias o avenidas de las dos categorías evaluadas en la cuenca (1: Poblacional y 3: Riego de vegetales y bebida de animales). Estos resultados se relacionan con DIGESA, (2007) que halló el incumplimiento del Fe en un monitoreo de la calidad del agua y con Loaiza (2016), que no encontró evidencias para afirmar la existencia del riesgo ambiental por metales pesados generados por la actividad minera artesanal en los ríos Quiroz y Chira.

La caracterización hidroquímica del agua superficial del ámbito peruano de la cuenca Puyango-Tumbes ha permitido conocer las facies hidroquímicas predominantes en los puntos de control de los ríos Tumbes y Chira evaluados temporal y espacialmente a partir de información de 8 (río Tumbes) y 6 monitoreos (río Chira) entre los años 2017 y 2021.

En el río Tumbes, el predominio de facies mixtas bicarbonatadas sódico-cálcico-magnésicas y sulfatadas sódico-cálcico-magnésicas en las zona alta y media de la cuenca se relaciona con las características litológicas, de origen volcánico, metamórfico y sedimentario. En la parte baja y próxima a la desembocadura, las facies predominantes son cloruradas sódicas y bicarbonatadas cálcicas, que se asocian a la litología y a la proximidad con el mar, además con los valores más elevados. de conductividad eléctrica (RTumb7-27690 uS/cm) Las muestras representadas en el mapa mediante diagramas de Stiff permiten diferenciar las concentraciones iónicas en los puntos de control de las quebradas afluentes, como ejemplo, en el punto QCaza1 se relacionaría con el afloramiento de estratos de calizas bituminosas de la Formación Muerto en ambas márgenes de la Quebrada Cazaderos (Carrasco et al., 2020). La conductividad eléctrica en este punto de control fluctúa entre 700 y 1700 uS/cm, con valores de pH 7,2-9,7.

En el caso del río Chira, se observó que gran parte de los puntos no presentaron variación temporal y conforman facies hidroquímicas similares (sulfatadas cálcico-sódico-magnésicas, sulfatadas magnésico-sódico-cálcicas y bicarbonatadas magnésico-sódico-cálcicas). La representación de los diagramas de Stiff muestra el incremento de la carga iónica en dos afluentes del río Chira. Esto se relaciona con la disposición de focos contaminantes en la zona y con la disolución de rocas sedimentarias. Posteriormente, en los puntos cercanos a la desembocadura se impone el carácter clorurado sódico (estiaje) y sulfatado sódico-cálcico (avenida) explicado por su proximidad a la zona de confluencia e intercambio del agua del río Chira con el agua de mar. La conductividad mínima es 15,3 μ S/cm (RChip1) y 8560 μ S/cm (RChir 8). Los valores de pH fluctúan entre 7,3 (RPbla1) y 9,28 (RChip2).

7. CONCLUSIONES

La evaluación geoambiental del agua superficial de las cuencas transfronterizas Puyango-Tumbes y Catamayo-Chira entre Perú y Ecuador ha permitido mejorar el conocimiento de los principales focos de contaminación hídrica predominantes en el lado peruano de ambas cuencas, así como la calidad ambiental del agua y la caracterización hidroquímica, a partir de información histórica de carácter técnico y científico. De los resultados del presente trabajo, se destacan las siguientes conclusiones:

1. Los focos puntuales de contaminación de origen antrópico en la cuenca Puyango-Tumbes en el lado peruano se asocian principalmente con el vertido de aguas residuales urbanas (11) y con la disposición inadecuada de residuos sólidos (11), además de con la actividad minera desarrollada en la zona alta de la cuenca o lado ecuatoriano (87 plantas de beneficio de minerales ubicadas sobre terrazas aluviales de las riberas de los ríos Calera y Amarillo, afluentes del río Puyango).
2. Los focos puntuales de contaminación de origen antrópico en la cuenca Catamayo-Chira, en el lado peruano se asocian principalmente con el vertido de aguas residuales urbanas y agropecuarias (44) y con la disposición inadecuada de residuos sólidos (31), así como con actividades de agricultura y ganadería que se desarrollan en el lado ecuatoriano o zona alta de la cuenca.
3. En la evaluación de la calidad del agua superficial del lado peruano de la cuenca Puyango-Tumbes, se ha encontrado que los valores de UCL95 del Pb y P superan los ECA para agua en la categoría 1 (Poblacional) y 4 (Conservación), independientemente de las temporadas evaluadas. Además, los valores UCL95 del Al, As, Fe, Hg, Mn y Zn superaron dos o más categorías de evaluación de los ECA para agua, hecho que ocurrió con mayor frecuencia durante las temporadas de avenidas o lluvias.
4. En cuanto a la calidad del agua superficial del lado peruano de la cuenca Catamayo-Chira, los valores UCL95 de los parámetros Hg, Zn, Ni, Pb, Mn, Cu y As no superaron los ECA para Agua en ninguno de los casos evaluados. Asimismo, los valores UCL95 del Al, Fe y P superaron los ECA para Agua únicamente en las temporadas de lluvias o avenidas de las dos categorías evaluadas en la cuenca (1: Poblacional y 3: Riego de vegetales y bebida de animales).
5. Las facies hidroquímicas predominantes en el ámbito peruano de la cuenca Puyango-Tumbes, de acuerdo con la sectorización asignada, son las siguientes: sector alto del río Tumbes o frontera con Ecuador, bicarbonatadas sódico-cálcico-magnésicas y sulfatadas sódico-cálcico-magnésicas; sector medio del río Tumbes, sulfatadas sódico-cálcico-magnésicas; y en el sector bajo o desembocadura, cloruradas sódicas y bicarbonatadas cálcicas.

6. La facies hidroquímica predominante en el ámbito peruano de la cuenca Catamayo-Chira es sulfatada cálcico-sódica-magnésica en gran parte de la extensión de la cuenca, sulfatada magnésico-sódico-cálcica y bicarbonatada magnésico-sódico-cálcica en las zonas próximas al embalse de Poechos en la intersección de los afluentes Macará y Quiroz, y clorurada sódica y sulfatada sódico-cálcica en la zona de desembocadura.
7. La caracterización hidroquímica en el lado peruano de las dos cuencas de estudio permitió conocer la influencia de la composición litológica de las rocas que conforman la cuenca en la composición iónica del agua en todo el ámbito de estudio, asociada fundamentalmente a la influencia de las rocas sedimentarias, además de las fuentes de contaminación antrópica, y en las zonas de desembocadura el contacto con el agua de mar.
8. Respecto al estado de la calidad hídrica de las dos cuencas evaluadas, en base a los criterios del presente estudio, se podría determinar que la cuenca Puyango-Tumbes presentaría mayor afectación ambiental por metales pesados y metaloides (Al, As, Fe, Hg, Mn, Pb, y Zn), influenciada prioritariamente por la actividad minera desarrollada en la zona alta de la cuenca, en comparación con la cuenca Catamayo-Chira, que presentaría menor afectación ambiental. La presencia de fósforo total en más de una serie evaluada se relacionaría con la descarga de grandes volúmenes de aguas residuales a lo largo de la cuenca y la del Fe como un metal común en el agua presente en la mayoría de los sistemas hidrográficos costeros del Pacífico.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, N., Ojeda-Luna, T., Eguiguren, P., & Z., A.-M. (2015). *Cambio climático y biodiversidad: Estudio de caso de los páramos del Parque Nacional Podocarpus, Ecuador*. Programa de biodiversidad y Servicios Ecosistémicos. Universidad Nacional de Loja.
- ANA. (2008). *Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú*.
- ANA. (2015a). *Plan de gestión de los recursos hídricos de la cuenca Chira - Piura*.
- ANA. (2015b). *Plan de Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca Tumbes* (ANA).
- ANA. (2019). *Actualización de identificación de fuentes contaminantes en la cuenca piloto Tumbes-2019*.
- ANA. (2022). *Observatorio del Agua a Nivel Nacional*. Temática de La Calidad Del Agua. <https://snirh.ana.gob.pe/observatorioSNIRH/>
- Appleton, J. D., Williams, T. M., Orbea, H., & Carrasco, M. (2001). Fluvial contamination associated with artisanal gold mining in the Ponce Enríquez, Portovelo-Zaruma and Nambija areas, Ecuador. *Water, Air, and Soil Pollution*, 131(1–4), 19–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1011965430757>
- Arteaga, J., Ochoa, P., Fries, A., & Boll, J. (2020). Identification of Priority Areas for Integrated Management of Semiarid Watersheds in the Ecuadorian Andes. *Journal of the American Water Resources Association*, 56(2), 270–282. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12837>
- Benavent, I., Castillo, W., Farías de Reyes, M., Chávez, A. ., Távora, C., Calderón, E., Alcas, J. C., & Dunin-Borkowski, M. S. (2009). Hidrología isotópica para optimizar la gestión de los recursos hídricos en el norte de Perú: El acuífero Alto Piura – Perú. *Estudios de Hidrología Isotópica América Latina 2006*, 232.
- Bonilla, W. R. (2009). *Metalogenia del distrito minero Zaruma-Portovelo, República del Ecuador*. Universidad de Buenos Aires.
- Canadian Council of Ministers of the Environment CCME. (1998). *Canadian Water and Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*.
- Carrasco, M., Otiniano, A., Becerra, I., Huaripata, M., Ortiz, J., & Andrade, J. (2020). *Inspección Técnica de Línea Base Geoambiental de la Cuenca del río Puyango-Tumbes (Lado Peruano)*.
- CISPDR. (2016). *Plan Hidráulico Regional de la Demarcación Hidrográfica Puyango-Catamayo*.
- Comunidad de Madrid. (2011). *Instrucciones Técnicas para el Análisis de Riesgos para la Salud Humana en el Ámbito del Real Decreto 9/2005 de 14 de Enero en la Comunidad de Madrid*.
- Custodio, M., Cuadrado, W., Peñaloza, R., Montalvo, R., Ochoa, S., & Quispe, J. (2020). Human risk from exposure to heavy metals and arsenic in water from rivers with mining influence in the Central Andes of Peru. *Water (Switzerland)*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/w12071946>
- Delgado, A., Fernandez, A., Chirinos, B., Barboza, G., & Huamaní, E. L. (2021). Impact of the Mining Activity on the Water Quality in Peru Applying the Fuzzy Logic with the Grey Clustering Method. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(1), 348–357. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120141>
- Delgado, J., Barba, C., & Boski, T. (2018). Caracterización de residuos mineros y diseño preliminar de un sistema de acopio controlado en el distrito minero de Zaruma-Portovelo (SE Ecuador). In *Geogaceta* (Vol. 64).
- DIGESA. (2007). *Río Catamayo - Chira y Tributarios 2003 - 2005 - 2006 – Marzo 2007*.
- Escobar, J. (2002). La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. In *CEPAL* (Vol. 17, Issue 3).
- Fernandez, E. (2006). *Los hidrogramas y otros sistemas de representación del quimismo de las aguas* (GRAFINAT (ed.)).
- García, M. E., Betancourt, O., Cueva, E., & Guimaraes, J. R. D. (2012). Mining and Seasonal Variation of the Metals Concentration in the Puyango River Basin—Ecuador. *Journal of Environmental Protection*, 03(11), 1542–1550. <https://doi.org/10.4236/jep.2012.311170>

- Grande, J. A., Loayza-Muro, R., Alonso-Chaves, F. M., Fortes, J. C., Willems, B., Sarmiento, A. M., Santisteban, M., Dávila, J. M., de la Torre, M. L., Durães, N., Diaz-Curiel, J., & Luís, A. T. (2019). The Negro River (Ancash-Peru): A unique case of water pollution, three environmental scenarios and an unresolved issue. *Science of the Total Environment*, 648, 398–407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.068>
- Ingemmet-IIGE. (2021). *Boletín geológico binacional Perú-Ecuador, cuadrángulos de Tumbes (8c), Las Playas (9c) y Las Hojas de Huaquillas (N°20), Puyango (N°21), Alamor (N°22) y Zapotillo (N°23)*.
- INRENA. (2007). *Estudio Hidrogeológico del Valle de Tumbes*.
- Linares-Palomino, R., & Alvarez, S. I. P. (2005). Tree community patterns in seasonally dry tropical forests in the Cerros de Amotape Cordillera, Tumbes, Peru. *Forest Ecology and Management*, 209(3), 261–272. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.003>
- Loaiza, L. (2016). *Evaluación del riesgo ambiental por metales pesados, generados por la actividad minera artesanal en los ríos Quiroz y Chira – Piura por el método de especiación secuencial* [Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/5221>
- Marshall, B. G., Veiga, M. M., Kaplan, R. J., Adler Miserendino, R., Schudel, G., Bergquist, B. A., Guimarães, J. R. D., Sobral, L. G. S., & Gonzalez-Mueller, C. (2018). Evidence of transboundary mercury and other pollutants in the Puyango-Tumbes River basin, Ecuador–Peru. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 20(4), 632–641. <https://doi.org/10.1039/C7EM00504K>
- MINAM. (2017). Aprueban Estandares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen disposiciones complementarias. In *El Peruano* (pp. 6–9).
- Molloy, J. B., Rodbell, D. T., Gillikin, D. P., & Hollocher, K. T. (2020). Citizen science campaign reveals widespread fallout of contaminated dust from mining activities in the central Peruvian Andes. *Geology*, 48(7), 678–682. <https://doi.org/10.1130/G47096.1>
- Mondal, D., Periche, R., Tineo, B., Bermejo, L. A., Rahman, M. M., Siddique, A. B., Rahman, M. A., Solis, J. L., & Cruz, G. J. F. (2020). Arsenic in Peruvian rice cultivated in the major rice growing region of Tumbes river basin. *Chemosphere*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125070>
- Moquet, J. S., Morera, S. B., Turcq, B., Poitrasson, F., Roddaz, M., Moreira-Turcq, P., Espinoza, J. C., Guyot, J. L., Takahashi, K., Orrillo, J. D., Petrick, S., Mounic, S., & Sondag, F. (2020). Control of seasonal and inter-annual rainfall distribution on the Strontium-Neodymium isotopic compositions of suspended particulate matter and implications for tracing ENSO events in the Pacific coast (Tumbes basin, Peru). *Global and Planetary Change*, 185(November 2019), 12. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103080>
- Mora, A., Jumbo-Flores, D., González-Merizalde, M., & Bermeo-Flores, S. A. (2016). Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río puyango, Ecuador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(4), 385–397. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.04.02>
- Moreno, L., & De la Losa, A. (2009). *INAQUAS: utilidad para la interpretación de análisis químicos de aguas subterráneas* (IGME (ed.)).
- Na, T. W., Kang, T. W., Lee, K. H., Hwang, S. H., Jung, H. J., & Kim, K. (2019). Distribution and ecological risk of pharmaceuticals in surface water of the Yeongsan river, Republic of Korea. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 181(January), 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.06.004>
- Nima, R. (2020). *Determinación del grado de contaminación por metales pesados generados por la actividad minera artesanal, para evaluar la calidad del agua del río Quiroz sector San Sebastián - Pampa Larga-Suyo-Piura*. Universidad Nacional de Piura.
- OEFA. (2022a). *Portal interactivo de Fiscalización Ambiental*. Intervenciones. <https://publico.oefa.gob.pe/Portalpifa/>
- OEFA. (2022b). *Reporte de intervenciones de la cuenca del río Chira*. <https://publico.oefa.gob.pe/Portalpifa/Intervenciones.do?tipo=2&codigo=138>
- OEFA. (2022c). *Reporte de intervenciones de la cuenca del río Tumbes. Áreas Degradadas*

- Por Residuos Sólidos Municipales.
<https://publico.oefa.gob.pe/Portalpifa/Intervenciones.do?tipo=2&codigo=1394>
- OMS. (1981). *Revised Health Criteria Document: Mercury*.
- Oviedo, R., Moina, E., Naranjo, J., & Barcos, M. (2017). Contamination by heavy metals in the south of Ecuador associated to the mining activity. *Bionatura*, 2(4), 437–441. <https://doi.org/10.21931/RB/2017.02.04.5>
- PBCCH. (2005). *Cuenca Binacional Catamayo-Chira. Caracterización hídrica y adecuación entre la oferta y la demanda, caracterización territorial y documentación básica*.
- PBDRF. (2021). *Gestión Integral de la Cuenca Binacional Catamayo-Chira*. <https://planbinacional.org.ec/gestion-integral-de-la-cuenca-binacional-catamayo-chira/>
- Pinos, J., & Malo-Larrea, A. (2018). El derecho humano de acceso al agua: una revisión desde el Foro Mundial del Agua y la gestión de los recursos hídricos en Latinoamérica. *Invurnus*, 13(1), 12–20.
- Rascón, J., Corroto, F., Leiva-Tafur, D., & Gamarra Torres, O. A. (2021). Variaciones limnológicas espaciotemporales de un lago altoandino tropical al norte de Perú. *Ecología Austral*, 31(2), 343–356. <https://doi.org/10.25260/ea.21.31.2.0.1200>
- SENAMHI. (2021). *Mapa Climático del Perú*. SENAMHI. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Singh, A. ., Singh, A., & Engelhardt, M. (1997). The lognormal distribution in environmental applications. *Technology Support Center Issue Paper*, 226–226. <https://doi.org/10.2307/j.ctv346phg.18>
- USEPA. (2002). Calculating upper confidence limits for exposure point concentrations at hazardous waste sites. In *Oswer 9285.6-10*.
- USEPA. (2005). Supplemental Guidance to RAGS: Calculating the Concentration Term. In *Intermittent Bulletin, Volume 1 Number 1* (Vol. 1, p. 8).
- USEPA. (2022). *ProUCL: Statistical Software for Environmental Applications for Data Sets with and without Nondetect Observations. Version 5.2*. <https://www.epa.gov/land-research/proucl-software>
- Vilchez, M., Núñez, S., & Valenzuela, G. (2006). Estudio Geoambiental de la Cuenca del Río Chira-Catamayo. In *Geodinámica e Ingeniería Geológica: Vol. Serie C* (INGEMMET, p. 271).

ANEXO

Cuenca Tumbes

Categoría 1: Poblacional					Categoría 3: Riego y bebida de animales					Categoría 4: Conservación del ambiente acuático				
T	Pará m.	ECA (mg/l)	UCL95 (mg/l)	REU	T	Pará m	ECA (mg/l)	UCL95 (mg/l)	REU	T	Parám.	ECA (mg/l)	UCL95 (mg/l)	REU
A	Al	5	10,61	2,12	A	Al	5	20,7	4,14	A	As	0,15	0,323	2,15
A	As	0,01	0,15	15,00	A	As	0,1	0,24	2,40	A	Cu	0,1	0,328	3,28
A	Cu	2	0,243	0,12	A	Co	0,05	0,0121	0,24	A	P total	0,05	0,369	7,38
A	Fe	1	24,49	24,49	A	Cu	0,2	0,314	1,57	A	Hg	0,0001	0,00022159	2,22
A	P	0,15	357,3	2382,00	A	Fe	5	32,89	6,58	A	Ni	0,052	0,0153	0,29
A	Hg	0,002	0,000096216	0,05	A	Hg	0,001	0,0001456	0,15	A	Pb	0,0025	0,362	144,80
A	Mn	0,4	0,503	1,26	A	Mn	0,2	0,632	3,16	A	Zn	0,12	0,766	6,38
A	Pb	0,05	0,367	7,34	A	Ni	0,2	0,018	0,09	E	As	0,15	0,129	0,86
A	Zn	5	0,498	0,10	A	Pb	0,05	0,387	7,74	E	Cu	0,1	0,204	2,04
E	Al	5	0,207	0,04	A	Zn	2	0,574	0,29	E	P total	0,05	0,154	3,08
E	As	0,01	0,126	12,60	E	Al	5	61	12,20	E	Hg	0,0001	0,0006662	6,66
E	Fe	1	0,151	0,15	E	As	0,1	1,495	14,95	E	Ni	0,052	0,0027	0,05
E	P total	0,15	4,797	31,98	E	Co	0,05	0,0258	0,52	E	Pb	0,0025	0,249	99,60
E	Hg	0,002	0,314	1	E	Cu	0,2	0,227	1,14	E	Zn	0,12	69,34	577,83
E	Mn	0,4	0,00049462	0,00	E	Fe	5	129,8	25,96	E	Donde: T: temporada (A - avenida / E - estiaje) REU = UCL/ECA			
E	Pb	0,05	0,205	4,10	E	Hg	0,001	0,0146	14,60					
E	Zn	5	0,197	0,04	E	Mn	0,2	4,683	23,42					
					E	Ni	0,2	0,0259	0,13					
					E	Pb	0,05	2,463	49,26					
					E	Zn	2	3,547	1,77					

Cuenca Chira

Categoría 1: Poblacional					Categoría 3: Riego y bebida de animales				
T	Parám.	ECA	UCL95	REU	T	Parám.	ECA	UCL95	REU
A	P	0,15	0,219	1,46	A	Al	5	14,05	2,81
A	Al	5	7,635	1,53	A	As	0,1	0,00546	0,05
A	As	0,01	0,00423	0,42	A	Co	0,05	0,00506	0,10
A	Cu	2	0,0109	0,01	A	Cu	0,2	0,0144	0,07
A	Fe	1	9,164	9,16	A	Fe	5	22,62	4,52
A	Fosfatos	0,15	0,219	1,46	A	Mn	0,2	0,24	1,20
A	Mn	0,4	0,309	0,77	A	Hg	0,001	0,00011819	0,12
A	Hg	0,002	0,000084836	0,04	A	Ni	0,2	0,00703	0,04
A	Pb	0,05	0,00527	0,11	A	Pb	0,05	0,00794	0,16
A	Zn	5	0,0267	0,01	A	Zn	2	0,0387	0,02
E	P	0,15	0,125	0,83	E	Al	5	0,908	0,18
E	Al	5	0,671	0,13	E	As	0,1	0,0047	0,05
E	As	0,01	0,00497	0,50	E	Co	0,05	0,00125	0,03
E	Cu	2	0,00297	0,00	E	Cu	0,2	0,00419	0,02
E	Fe	1	0,408	0,41	E	Fe	5	0,676	0,14
E	Fosfatos	0,15	0,125	0,83	E	Mn	0,2	0,0571	0,29
E	Mn	0,4	0,121	0,30	E	Hg	0,001	0,0002596	0,26
E	Hg	0,002	0,00034637	0,17	E	Ni	0,2	0,00421	0,02
E	Pb	0,05	0,00156	0,03	E	Pb	0,05	0,00296	0,06
E	Zn	5	0,0108	0,00	E	Zn	2	0,0152	0,01