

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
DIRECCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE FÍSICA
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA



TESIS

“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO Y ESTRATEGIAS DE GESTIÓN EN LA
SUBCUENCA YEGUARE, 2020-2021”

PRESENTA: JOSSELINE FAVIOLA NUÑEZ MARADIAGA

PREVIA OPCIÓN AL GRADO DE MÁSTER EN:
RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA

ASESORES:
TANIA PEÑA
ALEXANDRA SUHOGUSOFF
DILIA IRASEMA MONTOYA

TEGUCIGALPA, M.D.C.

HONDURAS, C.A.

MARZO, 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
DIRECCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE FÍSICA
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA
Ciudad Universitaria, Tegucigalpa, Honduras.



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS:

DOCTOR: ODIR AARÓN FERNÁNDEZ FLORES

RECTOR

MASTER JOSÉ ALEXANDER ÁVILA VALLECILLO

SECRETARIO GENERAL

DOCTOR: ARMANDO EUCEDA

DIRECTOR DE POSTGRADOS

MÁSTER: TANIA PEÑA

COORDINADOR DE LA MAESTRÍA

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA

MARZO, 2024

RESUMEN

El agua es esencial para la vida y desempeña un papel fundamental para el desarrollo de las actividades diarias, por lo tanto, su disponibilidad como su calidad tienen un impacto directo en el bienestar humano. En esta investigación, se planteó el objetivo de evaluar la calidad del agua para consumo humano en la subcuenca Yeguaré durante el periodo 2020 y 2021, con el fin de proponer estrategias integrales de gestión que promuevan el uso sostenible del agua. Para cumplir con este objetivo, se realizó un monitoreo continuo de la calidad del agua durante el periodo mencionado, respaldado por la implementación de la caracterización hidroquímica. En este proceso, se observaron similitudes en la composición química de dos grupos principales. Uno de estos grupos mostraba una composición mayormente sulfatada sódica, con niveles de pH bajos entre 3 y 5. El otro grupo presentaba una composición mayormente bicarbonatada cálcica, con niveles de pH entre 6 y 8. La aplicación del Índice de Calidad de Agua propuesto por Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME_{WQI}) reveló que el 61% de fuentes de agua obtuvieron clasificación de “Marginal” (48%) o “Pobre” (13%) según los criterios de la normativa nacional para el consumo de agua potable. A su vez se comparó con las directrices de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) mostrando un aumento en la clasificación “Pobre”. La falta de fuentes con clasificación “Excelente” y la presencia significativa de fuentes “Marginales” y “Pobres” destacan la importancia de acciones de conservación, monitoreo y control de la calidad del agua para proteger la salud de las comunidades y el medio ambiente. Este estudio proporciona información relevante para la toma de decisiones sobre el manejo y tratamiento del agua subterránea en la subcuenca Yeguaré, y propone estrategias que promueven la Gestión Integrada del Recurso Hídrico.

ABSTRACT

Water is essential for life and plays a fundamental role in the development of daily activities; therefore, its availability and quality directly impact human well-being. In this research, the objective was to evaluate the quality of water for human consumption in the Yeguaré sub-basin during the period 2020 and 2021 to propose comprehensive management strategies that promote the sustainable use of water. To meet this objective, continuous water quality monitoring was carried out during the period mentioned above, supported by the implementation of hydrochemical characterization. In this process, similarities in the chemical composition of two main groups were observed. One of these groups showed a mostly sodium sulfate composition, with low pH levels between 3 and 5. The other group showed a mostly calcium bicarbonate composition, with pH levels between 6 and 8.

The application of the Water Quality Index proposed by the Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME_{WQI}) revealed that 61% of water sources were classified as "Marginal" (48%) or "Poor" (13%) according to national drinking water standards. This in turn was compared to Environmental Protection Agency (EPA) and World Health Organization (WHO) guidelines showing an increase in the "Poor" classification. The lack of sources with "Excellent" classification and the significant presence of "Marginal" and "Poor" sources highlight the importance of conservation actions, monitoring and control of water quality to protect the health of communities and the environment. This study provides relevant information for decision-making on groundwater management and treatment in the Yeguaré sub-basin and proposes strategies that promote Integrated Water Resource Management

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	III
ABSTRACT.....	III
Índice de figuras	VIII
Índice de gráficos	IX
Índice de ilustraciones.....	IX
Índice de mapas	IX
Índice de tablas	X
ABREVIATURAS.....	XII
Nomenclatura Química	XIII
AGRADECIMIENTOS.....	XIV
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: Delimitación del problema	3
1.1 Descripción de la problemática	3
1.2 Justificación de la investigación.....	5
1.3 Límites de la investigación	6
A. Limitaciones de Tiempo.....	6
B. Limitaciones de Espacio o Territorio.....	7
C. Limitaciones de Recursos	7
1.4 Definición del problema	7
CAPITULO II: Objetivos.....	9
2.1 Objetivo general	9
2.2 Objetivos específicos	9
CAPITULO III: Marco de referencia	10
3.1 Marco histórico	10
3.2 Marco político	11
3.3 Marco teórico	13

A.	Recursos Hídricos	13
B.	Calidad del agua	15
C.	Hidroquímica	28
D.	Contaminación de las Fuentes de Agua Subterránea	35
E.	Efectos de la Calidad del Agua en la Salud Humana y Ecosistemas	37
F.	Gestión Integrada del Recurso Hídrico	40
CAPITULO IV: Descripción del medio		41
4.1	Situación geográfica	41
4.2	Descripción socioeconómica	42
A.	Actividades económicas	43
B.	Uso del suelo	44
4.3	Morfología.....	45
4.4	Geología	46
4.5	Climatología.....	49
4.6	Hidrología	53
4.7	Hidrogeología	55
CAPITULO V: Metodología		59
5.1	Tipo de investigación	59
5.2	Diseño de la investigación	59
A.	Fase I: Revisión bibliográfica de la problemática	61
B.	Fase II: Recolección de datos	61
C.	Fase III: Manejo de datos.....	73
D.	Fase IV: Análisis de Resultados	78
CAPITULO VI: Análisis e interpretación de los datos		79
6.1	Hidroquímica	79
A.	Parámetros Físicos.....	79

B. Iones Mayoritarios.....	84
C. Nutrientes.....	92
D. Metales.....	95
E. Diagramas de Pourbaix.....	98
6.2 Calidad de agua	103
6.3 Gestión Integrada del Recurso Hídrico	106
A. Riesgos Hídricos que impactan en la calidad del agua	106
B. Estrategias de Gestión	107
CAPITULO VII: Discusión.....	119
Conclusiones	125
Recomendaciones	127
BIBLIOGRAFÍA.....	129
ANEXOS	144
ANEXO 1: Norma Técnica Nacional para la Calidad del Agua Potable	144
ANEXO 2: Puntos de muestreo	145
ANEXO 3: Balance iónico de los puntos de muestreo.....	146
ANEXO 4: Tipo de agua.....	148
ANEXO 5: Series temporales de iones mayoritarios	150
A. Cloruros	150
B. Sulfatos.....	151
C. Bicarbonatos.....	152
D. Calcio	153
E. Magnesio.....	154
F. Potasio.....	155
G. Sodio.....	156
ANEXO 6: Índice de Calidad del Agua (ICA).....	157

A. Según Norma Técnica Nacional para la Calidad del Agua Potable (NTNCAP)	157
B. Según Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)	158
C. Según Organización Mundial de la SaLud (OMS)	159
Contribuciones científicas	160
Artículos científicos	160
Trabajos de investigación	161
Capítulos de Libro.....	162

Índice de figuras

Figura I-1 Línea de tiempo de las actividades desarrolladas en la investigación.	6
Figura V-1 Diseño de investigación.....	60
Figura V-2 Consideraciones para la recolección de datos.	62
Figura V-3 Definición de parámetros considerados para el desarrollo del ICA en la subcuenca Yeguaré. ...	64
Figura V-4 Condiciones de preservación para cada parámetro analizado.	65
Figura V-5 Metodología de muestreo.....	66
Figura VI-1 Diagrama de Piper época lluviosa 2020 en la subcuenca Yeguaré.	85
Figura VI-2 Diagrama de Schoeller época lluviosa 2020 en la subcuenca Yeguaré.	86
Figura VI-3 Diagrama de Piper época seca 2021 en la subcuenca Yeguaré.	87
Figura VI-4 Diagrama de Schoeller época seca 2021 en la subcuenca Yeguaré.	88
Figura VI-5 Diagrama de Piper temporada de canícula 2021 en la subcuenca Yeguaré.	89
Figura VI-6 Diagrama de Schoeller temporada de canícula 2021 en la subcuenca Yeguaré.	90
Figura VI-7 Diagrama de Pourbaix del Hierro en la subcuenca Yeguaré.	99
Figura VI-8 Diagrama de Pourbaix del Aluminio en la subcuenca Yeguaré.....	100
Figura VI-9 Diagrama de Pourbaix del Aluminio en toma #3, Macuelizo, Tatumbla (Y-MA-05).....	100

Índice de gráficos

Gráfica IV-1 Precipitación media mensual en la Subcuenca Yeguaré.	53
Gráfica VI-1 Serie temporal de la conductividad en la subcuenca Yeguaré.	80
Gráfica VI-2 Serie temporal del ORP en la subcuenca Yeguaré.	81
Gráfica VI-3 Serie Temporal del pH en la subcuenca Yeguaré.	82
Gráfica VI-4 Serie temporal de la Turbidez en la Subcuenca Yeguaré.	84
Gráfica VI-5 Serie temporal del amonio en la subcuenca Yeguaré.	92
Gráfica VI-6 Serie temporal del nitrito en la subcuenca Yeguaré.	93
Gráfica VI-7 Serie temporal del nitrato en la subcuenca Yeguaré.	94
Gráfica VI-8 Índice de Calidad de Agua, según NTNCA (1995) en la Subcuenca Yeguaré.	104

Índice de ilustraciones

Ilustración III-1 Ciclo del agua.....	13
Ilustración IV-1 Perfil longitudinal del Río Yeguaré.	46
Ilustración IV-2 Suelos laterítico de la subcuenca Yeguaré.	49
Ilustración V-1 Recolección de muestras bacteriológicas.....	66
Ilustración V-2 Medición de datos de campo.	66
Ilustración V-3 Preparación del recipiente.	67
Ilustración V-4 Recolección de la muestra.....	67
Ilustración VI-1 Propuesta de sistema de potabilización para las fuentes de agua en la subcuenca Yeguaré.	118

Índice de mapas

Mapa IV-1 Ubicación geográfica de la Subcuenca Yeguaré.	42
Mapa IV-2 Cobertura forestal de la Subcuenca Yeguaré.	44
Mapa IV-3 Modelo de elevación de la Subcuenca Yeguaré.	45
Mapa IV-4 Geología de la Subcuenca Yeguaré.	48
Mapa IV-5 Estaciones de precipitación en la Subcuenca Yeguaré.	50
Mapa IV-6 Temperatura media anual de la Subcuenca Yeguaré.	51
Mapa IV-7 Precipitación media anual de la Subcuenca Yeguaré.	52

Mapa IV-8 Red Hídrica de la Subcuenca Yeguaré.	54
Mapa IV-9 Hidrogeología de la Subcuenca Yeguaré.	57
Mapa IV-10 Elevaciones potenciales de recarga de la Subcuenca Yeguaré.	58
Mapa V-1 Puntos de muestreo de la subcuenca Yeguaré.	62
Mapa VI-1 Comportamiento temporal del pH en la subcuenca Yeguaré.	83
Mapa VI-2 Comportamiento temporal de los iones mayoritarios en la subcuenca Yeguaré.	91
Mapa VI-3 Concentraciones elevadas de nutrientes en la subcuenca Yeguaré.	95
Mapa VI-4 Concentraciones elevadas de metales en la subcuenca Yeguaré.	97
Mapa VI-5 Índice de Calidad de Agua según NTNCAP en la subcuenca Yeguaré.	105
Mapa VI-6 Declaratoria de microcuencas de la subcuenca Yeguaré.	111

Índice de tablas

Tabla III-1 Definición de parámetros bacteriológicos.	16
Tabla III-2 Definición de parámetros fisicoquímicos.	17
Tabla III-3 Definición de parámetros químicos (iones mayoritarios).	20
Tabla III-4 Definición de parámetros químicos (metales pesados).	22
Tabla III-5 Definición de parámetros químicos (nutrientes).	25
Tabla III-6 Origen de los componentes más comunes de las aguas subterráneas.	30
Tabla III-7 Tipos de diagramas hidrogeoquímicos.	33
Tabla III-8 Clasificación de enfermedades según origen hídrico.	38
Tabla IV-1 Distribución poblacional en la subcuenca Yeguaré.	43
Tabla IV-2 Columna estratigráfica de la subcuenca Yeguaré.	47
Tabla IV-3 Tipos de acuíferos según la litología en la subcuenca Yeguaré.	55
Tabla V-1 Descripción temporal del muestreo en la Subcuenca Yeguaré.	63
Tabla V-2 Muestreo de propiedades bacteriológicas en los puntos de muestreo de la subcuenca Yeguaré.	68
Tabla V-3 Muestreo de propiedades fisicoquímicas en los puntos de muestreo de la subcuenca Yeguaré.	70
Tabla V-4 Equipos utilizados en campo y laboratorio para los análisis de parámetros fisicoquímicos.	71
Tabla V-5 Métodos utilizados para el análisis de espectrofotometría de UV-Vis.	72
Tabla V-6 Muestras analizadas en la Universidad de Alicante.	72
Tabla V-7 Referencia de balance iónico.	73

Tabla V-8 Valores del objetivo de los parámetros bacteriológicos para el cálculo del Índice de Calidad de Agua	75
Tabla V-9 Criterios para la clasificación de calidad de las agua.	77
Tabla VI-1 Evaluación de la calidad del dato	79
Tabla VI-2 Comparación de los valores promedio de la subcuenca Yeguaré y los valores de referencia de los parámetros hidroquímicos.	102
Tabla VI-3 Calidad del agua subterránea en la Subcuenca Yeguaré.	103
Tabla VI-4 Comparación de clasificaciones obtenidas para el $CCME_{WQI}$ en la subcuenca Yeguaré.	104

ABREVIATURAS

°C	Grados Celsius
μS/cm	Microsiemens por centímetro
AdaptarC	Proyecto Adaptación basada en Ecosistemas en el Corredor Boscoso Central
APHA	Asociación Americana de Salud Pública
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CCMEWQI	Índice de Calidad de Agua propuesto por Canadian Council of Ministers of the Environment
CEIRH	Centro Experimental y de Innovación del Recurso Hídrico
CIAIZ	Centro de Investigación en Agentes Infecciosos y Zoonóticos
COMAS	Comisiones Municipales de Agua y Saneamiento
COSUDE	Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación
CTE	Coliformes Termotolerantes
CTO	Coliformes Totales
DEM	Modelos digitales de elevación
DGRH	Dirección General de Recursos Hídricos
Ecoli	<i>Escherichia Coli</i>
EPA	Agencia de Protección Ambiental
ERSAPS	Ente Regulador de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento
GIRH	Gestión Integrada del Recurso Hídrico
ICA	Índice de Calidad de Agua
ICF	Instituto de Conservación Forestal
IHCIT	Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra
IIM	Instituto de Investigación de Microbiología
INE	Instituto Nacional de Estadística
mg/l	Miligramos por Litro
mV	Milivoltios
NTNCAP	Norma Técnica Nacional para la Calidad de Agua Potable
NTU	Unidad Nefelométrica de Turbidez
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PFA	Programa del Fondo de Adaptación
PGHTR13GF	Programa de Gobernanza Hídrica Territorial en la Región 13 Golfo de Fonseca
ppm	Partes por millón
RBU	Reserva Biológica Uyuca
S/m	Siemens por metro
SERNA	Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente
SINIT	Sistema Nacional de Información Territorial
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
UCCRH	Unidad de Cambio Climático y Recursos Hídricos
UFC	Unidades Formadoras de Colonias
UNAH	Universidad Nacional Autónoma de Honduras
UNICEF	Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia
USCL	Unidad de Supervisión y Control Local

V	Voltios
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

Nomenclatura Química

Al	Aluminio
Al(OH)₃	Hidróxido de Aluminio III
Ca	Calcio
CaCO₃	Carbonato de Calcio
Cd	Cadmio
Cl⁻	Cloruro
CO₂	Dióxido de Carbono
CO₃²⁻	Carbonato
Cu	Cobre
EC	Conductividad Eléctrica
Fe	Hierro
Fe(OH)₃	Hidróxido de Hierro III
HCO₃⁻	Bicarbonato
K	Potasio
Mg	Magnesio
Mn	Manganeso
Na	Sodio
NH₄⁺	Amonio
NO₂⁻	Nitrito
NO₃⁻	Nitratos
OH⁻	Hidróxido
ORP	Porcentaje de Reducción de Oxígeno
Pb	Plomo
pH	Potencial de Hidrogeno
PO₄³⁻	Fosfatos
SO₄²⁻	Sulfatos
TDS	Sólidos Disueltos Totales
Ti	Titanio

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento primeramente con la vida que me ha brindado la oportunidad de emprender este viaje académico.

A mi hijo por ser mi fortaleza y motivación para seguir mejorando, sabiendo que cada paso es parte de su legado. A mis padres Xiomara Maradiaga y Carlos Nuñez y a mi abuela Ana Maradiaga por su inquebrantable apoyo y por siempre confiar en mí, brindándome fuerza y aliento en cada paso del camino. A mi querida hermana Scarlet Nuñez, por su infinita paciencia y amor dedicado a mí, que ha sido un faro de luz en los momentos más desafiantes. A mi pareja Marcio Chirinos, por su valiosa colaboración en la recolección de información, su constante apoyo y comprensión han sido fundamentales en este proceso.

Asimismo, deseo reconocer al Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT) por proporcionarme los datos necesarios para llevar a cabo esta investigación, así como a mis asesoras Tania Peña, Irasema Montoya y Alexandra Suhogusoff, su experiencia y conocimientos fueron de gran ayuda para enfrentar los desafíos que surgieron durante el desarrollo de la investigación, y estoy agradecida por su compromiso y disposición para ayudarme. A mis estimados maestros, por compartir generosamente sus conocimientos y experiencias, guiándome en el camino hacia la excelencia académica.

No puedo pasar por alto el invaluable aporte de mis compañeros de laboratorio, Isis Acosta, Shamir Nuñez y Wendy Lagos, cuya colaboración en el análisis de muestras ha sido fundamental para alcanzar los resultados presentados en esta tesis.

Además, quiero agradecer sinceramente a mis amigos y familiares por su constante estímulo y apoyo moral durante este exigente proceso académico. Agradezco especialmente a mi tía y primas por su cálido aliento y palabras de aliento en los momentos más difíciles. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por formar parte de este importante logro en mi vida.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para la vida humana y necesaria para el desarrollo de diversas actividades cotidianas como la agricultura, la industria y el uso doméstico, lo que la convierte en uno de los recursos más valiosos del planeta (Arcos Pulido, et al., 2005). No obstante, la calidad del agua a nivel mundial ha ido deteriorándose debido a cambios progresivos en el uso del suelo, modificaciones en las actividades humanas, crecimiento poblacional, urbanización e industrialización (Vammen & Vaux, 2019). En Honduras, se cuenta con grandes reservas hídricas que podrían proveer de agua a los hogares; sin embargo, aún persisten desafíos en el acceso a agua potable.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han establecido directrices que son fundamentales para garantizar la calidad del agua destinada al consumo humano en todo el mundo. La EPA ha desarrollado normas rigurosas, como las regulaciones del “Safe Drinking Water Act” (Ley de Agua Potable Segura), donde se encuentra el Reglamento Nacional de Agua Potable Primaria de 2009 que establece límites para una amplia gama de contaminantes en el agua potable, con el objetivo de proteger la salud pública y prevenir enfermedades asociadas con el agua. Asimismo, la OMS ha establecido directrices internacionales para la calidad del agua destinada al consumo humano, como “la Guía para la calidad del agua de consumo humano” de 2018. Estas directrices abordan los aspectos microbiológicos, químicos y físicos del agua potable, proporcionando orientación sobre la seguridad y potabilidad del agua para proteger la salud de las poblaciones. Honduras cuenta con una Norma Técnica Nacional para la Calidad del Agua Potable emitida en 1995, la cual es muy limitada en cuanto a esta parametrización, y a la definición de procedimientos, entre otros aspectos clave, por lo que requiere de un proceso de actualización como lo expresa Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) en 2020.

Aunado a esta situación, la carencia de información detallada sobre la calidad del agua en Honduras puede limitar la capacidad de las autoridades dedicadas a la vigilancia y monitoreo, pero también de la sociedad civil en general para tomar decisiones informadas y mejorar la calidad del agua para su consumo. Es esencial abordar estas limitantes en la normativa, mejorar las estrategias de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) y así generar sistemas de monitoreo para poder adecuar los sistemas de potabilización y de esta manera poder cumplir con los estándares definidos para el aseguramiento de la salud y seguridad hídrica.

En el marco de la presente investigación, se persiguió el objetivo de evaluar la calidad del agua para consumo humano en la subcuenca Yeguaré durante el periodo 2020 y 2021 y así proponer estrategias integrales de gestión que promuevan el uso sostenible del agua en la zona. Para llevar a cabo esta

evaluación, se realizó un monitoreo continuo de la calidad del agua durante el periodo mencionado, respaldado por la implementación de la caracterización hidroquímica.

La necesidad de esta evaluación se fundamenta en la importancia vital de las microcuencas en la vida cotidiana de la población local. Estas microcuencas sirven como fuente primordial de agua para el consumo humano y para actividades de riego. Es crucial señalar que, en muchos casos, las aguas destinadas al consumo humano son distribuidas sin someterse a tratamientos previos a través de sistemas de agua entubada.

Como resultado de este estudio, se presenta el comportamiento hidroquímico en múltiples puntos de muestreo dentro de la subcuenca Yeguaré. A través de un análisis minucioso, se identifican patrones y similitudes significativas en la composición del agua en estos puntos. Además, se realiza una evaluación integral de la calidad del agua, abordando diversos parámetros y factores que influyen en su idoneidad para el consumo humano.

Uno de los hallazgos destacados de este estudio es la necesidad de actualizar la Norma Técnica Nacional para la Calidad de Agua Potable (NTNCAP), ya que los resultados obtenidos señalan posibles discrepancias o áreas de mejora en los estándares actuales. Esta actualización no solo garantizaría la conformidad con las mejores prácticas internacionales en términos de calidad del agua, sino que también fortalecería los esfuerzos de gestión hídrica en la subcuenca Yeguaré. Por último, este estudio no solo se limita a la identificación de problemas, sino que también propone estrategias concretas para promover una GIRH en la región.

CAPITULO I: Delimitación del problema

1.1 Descripción de la problemática

El agua, además de ser una sustancia imprescindible para la vida, por sus múltiples propiedades, es ampliamente utilizada en actividades diarias tales como la agricultura (70% al 80%), la industria (20%) y, el uso doméstico (6%), entre otras, convirtiéndose en uno de los recursos más apreciados en el planeta. De ahí la importancia de conservar y mantener la calidad de las fuentes naturales, de manera que se garantice su sostenibilidad y aprovechamiento para las futuras generaciones (Arcos Pulido, et al., 2005).

A nivel mundial, millones de personas enfrentan desafíos relacionados con la contaminación del agua, la escasez de recursos hídricos y la degradación de los ecosistemas acuáticos. El informe publicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en nombre de Organización de las Naciones Unidas (ONU)-Agua revela que, en las últimas cifras del año 2020, el 26% de la población mundial (2.000 millones de personas) carecía de acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura y aproximadamente el 46% (3.600 millones) carecía de acceso a servicios de saneamiento gestionados de forma segura y se proyecta que la población urbana mundial que sufre escasez de agua se duplicará, alcanzando entre 1.700 y 2.400 millones de personas para 2050 (Naciones Unidas, 2023). Además, el aumento de las sequías extremas y prolongadas está ejerciendo presión adicional sobre los ecosistemas, con consecuencias devastadoras para la flora y fauna.

Ante esta situación, Audrey Azoulay (2023), directora general de la UNESCO, subrayó la urgencia de establecer mecanismos internacionales sólidos para prevenir una crisis global del agua incontrolable. Destacó que el agua es fundamental para el futuro compartido y que es imperativo actuar de manera colaborativa para garantizar su distribución equitativa y su gestión sostenible. Estas declaraciones fueron realizadas durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua en 2023.

El continente americano tiene diversas áreas especiales de importancia global para el clima y a su vez una gran importancia hidrológica. No obstante, en términos de la calidad del agua se puede observar que ningún país de las Américas tiene un éxito total en su gestión, ni los países desarrollados ni aquellos que están en vías de desarrollo; en parte debido al descuido en la protección de las aguas subterráneas, en cantidad como en calidad, siendo éstas una fuente potencial de suministro (Vammen & Vaux, 2019)

Hay zonas determinadas a nivel mundial que tienen suficiente agua, mientras que otras presentan graves problemas de escasez, incluso para cubrir sus necesidades más básicas. Sin embargo, en Centroamérica la relativa abundancia de agua constituye uno de sus tesoros más privilegiados, pero como en la mayor parte

del continente, la contaminación de las fuentes de agua ha alcanzado niveles alarmantes. La falta de prácticas de conservación y el uso inapropiado de los suelos, la contaminación por pesticidas, la acelerada deforestación y la disminución de la diversidad biológica, los procesos expansivos e incontrolados de urbanización, el manejo inadecuado de desechos sólidos urbanos y de desechos peligrosos y la contaminación atmosférica e industrial, entre otros han agudizado los problemas relacionados con el limitado acceso al agua y su deteriorada calidad (Ibarra Turcios, 2008).

En Honduras la Dirección General de Recursos Hídricos (DGRH) de la Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (SERNA) es la responsable de la gestión de los recursos hídricos, su misión es *“controlar los recursos hídricos, mediante la formulación de políticas en torno del recurso, recolección y análisis de información hidroclimatológica para la toma de decisiones oportunas que aseguren la calidad, cantidad y perpetuidad del agua en el tiempo.”* (MiAmbiente, s.f.). Sin embargo, el acceso al agua no se ha cumplido en su totalidad. De acuerdo con el XVII Censo Nacional de Población y VI de Vivienda 2013 del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), solo el 85.19% de las viviendas a nivel nacional cuentan con cobertura de agua potable, una cifra que ha mejorado al 88.4% en 2019 como parte de los esfuerzos para cumplir el objetivo de desarrollo sostenible 6: “Agua limpia y saneamiento” (ODS 6).

La Subcuenca Yeguaré pertenece a la Cuenca del Río Choluteca y enfrenta desafíos significativos que afectan su calidad de agua. Tales desafíos incluyen la erosión del suelo, el transporte de productos químicos agrícolas, la sedimentación y el crecimiento urbano desordenado, entre otros. Estos factores tienen graves consecuencias, como la proliferación de microorganismos patógenos y la alteración de las propiedades físicas y químicas del agua. Además, se observa una disminución en la diversidad biológica acuática y daños en los suelos y cultivos (Ponce de Montoya, 2008). De igual manera la calidad del agua de la cuenca presenta una notable vulnerabilidad debido a la presencia de metales como el manganeso, hierro, plomo, zinc y cobre; en suelos de origen volcánico, que es el caso de las formaciones cercanas a Tegucigalpa (IHCIT, 2014).

Los estudios relacionados con la calidad del agua en Honduras son limitados y en específico la subcuenca Yeguaré no cuenta con mucha información que detalle la actividad geoquímica con las fuentes de agua subterráneas las cuales son utilizadas por diferentes comunidades para su consumo, algunas sin un tratamiento previo, teniendo en cuenta que esta subcuenca cuenta con la Reserva Biológica Uyuca (RBU), que tiene una gran importancia como fuente de agua para las municipalidades de Tatumbula, el cual presenta un crecimiento periurbano, San Antonio de Oriente y a las aldeas de los alrededores. De igual manera dentro de la subcuenca se encuentra una pequeña parte del Parque Nacional La Tigra el cual es una de las principales fuentes de abastecimiento para la capital.

La presente investigación buscó determinar la calidad de las fuentes de agua que abastecen a las comunidades prioritarias en la subcuenca Yeguaré. El enfoque central se orientó hacia la salud global, buscando comprender el impacto directo de la calidad del agua en el bienestar de las comunidades. A través de un análisis exhaustivo de parámetros hidroquímicos y bacteriológicos, se identificaron posibles riesgos para la salud y, sobre esa base, se desarrollaron estrategias de gestión integrada del recurso hídrico; debido a que la población del territorio utiliza estas microcuencas para obtener agua para riego y para consumo humano, y generalmente el agua es distribuida de la fuente a las casas sin ningún tratamiento a través de sistemas de agua entubada.

1.2 Justificación de la investigación

Honduras posee un alto potencial hídrico, sin embargo, solo un 70% de su población tiene acceso al agua y del cual no se puede mencionar que es potable (EFE, 2019), por lo que muchas regiones enfrentan desafíos en cuanto al abastecimiento y saneamiento, siendo el caso de las comunidades que se encuentran en la subcuenca Yeguaré. Los pobladores de la subcuenca Yeguaré pertenecen a la expansión periurbana de Tegucigalpa, significando una población flotante ya que en su mayoría se desplazan hacia la capital, ellos utilizan las microcuencas para obtener el agua que utilizan para consumo humano y para riego. El agua suministrada en estas zonas rurales generalmente se distribuye sin ningún tratamiento a través de sistemas de agua entubada, y es importante considerar que la falta de calidad de este líquido es uno de los principales problemas relacionados con la salud global. Por lo que la necesidad de estudiar las problemáticas que se generan alrededor de este vital recurso es de suma importancia.

El concepto de calidad del agua surge al considerar el agua como un recurso, tomando en cuenta el uso al que esta quiere destinarse. En términos de calidad de agua para consumo humano, la amenaza de su calidad no radica exclusivamente en su composición química, sino en los diversos componentes y contaminantes que pueden estar presentes en ella, las aguas adquieren su composición química predominante como consecuencia de la acción disolvente que ejercen sobre las rocas. Los contaminantes son cada vez más complejos y pueden estar directamente relacionados con la salud humana y con impactos importantes en los ecosistemas (Bach Plaza & Mas-Pla, 2008).

En 2010, el 80% de las enfermedades eran producto del consumo de agua no potable y a las malas condiciones sanitarias, también se estimó que una tercera parte de las muertes en países en desarrollo se deben al agua contaminada y, en promedio, hasta una décima parte del tiempo productivo de cada persona se ve sacrificado a raíz de las enfermedades relacionadas con el agua (Córdoba et al., 2010); es por ello que las fuentes de agua deben ser protegidas para el cuidado de la calidad y la cantidad de este valioso recurso.

Considerando el movimiento relativamente lento de las aguas subterráneas, estas suelen presentar, en su mayoría, una mejor calidad y son más fáciles de controlar que las aguas superficiales.

La agricultura y la ganadería son actividades económicas fundamentales para las comunidades cercanas a la capital del país, al igual que para aquellas situadas en la subcuenca. Estas comunidades abastecen productos agrícolas y ganaderos a la capital y también exportan sus productos. Por esta razón, es crucial llevar a cabo estudios que evalúen el potencial de contaminación que pueden generar los insumos agrícolas y ganaderos, como los fertilizantes, pesticidas y desechos animales, en la calidad del agua de las fuentes utilizadas tanto para consumo humano como para el riego de cultivos.

1.3 Límites de la investigación

A. LIMITACIONES DE TIEMPO

La investigación se dividió en dos etapas principales: la primera consistió en la recolección de datos a través del muestreo de las fuentes de agua durante el periodo 2020-2021, que incluyó el análisis de la época seca (abril-mayo), la temporada de canícula (agosto) y la época lluviosa (octubre) de ambos años. Es importante destacar que el Estado de Honduras declaró estado de emergencia sanitaria el 10 de febrero de 2020 mediante el decreto ejecutivo PCM-005-2020, seguido por un estado de excepción vía decreto ejecutivo PCM-021-2020, el 16 de marzo del mismo año debido a la crisis sanitaria mundial causada por el virus Sars-Cov-2. Estas medidas impusieron grandes limitaciones de movilidad que afectaron la realización del muestreo completo de las fuentes de agua durante la época seca y la temporada de canícula de 2020. La segunda etapa de la investigación comprendió el análisis e interpretación de los resultados, que se llevó a cabo desde noviembre de 2021 hasta marzo de 2024. En la figura I-1 se describen las actividades realizadas año tras año para la ejecución de la investigación.

Figura I-1 Línea de tiempo de las actividades desarrolladas en la investigación.



B. LIMITACIONES DE ESPACIO O TERRITORIO

Este estudio se llevó a cabo en las comunidades priorizadas por el Proyecto Adaptación basada en Ecosistemas en el Corredor Boscoso Central (AdaptarC), ubicadas dentro de los límites de la subcuenca Yeguaré. La ubicación exacta de los puntos se muestra en el anexo 1.

C. LIMITACIONES DE RECURSOS

Los recursos financieros para el desarrollo de la investigación fueron principalmente proporcionados por el Proyecto del Fondo de Adaptación en el marco del proyecto AdaptarC, de igual manera la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH) a través del Centro Experimental y de Innovación del Recurso Hídrico (CEIRH) perteneciente al Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT) proporcionó apoyo financiero para la presente investigación.

Los análisis de laboratorio se llevaron a cabo en el CEIRH, que cuenta con el personal y la tecnología necesaria para evaluar la calidad de las fuentes de agua. Para evaluar la contaminación biológica, se analizaron los niveles de Coliformes termotolerantes (CTE) y *Escherichia Coli* (Ecoli). En cuanto a los parámetros físicos, se midieron la Conductividad eléctrica, el Potencial de Hidrógeno (pH), el Porcentaje de Reducción de Oxígeno (ORP), la Turbidez y los Sólidos Disueltos Totales (TDS). Además, se realizaron análisis químicos que incluyeron la alcalinidad, el calcio, los cloruros, el magnesio, el potasio, el sodio, los sulfatos, el aluminio, el cadmio, el cobre, el hierro, el manganeso, el plomo, el zinc, el amonio, nitritos y nitratos.

El trabajo técnico fue ejecutado por profesores y técnicos de la Facultad de Ciencias en específico del CEIRH, la Unidad de Cambio Climático y Recursos Hídricos (UCCRH) y la Unidad de Geología y Geofísica del IHCIT.

1.4 Definición del problema

La agricultura y ganadería han ido incrementando ya que son de las principales actividades económicas desarrolladas, representan el 49.8% de la actividad económica de la zona (Fortín, 2018). Sin embargo, su expansión puede ser considerada una potencial fuente de contaminación de las aguas, ya que para el desarrollo de estas actividades se utilizan compuestos químicos que llegan a los acuíferos y afectan su calidad.

De igual manera los asentamientos humanos se han extendido y se ubican cada vez cerca de la zona de amortiguamiento del Parque Nacional La Tigra y de la RBU, lo que reduce tanto la cantidad como la calidad del agua que recarga.

En la subcuenca Yeguaré las fuentes son utilizadas por los pobladores de las 111 aldeas que se encuentran en los límites de la subcuenca y cuya población estimada para el 2016 es de 118,518 habitantes que la usan

para su consumo, así como para el riego del cultivo de granos básicos (maíz y frijol); también pequeños productores que se dedican a la producción de hortalizas, frutas y flores, la usan especialmente en las zonas altas (Fortín, 2018).

Entre las principales amenazas se puede mencionar la deforestación existente en la zona por el incremento de la urbanización y la agricultura, contaminación de acuíferos, impermeabilización de la zona de recarga entre otros, que conllevan a un detrimento en la calidad del agua y de vida de las personas que habitan la zona. Siendo las causas predominantes la tenencia de la tierra, falta de apoyo por los entes gubernamentales, pobreza y falta de educación, provocando pérdidas en la capacidad de infiltración del suelo, pérdida de diversidad forestal y de paisaje, vulnerabilidad en los asentamientos humanos y un riesgo para la salud de los habitantes.

La subcuenca Yeguaré es monitoreada en diferentes variables por la escuela agrícola Zamorano, ya que tesis de pregrado presentan evidencias de procesos de contaminación debido a los desechos orgánicos generados por las comunidades cercanas a la RBU, y esto estaría generando presencia de ácido húmico en el suelo (Gallo Guevara, 1997). En 2012 se realizó un estudio que evaluó la presencia de metales en el sistema de agua potable del Zamorano, el cual evidenció que metales como el aluminio, hierro y plomo se encuentran presentes en valores que sobrepasan la NTNCAP, esto en las fuentes de agua provenientes de la RBU. También Enríquez Balcázar (2012), y a su vez Muñoz (2017) encontraron valores elevados de aluminio e hierro en las fuentes del casco urbano de Tatumbula.

Un interés particular existe debido a que los valores de pH que presentan muchas de las fuentes de agua de la zona, se encuentran por debajo del 6.5 requerido para el consumo. Estudios que datan de 1997 ya evidenciaban los bajos valores de pH en las aguas subterráneas. En general la información sobre la calidad de las fuentes de agua subterránea de la zona es escasa y a la fecha no se han desarrollado estudios enfocados en la definición de las potenciales fuentes de contaminación de los acuíferos, que conllevan a tener aguas con $\text{pH} > 6.0$.

El agua con propiedades ácidas suele disolver los metales que se encuentran en el medio, los cuales al ser ingeridos afectan la salud; de igual manera afecta los procesos de potabilización del agua, produciendo subproductos que pueden ser dañinos para el ser humano. Como ejemplo de potabilización está la cloración para la eliminación de bacterias, sin embargo, en pH ácido el cloro actúa como hipoclorito, lo que le reduce la capacidad de eliminar la materia orgánica y reaccionar con la misma produciendo compuestos orgánicos dañinos (Gopal et al., 2007).

Katherine Gutiérrez-Álzate y sus colegas de la Universidad e Federal da Bahia y de la Universidad de Cartagena (2023) llevaron a cabo una revisión bibliográfica centrada en la relación entre el aluminio y la enfermedad de Alzheimer. Destacan que este metal tiende a acumularse en el cuerpo humano principalmente a través de la ingesta de alimentos contaminados con aluminio. Dado su carácter de metal pesado, se encuentra comúnmente en el suelo y, por ende, puede estar presente en frutas, verduras y agua. Sin embargo, la OMS no establece un valor máximo permisible considerando los efectos en la salud por falta de investigaciones (Muñoz Ventura, 2017). El plomo ingerido en cualquiera de sus formas es altamente tóxico, ya que suele sentirse después de haberse acumulado en el organismo durante un periodo de tiempo, con síntomas como anemia, debilidad, estreñimiento y parálisis en muñecas y tobillos (IHCIT,2014). El hierro es un elemento esencial para casi todos los organismos vivos, ya que participa en una amplia variedad de procesos metabólicos, pero el hierro puede formar radicales libres, su concentración en los tejidos del cuerpo debe estar estrictamente regulada porque en cantidades excesivas puede provocar daños en los tejidos (Abbaspour et al., 2014).

CAPITULO II: Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la calidad del recurso hídrico subterráneo para el periodo 2020-2021, con el fin de desarrollar estrategias integrales para promover el uso sostenible del agua en la subcuenca Yeguaré.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar hidroquímicamente las aguas subterráneas, identificando elementos clave que impactan en su calidad;
- Determinar la calidad del agua para consumo humano, analizando parámetros químicos y bacteriológicos mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA) propuesto por el Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME_{WQI}) para el periodo 2020-2021;
- Desarrollar una estrategia de gestión integral para el recurso hídrico subterráneo, basada en el análisis de calidad e hidroquímica, enfocada en promover el uso sostenible del agua.

CAPITULO III: Marco de referencia

3.1 Marco histórico

El crecimiento poblacional en Honduras ha generado una expansión periurbana significativa en las principales ciudades del país, incluida la capital, Tegucigalpa. Según proyecciones basadas en datos del INE, se estima que para el año 2050 la población de Tegucigalpa alcanzará los 1.96 millones de habitantes si se mantienen las tendencias actuales de crecimiento (IDOM, 2015); el cual se refleja tanto dentro de los límites urbanos existentes como en los desarrollos exteriores asociados. Además de este crecimiento cuantitativo, la principal preocupación es que el desarrollo se oriente hacia mayores crecimientos espontáneos, asentamientos lineales desordenados a lo largo de las carreteras al norte, Olancho, Valle de Ángeles, Danlí y Sur, así como la continuada ocupación de áreas ambientalmente susceptibles como el Altiplano del Cerro de Hule, la Hondonada de Valle de Ángeles, el Parque Nacional La Tigra, la Cuenca del Río Guacerique y la RBU, ya que desde la década de los 90 se han venido presentando invasiones en las áreas antes mencionadas (BID,2018). La expansión periurbana se extiende a los municipios ubicados en los límites de la subcuenca Yeguaré, junto con el Parque Nacional La Tigra y la RBU, que son importantes fuentes de abastecimiento de agua para la capital. Por esta razón, este tema es de interés para la Alcaldía Municipal del Distrito Central.

Estudios que reporten sobre la calidad del agua subterránea en la subcuenca Yeguaré son escasos y la mayoría han sido realizados por estudiantes de la Universidad Agrícola del Zamorano. Por ejemplo, en 1997 se realizó un análisis de la calidad del agua de los manantiales del Cerro Uyuca y el cual solo evaluó el caudal, la temperatura, pH y colonias de coliformes totales. Dentro de las conclusiones resalta que el pH promedio fue de 4.30 y valores que fluctúan entre 3.98 y 5.58 (Gallo Guevara, 1997).

En el 2004 un estudiante realizó una línea base de la calidad y cantidad agua, para lo cual realizó el cálculo de índice de contaminación del río Yeguaré y determinó las potenciales fuentes de contaminación del río. De acuerdo con sus resultados concluyó que la producción de agua del río era de 13,245,120 m³ anuales, y encontró que las potenciales fuentes de contaminación del río eran los asentamientos humanos y las actividades pecuarias (Cruz Ruiz, 2004).

El Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra durante el 2012 y 2013 realizó un estudio hidrogeoquímico de la parte alta de la cuenca del Río Choluteca, dicha investigación contiene la información de los pozos en la subcuenca, así como la determinación del tipo de agua que se encuentra en la zona. Con base en dicha investigación se determinó que las aguas del río Yeguaré son aguas heterogéneas con la tendencia de bicarbonatadas/sulfatadas sódicas y potásicas (IHCIT,2013).

3.2 Marco político

Después de realizar una revisión del marco jurídico y político existente en el país, se pudo comprobar que existen leyes relevantes y tratados internacionales vinculados al manejo y protección de los recursos naturales; sin embargo a pesar de esta gran variedad de leyes las cuales son diversas y extensas en las diferentes áreas, se puede establecer que el tema de los recursos hídricos es tocado de manera explícita en la “Ley General de Aguas” de 2009 (Guillén & Tabora, 2015).

Es importante destacar que la Ley General de Aguas emitida mediante Decreto 181-2009 (Congreso Nacional de Honduras, 2009) prevé la creación de nuevas instancias como la Autoridad del Agua, el Instituto Nacional de Recursos Hídricos, el Consejo Nacional de Recursos Hídricos, las Agencias Regionales y los Consejos de Cuencas. Estas instancias no han sido creadas todavía, aunque se han iniciado algunos esfuerzos aislados en la creación de los Consejos de Cuencas. De igual manera se puede mencionar que la Ley General de aguas es la que se enfoca en el cuidado del Recurso hídrico o manejo de cuenca, para lo cual contempla los siguientes lineamientos:

1. Establecer el marco de principios, alcances y objetivos de la gestión hídrica.
2. Determinar las condiciones del dominio legal del agua, espacios y recursos asociados.
3. Definir el marco de competencias, funciones y responsabilidades de la administración pública en la gestión de los recursos hídricos.
4. Establecer la normativa sobre la protección y conservación del recurso hídrico.
5. Establecer las normas para el aprovechamiento del recurso hídrico.
6. Establecer el marco de sanciones.

En términos de calidad de agua, Honduras cuenta con la Norma Técnica Nacional para la Calidad del Agua Potable la cual entro en vigencia en el 4 de octubre de 1995, esta define valores recomendables y valores máximos admisibles de algunos parámetros bacteriológicos, organolépticos, fisicoquímicos, y sustancias orgánicas e inorgánicas con significado para la salud, dichos valores se presentan en el anexo 1. Es la única norma que rige a los prestadores de este servicio.

También existen otros instrumentos legales que regulan o contemplan la normativa para la calidad del agua para consumo humano:

- Ley Marco del Sector Agua Potable y Saneamiento.
- Código de Salud (Decreto No. 65-91).
- Reglamento General de Salud Ambiental.

- Reglamento General de la Ley Marco del Sector Agua Potable y Saneamiento.
- Reglamento Infracciones y Sanciones - Acuerdo de Directorio (25-2014).
- Reglamento de Juntas Administradoras de Agua.
- Reglamento Interno ERSAPS.
- Reglamento de la Ley General de Aguas.
- Reglamento Nacional de Descarga y Reutilización de Aguas Residuales.
- Modelo de Reglamento Comisiones Municipales de Agua y Saneamiento (COMAS).
- Modelo de Reglamento Unidad de Supervisión y Control Local (USCL) .

Dentro de los límites de la subcuenca se encuentra la RBU la cual fue declarada reserva biológica mediante el Acuerdo Presidencial N°1348, del 10 de octubre de 1984 y el Decreto del Congreso Nacional N°211-84, del 12 de noviembre de 1985 (Mora et al., 2013) y cuenta con un Plan de Manejo desarrollado por la SERNA y con vigencia hasta el 2025. La RBU representa una gran fuente de abastecimiento de agua, que se ha ido reduciendo debido a la pérdida del bosque en la zona, y la calidad se ha visto afectada por los sembradillos que se dan en sus alrededores.

Sin embargo, existe una serie de leyes y políticas nacionales que están directamente relacionadas con la conservación, la protección y el manejo de la RBU. Entre las que se encuentran:

- Ley General del Ambiente.
- Ley Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre.
- Ley de Ordenamiento Territorial.
- Ley de Municipalidades.
- Política Ambiental de Honduras.
- Política Forestal de las Áreas Protegidas y la Vida Silvestre.
- Política Hídrica Nacional.
- Política de Comanejo de las Áreas Protegidas.
- Reglamento de la Ley General de Ambiente.
- Reglamento para el Manejo Integral de los Residuos Sólidos.
- Reglamento para el Control de Emisiones Generadas por Fuentes Fijas.
- Reglamento General de la Ley Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre.
- Reglamento del Sistema Nacional de Áreas Protegidas en Honduras.
- Reglamento del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental.
- Reglamento Especial de los Organismos de Cuencas.

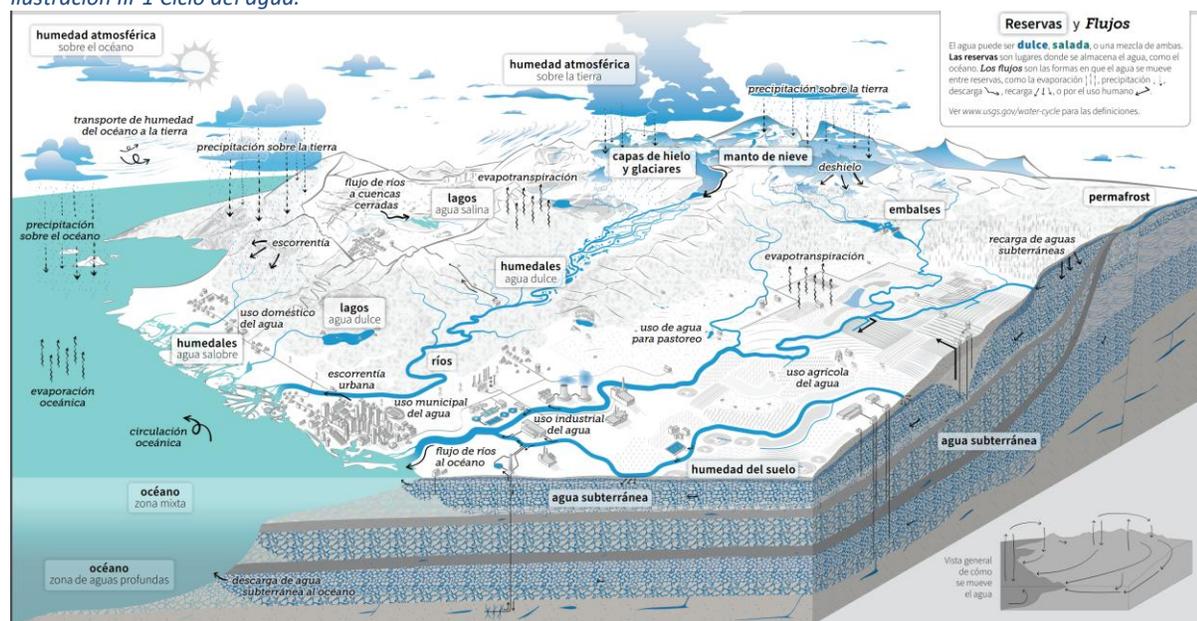
3.3 Marco teórico

A. RECURSOS HÍDRICOS

Los recursos hídricos son bienes naturales, que forman parte del patrimonio natural del Estado, de dominio público, y de libre acceso para satisfacer esa necesidad vital de la humanidad (Benavides Muñoz, 2019).

La disponibilidad de los recursos hídricos depende del ciclo del agua (ilustración III-1), el cual describe dónde se encuentra el agua en la tierra y cómo se mueve a través de los diferentes compartimientos de la biosfera. El uso del agua por parte de los humanos, el uso de la tierra y el cambio climático tienen un impacto en el ciclo del agua, al comprender estos impactos se puede trabajar hacia un uso del agua de manera sostenible (Water Science School, 2019).

Ilustración III-1 Ciclo del agua.



Fuente: (Water Science School, 2019)

i. Aguas superficiales

Las aguas superficiales son las aguas continentales, excepto las aguas subterráneas; las aguas de transición y las aguas costeras, y, en lo que se refiere al estado químico, también las aguas territoriales (Zarza, s.f.). Un río es una corriente de agua que fluye desde su nacimiento hasta su desembocadura en otro río, lago o en el mar. Un río puede ser más o menos caudaloso dependiendo de las partes del río, y se pueden alimentar de varias formas: precipitaciones, escorrentía terrestre, manantiales y filtraciones, agua de deshielo en zonas con nieve y en glaciares (Valdivielso, iAgua, s.f.).

ii. Aguas subterráneas

El agua subterránea es un recurso hídrico muy valioso que es un componente fundamental del ciclo del agua. La contribución de agua de los acuíferos al flujo de los ríos es responsable que el río siga teniendo caudal cuando no hay precipitaciones. El porcentaje de la aportación del caudal base con respecto al total del río es muy variable dependiendo de la geología y el clima, pudiendo variar desde casi cero a ser próximo al 100% en cuencas muy permeables (Wolock, 2003). El agua subterránea se infiltra desde la superficie, moviéndose por gravedad a través de la zona no saturada hasta acumularse en la zona saturada, donde ocupa los poros de sedimentos no consolidados o fracturas en rocas. En esta zona, el agua se desplaza lentamente debido a diferencias de energía, con velocidades que van desde milímetros por año hasta metros por día. Este movimiento puede variar en dirección y magnitud debido a factores externos como la recarga o la explotación del recurso (Escuder et al., 2009).

a) Acuífero

Un acuífero se define como una formación geológica que almacena agua subterránea y es capaz de transmitirla de manera que puede ser aprovechada como un recurso. El agua de la superficie se infiltra a través del suelo hasta encontrarse con una capa impermeable; entonces se acumula y llena los poros y fisuras de las rocas, dando lugar a una zona de saturación. Los acuíferos se caracterizan fundamentalmente por la baja velocidad en el movimiento del agua subterránea, los grandes volúmenes de reserva y el gran tiempo de renovación del agua en el sistema (Escuder et al., 2009).

Tipos de acuíferos

Los acuíferos se pueden clasificar de varias maneras según el criterio que se utilice:

- Características litológicas: detríticos y carbonatados.
- Tipo de huecos: poroso, kárstico y/o fisurado.
- Presión hidrostática: libres o no confinados (en contacto con el aire y separado por la zona no saturada), confinados o cautivos (sometidos a una presión superior a la atmosférica y en zona totalmente saturada) y semiconfinados (algunas capas confinadas son semipermeables).
- Extensión: acuíferos locales o puntuales (pequeña extensión) y acuíferos regionales (muy extensos) (Valdivielso, iAgua, s.f.).

b) Recarga

Recarga natural es el volumen de agua que entra en un embalse subterráneo durante un periodo de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua (Custodio & Llamas, 2001).

c) Infiltración

Se entiende por infiltración el volumen de agua que procedente de las precipitaciones (a veces también de los ríos o de recarga artificial), en un determinado tiempo, atraviesa la superficie del terreno y ocupa total o parcialmente los poros del suelo o de las formaciones geológicas subyacentes (Custodio & Llamas, 2001).

B. CALIDAD DEL AGUA

Se puede definir la calidad del agua como el estado ideal de la interrelación entre los aspectos físicos, químicos, biológicos y bacteriológicos con las condiciones del medio ambiente, ayudando a identificar la contaminación del agua cuando uno de estos parámetros se encuentra sensiblemente alterado (Sánchez et al., 2018). La calidad del agua se refiere a la condición o grado en el que el agua cumple con ciertos estándares, criterios o requisitos para su uso previsto, ya sea para consumo humano, uso industrial, recreativo, agrícola o ecosistémico. La evaluación de la calidad del agua implica medir y analizar varios parámetros físicos, químicos y biológicos para determinar si el agua es segura y adecuada para el propósito deseado.

i. Parámetros biológicos

Se habla de calidad biológica al evaluar la calidad de las aguas mediante el estudio de la composición y estructura de las comunidades de organismos presentes en un cuerpo de agua. Se considera que existe una buena calidad cuando las características naturales permiten el desarrollo de las comunidades de organismos que le son propias y está estrechamente relacionada con el uso final del agua (Sánchez et al., 2018).

Desde el punto de vista microbiológico, el examen de la calidad sanitaria del agua tiene por objeto determinar la presencia de ciertos grupos de bacterias, que revelen una contaminación reciente por materia fecal o materia orgánica, siendo el criterio más utilizado la determinación de la clase y número de microorganismos que ésta contiene. Tradicionalmente se han usado ensayos de microorganismos indicadores más que la determinación de microorganismos patógenos.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), los agentes patógenos transmitidos por el agua constituyen una dificultad de salud ambiental, frente a esta problemática existe una demanda urgente de control mediante la implementación de medidas de protección ambiental y de saneamiento, a fin de evitar el incremento de la prevalencia de las enfermedades relacionadas con la calidad del agua de acuerdo con la procedencia y almacenamiento, considerando el coste beneficio y su efectividad. Por ello es necesario el conocimiento de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua de consumo para cumplir con las exigencias de la entidad reguladora (OMS, 2008).

Las bacterias indicadoras de contaminación fecal deben cumplir determinados criterios. Deben estar presentes universalmente en concentraciones elevadas en las heces humanas y de otros animales de sangre caliente, ser fácilmente detectables mediante métodos sencillos y no proliferar en aguas naturales. (OMS, 2006), asimismo, su análisis debe ser fácil, rápido y económico esto para garantizar su monitoreo periódico. Los indicadores microbiológicos de contaminación del agua generalmente han sido bacterias de la microbiota intestinal, entre las que se encuentran Bacteroides frágilis, bacterias mesófilas, coliformes totales, coliformes fecales [termotolerantes], *Escherichia coli* y *Enterococos* fecales (Ríos-Tobón et al., 2017). En la tabla III-1 se presentan las definiciones de los indicadores bacteriológicos que se emplean en el desarrollo de la investigación.

Tabla III-1 Definición de parámetros bacteriológicos.

Término	Definición
Coliformes totales (CTO)	El grupo de bacterias coliformes ha sido siempre el principal indicador de calidad de los distintos tipos de agua; el número de coliformes en una muestra se usa como criterio de contaminación y, por lo tanto, de calidad sanitaria de la misma. Esto provee información importante sobre la fuente y el tipo de contaminación presente (Simanca et al.,2010). Su unidad de medición es Unidades Formadoras de Colonias (UFC).
Coliformes termotolerantes (CTE)	Los coliformes fecales se denominan termotolerantes por su capacidad de soportar temperaturas más elevadas, son un subgrupo de los coliformes totales, capaces de fermentar la lactosa a 44.5°C. Aproximadamente el 95% del grupo de los coliformes presentes en heces fecales, están formados por <i>Escherichia coli</i> y ciertas especies de <i>Klebsiella</i> , <i>Citrobacter</i> y <i>Enterobacter</i> (CEIRH,2023). Su unidad de medición es Unidades Formadoras de Colonias (UFC).
<i>Escherichia Coli (Ecoli)</i>	Es una bacteria que se encuentra normalmente en el intestino del ser humano y de los animales de sangre caliente. La mayoría de las cepas de <i>E. coli</i> son inofensivas. Sin embargo, algunas de ellas, como <i>E. coli</i> productora de toxina Shiga, pueden causar graves enfermedades a través de los alimentos (OMS, 2018). Su unidad de medición es Unidades Formadoras de Colonias (UFC).

ii. Parámetros Físicoquímicos

Los parámetros físicoquímicos del agua son fundamentales para comprender la composición y la calidad del agua, así como para evaluar su idoneidad para diversos usos, incluyendo el consumo humano, la agricultura, la industria y la preservación del medio ambiente. En la tabla III-2 se presentan las definiciones de los parámetros físicoquímicos analizados en el estudio.

Tabla III-2 Definición de parámetros físicoquímicos.

Término	Definición
Alcalinidad total	La alcalinidad es la medida de la capacidad de una disolución acuosa para mantener su pH estable frente a la adición de un ácido o una base, conocido como efecto tampón. Se calcula sumando las concentraciones de aniones que actúan como bases frente a ácidos fuertes. En aguas subterráneas, la alcalinidad es mayoritariamente atribuida a los iones bicarbonato y carbonato, dado que otros aniones están presentes en cantidades insignificantes y se desprecian en el cálculo (Vázquez-Suñé E. , 2009). La alcalinidad total se representa como miligramos por Litro de Carbonato de Calcio (mg/l CaCO_3).
Conductividad eléctrica	La conductividad eléctrica del agua se refiere a su capacidad para conducir electricidad y se mide mediante la conductividad entre dos electrodos en el agua. Este valor aumenta con la cantidad de iones disueltos presentes. La conductividad no solo depende de la concentración iónica, sino también del tipo de iones y sus propiedades eléctricas (carga eléctrica, estado de disociación, movilidad, etc.). La conductividad eléctrica del agua se mide típicamente en siemens por metro (S/m) o en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (Custodio & Llamas, 2001).
Potencial de Hidrógeno (pH)	El pH es el potencial de hidrógeno, es una medida para determinar el grado de acidez de una disolución el cual influye en algunos fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución. Aunque podría decirse que no tiene efectos directos sobre la salud, sí puede influir en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección (Martel, 2001). La unidad de medida del pH es adimensional, ya que representa una escala logarítmica de la concentración de iones de hidrógeno (H^+) en una solución acuosa, que va desde 0 (muy ácido) hasta 14 (muy alcalino), con 7 considerado neutro.
Porcentaje de reducción de oxígeno (ORP)	El potencial redox es una medida de la energía química de una reacción de oxidación-reducción, determinada mediante un electrodo. Se utiliza para evaluar la estabilidad de los iones en un estado de oxidación dado y puede ser positivo (indicando

Término	Definición
	<p>oxidación) o negativo (indicando reducción). Este potencial está influenciado por factores como el pH, la presión y la temperatura, y es relevante en los procesos de disolución de sales por la acción del agua en minerales. El ORP en el agua se mide comúnmente en milivoltios (mV) o en Voltios (V). (Custodio & Llamas, 2001).</p>
Temperatura	<p>La temperatura del agua es un factor crucial que afecta numerosos procesos, como la actividad biológica, la absorción de oxígeno y la formación de compuestos. En las aguas subterráneas, esta temperatura suele ser estable y está influenciada por las condiciones climáticas y la geología local. Su variación con la profundidad se debe al gradiente geotérmico (1°C cada 33 m en media, algo mayor en zonas tectónicas y volcánicas y algo menor en grandes cubetas sedimentarias) (Custodio & Llamas, 2001; Vázquez-Suñé E. , 2009). La temperatura puede ser clasificada en dos categorías principales: temperatura relativa y temperatura absoluta. La temperatura relativa es la medida de la temperatura en relación con un punto de referencia específico, como el punto de congelación del agua o el punto de ebullición. En el sistema internacional, esta medida se expresa en grados Celsius (°C), mientras que en el sistema inglés se utiliza la escala de grados Fahrenheit (°F). Por otro lado, la temperatura absoluta se mide desde el punto de cero absoluto, donde las moléculas dejan de tener movimiento térmico. En el sistema internacional, esta medida se expresa en grados Kelvin (K), y en el sistema inglés se utiliza la escala de grados Rankine (°R). La temperatura absoluta proporciona una medida más precisa y universal de la temperatura, ya que no depende de puntos de referencia arbitrarios y se basa en la energía cinética molecular fundamental (Cengel & Boles, 2011).</p>
Turbidez	<p>Refleja una aproximación de materias coloidales, minerales u orgánicas, por lo que puede ser considerado indicio de contaminación. Los elevados niveles de turbidez en el agua pueden deberse a un tratamiento insuficiente en la planta de potabilización o a que el sedimento ha vuelto a quedar en suspensión en el sistema de distribución, de igual manera puede estar asociado a la existencia de conexiones cruzadas en el mismo, lo que puede causar protección a los microorganismos de los efectos de la desinfección, estimular la proliferación de bacterias y aumentar la demanda de cloro (Marcó et al., 2004). La unidad de medida de la turbidez es la Unidad Nefelométrica de Turbidez (NTU por sus siglas en inglés).</p>

Término	Definición
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	TDS (Sólidos Disueltos Totales) es una medida de la concentración de materia en una muestra de agua que incluye partículas de tamaño menor a 2 micrones (2 millonesimas de un metro), las cuales no pueden ser eliminadas mediante un filtro convencional. TDS representa esencialmente la acumulación de minerales, metales y sales disueltas en el agua, y sirve como un indicador sólido de la calidad del agua (Sigler & Bauder, 2017).

Es esencial comprender los rangos típicos en los que se encuentran tanto las aguas naturales como las aguas salobres para evaluar la posible interferencia de las actividades humanas y naturales. Por ello, se presenta en la tabla VI-2 (inciso 6.1) una referencia de estos valores, lo que proporciona una base para comparar y analizar los resultados obtenidos en el monitoreo de la calidad del agua.

iii. Parámetros químicos

Habitualmente se piensa que el agua natural que se conoce es un compuesto químico de fórmula H_2O , pero debido a su gran capacidad disolvente toda el agua que se encuentra en la naturaleza contiene diferentes cantidades de diversas sustancias en solución y hasta en suspensión, lo que corresponde a una mezcla. El agua es, quizá el compuesto químico más importante en las actividades del hombre y también más versátil, ya que como reactivo químico funciona como ácido, álcali, ligando, agente oxidante y agente reductor (Moreno Roncancio, 2009). Dado su carácter de solvente universal el agua puede contener una gran cantidad de iones disueltos que la dotan de sus propiedades químicas características como ser reacción con óxidos ácidos, básicos, metales, no metales y formación de hidratos.

Según la Organización Mundial de la Salud (2008), los riesgos para la salud asociados a los componentes químicos del agua de consumo son distintos de los asociados a la contaminación microbiana y se deben principalmente a la capacidad de los componentes químicos de producir efectos adversos sobre la salud tras periodos de exposición prolongados.

Los parámetros químicos pueden expresarse en diferentes unidades de concentración, como peso/peso, peso/volumen, partes por millón (ppm), partes por billón (ppb), partes por trillón (ppt), o en formas químicas como molar (moles por litro), normal (equivalente en gramos por litro de solución), entre otras. Las unidades más utilizadas en la mayoría de las metodologías de laboratorio suelen ser peso/volumen (mg/l, $\mu\text{g/L}$).

a) Iones mayoritarios

En las aguas naturales la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Algunos de estos iones se encuentran presentes casi siempre en el agua y su suma representa casi la totalidad de los iones disueltos; estos iones son llamados fundamentales o mayoritarios y sobre ellos descansa la mayor parte de los aspectos químicos e hidrogeoquímicos, ellos son el cloruro, sulfato, bicarbonato (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}), sodio, calcio y magnesio. La definición de los iones mayoritarios se presenta en la tabla III-3 (Custodio & Llamas, 1983).

Tabla III-3 Definición de parámetros químicos (iones mayoritarios).

Término	Definición
Bicarbonatos y Carbonatos	La relación entre el dióxido de carbono (CO_2) gas, CO_2 disuelto, HCO_3^- , CO_3^{2-} y pH es fundamental en la química del agua. Los iones HCO_3^- y CO_3^{2-} están estrechamente vinculados con la alcalinidad del agua, ya que contribuyen a su capacidad para resistir cambios en el pH al actuar como sistemas amortiguadores. Además, no son susceptibles a la oxidación ni a la reducción en condiciones naturales del agua. Es importante destacar que estos iones pueden precipitar con relativa facilidad, formando CaCO_3 , lo que influye significativamente en la química y la calidad del agua. Su medición parte del análisis realizado para determinar la alcalinidad, y al igual que esta se presenta como mg/l CaCO_3 (Custodio & Llamas, 1983).
Calcio	El calcio se encuentra en las aguas en mayor cantidad que el magnesio siendo, salvo en raras excepciones, el catión más abundante. A las aguas pasa por simple disolución, cuando tiene su origen en los yesos o los silicatos, o bien por ataque de las calizas o dolomitas, por la acción del anhídrido carbónico. (Zamora, 2009). Puede ser expresado como ppm Ca o CaCO_3 , mg/l Ca o CaCO_3 dependiendo de la metodología implementada para su determinación.
Cloruros	El cloruro presente en el agua de consumo procede de fuentes naturales, aguas residuales y vertidos industriales, escorrentía urbana con sal de deshielo, e intrusiones salinas. No se propone ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para el cloruro en el agua de consumo (OMS,2008). Puede ser expresado como ppm Cl^- , mg/l Cl^- dependiendo de la metodología implementada para su determinación
Magnesio	El magnesio no existe libre en la naturaleza. Se encuentra combinado como carbonato, MgCO_3 , constituyendo el mineral llamado magnesita o giobertita. Se encuentra generalmente en las aguas en cantidades mucho menores que el calcio, pero su importancia biológica es grande. Si la cantidad de magnesio en el agua es muy grande,

Término	Definición
	puede actuar como laxante e incluso adquirir un sabor amargo (Zamora, 2009). Puede ser expresado como ppm Mg o CaCO ₃ , mg/l Mg o CaCO ₃ dependiendo de la metodología implementada para su determinación
Potasio	El potasio, es un metal alcalino abundante en la naturaleza que forma parte de minerales como la silvina, que es una variedad de sal, pero más amarga. La OMS recomienda una ingesta diaria de potasio de al menos 90 mmol/día (3510 mg/día) en adultos, con el fin de reducir la tensión arterial y el riesgo de enfermedades cardiovasculares, accidentes cerebrovasculares y cardiopatía coronaria en adultos (Mesa, 2018). Puede ser expresado como ppm K, mg/l K dependiendo de la metodología implementada para su determinación
Sodio	El sodio es uno de los cationes mayoritarios del agua ya que cuenta con una solubilidad muy elevada y es muy difícil de precipitar, y se encuentra en las aguas dulces con concentraciones de hasta 150 ppm (Custodio & Llamas, 2001). El consumo recomendado en la actualidad por la OMS es 2 gramos de sodio (equivalentes a 5 gramos de sal) al día (OMS,2014). Puede ser expresado como ppm Na, mg/l Na dependiendo de la metodología implementada para su determinación
Sulfatos	Los sulfatos se liberan al agua procedentes de residuos industriales y mediante precipitación desde la atmósfera; no obstante, las concentraciones más altas suelen encontrarse en aguas subterráneas y provienen de fuentes naturales (OMS, 2008). Los sulfatos en el agua provocan sabores amargos (Galvín, 2004). Puede ser expresado como ppm SO ₄ ²⁻ , mg/l SO ₄ ²⁻ dependiendo de la metodología implementada para su determinación

Los iones mayoritarios desempeñan un papel crucial en su calidad y composición del agua. Por lo tanto, es fundamental comprender sus concentraciones y propiedades para evaluar adecuadamente la idoneidad del agua para diversos usos. En este contexto, se presenta la tabla VI-2 (inciso 6.1), que proporciona los valores de referencia de estos iones, lo que contribuye significativamente a la comprensión integral de la calidad del agua.

b) Metales pesados

El término de metal pesado refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas. Los ejemplos de metales pesados o algunos metaloides, incluyen el mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl), plomo

(Pb), litio (Li) entre otros, en un pequeño grado se pueden incorporar a organismos vivos (plantas y animales) por vía del alimento y lo pueden hacer a través del agua y el aire como medios de translocación y dependiendo de su movilidad en dichos medios. Los iones metálicos derivados arsénico (As), antimonio (Sb), cromo (Cr), cobre (Cu), zinc (Zn), bario (Ba), vanadio (V), mercurio (Hg), uranio (U), entre otros, a veces están en cantidades medibles, pero en general son elementos traza (Custodio & Llamas, 1983), es decir que generalmente están presentes en cantidades difícilmente medibles por medio químicos usuales.

Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos, se pueden incorporarse a un sistema de abastecimiento de agua por medio de residuos industriales que son vertidos sin previos tratamientos, los que posteriormente se depositan en lagos, ríos y distintos sistemas acuíferos (Méndez, 2009). También su presencia se puede derivar de la geología propia del lugar, en la tabla III-4. Los metales pesados pueden presentarse en el agua en concentraciones variables, lo que conlleva a su cuantificación utilizando diversas unidades, como partes por millón (ppm), partes por mil millones (ppb), miligramos por litro (mg/l) o microgramos por litro ($\mu\text{g/l}$), dependiendo del método analítico empleado. La evaluación de estos metales puede abordar tanto su concentración total como su especiación, lo que implica identificar los diferentes estados iónicos en los que se encuentran presentes en el agua.

Tabla III-4 Definición de parámetros químicos (metales pesados).

Término	Definición
Aluminio	El aluminio (Al) es fácilmente hidrolizable y anfótero. Solo existe en cantidades importantes como Al^{+3} en aguas muy ácidas o como $\text{Al}_2\text{O}_4^{-2}$ o $\text{Al}_2\text{O}_4\text{H}^-$ en aguas básicas, en cuyo caso puede producir alguna alcalinidad. Puede también estar en forma coloidal $\text{Al}_2\text{O}_4\text{H}_2$. (Custodio & Llamas, 2001) Los riesgos relativos de enfermedad de Alzheimer por exposición a concentraciones de Al en el agua de consumo mayores que 100 $\mu\text{g/l}$, según determinan estos estudios, son bajos (menores que 2,0). Estas predicciones imprecisas pueden, no obstante, ser útiles para adoptar decisiones relativas a la necesidad de controlar la exposición al Al de la población general (OMS, 2003).
Cadmio	La contaminación del agua por cadmio (Cd) es provocada por las principales áreas de aplicación que arrojan sus desechos a las alcantarillas, como son el acabado de metales, la electrónica, la manufactura de pigmentos, baterías, estabilizadores plásticos, plaguicidas, electrodeposición o aleaciones de fierro, en la producción de fierro y zinc, y en el uso de reactores nucleares (Agua México, 2007). El Cd es dañino en dosis muy pequeñas, el envenenamiento por Cd produce osteoporosis, enfisema pulmonar, cáncer de pulmón,

Término	Definición
	cáncer de próstata, hipertensión, diversas cardiopatías y retraso en la habilidad verbal de los niños, cuyo valor máximo aceptado es de 0.003 mg /L. (Accostupa Quispe & Mamani Tunqui, 2012).
Cobre	El cobre es un nutriente esencial y, al mismo tiempo, un contaminante del agua de consumo. En ocasiones se añade sulfato de cobre pentahidratado a las aguas superficiales para el control de algas. Las concentraciones de cobre en el agua de consumo varían mucho, y la fuente principal más frecuente es la corrosión de tuberías de cobre interiores. Las concentraciones suelen ser bajas en muestras de agua corriente o que se ha dejado correr prolongadamente, mientras que en muestras de agua retenida o que se ha dejado correr poco tiempo son más variables y suelen ser considerablemente más altas (con frecuencia >1 mg/l) (OMS, 2008).
Hierro	El hierro es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre. También puede haber hierro en el agua de consumo debido a la utilización de coagulantes de hierro o a la corrosión de tuberías de acero o hierro colado durante la distribución del agua. El incremento de su concentración obedece a la corrosión de las cañerías. El hierro en el agua no presenta problemas graves de toxicología. Pero en concentraciones superiores a 0.3 mg/l le imparte un color amarillento y, a partir de 1 mg/l, genera un sabor amargo y astringente. El hierro tiñe de color café los textiles, plomería y las paredes. (Cisneros, 2005).
Manganeso	El manganeso es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre, y su presencia suele estar asociada a la del hierro. Hay manganeso de origen natural en muchas fuentes de agua superficiales y subterráneas, sobre todo en condiciones anaerobias o de micro oxidación, el manganeso es un elemento esencial para el ser humano y otros animales. Tanto la carencia como la sobreexposición pueden causar efectos adversos. Se sabe que produce efectos neurológicos tras la exposición por inhalación, especialmente de tipo laboral (OMS, 2008).
Plomo	Los cuerpos de agua superficiales constituyen trampas de acumulación para los compuestos de plomo derivados de actividades antropogénicas. Los compuestos insolubles se hunden y se adsorben en los sedimentos o se adhieren a partículas en suspensión (especialmente a partículas de arcilla). Es así que cuando el plomo es ingerido, inhalado o absorbido por la piel, resulta ser altamente tóxico para los seres vivos en general y para los humanos en particular. Se sabe que es tóxico para los sistemas

Término	Definición
	endocrino, cardiovascular, respiratorio, inmunológico, neurológico, gastrointestinal, epidérmico y nefrológico, cuyo valor máximo aceptado es de 0.01 mg/l. (Accostupa Quispe & Mamani Tunqui, 2012)
Zinc	El zinc es un oligoelemento esencial que se encuentra en prácticamente todos los alimentos y en el agua potable en forma de sales o complejos orgánicos. Generalmente, la principal fuente de zinc son los alimentos. Aunque las concentraciones de zinc en aguas superficiales y subterráneas no suelen sobrepasar 0.01 y 0.05 mg/l, respectivamente, en el agua de grifo puede haber concentraciones mayores como consecuencia de la disolución del zinc de las tuberías (OMS, 2008).

La presencia de metales pesados en el agua reviste un interés considerable debido a su implicación en problemas de salud. No obstante, debido a la variedad de fuentes naturales de estos metales, no existen valores de referencia universales para su presencia en aguas naturales y salobres, como se ilustra en la tabla VI-2 (inciso 6.1), son escasos los metales para los cuales se establecen estos rangos.

c) Nutrientes

Este grupo está formado por los nitratos, nitritos y amonio, son parte de los llamados iones menores que son aquellos que se encuentran habitualmente formando menos del 1% del contenido iónico total, los iones menores más importantes son nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-), fluoruro (F^-) y estroncio (Sr^{2+}), suelen estar en concentraciones entre 0.01 y 10.0 ppm, mientras que los fosfatos (PO_4^{3-}), yoduro (I^-), hidróxido (OH^-), amonio (NH_4^+), manganeso (Mn^{2+}) suelen estar en concentraciones entre 0.0001 y 0.1 ppm, es frecuente que el anión NO_3^- se considere dentro del grupo de iones fundamentales aun cuando en general su composición es pequeña (Custodio & Llamas, 1983).

Desde la perspectiva de la calidad del agua, los nutrientes proceden principalmente de las actividades antropogénicas principalmente la cosecha, el ion de amonio (NH_4^+) puede adsorberse a las partículas de arcilla y desplazarse como consecuencia de la erosión. No obstante, lo más importante es que el NH_4^+ y el NO_3^- son solubles y se movilizan a través del perfil del suelo hasta las aguas subterráneas durante los períodos de lluvia mediante el proceso de lixiviación. El NO_3^- se encuentra también en la escorrentía superficial durante los períodos de lluvia. La prevención de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por el nitrógeno depende en gran medida de la capacidad de mantener el NO_3^- del suelo por debajo de un nivel que pueda ser absorbido por los cultivos, y reducir la cantidad de NO_3^- retenida en el suelo después de la cosecha. Por el contrario, el comportamiento del fósforo es muy sencillo. En estudios

realizados sobre el desplazamiento del fósforo desde las tierras agrícolas, se observa que la parte más importante se incorpora a los materiales arcillosos y es transportada como producto de la erosión (FAO,1997). En la tabla III-5 se detallan los parámetros reconocidos como nutrientes, los cuales, al igual que los iones mayoritarios, suelen presentarse en concentraciones no tan reducidas. La unidad de medida utilizada puede ser ppm o mg/l, dependiendo de la metodología empleada. En el caso de los compuestos nitrogenados, estos pueden expresarse como mg/l de nitrógeno como nitrito, nitrato o amonio ($N-NO_2^-$, $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$) o bien directamente como mg/l de nitrito, nitrato o amonio. De manera similar, el fosfato, puede expresarse como mg/l de fósforo (P) o mg/l de ortofosfato o fosfato (PO_4^{3-}).

Tabla III-5 Definición de parámetros químicos (nutrientes).

Término	Definición
Amonio	La mayor parte del amonio en el ambiente se deriva de la descomposición natural de estiércol y de plantas y animales muertos (ATSDR, 2016,). Las aguas no deben contener normalmente amonio. En general, la presencia del ion amonio se considera como una prueba química de contaminación reciente y peligrosa. Si el medio es aerobio, el nitrógeno amoniacal se transforma en nitritos. El amonio presente en el medio ambiente procede de procesos metabólicos, agropecuarios e industriales, así como de la desinfección con cloramina. (OMS, 2006).
Fosfatos	El fósforo es un elemento esencial en el crecimiento de plantas y animales. Actualmente se considera como uno de los nutrientes que controlan el crecimiento de algas, el fósforo se encuentra en aguas naturales y residuales casi exclusivamente como fosfatos. El empleo de detergentes, los cuales contienen grandes cantidades de fósforo, ha aumentado el contenido de fosfato en las aguas residuales domésticas y ha contribuido al problema de incremento del mismo en las fuentes receptoras (Suarez, 2004). La contaminación del fertilizante de fosfato por elementos tóxicos se ha observado por medio de diferentes estudios y se ha encontrado que los fluoruros, metales como Cadmio, mercurio (Hg), plomo (Pb), U y cromo (Cr) son significativamente altos en algunos de los productos finales listos para su comercialización, esto ha provocado la entrada de varios metales pesados en la cadena alimentaria humana a través de diversos productos agrícolas por lo cual ha recibido mayor atención en los últimos años debido a sus posibles impactos en la salud. (Chandrajith, 2009).
Nitratos	El nitrato es la forma termodinámica estable del nitrógeno combinado en los sistemas acuosos y terrestres oxigenados, de forma que hay una tendencia de todos los materiales nitrogenados a ser convertidos a nitratos en estos medios. El problema con los nitratos es

Término	Definición
	<p>que son contaminantes móviles en el agua subterránea que no son adsorbidos por los materiales del acuífero y no precipitan como un mineral, y debido a sus propiedades físicas, no pueden olerse ni sentirse y su presencia en concentraciones potencialmente peligrosas, es detectada cuando se manifiesta un problema de salud el único control del nitrato (Pacheco Ávila & Cabrera Sansores, 2003).</p> <p>El principal riesgo para la salud del nitrito y el nitrato es la metahemoglobinemia. El nitrato se reduce a nitrito en el estómago de los lactantes, y el nitrito puede oxidar la hemoglobina a metahemoglobina, que no puede transportar oxígeno por el organismo. La disminución del transporte de oxígeno se manifiesta clínicamente cuando la concentración de metahemoglobina alcanza o supera el 10% de la concentración normal de hemoglobina; esta enfermedad, denominada metahemoglobinemia, produce cianosis y, en concentraciones más altas, asfixia (OMS, 2008).</p>
Nitritos	<p>Un agua que contiene nitritos puede considerarse sospechosa desde el punto de vista sanitario. Por otro lado, hay que señalar que las aguas que están en contacto con ciertos terrenos y conducciones pueden contener nitritos de forma natural, al igual que aquellas que son pobres en oxígeno al haber sido captadas en sondeos profundos (Cabello, 2001). Son un estado intermedio de oxidación entre el amonio y los nitratos. (Marín Galvín, 2010)</p> <p>Los nitritos son de particular interés en la salud porque convierten la hemoglobina en la sangre a metamoglobina. La metamoglobina reduce la cantidad de oxígeno que se transporta en la sangre. Como resultado, las células no tienen suficiente oxígeno para funcionar adecuadamente en el organismo. A esta condición se le llama metamoglobinemia. La metamoglobinemia afecta principalmente a las mujeres embarazadas y los bebés. (Departamento de Servicios de Salud de California, 2006)</p>

Los nutrientes están relacionados directamente a las actividades antropogénicas y se relacionan estrechamente con la calidad del agua. En la tabla VI-2 (inciso 6.1) se exponen los rangos esperados para la presencia de nutrientes en las aguas naturales y salobres, proporcionando un marco de referencia crucial para evaluar su estado y abordar posibles impactos derivados de la actividad humana.

iv. Índice de calidad de agua

La alteración de las características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de la fuente de abastecimiento incide directamente sobre el nivel de riesgo sanitario presente en el agua, el cual se define como el riesgo de transportar agentes contaminantes que puedan causar enfermedades de origen hídrico al hombre y los animales o alterar el normal desempeño de las labores dentro del hogar o la industria (Torres et al., 2009).

El deterioro de las fuentes de abastecimiento de agua incide directamente en el nivel de riesgo sanitario presente y en el tipo de tratamiento requerido para su reducción; la evaluación de la calidad del agua permite tomar acciones de control y mitigación, garantizando el suministro de agua segura. Una herramienta son los índices de calidad de agua (ICA); que son herramientas diseñadas para asignar un valor de calidad basado en el análisis de diversos parámetros. El objetivo es transformar los datos en información fácilmente comprensible y utilizable para mejorar la interpretación y comprensión de los resultados del monitoreo del agua (Torres et al., 2009; Balmaseda Espinosa & García Hidalgo, 2014). Es común que la evaluación de la calidad se realice a partir de un conjunto de variables físicas, químicas y biológicas, cuyos resultados son interpretados por especialistas en la materia. Sin embargo, dada la importancia que tiene la calidad de las aguas para la sociedad es crucial que estos resultados se comuniquen de manera accesible tanto para profesionales como para el público en general (Balmaseda Espinosa & García Hidalgo, 2014).

El uso de índices para valorar la calidad de las aguas facilita su comunicación y entendimiento por especialistas y público en general. Uno de los más empleados es el propuesto por Canadian Council of Ministers of the Environment, conocido como CCME_{WQI} por la flexibilidad en la selección de las variables considerar.

Según el CCME, el índice se basa en una combinación de tres factores (CCME,2001):

1. El número de variables cuyos objetivos no se cumplen (alcance)
2. La frecuencia con la que los objetivos no se cumplen (frecuencia)
3. La cantidad por la que no se cumplen los objetivos (amplitud)

Estos se combinan para producir un valor único (entre 0 y 100) que describe la calidad del agua en las categorías buena, regular, marginal y pobre (ver tabla V-9 criterios para la clasificación de las aguas). El CCME_{WQI} se relaciona con la forma en que los factores individuales se combinan para proporcionar un índice final.

C. HIDROQUÍMICA

El estudio de las aguas subterráneas trasciende de la mera comprensión de este compuesto químico líquido a temperatura ambiente que se conoce como agua. Las singulares características físico-químicas del agua no solo son fundamentales para la existencia de la biosfera, sino que también definen la composición de las aguas subterráneas. Más allá de ser simplemente agua, estas fuentes subterráneas transportan una variedad de compuestos químicos disueltos u otras formas de materia. La hidroquímica, como disciplina, busca comprender estas complejas interacciones entre la composición química del agua, su distribución y circulación en los acuíferos, y los aspectos geológicos y mineralógicos que influyen en su comportamiento. En este sentido, el término "agua" se emplea como un término general que engloba soluciones acuosas diluidas que contienen tanto compuestos orgánicos como inorgánicos, y que constituyen una amplia gama de sistemas acuáticos. (Vázquez-Suñé E. , 2009).

i. Disolución de las sustancias en el agua

La mayoría de las sustancias se encuentran disueltas en forma iónica, que pueden ser iones simples como el Cl^- , Ca^{2+} y Na^+ , o complejos como SO_4^{2-} y HCO_3^- ; menos comunes son los complejos iónicos de metales pesados. Una parte de estas sustancias se presenta en forma molecular no iónica, que a menudo está en equilibrio con su forma ionizada, como en el caso del ácido carbónico (H_2CO_3), el carbonato de calcio (CaCO_3) y la sílice (SiO_2) disuelta. Además, algunas sustancias se encuentran en forma de suspensiones coloidales, como los OH^- de Si, Al, Fe, Mn y la materia orgánica. Los gases, por otro lado, suelen encontrarse disueltos en el agua (Vázquez-Suñé E. , 2009).

ii. Origen y composición química de las aguas subterráneas

La composición química de las aguas subterráneas depende de factores atmosféricos, geológicos, hidrológicos y antropogénicos. Por la gran capacidad de disolución del agua y su elevada reactividad, puede disolver gases, líquidos y sólidos; lo que hace que el agua contenga gran cantidad de sustancias disueltas. Sin embargo, típicamente contienen una mezcla de iones inorgánicos y, en menor medida, compuestos orgánicos disueltos.

a) Procesos modificadores de la composición del agua subterránea

Los procesos que modifican la composición del agua subterránea pueden ser naturales o antropogénicos, y pueden ocurrir en la superficie o en el subsuelo. Algunos de estos procesos incluyen:

- **Disolución y precipitación de sólidos:** Con el aumento del tiempo de contacto del agua con el terreno se pueden ir disolviendo más sales hasta alcanzarse los respectivos productos de solubilidad. El agua al infiltrarse incorpora Dióxido de Carbono (CO₂) del suelo, lo que provoca que se vaya acidificando y así aumentando su capacidad de disolución (Custodio & Llamas, 2001; Vázquez-Suñé E. , 2009).
- **Descomposición de la materia orgánica:** La materia orgánica presente en el suelo y la vegetación puede descomponerse y liberar productos químicos orgánicos en el agua subterránea, como ácidos húmicos y fúlvicos. Para que se de este proceso se requiere de tres factores importantes: existencia de un substrato oxidable, abundante materia orgánica (portador de electrones) y la aparición de un catalizador, generalmente microorganismos (aceptador de electrones) (Vázquez-Suñé E. , 2009).
- **Meteorización y descomposición de la roca:** La meteorización de minerales en la zona de recarga puede liberar iones que se disuelven en el agua subterránea. Los principales mecanismos de meteorización química son la hidrólisis (reacción entre el agua y el mineral), la hidratación (incorporación de las moléculas del agua en la estructura del mineral) y la disolución. En general la química del agua se ve alterada por el incremento de la alcalinidad y salinidad (Vázquez-Suñé E. , 2009).
- **Intercambio iónico:** Cuando el agua subterránea se infiltra, puede intercambiar iones con las partículas de suelo y roca. Este intercambio iónico tiene como objetivo alcanzar un equilibrio químico, lo que puede influir significativamente en la composición química del agua subterránea.
- **Mezcla de aguas:** La composición resultante de una mezcla de dos o más aguas está determinada por la proporción de los compuestos presentes en cada una de ellas y el nuevo equilibrio químico que emerge en la solución combinada. Este fenómeno se rige por los principios de la química de soluciones, donde las interacciones entre los diferentes iones y compuestos en las aguas originales conducen a una distribución equilibrada de los componentes en la mezcla resultante (Vázquez-Suñé E. , 2009).

Estos procesos pueden ocurrir de manera simultánea y compleja, lo que resulta en una amplia variedad de composiciones químicas en las aguas subterráneas.

b) Composición del agua subterránea

La composición química de las aguas subterráneas puede variar considerablemente dependiendo de los procesos que se detallan en el inciso 3.3.C.ii.a. Sin embargo, en términos generales, las aguas subterráneas suelen contener una variedad de iones y compuestos disueltos. Algunos de los componentes más comunes se detallan en la tabla III-6, y sus rangos de concentración se presentan en la tabla VI-2

Tabla III-6 Origen de los componentes más comunes de las agua subterráneas.

Elemento	Origen
Sodio	Puede originarse de varias fuentes, como el ataque de feldespatos y otros silicatos en el suelo, la sal gema, zeolita y polvo atmosférico, el agua de mar y el aerosol marino, así como de la contaminación urbana e industrial.
Potasio	Puede originarse principalmente del ataque de la ortosa y otros silicatos, como micas y arcillas, así como localmente de la disolución de sales potásicas naturales como silvinita y carnalita. En menor medida, puede provenir de aportes del agua de lluvia y ocasionalmente de la contaminación industrial, minera y agrícola, como los abonos.
Magnesio	Se origina principalmente del ataque de minerales como la dolomita, calizas dolomíticas, silicatos magnésicos y ferromagnésicos. También puede provenir de la disolución de sales de magnesio natural, como la carnalita y la epsomita. En menor medida, el magnesio puede estar presente en el agua debido a aportes del agua de lluvia y a la contaminación industrial, minera y agrícola.
Calcio	Puede originarse principalmente del ataque de minerales como la calcita, la dolomita y otros silicatos calcáreos. También puede provenir de la disolución de sales de calcio natural, como el yeso y la anhidrita. En menor medida, el calcio puede estar presente en el agua debido a aportes del agua de lluvia.
Cloruros	La principal fuente de cloruros es la disolución de minerales como la sal gema y la halita. También puede provenir de la disolución de sales de cloruro natural presentes en el suelo y las rocas. Además, puede ser aportado por la deposición atmosférica de aerosoles marinos y polvo, así como por la contaminación urbana e industrial y la mezcla con aguas marinas en zonas costeras.
Bicarbonatos	Puede originarse principalmente a partir de la disolución de CO ₂ atmosférico o del suelo, así como la disolución de minerales carbonatados como la calcita y la dolomita. Estos minerales contienen iones de carbonato que pueden reaccionar con ácido carbónico presente en el agua, formando bicarbonatos. Además, los bicarbonatos pueden ser

Elemento	Origen
	producto de la descomposición de materia orgánica en ambientes anaeróbicos, como en el caso de la fermentación de la materia orgánica en sedimentos o suelos.
Sulfatos	Una de las principales fuentes es el ataque de minerales sulfurados presentes en el suelo y las rocas, como la pirita (FeS_2), que se disuelve y libera iones sulfato en el agua, la disolución de yeso (sulfato de calcio) y otros minerales de sulfato presentes en la corteza terrestre. Otras fuentes incluyen la deposición atmosférica de sulfatos provenientes de la actividad volcánica, la industria y la combustión de combustibles fósiles.
Nitratos	La principal fuente es la actividad agrícola, donde los fertilizantes ricos en nitrógeno, como el nitrato de amonio y el nitrato de potasio, pueden infiltrarse en el suelo y llegar a las aguas subterráneas a través de la lixiviación. Los residuos animales, como los desechos de establos y granjas, también pueden contribuir a los niveles de nitratos en el agua subterránea debido a la descomposición de la materia orgánica. Otras fuentes incluyen la deposición atmosférica de nitratos provenientes de la combustión de combustibles fósiles y actividades industriales, así como la infiltración de aguas residuales urbanas y la descarga de sistemas sépticos y pozos negros.
Sílice	Una fuente común es la disolución de minerales silíceos presentes en la roca y el suelo, como cuarzo, feldespato y arcillas silíceas. Estos minerales pueden liberar sílice cuando están expuestos a procesos de meteorización y erosión. La actividad volcánica puede ser otra fuente importante de sílice. Otras fuentes incluyen la descomposición de materia orgánica rica en sílice, como diatomeas y esponjas de agua dulce, y la deposición atmosférica de partículas de sílice suspendidas en el aire.
Hierro	Una fuente común es la disolución de minerales de hierro presentes en la roca y el suelo, como la magnetita, la hematita y la siderita. La actividad volcánica puede ser otra fuente importante de hierro, ya que los materiales volcánicos pueden contener concentraciones significativas de este elemento. Otras fuentes incluyen la descomposición de materia orgánica rica en hierro, la actividad microbiana que puede reducir minerales de hierro insolubles a formas solubles, y la contaminación antropogénica por actividades industriales y agrícolas que pueden liberar hierro en el agua subterránea.
Fosfatos	La descomposición de minerales fosfatados presentes en la roca y el suelo, como la apatita y la roca fosfórica; la descomposición de materia orgánica rica en fósforo. El uso de fertilizantes fosfatados y los vertidos de aguas residuales urbanas e industriales aumentan la concentración de fosfato en el agua.

Fuente: (Custodio & Llamas, 2001; Vázquez-Suñé E. , 2009)

iii. Análisis químicos de las aguas subterráneas

En un análisis exhaustivo de Hidroquímica, es común determinar el contenido de Ca, Mg, Na, K, HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , así como el valor de pH, alcalinidad, conductividad, ORP, TDS y dureza. También se suele medir el contenido de Fe, Mn, Si y la materia orgánica. Estos análisis brindan un contexto sobre los posibles mecanismos que influyen en la composición química de las aguas subterráneas, como la interacción con la roca, la precipitación y la evaporación. Para evaluar la calidad del agua, se realizan una serie de comprobaciones sobre los parámetros medidos, que pueden incluir:

a) Balance iónico

En un análisis químico completo debe verificarse que: suma de equivalentes de aniones es igual a la suma de equivalentes de cationes. En la práctica existe una diferencia entre ambas cifras que es debida a los errores acumulados de cada una de las determinaciones individuales y a no tomar en cuenta las contribuciones iónicas menores. Este valor entre más cercano a 0% representa una correcta ejecución en análisis de las muestras y en la selección de los parámetros ya que un 0 % indica la electroneutralidad del agua, misma carga negativa (aniones) que carga positiva (cationes). Si existe una diferencia muy importante solo puede ser debido a que existen cantidades anormales de los iones menores o a un error grave en el análisis del laboratorio. El error admisible depende un poco de la concentración y del tipo de agua, existen valores de referencia que pueden ser utilizados de acuerdo con la conductividad, tomando en análisis rutinarios pueden a veces admitirse errores algo superiores (Custodio & Llamas, 2001).

b) Métodos gráficos

Para el estudio e interpretación de datos derivados de análisis hidroquímicos, comúnmente se utilizan una serie de diagramas que vienen incorporados en software como Aquachem y Diagrammes. Entre estos se tiene: Triangulares (Piper, Durov), Circulares, Barras (Collins), Columnas logarítmicas (Schoeller), Poligonales (Stiff modificado), Dimensionales de dispersión, Gibbs, Pourbaix, entre otros. En la tabla III-7 se presenta la definición de los tipos de diagramas (Custodio & Llamas, 2001; Villegas, 2011; Vázquez-Suñé E. , 2009).

Tabla III-7 Tipos de diagramas hidrogeoquímicos.

Término	Definición
Piper	Consta de dos diagramas triangulares y uno romboidal centra. Usualmente en un triángulo equilátero se representan las concentraciones de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , y Na^+ (en ocasiones Na^+ y K^+) y en otro las de los aniones HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- (o $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$). Cada uno de los vértices representan el 100% de miliequivalentes por Litro (meq/l) de un ion. En los diagramas de Piper las aguas de características químicas similares quedan agrupadas en sectores, pudiéndose establecer la clasificación según los posibles procesos modificadores (Escuder et al., 2009).
Durov	Los diagramas de Durov, al igual que los diagramas de Piper, constan de dos diagramas triangulares equiláteros donde se representan los porcentajes de los miliequivalentes de los iones principales. Uno de los diagramas está destinado a los aniones principales y el otro a los cationes principales.; posteriormente los puntos de datos se proyectan en una cuadrícula en la base de cada triángulo (Custodio & Llamas, 2001). Además, este diagrama posibilita la comparación directa de otros dos parámetros del agua subterránea que pueden ser: el pH, TDS u ORP.
Circulares	Consiste en un círculo de radio proporcional al residuo seco o al total de meq/L en el que se trazan los sectores proporcionales a los porcentajes de los diversos iones. Se adaptan bien a ser utilizados en mapas hidrogeoquímicos (Custodio & Llamas, 2001; Vázquez-Suñé E. , 2009).
Collins	Son representaciones gráficas que consisten en un par de barras adyacentes, una catiónica y otra aniónica; que están divididas en segmentos que indican la proporción de cada ion presente en la muestra. La altura de las barras es proporcional a la concentración de la muestra, mientras que los segmentos más grandes resaltan los iones dominantes, tanto catiónicos como aniónicos. Estos diagramas proporcionan una visualización clara de la composición iónica de las muestras de agua, facilitando la identificación de los principales componentes y sus proporciones (Mariño & García, 2018).
Schoeller	Constan de columnas graduadas con escalas logarítmicas todas del mismo módulo y representan los iones: Ca^{2+} , Mg^{2+} , y Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- , en meq/L cada uno en una columna. Estos diagramas permiten ver fácilmente las mezclas, que aparecen como líneas intermedias entre las aguas. Comparando la forma en que queda representada

Término	Definición
	cada muestra de agua, pueden deducirse las posibles reacciones y también establecer grupos de aguas con características similares (Vázquez-Suñé E. , 2009).
Stiff modificado	Consiste en tres semirrectas convergentes o paralelas y equidistantes, dividida en dos segmentos uno representando los iones mayoritarios y otro por los cationes mayoritarios. La longitud de cada segmento es proporcional a la concentración en meq/L de un determinado ion. La forma resultante da idea del tipo del agua. Son un buen método para estudiar la variación espacial de la composición del agua del acuífero (Custodio & Llamas, 2001; Vázquez-Suñé E. , 2009).
Dimensionales de dispersión	Son herramientas empleadas para visualizar la variación espacial o temporal de una o varias especies, así como para comparar la concentración de una especie frente a otra. Además, permiten observar cómo cambia una determinada relación iónica en el conjunto de las muestras analizadas. Estos gráficos ofrecen una representación clara de la distribución de los componentes químicos en un sistema acuático, facilitando la identificación de patrones y tendencias en los datos (Vázquez-Suñé E. , 2009).
Gibbs	Gibbs (1970) propuso dos diagramas en los cuales se representan las variaciones de las razones $(Na^+ + K^+) / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$ para los cationes y $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$ para los aniones en función del total de sólidos disueltos (TDS). Estos diagramas son herramientas que permiten identificar el mecanismo dominante que controla la química en las aguas subterráneas. Los posibles mecanismos incluyen la interacción con la roca, la precipitación y la evaporación. Analizando la distribución de los puntos en estos diagramas, es posible inferir cuál de estos procesos ejerce una mayor influencia en la composición química del agua subterránea en un determinado contexto geológico y ambiental (López & Roberto, 2015).
Pourbaix	Un diagrama de Pourbaix es una representación gráfica del potencial (ordenada) en función del pH (abscisa) para un metal dado bajo condiciones termodinámicas standard (usualmente agua a 25 °C). El diagrama tiene en cuenta los equilibrios químicos y electroquímicos y define el dominio de estabilidad para el electrólito (normalmente agua), el metal y los compuestos relacionados. Tales diagramas puedes construirlos a partir de cálculos basados en la ecuación de Nernst y en las constantes de equilibrio de distintos compuestos metálicos (Muñoz Portero, 2011).

D. CONTAMINACIÓN DE LAS FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea puede contaminarse de muchas maneras entre las que se incluyen las actividades humanas y los aportes naturales que tiene el medio. La manera de proteger las fuentes de agua subterráneas es identificar las áreas y los mecanismos por los cuales los contaminantes entran al sistema.

i. Aportes naturales

El agua se contamina naturalmente por algunas sustancias o por elementos libres como el sodio, el potasio, el cobre, el hierro, el calcio y el selenio (Abarca Monge & Mora Brenes, 2007).

Se entiende por contaminantes naturales del agua todos aquellos fenómenos o elementos naturales que contaminan la naturaleza. Aun así, muchas veces estos contaminantes naturales se ven agravados por las actividades humanas. Los principales contaminantes naturales del agua son:

- Calentamiento global: El aumento de las temperaturas está provocando que las capas de hielo se deshagan, por lo que aumenta el nivel del agua y se varía el ciclo del agua. Además, también disminuye su calidad dado que se arrastran sedimentos.
- Inundaciones: Cuando se producen inundaciones, el agua en exceso arrastra consigo todo tipo de sustancias tóxicas (como fertilizantes o pesticidas), animales muertos y residuos de todo tipo que devastan la zona. Este contaminante puede llegar a afectar a la higiene de las personas e incluso desencadenar en enfermedades causadas por el agua contaminada.
- Erosión de la costa: Se trata de un fenómeno natural originado por la combinación de procesos meteorológicos, climáticos, hidrodinámicos y sedimentarios con la forma de la costa. Esta interacción entre procesos provoca una modificación en la línea de la costa. Este fenómeno natural contamina el agua, ya que el desgaste del suelo, el sedimento y el polvo de la costa acaban en el agua del mar. En el caso de erosiones en zonas donde no hay agua, los elementos que se desprenden llegan a canales y el agua contaminada afecta el agua potable.
- Actividad volcánica: Con la presencia de ceniza, lava y otros elementos arrastrados en el agua, esta se vuelve mucho más turbia. Además, el contacto entre la lava y el agua puede llegar a generar una lluvia ácida (Sotoca, 2021)

ii. Contaminación antropogénica

Los contaminantes antropogénicos son aquellos residuos que derivan de las actividades realizadas por el ser humano. Dentro de estas actividades se encuentran los diferentes tipos de industria, las actividades mineras, que pueden depositar sus desechos directamente a cuerpo de agua sin tratamientos previos, así como de igual manera pueden afectar la calidad de los suelos, logrando de esta manera afectar la calidad tanto de las aguas subterráneas como de las aguas superficiales. También se presenta la contaminación por asentamientos humanos y por actividades agroganaderas que pueden ser una causa importante de eutrofización y degradación significativa de las fuentes de agua. Siendo estos últimos las principales fuentes de contaminación en la zona de estudio.

a) Agricultura

La agricultura que es uno de los factores que tiene mayor impacto en la calidad del agua, por el uso de fertilizantes que se utilizan para el cultivo, la calidad del agua de riego que se encuentra muy enriquecida en nutrientes infiltra y contamina los acuíferos. Los fertilizantes “Son sustancias de origen animal, mineral, vegetal o sintético, que contienen gran cantidad de nutrientes y se utilizan para enriquecer y mejorar características físicas, químicas y biológicas del suelo o sustrato; así las plantas se desarrollarán mejor.” (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019).

La agricultura afecta la calidad con los químicos que son empleados en su desarrollo, sin embargo, también afecta la cantidad al no tener sistemas de riego eficientes que eviten el derroche de agua. Los sistemas de riego tienen la finalidad de aportar a los cultivos el agua que no pudieron obtener a través de la lluvia, pero en muchas ocasiones la extracción del agua se realiza de la misma fuente que abastece a la población, lo que ocasiona una disminución en los caudales por lo que se debe procurar establecer sistemas de riego que utilicen el agua de manera eficiente. “Además de los problemas de anegamiento, desertificación, salinización, erosión, entre otros, que repercuten en las superficies regadas, otro efecto ambiental grave es la degradación de la calidad de los recursos hídricos, aguas abajo, por efecto de las sales, productos agroquímicos y lixiviados tóxicos.” (FAO,1993)

b) Ganadería

En muchas ocasiones en la ganadería no se realiza un manejo adecuado de los residuos producidos por el ganado, así como la pérdida de áreas boscosas para convertirlas en pastizales, aumentando la escorrentía y con ella la cantidad el arrastre de sólidos que alteran la calidad del agua. Los mecanismos de contaminación se diferencian entre fuentes puntuales y no puntuales. Entre las primeras se identifican los corrales de engorda, las plantas procesadoras de alimentos y las de agroquímicos y la descarga directa a

cuerpos de agua de estas instalaciones, que tiene lugar por inaceptable que sea. Entre las segundas se observa la aplicación de aguas residuales a la agricultura, los accidentes y derrames de las lagunas de oxidación que particularmente tienen lugar en la producción porcina. (Espejo, 2008).

La materia fecal es uno de los principales contaminantes de las aguas superficiales, estas al ser arrojadas o vertidas en las fuentes de agua excederán la capacidad de asimilación por lo que su calidad se verá afectada y mientras no cuente con procesos de tratamiento o desinfección no podrá utilizarse para abastecer a la población. El mal control de la materia fecal en la actividad ganadera tiene mayor impacto en la calidad del agua. “En términos generales, los mayores riesgos microbianos son los derivados del consumo de agua contaminada con excrementos humanos o animales (incluidos los de las aves). Los excrementos pueden ser fuente de patógenos, como bacterias, virus, protozoos y helmintos.” (OMS, 2006).

c) Asentamientos humanos

La contaminación de tipo doméstico proviene principalmente de fuentes como fosas sépticas y fugas de alcantarillado. En su mayoría, esta contaminación es de naturaleza orgánica y biológica, con la presencia adicional de detergentes y productos farmacéuticos y de higiene personal (PPCPs). Esta combinación de contaminantes domésticos puede afectar significativamente la calidad del agua y representar riesgos para la salud humana y el medio ambiente. La contaminación de las aguas subterráneas provocada por los asentamientos humanos es predominantemente de origen fecal, lo que conlleva la presencia habitual de microorganismos como *Ecoli* y *Pseudomonas aeruginosa*, así como un aumento en los niveles de nitratos, sales totales y cloruros. La aparición de nitratos suele asociarse a la descarga directa de aguas residuales sobre la zona no saturada, generando un entorno oxidante. En condiciones anaeróbicas o cuando la descarga se produce directamente en el acuífero, se observa una disminución de los niveles de NO_3^- junto con la presencia de hierro ferroso (Fe^{2+}) disuelto (Lledó, 2002).

E. EFECTOS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA SALUD HUMANA Y ECOSISTEMAS

Los impactos derivados de la calidad del agua sobre la salud humana y los ecosistemas son significativos y abarcan una amplia gama de aspectos. Desde el punto de vista de la salud humana, el consumo de agua contaminada puede provocar enfermedades gastrointestinales, infecciones bacterianas, parasitarias o virales, e incluso enfermedades crónicas a largo plazo debido a la presencia de sustancias químicas peligrosas.

En cuanto a los ecosistemas, la contaminación del agua puede tener efectos devastadores en la biodiversidad acuática, incluida la muerte de peces y otros organismos acuáticos, la degradación de los hábitats acuáticos y la extinción de especies. Además, puede provocar la eutrofización de los cuerpos de

agua, donde el exceso de nutrientes favorece el crecimiento excesivo de algas, lo que conduce a la disminución de oxígeno en el agua y la formación de zonas muertas.

i. Salud humana

La calidad del agua engloba todos los factores que tiene como consecuencia afectaciones en la salud del ser humano. Las enfermedades relacionadas con el uso de agua incluyen aquellas causadas por microorganismos y sustancias químicas presentes en el agua potable; enfermedades como la esquistosomiasis, que tiene parte de su ciclo de vida en el agua; la malaria, cuyos vectores están relacionados con el agua; el ahogamiento y otros daños, y enfermedades como la legionelosis transmitida por aerosoles que contienen microorganismos (OMS,2019). En la tabla III-8 se describen las enfermedades de origen hídrico.

Tabla III-8 Clasificación de enfermedades según origen hídrico.

Tipo	Descripción	Ejemplos
Enfermedades transportadas por el agua.	Son aquellas en las que el agente contaminante, ya sea químico o microbiológico, es ingerido a través de agua contaminada.	Enfermedades infecciosas microbianas: cólera, tifoidea, giardiasis, amebiasis, hepatitis A y E, salmonella, shiguella. Enfermedades toxicas: metales pesados, plaguicidas, cianuro
Enfermedades basadas en el agua.	Cuando el agente patógeno contaminante, desarrolla parte de su desarrollo y/o ciclo vital en el agua.	Esquistosomiasis, fasciolosis hepática, leptospirosis e infecciones por helmintos.
Enfermedades vinculadas.	Cuando los transmisores vectores son insectos y estos se reproducen en el agua.	Dengue, zika, chikungunya, malaria y fiebre amarilla.
Enfermedades relacionadas con la higiene.	Aquellas que están relacionadas al higiene personal y domiciliaria de las personas.	Pediculosis, escabiosis y conjuntivitis.
Enfermedades dispersadas por el agua	Los agentes patógenos se proliferan en el medio acuático, generalmente estos son ingeridos por el tracto respiratorio.	Fiebre de Pontiac y Legionella

Fuente: (Dueñas Jurado et al., 2022)

Las bacterias son uno de los principales factores de calidad de agua que provocan daños a la salud, ya que estos se presentan por contaminaciones orgánicas y son los principales causantes de enfermedades estomacales. La contaminación bacteriana presente en el agua provoca estragos casi inmediatos en la salud, por lo que las normas que regulan la calidad del agua lo contemplan de manera muy estricta. “Las condiciones bacteriológicas del agua son fundamentales desde el punto de vista sanitario. La norma bacteriológica de calidad establece que el agua debe estar exenta de patógenos de origen entérico y parasitario intestinal que son los responsables de transmitir enfermedades como salmonelosis, shigelosis, amebiasis, entre otros (Apella & Araujo, 2005).

La contaminación química del agua presenta problemas de mayor gravedad en la salud, por lo que se debe realizar monitoreo constante y tratamientos que ayuden a reducir su presencia. A diferencia de la contaminación bacteriana, la contaminación química se acumula los contaminantes en el sistema y produce estragos no tan inmediatos y más severos porque no son expulsados por el ser humano. Existe un número considerable de problemas graves de salud que pueden producirse como consecuencia de la contaminación química del agua de consumo (OMS, 2006).

ii. Ecosistemas

La calidad del agua juega un papel crucial en la salud de los ecosistemas acuáticos y terrestres. La presencia de contaminantes químicos como metales pesados, pesticidas y productos químicos industriales pueden degradar o destruir hábitats acuáticos, como arrecifes de coral, humedales y zonas de desove. A su vez el exceso de nutrientes en el agua provoca la eutrofización de los cuerpos de agua, lo que conlleva principalmente a una proliferación desmedida de algas y macrófitas, superando la capacidad de consumo de herbívoros como invertebrados y peces (García Miranda & Miranda Rosales, 2018). Este desequilibrio genera alteraciones significativas en la dinámica y la estructura de los ecosistemas acuáticos, impactando negativamente en la biodiversidad y la calidad del agua. lo que afecta a las especies que dependen de estos hábitats para reproducirse, alimentarse y refugiarse. Una disminución en la calidad del agua puede provocar la muerte de las plantas en el agua, privando a otros organismos de la cadena alimentaria de su fuente de alimento, afectando la biodiversidad y la salud general del ecosistema (Apure, 2023).

La pérdida de biodiversidad en los océanos es una preocupación grave y subestimada, principalmente atribuible a diversos factores como la acidificación de los cuerpos de agua salada, la sobreexplotación pesquera y la degradación de los ecosistemas marinos. Se ha observado un impacto significativo en la biomasa de las poblaciones marinas, con una reducción de hasta el 80% en tan solo 15 años de explotación. Estos cambios alarmantes plantean serias amenazas para la estabilidad y la salud de los ecosistemas

marinos, así como para la seguridad alimentaria y el sustento de millones de personas que dependen de los recursos marinos para su subsistencia (Cely Calixto et al., 2023).

F. GESTIÓN INTEGRADA DEL RECURSO HÍDRICO

De acuerdo con el módulo desarrollado por Gabriela Vergara en colaboración con el UICN para hablar de manejo y gestión primero se deben conocer bien cada uno de estos conceptos y al definirlos concluye que *“La gestión es un concepto más amplio y complejo que el de manejo. Es decir, no solamente se enfoca en el desarrollo del recurso hídrico, sino que debe abordar conscientemente el desarrollo del recurso hídrico de una manera tal, que asegure su uso sostenible a largo plazo y para futuras generaciones.”* (Vergara Villamagua, 2012). Para que una gestión sea de éxitos debe haber una integridad en todas las partes que conllevan a un mejor manejo del recurso: las autoridades, los agricultores, ganaderos, escuelas, industrias, los pobladores y todos aquellos entes que se ven beneficiados por el uso de este recurso, deben caminar hacia un solo sentido, cuidar este vital recurso. Las autoridades deben guiar y asegurar el cumplimiento de las normas establecidas para el desarrollo de una buena gestión del agua.

i. Riesgos hídricos

Riesgo hídrico se refiere a la posibilidad de que una entidad, ya sea una comunidad, una empresa o una región, enfrente desafíos relacionados con el agua, como escasez de agua, estrés hídrico, inundaciones, deterioro de la infraestructura o sequías. La magnitud del riesgo está determinada por la probabilidad de que ocurra un desafío específico y la gravedad del impacto que este desafío puede tener. Esta gravedad del impacto está influenciada por la intensidad del desafío y la vulnerabilidad de la entidad afectada. Es importante destacar que cada sector de la sociedad y las organizaciones que lo componen pueden percibir y definir el riesgo hídrico de manera diferente, incluso cuando se enfrentan al mismo nivel de desafíos relacionados con el agua. Sin embargo, muchos de estos desafíos pueden generar riesgos para múltiples sectores y organizaciones simultáneamente (CEO Water Mandate, 2017).

ii. Gobernabilidad y gobernanza del Agua

La gobernabilidad del agua abarca un conjunto integral de sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos que se ponen en práctica con el objetivo de facilitar el desarrollo y la gestión eficiente de los recursos hídricos. Además, este enfoque incluye la provisión estratégica de servicios de saneamiento en diversos niveles de la sociedad. En esencia, busca establecer estructuras y procesos que garanticen la equidad, la sostenibilidad y la participación de la comunidad en la toma de decisiones relacionadas con el agua, con el fin de optimizar su uso y preservar este recurso vital para las generaciones presentes y futuras (GWP, 2002).

CAPITULO IV: Descripción del medio

4.1 Situación geográfica

La Subcuenca Yeguaré, estratégicamente ubicada en el centro oriente de Honduras y con un área de 523.59 km². Su relevancia trasciende lo meramente geográfico, abarcando una considerable diversidad biológica y ecológica, así como un complejo mosaico de usos del suelo y actividades humanas que inciden directamente en su gestión y conservación.

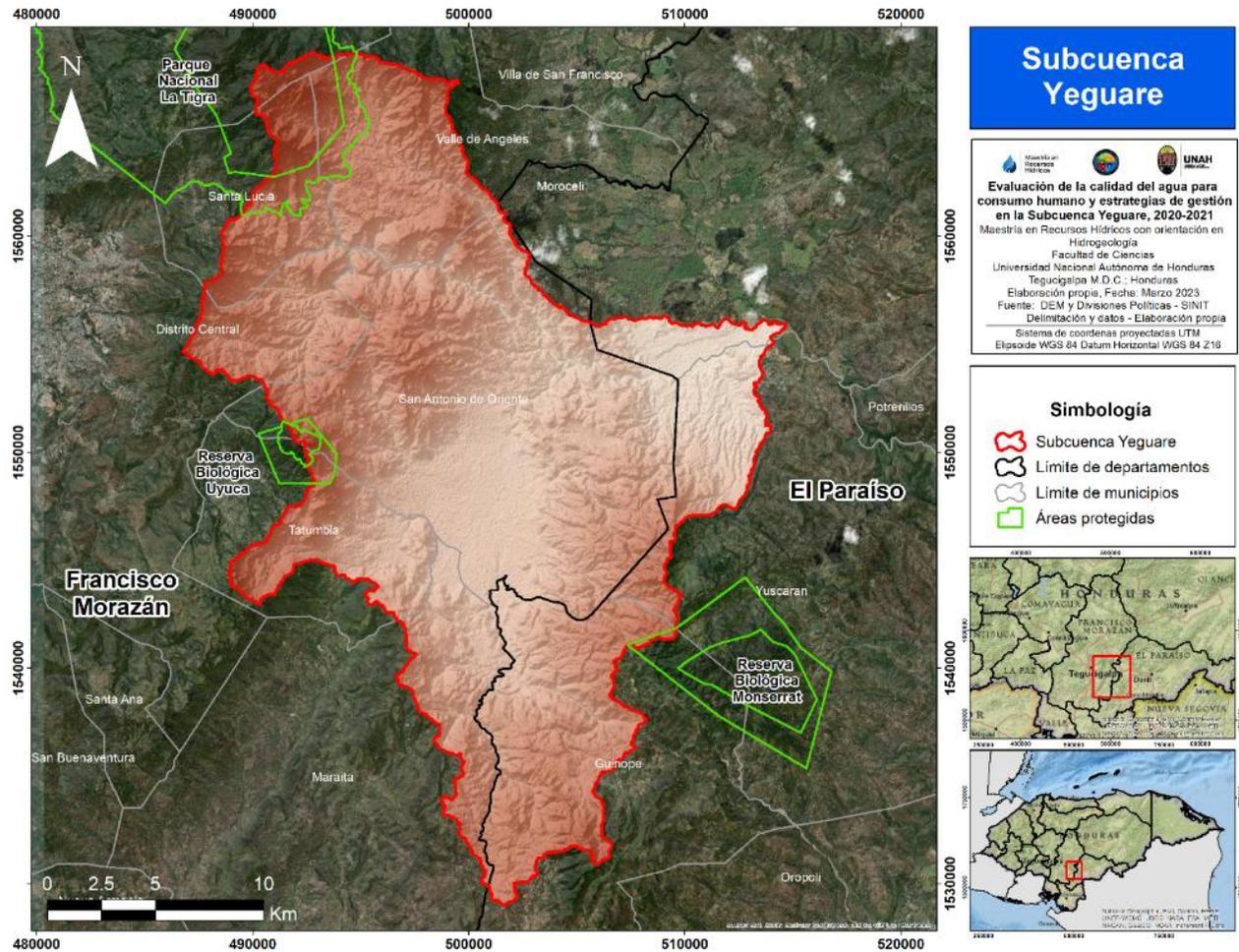
Distribuida políticamente entre dos departamentos y nueve municipios—El Paraíso (Yuscarán, Güinope, Morocelí) y Francisco Morazán (Distrito Central, Maraita, San Antonio de Oriente, Santa Lucía, Tatumbla, Valle de Ángeles)—, esta subcuenca presenta un mosaico de gestión territorial. En el mapa IV-1 se observa que San Antonio de Oriente, ocupa el 39% del área total de la subcuenca, y Morocelí, con un 3%, ejemplifican la variedad de escalas y retos en la administración de recursos hídricos y territoriales.

En su seno, alberga tres áreas protegidas de significativa importancia ecológica:

- **Parque Nacional La Tigra:** Este parque fue el primero en ser declarado Parque Nacional en Honduras en 1980, abarcando aproximadamente 238 km². Se ubica cerca de la capital, Tegucigalpa, y se caracteriza por sus bosques nublados, los cuales son cruciales para la captación de agua, proporcionando una parte significativa del agua potable para la ciudad. La Tigra es hogar de una rica biodiversidad, incluyendo varias especies de flora y fauna en peligro de extinción, destacándose por sus senderos ecológicos que permiten la observación de su diversidad biológica.
- **Reserva Biológica Uyuca (RBU):** Esta reserva biológica, ubicada en el departamento de Francisco Morazán, se extiende por una superficie de alrededor de 23.3 km². Es conocida por su bosque nublado y su variada biodiversidad. La Uyuca juega un papel fundamental en la investigación científica y la educación ambiental, siendo un sitio de estudio para muchas especies de flora y fauna, algunas de las cuales son endémicas de la región. Además, contribuye significativamente a la recarga de acuíferos que abastecen de agua a comunidades locales.
- **Reserva Biológica Monserrat:** Situada en el departamento de El Paraíso en el municipio de Yuscarán, esta reserva destaca por su diversidad de ecosistemas que van desde bosques de pino hasta bosques húmedos montañosos. La reserva es esencial para la protección de fuentes de agua y suelos, así como para la conservación de la biodiversidad, incluyendo varias especies de aves y mamíferos. Además, Yuscarán es un área de interés para el ecoturismo y la educación ambiental, ofreciendo oportunidades para el desarrollo sostenible a través de la conservación.

Estas áreas son bastiones de biodiversidad, hogar de especies endémicas y en peligro de extinción, y representan ecosistemas críticos como bosques nublados y bosques secos que son esenciales para la conservación del patrimonio natural de Honduras.

Mapa IV-1 Ubicación geográfica de la Subcuenca Yeguaré.



Fuente: DEM y Divisiones Políticas – SINIT. Delimitación y datos - IHCIT-UNAH

4.2 Descripción socioeconómica

Según los datos recolectados en el “Plan de Desarrollo y Programa de Inversiones en el Territorio Yeguaré (2018), en el 2016 se estimó una población total de 118,518 habitantes que se encontraban distribuidos en 52 aldeas, localizadas en su mayoría en las laderas de las montañas que forman las subcuencas de los ríos Choluteca, Yeguaré y Maraita. En la tabla IV-1 se presenta la distribución poblacional total de los municipios que se encuentran dentro de la cuenca, de acuerdo con las proyecciones para el 2020 del Instituto Nacional de Estadística (INE) y lo estimado como población meta para el Proyecto Adaptar C, esta distribución representa el total de los habitantes de los municipios, siendo que no toda esta población se encuentra dentro del territorio.

Tabla IV-1 Distribución poblacional en la subcuenca Yeguaré.

NOMBRE	Aldeas	Población meta Proyecto AdaptarC	Población 2020, según proyección INE, 2013
Yuscarán	4	6,000.00	16,181.00
Güinope	7	4,000.00	9,589.00
Morocelí	2	12,923.00	18,683.00
Distrito Central	4	800,000.00	1,276,738.00
Maraita	6	1,500.00	7,124.00
San Antonio de Oriente	13	1,210.00	16,073.00
Santa Lucía	5	12,000.00	5,591.00
Tatumbla	5	3,850.00	8,731.00
Valle de Ángeles	6	10,500.00	20,540.00
Total	52	851,983.00	1,379,250.00

Fuente: (INE,2013), (Peña-Paz & Chirinos-Escobar, 2023).

A. ACTIVIDADES ECONÓMICAS

Las principales actividades socioeconómicas que se desarrollan en los municipios de la subcuenca Yeguaré es la agricultura y la ganadería, excepto en Valle de Ángeles y Santa Lucía, donde las principales actividades son la construcción y el empleo doméstico.

Las principales siembras que se dan en el territorio Yeguaré son los granos básicos (maíz y frijol), a pequeña escala se da la producción de flores, café, papa, caña de azúcar, frutas como ser el plátano, mango, piña, aguacate, fresas, naranja, entre otras; y hortalizas, principalmente cebolla, tomate, repollo y chile dulce, especialmente en las zonas altas. La mayoría de estos productos se destinan al consumo propio y a la venta en los mercados locales, pero también a los mercados de Tegucigalpa y San Pedro Sula (Fortín, 2018).

Las actividades económicas en la Subcuenca Yeguaré plantean desafíos significativos para la gestión sostenible del agua. Estas prácticas no solo impactan la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos, sino que también afectan la integridad de los ecosistemas y la vida de las comunidades locales que dependen de estos recursos para su sustento. La contaminación por actividades agrícolas e industriales, la sobreexplotación de los acuíferos y los efectos adversos del cambio climático subrayan la necesidad urgente de estrategias efectivas de manejo que promuevan el uso sostenible del agua y la conservación de los ecosistemas.

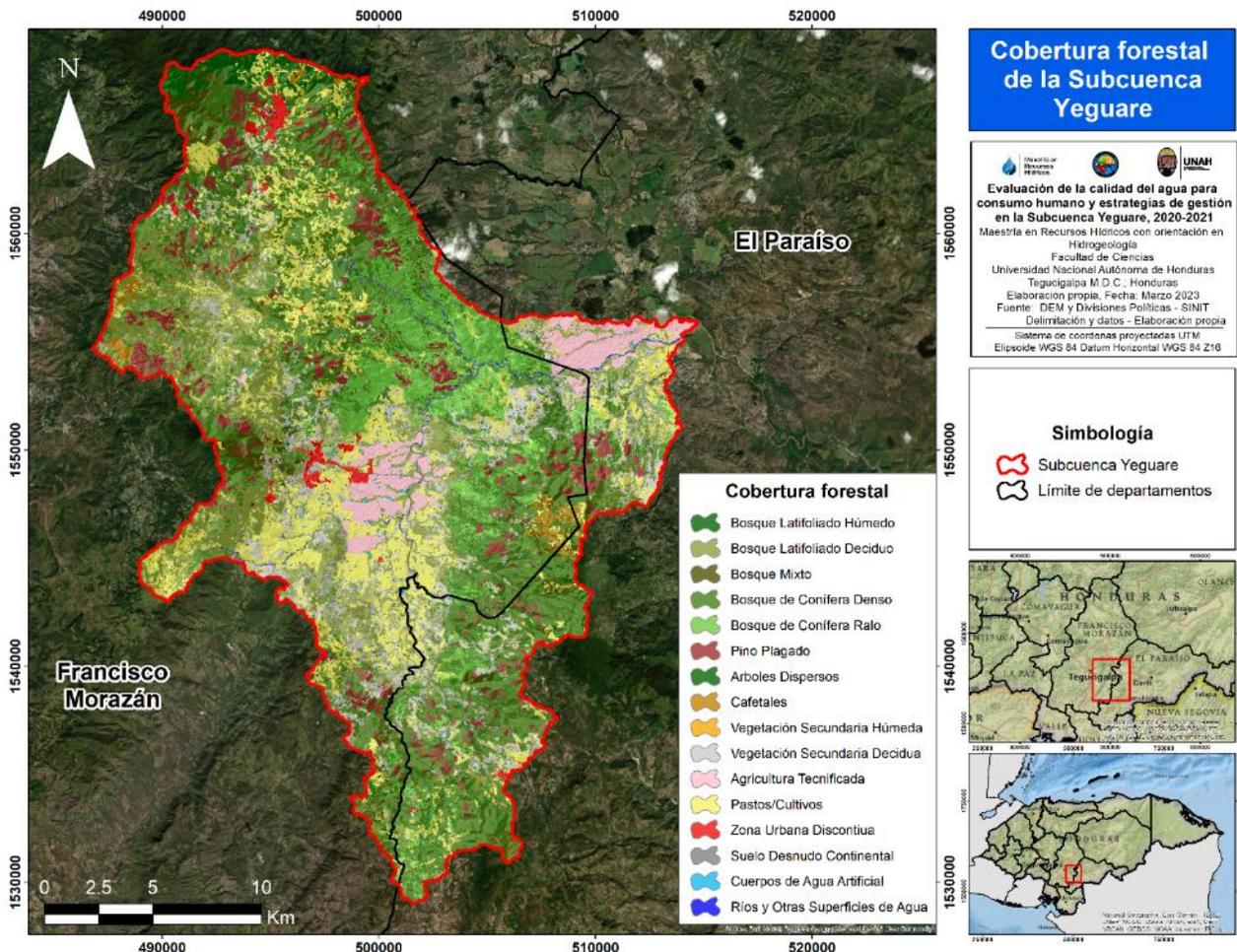
Afortunadamente, existen diversas iniciativas y proyectos encaminados a la conservación de las áreas protegidas y la gestión sostenible de los recursos hídricos. Estas acciones incluyen esfuerzos de reforestación, adopción de prácticas de agricultura sostenible y programas de educación ambiental destinados a fortalecer la resiliencia de las comunidades y ecosistemas frente a las amenazas existentes.

La Subcuenca Yeguaré, con su rica biodiversidad, complejidad ecológica y desafíos en la gestión de recursos, constituye un claro ejemplo de la necesidad de integrar esfuerzos conservacionistas y prácticas sostenibles en la planificación territorial y el manejo de recursos hídricos para asegurar la preservación de este valioso patrimonio natural para las futuras generaciones.

B. USO DEL SUELO

Aunque los suelos presentan una predominancia forestal, es importante destacar la diversidad de ecosistemas presentes en el territorio, que incluyen bosques densos de coníferas, bosques caducifolios de hoja ancha, áreas con bosques de coníferas dispersos y zonas afectadas por la infestación de pinos. Esta variedad refleja la riqueza ambiental y la complejidad de la cobertura vegetal en la región. Aunque la vocación forestal es notable, también es relevante el uso agropecuario en ciertas áreas, lo que subraya la interacción entre la actividad humana y el medio ambiente. El mapa IV-2 proporciona una representación visual de esta distribución de usos del suelo, lo que contribuye a comprender mejor la configuración geográfica y la dinámica de la ocupación del territorio (ICF, 2014).

Mapa IV-2 Cobertura forestal de la Subcuenca Yeguaré.

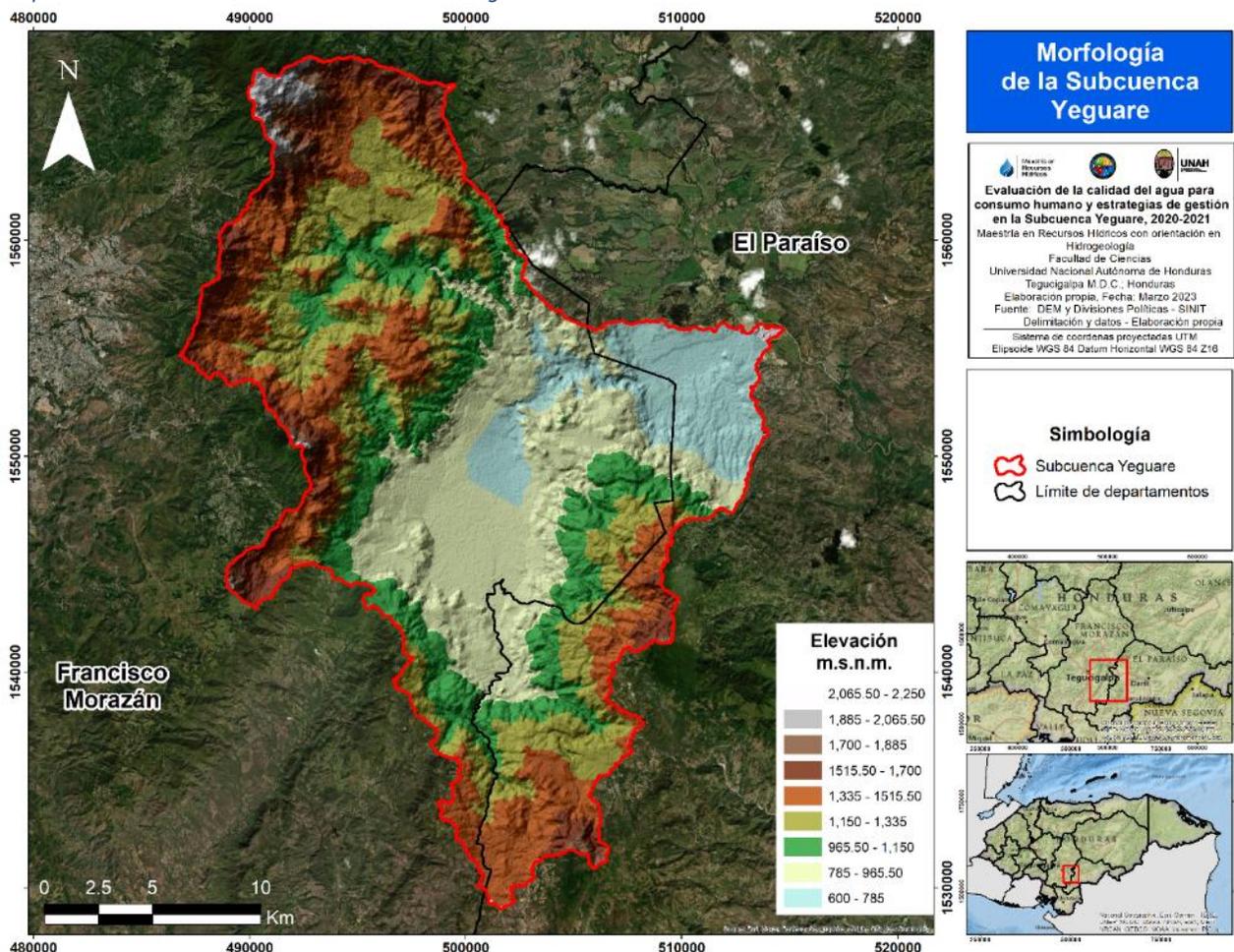


Fuente: (ICF, 2014)

4.3 Morfología

La sección alta de la subcuenca, con altitudes que varían entre 2310 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) y 1200 m.s.n.m, se distingue por su topografía escarpada, lo que propicia una considerable cantidad de escurrimientos, ya sean permanentes, intermitentes o efímeros. En contraste, la región media y baja descende hasta los 560 m.s.n.m, punto en el que se encuentra la confluencia con el Río Choluteca, mostrando un relieve más suave y menos pronunciado (mapa IV-3).

Mapa IV-3 Modelo de elevación de la Subcuenca Yeguaré.

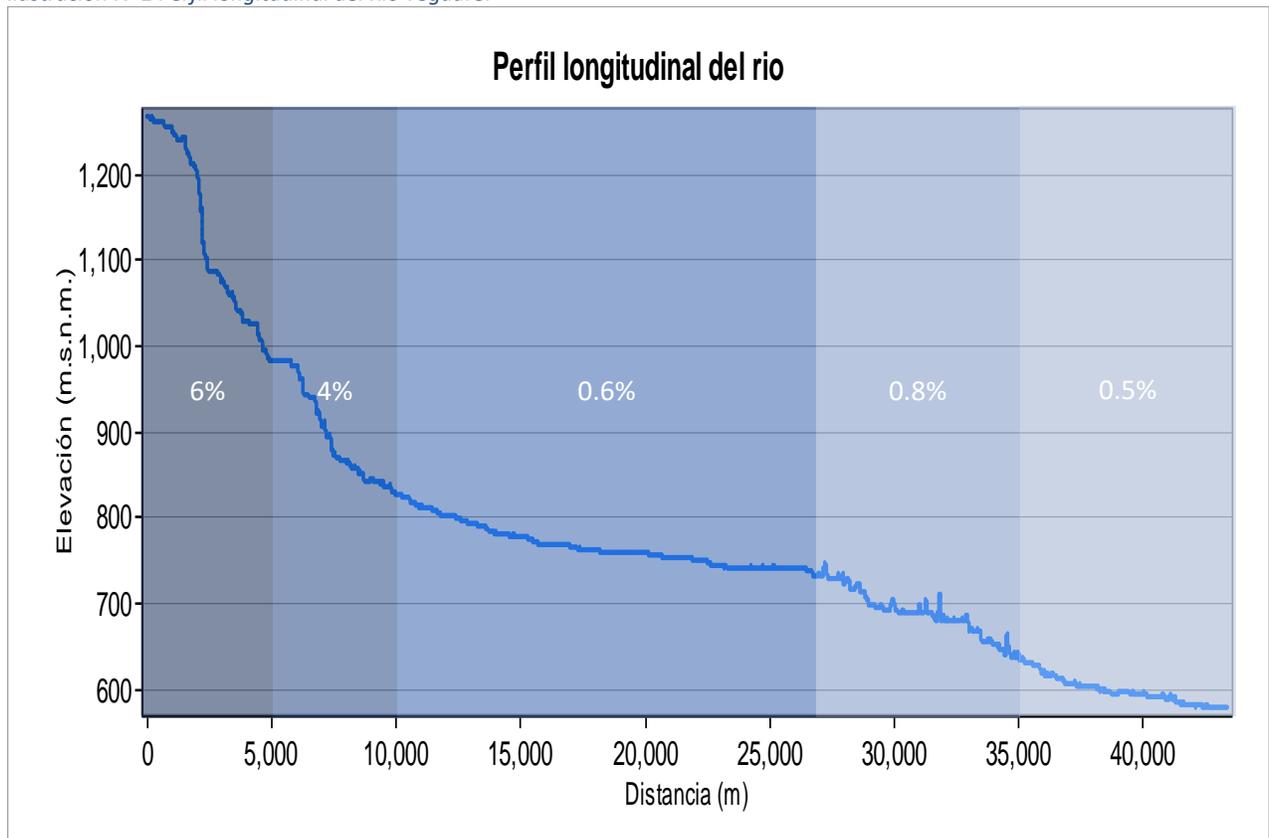


Fuente: DEM y Divisiones Políticas – SINIT. Delimitación y datos - IHCIT-UNAH

El río Yeguaré con una longitud de 43.75 km es un afluente importante en la cuenca del río Choluteca, y su curso proporciona agua para usos agrícolas, industriales y domésticos en la zona. Al analizar su perfil longitudinal (véase ilustración IV-1), se observa un inicio caracterizado por una pendiente abrupta del 6% en los primeros 5 km, sugiriendo un tramo inicial de aguas rápidas y turbulentas. Seguido de un tramo subsiguiente de 5 km, la pendiente se reduce a un 4%, aunque aún significativa, indicando un flujo vigoroso. El río continúa su curso a través del valle de Zamorano, con una extensión de aproximadamente 15 km,

donde la pendiente disminuye considerablemente a un 0.6%. Este tramo se caracteriza por una topografía más plana y un flujo de agua más pausado, siendo además la zona de producción agrícola predominante en la subcuenca. Posteriormente, tras salir del valle, el río experimenta un tramo de 5 kilómetros con una pendiente ligeramente mayor del 0.8%. Aunque superior a la del valle, esta pendiente sigue siendo relativamente suave en comparación con los tramos iniciales del río. Finalmente, el río concluye su curso con un segmento de 5 kilómetros donde la pendiente se reduce a un 0.5%. Esta pendiente mínima sugiere un flujo de agua tranquilo, posiblemente asociado con áreas de sedimentación en las proximidades del río. Este último tramo desemboca en el río Choluteca, uniéndose a este último en su curso.

Ilustración IV-1 Perfil longitudinal del Río Yeguaré.

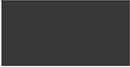


4.4 Geología

La Subcuenca Yeguaré presenta una composición litológica compuesta principalmente por tobas e ignimbritas riolíticas de diversos colores, además de sedimentos tobáceos que se depositan en agua. Esta región se encuentra dividida geológicamente en doce unidades litoestratigráficas informales, en la tabla IV-2 se presenta el período de tiempo geológico e información relevante de cada unidad litológica. Aunque no se disponga de datos de radio métricos para establecer conexiones precisas entre estas formaciones, se

definen agrupaciones generales basadas en similitudes petrográficas entre las formaciones y miembros que ya han sido propuestas de forma predeterminada.

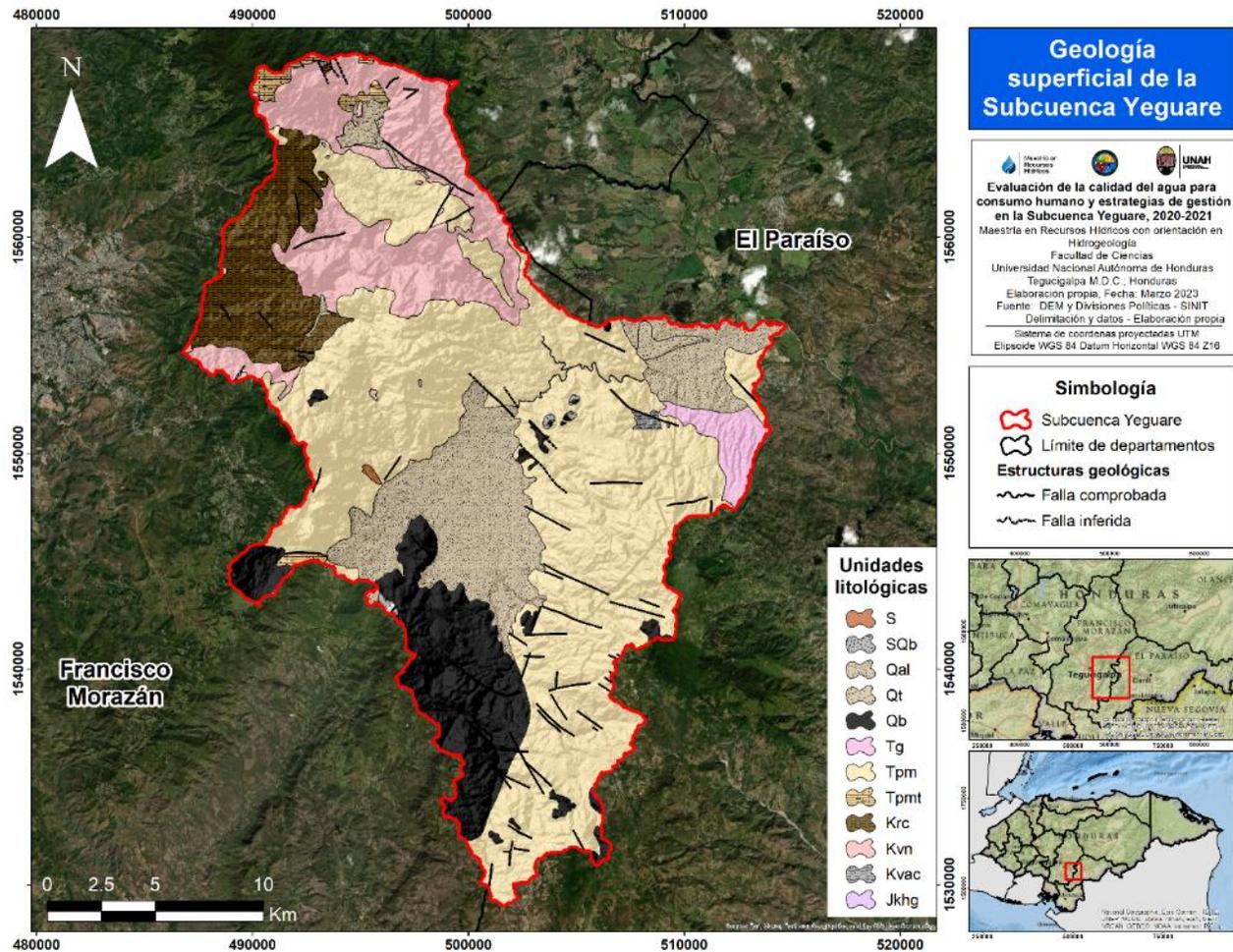
Tabla IV-2 Columna estratigráfica de la subcuenca Yeguaré.

Era	Periodo	Época	Nombre	Símbolo	Color en mapa	Descripción		
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Deslizamientos	S		Deslizamiento o derrumbe		
			Deslizamientos	SQb		Deslizamiento de tierra, escombros de Qb		
			Depósitos aluviales	Qal		Depósitos recientes de aluvión, Aluvión y planicies de inundación		
			Terrazas aluviales	Qt		Terrazas de grava, aluvión más antiguo y abanico aluvial		
	Terciario	Plioceno	Formación Gracias	Tg		Sedimentos lacustre-volcánicos: Tipo Formación Gracias con guijarros de cuarzo subordinados.		
			Grupo Padre Miguel					
			Mioceno medio - Plioceno	Tobas e ignimbritas	Tpm		Tobas e ignimbritas riolíticas de color blanco, rojo, púrpura y sedimentos tobaceos depositados en agua	
			Mioceno medio - Plioceno	Capas Tenampúa	Tpmt		Capas piroclásticas retrabajadas y eólicas con algunos "sillars" interestratificados	
			Oligoceno - Mioceno	Basaltos terciarios	Qb		Coladas de andesita y basalto	
	Mesozoico	Cretácico superior	Valle de Ángeles					
Mastrichtiano			Formación Río Chiquito	Krc		Lutitas, limolitas, areniscas rosadas y algunas capas de conglomerado de cuarzo		
Cretácico		Campaniano	Formación Villanueva	Kvn		Estratos siliciclasticos de grano grueso conglomerados de cuarzo y clastos de rocas (metamórficas, volcánicas y calizas) areniscas de color rojo claro hasta café claro y alginas tobas volcánicas		
			Grupo Yojoa					
			Aptiano	Formación Atima	Kvac		Calizas, limolitas, areniscas y lutitas calcáreas.	
Triásico Jurásico		Grupo Honduras						
	Jurásico Superior	Grupo Honduras	Jkhg		Lutitas y areniscas oscuras bien alteradas con algunas rocas volcánicas			

Fuente: (Ruíz et al., 2023)

El mapa IV-4 muestra la diversidad de estratos geológicos presentes en la subcuenca. Es significativo señalar que el 50% del área está bajo la influencia de las Tobas e ignimbritas del Grupo Padre Miguel el cual está constituido por rocas volcánicas ácidas con escasa presencia de andesita y basalto, se caracteriza por estar formada por sedimentos volcánicos de ignimbritas en su parte superior (Ruíz et al., 2023).

Mapa IV-4 Geología de la Subcuenca Yeguaré.



Fuente: DEM y Divisiones Políticas – SINIT. Delimitación y datos - IHCIT-UNAH

En entrevista con el geólogo Maynor Ruiz del IHCIT, el menciona la presencia de riolitas, bauxita y suelos lateríticos en las cercanías de la Reserva biológica Uyuca (ilustración IV-2):

- Los suelos lateríticos se forman de suelos ácidos y que están en un ambiente muy húmedo y de mucha precipitación lo que provoca que se formen de manera precipitada y tengan una estructura mineralógica o microestructura uniforme e isotrópica, lo que les otorga una notable resistencia a la erosión. Además, presentan una notable porosidad y permeabilidad, junto con una baja capacidad de expansión y plasticidad (Tibasosa Moreno, 2018; Ruiz, 2023). Las altas temperaturas promueven una rápida mineralización de la materia orgánica, impulsada por la intensa actividad microbiana.

Este proceso acelera la descomposición y evita la acumulación de materia orgánica en el suelo. Durante períodos de sequía o humedad, la alteración de los silicatos se produce principalmente por hidrólisis total, generando sílice e hidróxidos de aluminio, magnesio y hierro (Moreno Ramón & Ibáñez Asensio, 2019).

- La bauxita es una roca mayormente compuesta por minerales de óxido de aluminio hidratados, lo que le otorga una composición no definida. Aunque algunas bauxitas se asemejan a la gibbsita [Hidróxido de Aluminio III ($\text{Al}(\text{OH})_3$)], la mayoría son mezclas que suelen contener hierro. Sus constituyentes principales incluyen la bohemita, gibbsita y diáspora. Este tipo de roca se forma en ambientes supergénicos, típicamente en regiones tropicales o subtropicales, a través de un proceso prolongado de meteorización de rocas alumínicas. La bauxita puede derivarse también de la meteorización de calizas que contienen arcillas. Se encuentra tanto como un derivado directo de la roca original, depositado posteriormente en formaciones sedimentarias, como en depósitos tropicales conocidos como lateritas, que se forman en suelos residuales (Hurlbut, 1960).

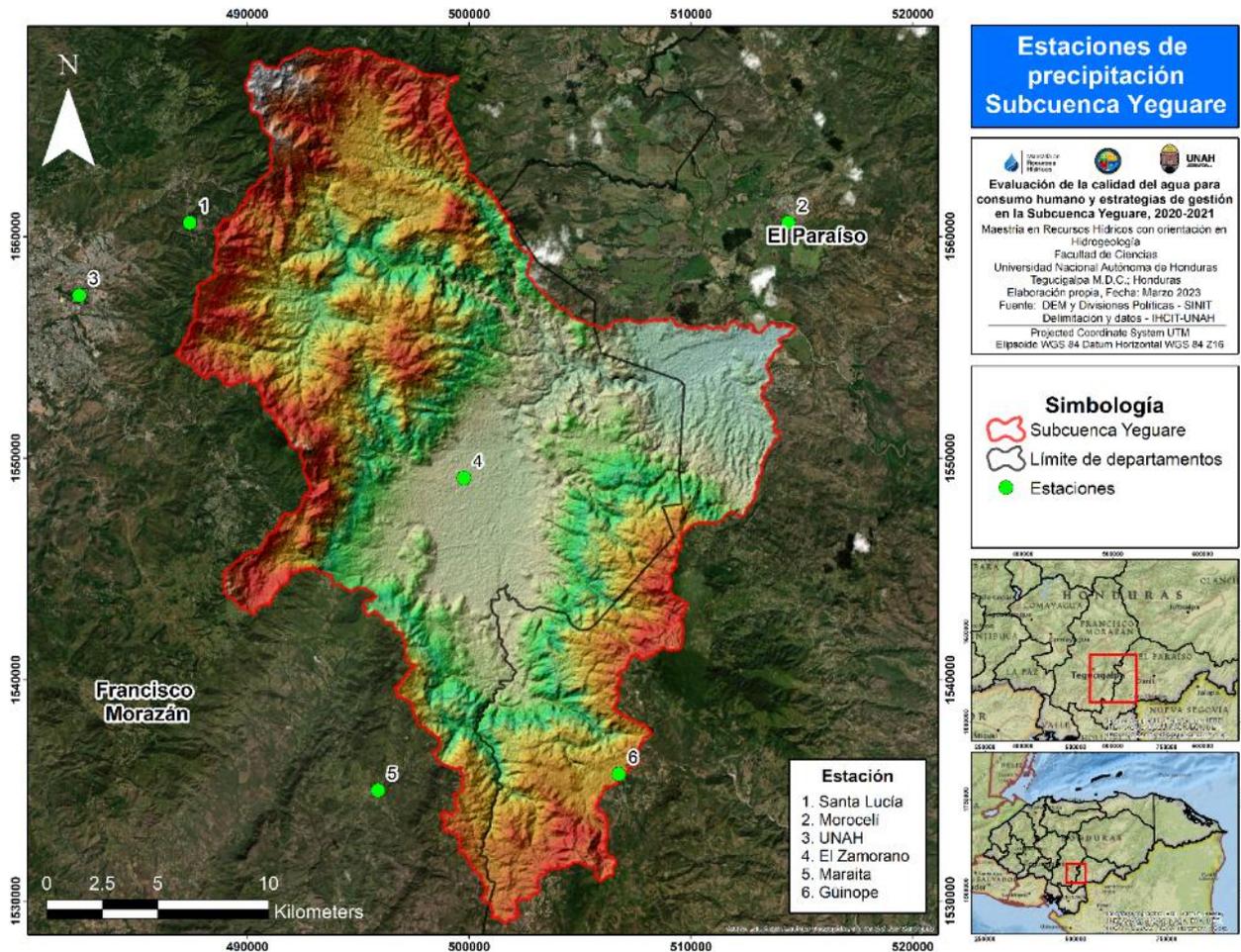
Ilustración IV-2 Suelos laterítico de la subcuenca Yeguaré.



4.5 Climatología

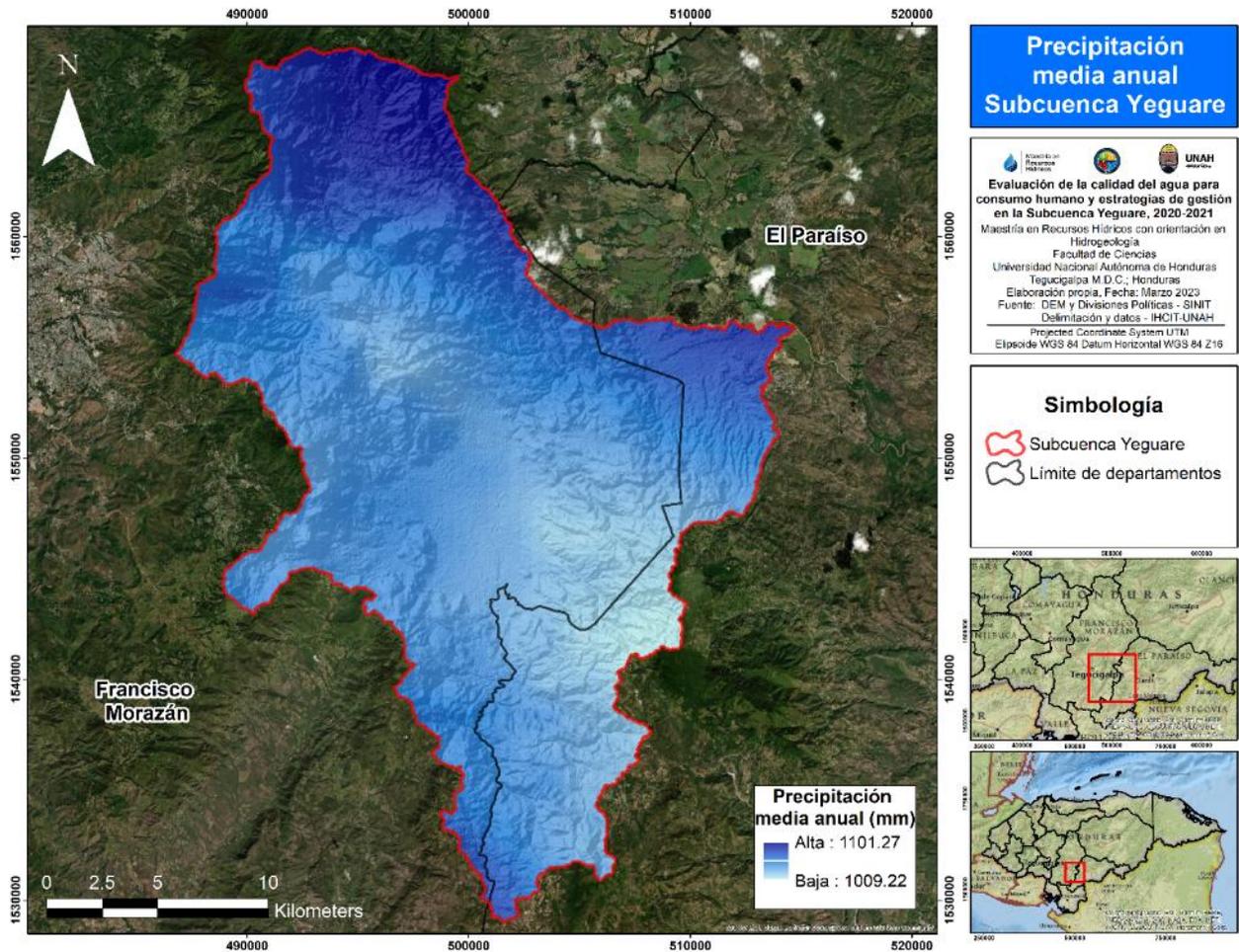
La información climática para la Subcuenca Yeguaré es de acceso limitado, por lo que se ha utilizado el Atlas Climático y de Gestión de Riesgo, desarrollado por el IHCIT-UNAH en el año 2012 con la colaboración de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), para elaborar mapas climáticos precisos, mientras que para la descripción de la precipitación se utilizó los datos meteorológicos observados en las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), SERNA y UNAH estas estaciones han sido seleccionadas por su proximidad a la zona de estudio, a continuación, en el mapa IV-5 se presenta la ubicación y nombre de cada estación meteorológica utilizada.

Mapa IV-5 Estaciones de precipitación en la Subcuenca Yeguaré.



La Subcuenca Yeguaré experimenta una notable variación climática, desde sus valles hasta las cumbres, lo que influye significativamente en los patrones de precipitación y temperatura a lo largo del año. En cuanto a la temperatura en la subcuenca se observa como la temperatura disminuye con la altura, en concordancia con el gradiente térmico ($0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ de altura) (Wilcke et al., 2008). Mientras que en las zonas bajas se disfruta de una temperatura media anual de aproximadamente 23.53°C , propiciando un ambiente cálido y propicio para la diversidad de actividades agrícolas, las regiones elevadas presentan un clima más fresco, con una media anual de 21.43°C , lo que favorece ecosistemas y prácticas agrícolas distintas a las de las áreas de menor elevación (mapa IV-6).

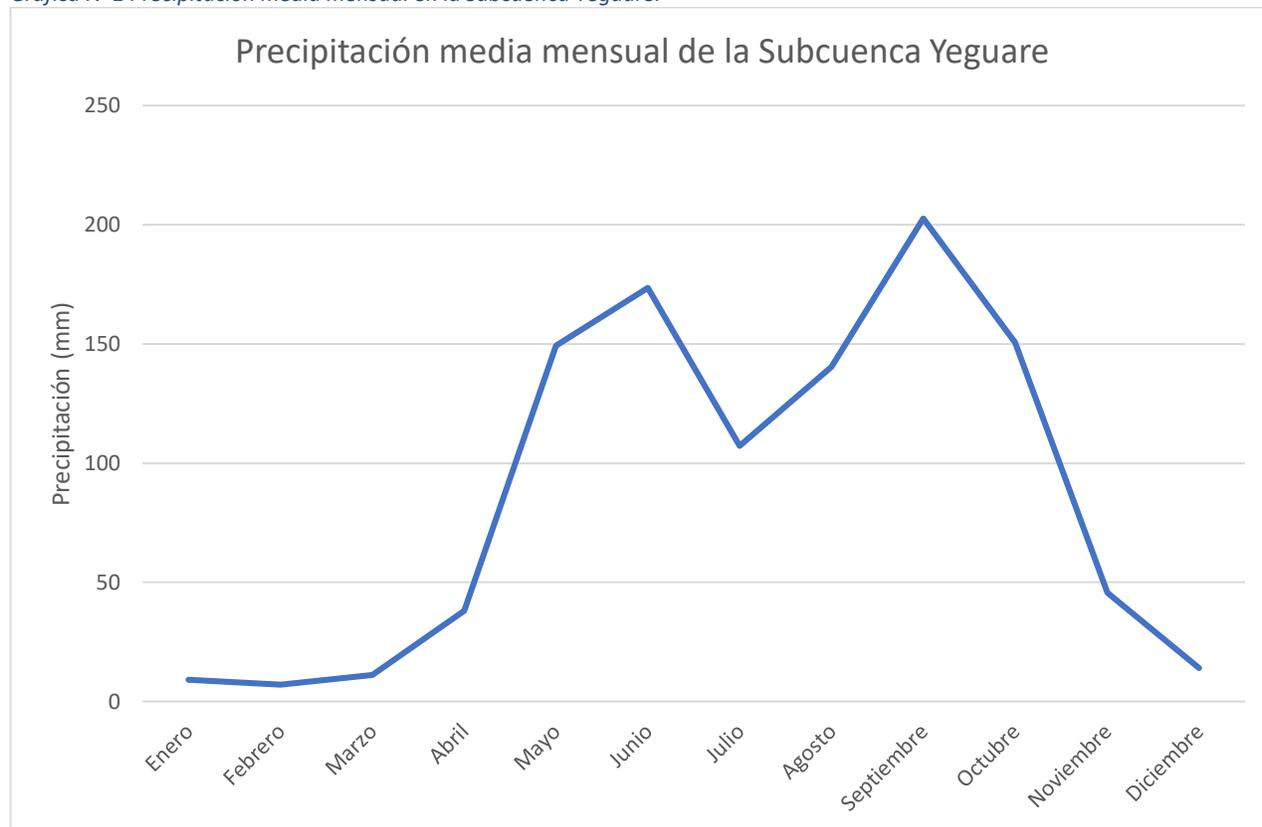
Mapa IV-7 Precipitación media anual de la Subcuenca Yeguaré.



Fuente: DEM y Divisiones Políticas – SINIT. Delimitación y datos - IHCIT-UNAH

La gráfica IV-1 muestra el régimen pluvial de la subcuenca Yeguaré, indicando un patrón bimodal con dos picos de lluvia. Los valores máximos se registran en junio y septiembre, siendo septiembre el mes con mayor precipitación. Este período de abundantes lluvias discrepa con los meses de noviembre a abril, cuando la precipitación desciende considerablemente, siendo febrero el mes más seco. Además, la subcuenca experimenta una disminución intermedia en las lluvias, conocida como temporada de canícula, que ocurre entre julio y agosto, lo que puede afectar la disponibilidad de agua.

Gráfica IV-1 Precipitación media mensual en la Subcuenca Yeguaré.



En entrevista con el Msc. Edgar Mejía, meteorólogo del IHCIT, menciona que la Subcuenca Yeguaré por su ubicación geográfica presenta características tropicales, y se ve afectada por fenómenos meteorológicos subtropicales y extra tropicales como ser: las ondas tropicales, las vaguadas en altura, sistemas prefrontales y el desplazamiento norte-sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) que generan precipitaciones considerables, así como el paso de ciclones tropicales que cruzan el Mar Caribe (Mejía, 2023).

Esta variabilidad climática no solo define el paisaje natural y las actividades humanas en la Subcuenca Yeguaré, sino que también plantea retos específicos para la gestión de recursos hídricos, la conservación de la biodiversidad, y el desarrollo sustentable en la región. La comprensión detallada de estos patrones climáticos es crucial para diseñar estrategias efectivas que se adapten a las condiciones locales y promuevan un equilibrio entre el uso y conservación de los recursos naturales disponibles.

4.6 Hidrología

La subcuenca Yeguaré se extiende sobre un área de 523.59 km² que representa un 7 % de la cuenca del Río Choluteca, la más grande de la región 13 y consta de 34 microcuencas. Con un perímetro de 149.68 km (Medina & Padilla, 2022), la subcuenca Yeguaré alberga un cauce principal con una longitud de 43.75 km y una pendiente promedio de 1.69%. La elevación máxima del cauce del río es de 1300 m.s.n.m en su punto

4.7 Hidrogeología

El estudio de la geología para el Corredor Boscoso Central (CBC) realiza una propuesta para la clasificación de acuíferos en esta región, basada en datos geológicos, litológicos y en las características estructurales del terreno. La tabla IV-3 muestra los diferentes tipos de acuíferos según la litología para la Subcuenca Yeguaré. Sin embargo, se debe destacar que la subcuenca tiene una significativa falta de información de libre acceso acerca de las propiedades hidráulicas de estos acuíferos.

Este déficit de información plantea un desafío para el manejo sostenible del recurso hídrico en la zona y resalta la necesidad de generar más conocimiento sobre la hidrogeología del área. Es esencial contar con datos más precisos sobre la porosidad, permeabilidad, tasas de recarga y otras propiedades hidráulicas para comprender mejor el comportamiento de los acuíferos y así implementar una GIRH efectiva.

Tabla IV-3 Tipos de acuíferos según la litología en la subcuenca Yeguaré.

Era	Periodo	Época	Nombre	Símbolo	Color en mapa	Tipo de acuífero
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Deslizamientos	S		Acuífero detrítico (poroso)
			Deslizamientos, escombros de Qb	SQb		
			Depósitos aluviales	Qal		
			Terrazas aluviales	Qt		
	Terciario	Plioceno	Formación Gracias	Tg		Acuífero poroso en material piroclástico
		Grupo Padre Miguel				
Mioceno medio - Plioceno		Tobas e ignimbritas	Tpm			
Mesozoico	Cretácico superior	Mastrichtiano	Basaltos terciarios	Qb		Acuífero fracturado
			Valle de Ángeles			
	Cretácico	Campaniano	Estratos de grano grueso, areniscas y tobas volcánicas	Krc		Acuífero multicapa
		Grupo Yojoa				
		Triásico Jurásico	Jurásico Superior	Lutitas y areniscas alteradas con algunas rocas volcánicas	Jkhg	
Grupo Honduras						

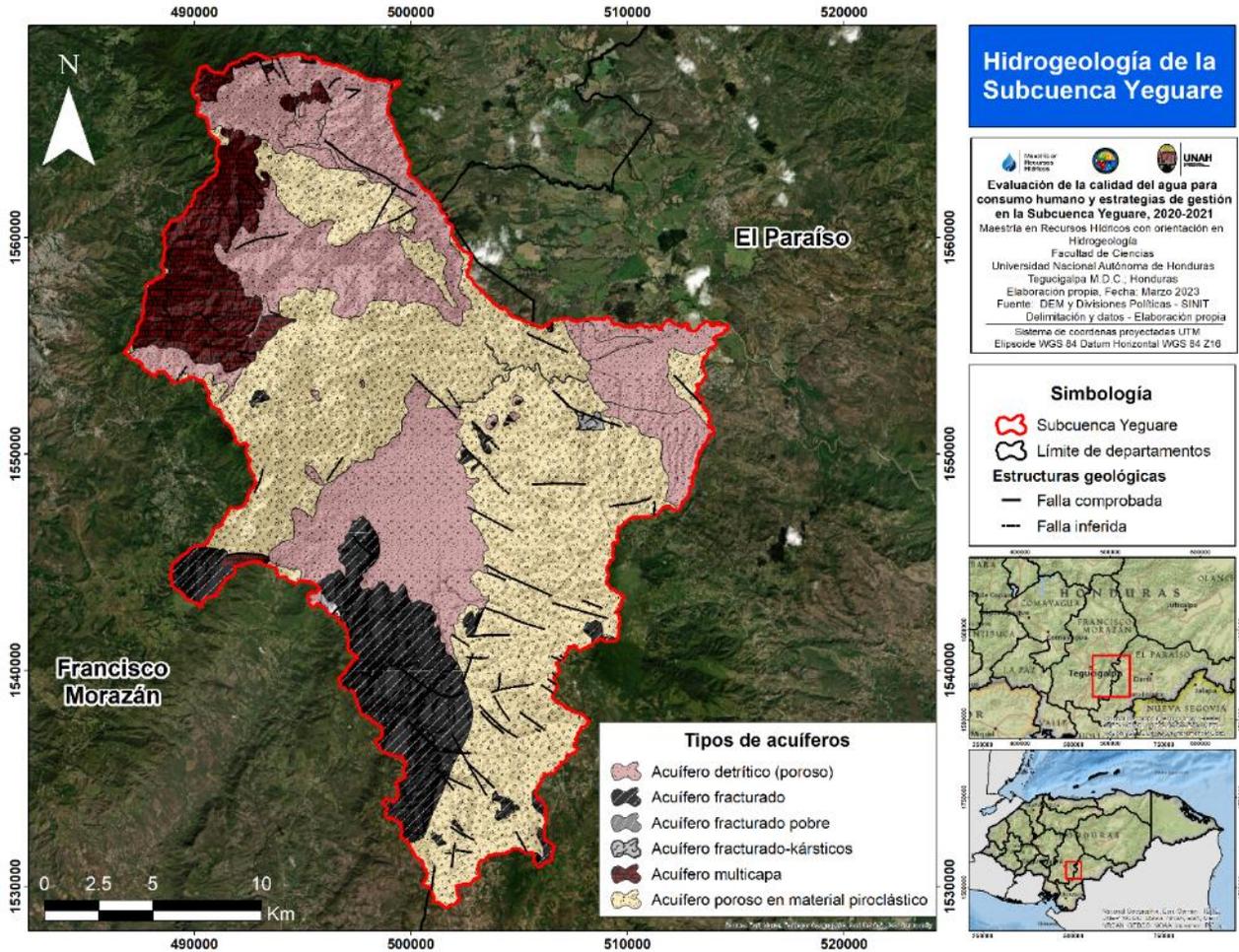
Fuente: (Ruíz et al., 2023)

La diversidad geológica de la Subcuenca Yeguaré muestra a su vez una diversidad de acuíferos, de manera general se identifican acuíferos de tipo poroso y fracturado. Las tobas e ignimbritas del Grupo Padre Miguel sugiere un acuífero poroso en material piroclástico, que constituyen un 49% de la totalidad del terreno como se muestra en el mapa IV-9.

De la geología se sabe que la zona circundante a la RBU presenta suelos lateríticos, conocidos por sus características geológicas distintivas. Las propiedades acuíferas de estos suelos son complejas y se ven influenciadas por la estructura de los materiales y las condiciones de meteorización. Una característica significativa de estos suelos es la alta permeabilidad en ciertas áreas, que puede ocasionar riesgos importantes de inestabilidad y deslizamientos, especialmente durante períodos de lluvias intensas (Guardado Lacaba, 2006).

Este riesgo se debe a la capacidad de los suelos lateríticos para permitir el flujo rápido de agua a lo largo de juntas y fracturas, lo que puede provocar cargas hidrostáticas e hidrodinámicas significativas. Estos factores contribuyen a la posibilidad de deslizamientos y fallas geológicas, lo que hace que una evaluación a gran escala sea esencial para gestionar estos riesgos de manera efectiva y garantizar la seguridad de las áreas circundantes (Brand, 1985).

Mapa IV-9 Hidrogeología de la Subcuenca Yeguaré.

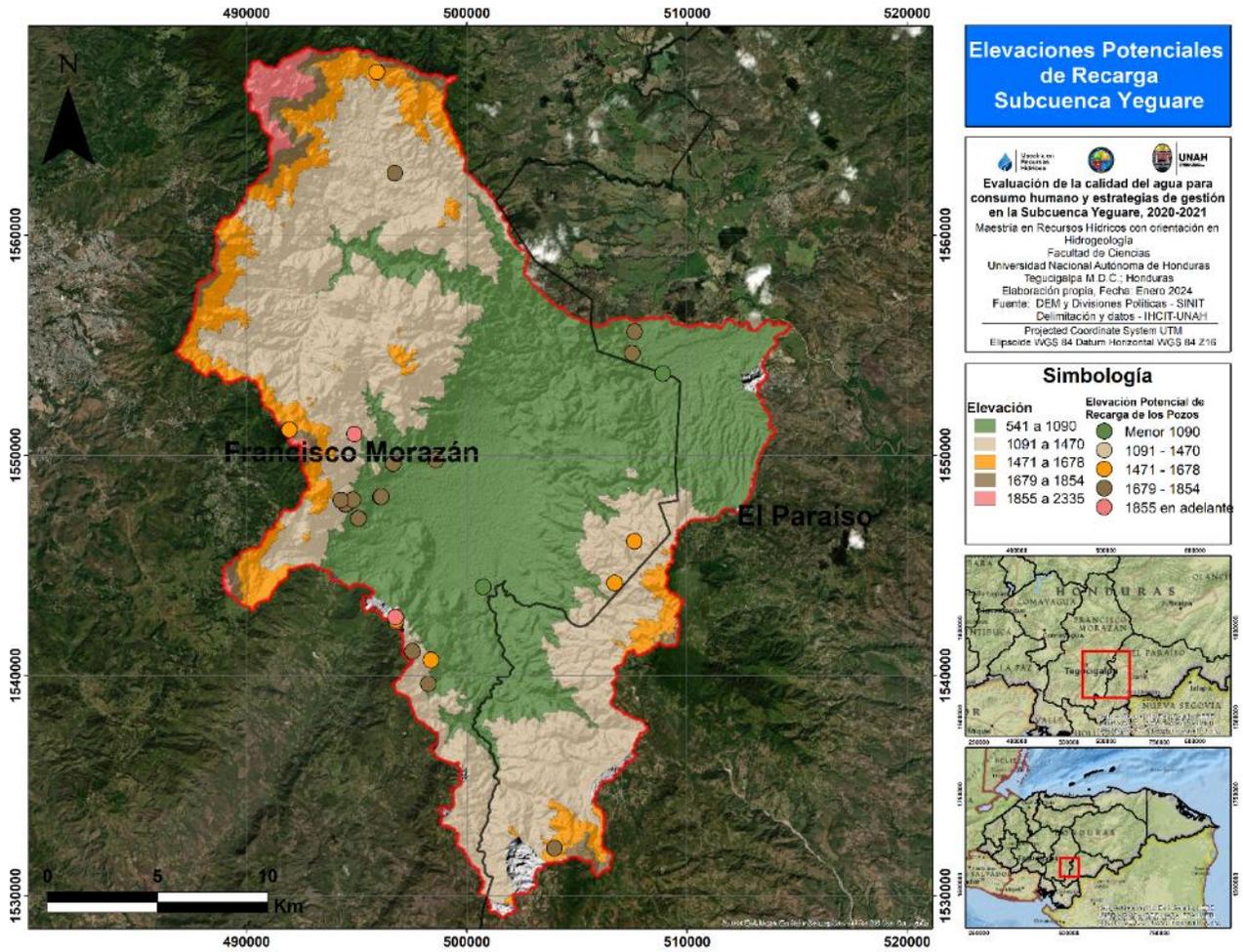


Fuente: DEM y Divisiones Políticas – SINIT. Delimitación y datos - IHCIT-UNAH

El mapa IV-10 ofrece una representación combinada de la clasificación de intervalos de elevación del terreno natural y las elevaciones de potencial de recarga. En este mapa se observa como la superior experimenta un fenómeno de recarga que se origina principalmente en el Parque Nacional La Tigra, mientras que la parte oeste y sudoeste experimenta un fenómeno de recarga que proviene de la RBU. Sin embargo, en las zonas este y sur hay poca información sobre los puntos de muestreo para la recarga de pozos, aunque la dinámica de recarga evaluada sugiere cierta diversificación (García, 2023).

De forma general, el mapa sugiere que existe una baja influencia de fuentes locales en los puntos analizados mediante técnicas isotópicas, indicando posibles aportes desde zonas externas al área de estudio. Esto puede tener implicaciones para la gestión de los recursos hídricos y la comprensión de los patrones de recarga en la región, especialmente en áreas con datos limitados.

Mapa IV-10 Elevaciones potenciales de recarga de la Subcuenca Yeguaré.



Fuente: DEM y Divisiones Políticas – SINIT. Datos – García-Santos et al., 2022

CAPITULO V: Metodología

5.1 Tipo de investigación

La investigación adopta un enfoque descriptivo exhaustivo para examinar y documentar minuciosamente las condiciones que afectan la calidad del agua potable en la subcuenca Yeguaré. Este enfoque permite una exploración detallada de múltiples variables y factores que influyen en la calidad del agua, abordando así la complejidad del sistema hídrico en esta área específica.

5.2 Diseño de la investigación

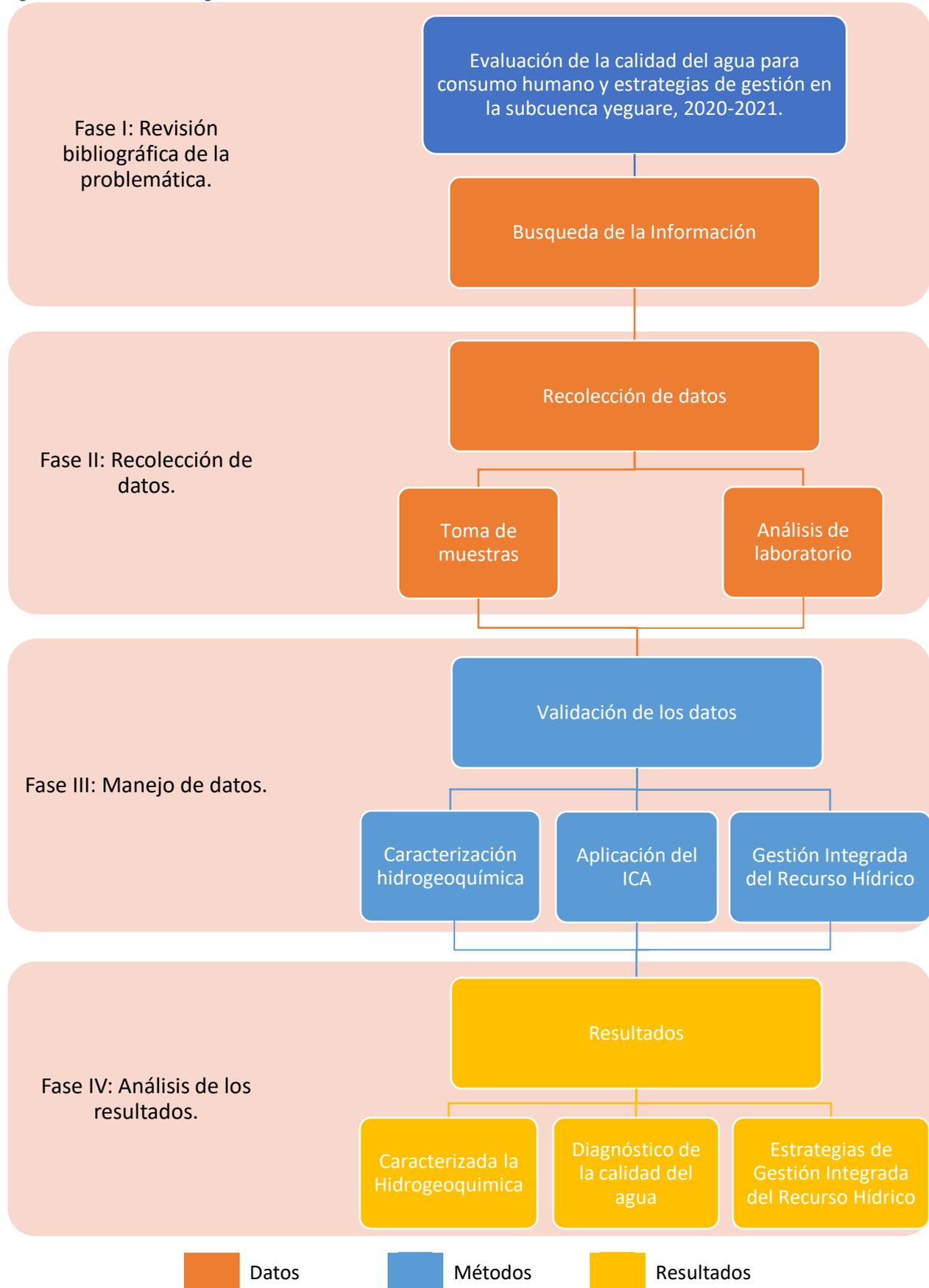
Se propuso un diseño observacional no experimental para abordar la complejidad de la problemática en estudio. Este diseño combinó elementos cuantitativos y cualitativos, lo que permitió obtener una comprensión más profunda y holística del tema. Las cinco fases principales del diseño metodológico fueron cuidadosamente estructuradas para garantizar una investigación rigurosa y completa.

El diseño de la investigación se realizó en 4 fases principales:

- Fase I: Revisión bibliográfica de la problemática.
- Fase II: Recolección de datos.
- Fase III: Manejo de datos.
- Fase IV: Análisis de los resultados.

La figura V-1 proporciona una visualización detallada de los pasos llevados a cabo en cada fase, brindando una guía clara del proceso metodológico empleado en el estudio.

Figura V-1 Diseño de investigación



A. FASE I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LA PROBLEMÁTICA

La fase I se basó principalmente en la recolección de la información correspondiente a la problemática, como ser los antecedentes de la zona de estudio los cuales en su mayoría fueron encontrados en la biblioteca digital de la “Universidad Zamorano”, debido a las diversas investigaciones que se han realizado en la zona esto a raíz de que sus instalaciones se encuentran en los límites de la subcuenca.

De igual manera se realizó la recolección de información basada en la descripción del medio, dicha información fue rescatada en su mayoría de los diversos estudios realizados por el IHCIT en conjunto con SERNA y financiado por PFA a través del proyecto “Adaptar C+”, en específico el diagnóstico de la ecología del agua del CBC y frecuencia de contaminantes biológicos, microbiológicos e hidrogeoquímica, la cual contiene la información relevante del estudio como ser: la demanda hídrica con el respectivo censo de las fuentes de abastecimiento hídrico, las zonas de recarga de las fuentes, la geología, hidrología, hidrogeología e hidroquímica de la zona. Así como la información correspondiente para el análisis climatológico.

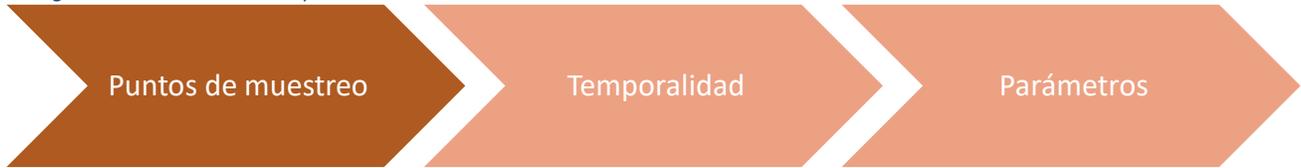
Para la descripción del uso de suelo se utilizó el ráster generado a través del mapa de cobertura forestal y uso de la tierra de 2018 elaborado y publicado por ICF a través de la Unidad de Monitoreo Forestal, el Programa ONU-REDD de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; y el proyecto REDD de SERNA, el cual se desarrolló realizando interpretación visual de imágenes de satélite del sensor Sentinel 2, lanzado por el Programa Copernicus de la Comisión Europea y equipado con sensores multi espectral con resolución de 10 a 60 m (ICF, 2019).

Información complementaria para la descripción social se hizo uso de la información encontrada en el plan de desarrollo y programa de inversiones: Territorio Yeguaré desarrollado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura en el 2018, así como la publicada por el censo nacional de población y vivienda del INE en el 2013, y sus respectivas proyecciones. Mientras que el análisis de la situación geográfica se complementó con los diversos estudios de la Universidad Zamorano, del Sistema Nacional de Información Territorial (SINIT) y de Aguas de Honduras.

B. FASE II: RECOLECCIÓN DE DATOS

Para realizar una caracterización hidrogeoquímica, y un estudio de calidad de agua se debe contar con una base de datos amplia y confiable, por lo que los puntos de muestreo y la frecuencia con la que se realice la toma de muestra deben ser representativos de la zona de estudio y siguiendo protocolos de buenas prácticas para asegurar que el dato sea confiable. Para asegurar la representatividad de los datos y facilitar el desarrollo de la investigación, se han tomado en cuenta consideraciones fundamentales para la recolección de datos, las cuales se detallan en la figura V-2.

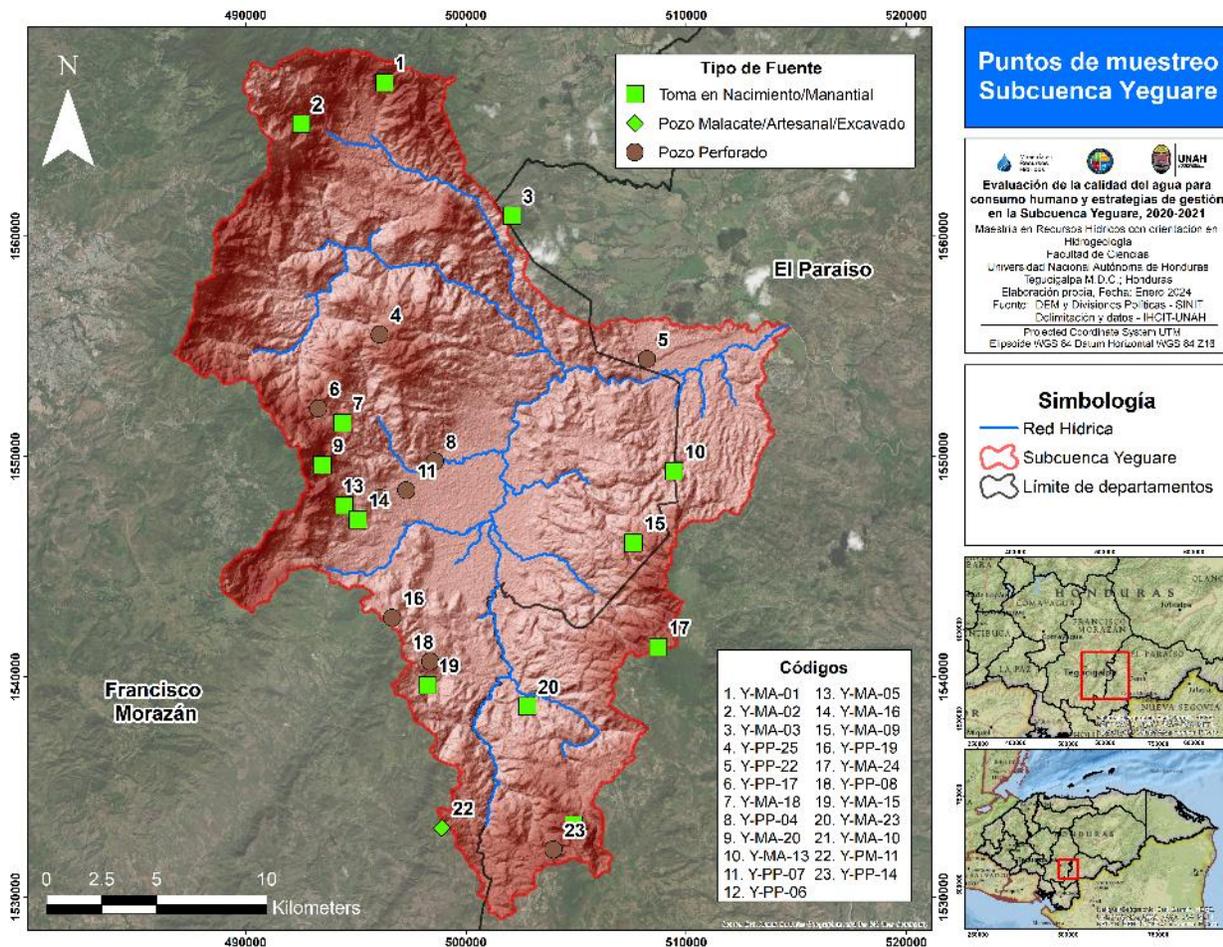
Figura V-2 Consideraciones para la recolección de datos.



Selección de puntos de muestreo.

La selección de los puntos de muestreo para la toma de muestras partió del censo de fuentes de agua subterránea desarrollado por la UCCRH del IHCIT (Peña-Paz & Chirinos-Escobar, 2023), de donde fueron seleccionados de acuerdo con su ubicación espacial, la accesibilidad y la limitación de recursos con los que se contaba, buscando que los puntos representen de mejor forma la calidad e hidroquímica de la zona de estudio. Se realizó la selección de 13 tomas en nacimientos/manantiales, 9 pozos perforados, 1 pozo malacate/artesanal/excavado. Dichas fuentes se representan espacialmente en el mapa V-1.

Mapa V-1 Puntos de muestreo de la subcuenca Yeguaré.



Fuente: DEM y Divisiones Políticas – SINIT. Delimitación y datos - IHCIT-UNAH

Selección de temporalidad

Los muestreos se llevaron a cabo durante la época seca (marzo-mayo), la temporada de canícula (julio-agosto) y la época lluviosa (octubre-noviembre) durante los 2 años en que se realizó el estudio 2020 y 2021. Sin embargo, se enfrentaron desafíos significativos durante el muestreo del año 2020 debido a las restricciones de movilidad impuestas por la pandemia del SARS-CoV-2. Estas dificultades se reflejaron en la tabla V-1, donde se describe detalladamente la ejecución de los muestreos, destacando la disminución en el número de muestras y el retraso en el muestreo durante la época seca de 2020.

Tabla V-1 Descripción temporal del muestreo en la Subcuenca Yeguaré.

No.	Punto de muestreo (Código)	2020			2021		
		Mayo	Agosto	Octubre	Marzo	Julio	Octubre
1	Y-MA-01			X	X	X	X
2	Y-MA-02			X	X	X	
3	Y-MA-03			X	X	X	
4	Y-PP-25					X	X
5	Y-PP-22	X		X	X	X	
6	Y-PP-17			X	X	X	
7	Y-MA-18			X	X	X	
8	Y-PP-04	X	X	X	X	X	X
9	Y-MA-20			X		X	
10	Y-MA-13			X	X	X	
11	Y-PP-07		X	X	X	X	
12	Y-PP-06		X	X			
13	Y-MA-05	X	X	X	X	X	X
14	Y-MA-16			X	X	X	X
15	Y-MA-09			X	X	X	
16	Y-PP-19					X	X
17	Y-MA-24			X	X	X	
18	Y-PP-08			X	X	X	
19	Y-MA-15			X	X	X	
20	Y-MA-23			X	X	X	X
21	Y-MA-10			X	X	X	X
22	Y-PM-11			X	X	X	
23	Y-PP-14			X	X	X	X
Total		3	4	21	19	22	9

Fuente: Elaboración propia

Selección de parámetros

Los parámetros fueron seleccionados con el fin de poder determinar la calidad de agua a partir de parámetros relevantes para la salud humana, de igual manera poder definir las condiciones naturales del

medio que podría tener relación directa con la calidad del agua para consumo humano. El detalle de los parámetros seleccionados se observa en la figura V-3.

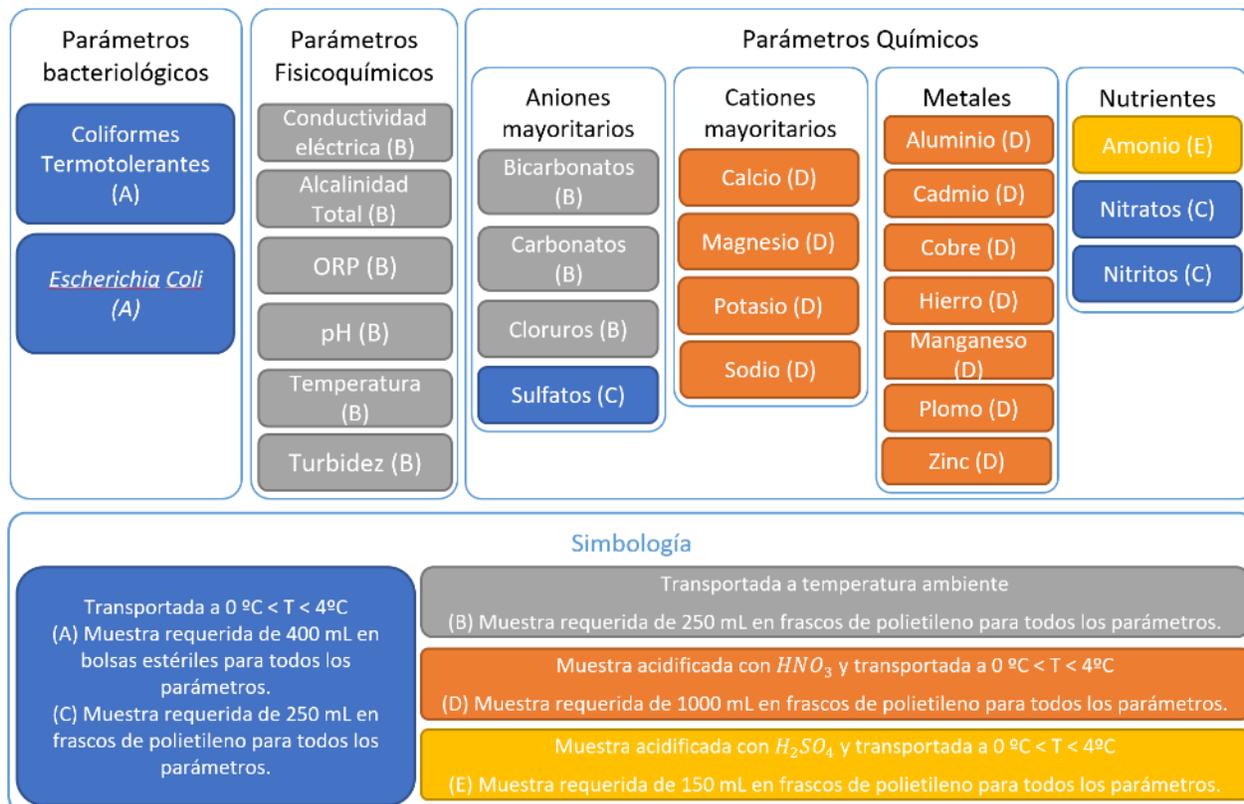
Figura V-3 Definición de parámetros considerados para el desarrollo del ICA en la subcuenca Yeguaré.



i. Toma de muestras

Antes del muestreo, se realizaron una serie de actividades para garantizar la idoneidad de las muestras y facilitar su análisis. Inicialmente, se lavaron meticulosamente los recipientes de almacenamiento con una solución de ácido clorhídrico al 5 N, seguido de un enjuague con agua destilada para eliminar cualquier contaminante que pudiera afectar los resultados. Luego, se etiquetaron los recipientes con información relevante, como el lugar, la hora y la fecha del muestreo, así como el tipo de análisis requerido según su método de preservación. Las muestras bacteriológicas se recolectaron en bolsas estériles de 500 mL, siguiendo las recomendaciones de la Asociación Americana de Salud Pública (APHA). Previo a la gira de muestreo se obtuvieron las condiciones específicas de preservación para cada parámetro esto para garantizar la conservación de la muestra. Estas condiciones se detallan en la figura V-4.

Figura V-4 Condiciones de preservación para cada parámetro analizado.



Los cationes mayoritarios y metales del primer, segundo y quinto muestreo fueron analizados en la Universidad de Alicante, se aplicó una metodología específica de preservación. Esto implicó la filtración y acidificación de 50 mL de muestra con ácido nítrico (HNO_3) a una proporción de 2ml de HNO_3 por cada litro de muestra para asegurar se mantiene a $pH < 2$, las cuales se almacenaron a temperatura ambiente hasta su traslado a las instalaciones universitarias. Una vez establecidas las condiciones de preservación, se procedió con la gira de muestreo, siguiendo los pasos detallados en la figura V-5.

Figura V-5 Metodología de muestreo.

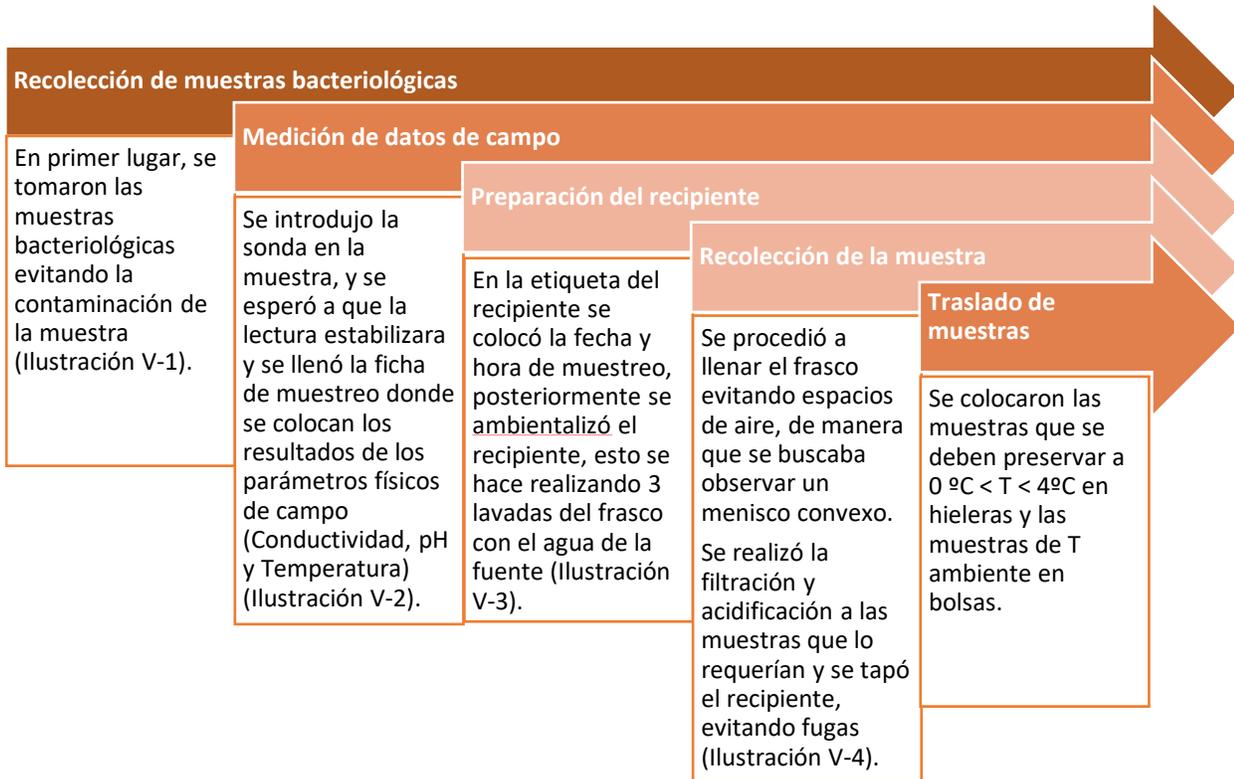


Ilustración V-1 Recolección de muestras bacteriológicas.



Ilustración V-2 Medición de datos de campo.



Ilustración V-3 Preparación del recipiente.



Ilustración V-4 Recolección de la muestra.



Las muestras de coliformes termotolerantes y *Escherichia Coli* fueron trasladados en hieleras y se entregaron en el Centro de Investigación en Agentes Infecciosos y Zoonóticos (CIAIZ) del Instituto de Investigación de Microbiología (IIM) antes de cumplir las 6 horas máximas de preservación. Mientras que las muestras para parámetros físicos y químicos fueron entregadas en el laboratorio de Hidroquímica para su análisis; ambos laboratorios pertenecientes al Centro Experimental y de Innovación del Recurso Hídrico. Las muestras que se analizaron en la Universidad de Alicante fueron almacenadas a temperatura ambiente hasta ser enviadas vía aérea, cuidando el tiempo máximo de preservación (6 meses).

ii. Análisis de laboratorio

a) Propiedades bacteriológicas

Debido a limitaciones de recursos, no fue posible realizar completamente el análisis de las propiedades bacteriológicas en los seis muestreos. En la tabla V-2 se detallan los parámetros analizados por punto y por muestreo.

Tabla V-2 Muestreo de propiedades bacteriológicas en los puntos de muestreo de la subcuenca Yeguaré.

No.	Punto de muestreo (código)	SC2020	CN2020	LL2020	SC2021	CN2021	LL2021
1	Y-MA-01			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>
2	Y-MA-02			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTO y <i>Ecoli</i>	
3	Y-MA-03			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	
4	Y-PP-25					CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>
5	Y-PP-22			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	
6	Y-PP-17			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	
7	Y-MA-18			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	
8	Y-PP-04		CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	
9	Y-MA-20			CTE y <i>Ecoli</i>		CTE y <i>Ecoli</i>	
10	Y-MA-13			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	
11	Y-PP-07			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	
12	Y-PP-06			CTE y <i>Ecoli</i>			
13	Y-MA-05			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>
14	Y-MA-16			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>
15	Y-MA-09			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	
16	Y-PP-19					CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>
17	Y-MA-24				CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	
18	Y-PP-08			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	
19	Y-MA-15			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	
20	Y-MA-23			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>
21	Y-MA-10			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>
22	Y-PM-11			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	
23	Y-PP-14			CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>	CTE y <i>Ecoli</i>

Fuente: Elaboración propia

Análisis de coliformes termotolerantes y Escherichia coli

Las muestras fueron analizadas en el CIAIZ del IIM que está asociado al CEIRH.

- La determinación de coliformes termotolerantes se llevó a cabo mediante la técnica de filtración por membrana; utilizando membranas de acetato de celulosa de 0.45 micras de tamaño de poro y 47 mm de diámetro (Millipore Inc®). Una vez filtrada la muestra, la membrana se colocó en agar mFC y se incubaron a 44.5 °C/ 24h, siguiendo el procedimiento recomendado por la Asociación Americana de Salud Pública (APHA) (2018). Después del período de incubación, se llevó a cabo el recuento de las colonias azules y los resultados se expresaron UFC (Unidades Formadoras de Colonias) por cada 100 mL de muestra (CEIRH, 2023).
- La determinación de *Escherichia coli* se llevó a cabo mediante el método de Compact Dry EC R-Biopharm (HyServe GmbH & Co. KG,) se depositó 1 ml de la muestra en la placa de cultivo. Luego, la placa se incubó a una temperatura de 37°C durante 24 horas, siguiendo el procedimiento recomendado por APHA (2018). Después del período de incubación, se llevó a cabo el recuento de las colonias azules, y los resultados se expresaron como UFC de E. coli por cada 1 ml de muestra (CEIRH,2023).

b) Propiedades físicoquímicas

En la tabla V-3 se presenta un resumen detallado de los parámetros analizados por punto y por muestreo.

Se pueden distinguir dos categorías principales de análisis:

- Análisis Completo (AC), que incluye todos los parámetros indicados en la figura V-3
- Análisis Básico (AB), que abarca los Aniones y Cationes mayoritarios (AM y CM, respectivamente), el análisis de Nutrientes (NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^-), el análisis de parámetros Físicoquímicos (FQ) y el análisis de Metales Básico (Fe, Mn, Cu y Zn).

Tabla V-3 Muestreo de propiedades fisicoquímicas en los puntos de muestreo de la subcuenca Yeguaré.

No.	Punto de muestreo (código)	SC2020	CN2020	LL2020	SC2021	CN2021	LL2021
1	Y-MA-01	-	-	AB, Cd y Pb	AB	AB y Al	AC
2	Y-MA-02	-	-	AB, Cd y Pb	AB	AB y Al	-
3	Y-MA-03	-	-	AB y Pb	AB	AB y Al	-
4	Y-PP-25	-	-	-	-	AB y Al menos NO ₃ ⁻	AC
5	Y-PP-22	AC menos NO ₃ ⁻	-	AB y Pb	AB	AB y Al	-
6	Y-PP-17	-	-	AB, Cd y Pb	AB	AB y Al menos NO ₃ ⁻	-
7	Y-MA-18	-	-	AB, Cd y Pb	AB	AB y Al	-
8	Y-PP-04	FQ, AM, NO ₃ ⁻ y NH ₄ ⁺	AC menos NO ₃ ⁻	AB y Pb	AB	AC	AC
9	Y-MA-20	-	-	AB, Cd y Pb	-	AB y Al menos NO ₃ ⁻	-
10	Y-MA-13	-	-	AB y Pb	AB	AB y Al	-
11	Y-PP-07	-	FQ y AM	AB y Pb	AB	AC	-
12	Y-PP-06	-	FQ, AM y NO ₂ ⁻	AB, Cd y Pb	-	-	-
13	Y-MA-05	AC menos NO ₃ ⁻	AC menos NO ₃ ⁻	AB, Al y Pb	AB	AC	AB, Al y Cd
14	Y-MA-16	-	-	AB, Cd y Pb	AB	AC	AC
15	Y-MA-09	-	-	AB y Pb	AB	AB y Al	-
16	Y-PP-19	-	-	-	-	AC	AC
17	Y-MA-24	-	-	AB, Cd y Pb	AB	AB y Al	-
18	Y-PP-08	-	-	AB y Pb	AB	AC	-
19	Y-MA-15	-	-	AB, Cd y Pb	AB	AC	-
20	Y-MA-23	-	-	AB, Cd y Pb	AB	AC	AC
21	Y-MA-10	-	-	AB, Cd y Pb	AB	AB y Al	AC
22	Y-PM-11	-	-	AB, Cd y Pb	AB	AC	-
23	Y-PP-14	-	-	AB, Cd y Pb	AB	AC	AC

Fuente: Elaboración propia.

La metodología para el análisis de las muestras depende del tipo de parámetro a medir de manera general se pueden subdividir en 4 técnicas principales de análisis químico: Análisis potenciométricos, volumétricos, espectrometría UV-Visible y de absorción atómica.

Análisis potenciométricos

El análisis potenciómetro se realiza para los parámetros fisicoquímicos y mecánicos principalmente, como ser: cloruros, conductividad eléctrica, ORP, pH, salinidad, sólidos disueltos totales, temperatura, estos fueron tomados en campo y al llegar al laboratorio Los aparatos son calibrados con soluciones estándar antes de realizar la lectura de los resultados de las muestras, dichos aparatos se detallan en la tabla V-4.

Tabla V-4 Equipos utilizados en campo y laboratorio para los análisis de parámetros fisicoquímicos.

Parámetro	Equipo
Parámetros medidos en campo.	
Conductividad eléctrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Instrumento portátil multiparámetro YSI 556 pH-meter (Eco Testr pH 2; Oakton 35423-10)
pH	
Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	
Parámetros medidos en laboratorio	
Cloruros [$\text{mg}/\text{l Cl}^{-}$]	Medidor multiparámetro YSI Professional Plus ProQuatro)
Conductividad eléctrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	
Sólidos Disueltos Totales [mg/l]	
Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	
ORP [mV]	
pH	Medidor multiparámetro HANNA HI 9829
Turbidez [NTU]	Turbidímetro HACH 2100Q

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de volumetría

Al igual que los análisis fisicoquímicos y mecánicos, el análisis de alcalinidad fue realizado al llegar al laboratorio de Hidroquímica del CEIRH debido al tiempo de conservación (24 horas) de este. La alcalinidad fue desarrollada con el método 2320B del Standard Methods, el cual consiste en valorar una muestra de agua con una solución de ácido sulfúrico a 0.02N, hasta los virajes a pH 8.3 y 4.5. Estos puntos finales se determinan visualmente mediante el uso de la fenolftaleína para el viraje a 8.3 donde está próximo al punto de equivalencia para las concentraciones de carbonato y dióxido de carbono (CO_2) en el agua, esta valoración representa la cantidad de hidróxido (OH^{-}) y la mitad del carbonato (CO_3^{2-}) presentes en la muestra. Mientras que la mezcla de verde de bromocresol-rojo de metilo para el viraje a pH 4.5 y está próximo al punto de equivalencia para el ion hidrógeno (H^{+}) y el bicarbonato (HCO_3^{-}) en el agua, al evaluar hasta este pH, se puede determinar la cantidad de bicarbonato (HCO_3^{-}) presente en la muestra (APHA, 2018).

Análisis de espectrofotometría de Ultravioleta-Visible (UV-Vis)

Los análisis de aniones (nitratos, nitritos y sulfatos) y la alcalinidad se realizaron al llegar al laboratorio de Hidroquímica del CEIRH, debido a que estos compuestos tienen un tiempo de conservación limitado (48 horas). Por otro lado, el análisis de amonio fue realizado antes de cumplir el plazo de conservación (28 días). Todos estos análisis se efectuaron mediante espectrofotometría UV-Vis, utilizando el espectrofotómetro DR3900 de la marca HACH, los métodos empleados para estos análisis se detallan en la tabla V-5.

Tabla V-5 Métodos utilizados para el análisis de espectrofotometría de UV-Vis.

Análisis	Método
Sulfatos [2 - 70 mg/l SO ₄ ²⁻]	USEPA SulfaVer 4 Method ¹ [Method 8051]- Powder Pillows
Amonio [0.02 - 2.50 mg/l N- NH ₄]	USEPA Nessler Method ² [Method 8038]
Nitratos [0.3 - 30 mg/l N-NO ₃ (HR)]	Cadmium Reduction Method [Method 8039] – Powder Pillows
Nitritos [0.002 - 0.3 mg/l N-NO ₂ (LR, Spectrophotometers)]	USEPA Diazotization Method [Method 8507] – Powder Pillows

Fuente: (HACH, 2000).

¹Método adaptado del Standard Methods Método 4500-SO4.

²Método adaptado del Standard Methods 4500-NH3 B y C.

Análisis de Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA)

El análisis de calcio, sodio, magnesio, potasio, hierro, manganeso, cobre y zinc fueron realizados en el laboratorio de hidroquímica, mediante la técnica de análisis de espectrofotometría de absorción atómica de flama y el método del Standard Methods 3111-B con el espectrofotómetro de absorción atómica marca Agilent Technologies modelo 55AA. Mientras que, para el análisis de aluminio, cadmio, plomo se realizó mediante la técnica de análisis de espectrofotometría de absorción atómica de horno grafito y el método del Standard Methods 3113-B con el espectrofotómetro de absorción atómica marca Agilent Technologies modelo 240Z. Los análisis se realizaron cumpliendo con la metodología y los tiempos máximos de conservación (6 meses).

Análisis de Espectrofotometría de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)

De las 78 muestras tomadas a lo largo del estudio, 15 de ellas distribuidas 2 en el primer y segundo muestreo, una muestra en el tercer muestreo y 10 en el quinto muestreo; sus cationes mayoritarios y metales fueron analizadas en la Universidad de Alicante, en España, en un espectrómetro de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) siguiendo el método 3125-B del Standard Methods. Los análisis se realizaron cumpliendo con la metodología y los tiempos máximos de conservación (6 meses). En la tabla V-6 se describen las muestras realizadas bajo esta metodología.

Tabla V-6 Muestras analizadas en la Universidad de Alicante.

Primer muestreo	Segundo muestreo	Tercer muestreo	Quinto muestreo
Y-MA-05 y Y-PP-22	Y-MA-05 y Y-PP-04	Y-MA-05	Y-MA-05, Y-PP-04, Y-PP-07, Y-MA-16, Y-PP-19, Y-PP-08, Y-MA-15, Y-MA-23, Y-PM-11, Y-PP-14

Fuente: Elaboración propia.

C. FASE III: MANEJO DE DATOS

El análisis de los datos comenzó con las conversiones y cálculos estadísticos necesarios para obtener los resultados de forma que pudieran ser ingresados a los programas de software pertinentes (AquaChem y PHREEQ-C), así como para poder realizar las comparaciones y los cálculos necesarios para el desarrollo de la investigación. Dichos resultados deben ser revisados y valorados según lo obtenido a partir del balance iónico, para posteriormente dar una vista cualitativa a la calidad del agua y por último ver la interacción del medio y las actividades antropogénicas con las fuentes de agua.

i. Validación de los datos a partir del balance iónico

Con los resultados de los análisis de laboratorio de las muestras se procede dar la validez de los datos y esto resulta a partir de la obtención del balance iónico, ya que como se expresó anteriormente si existe una diferencia muy importante entre las sumas de las cargas de los iones, solo puede ser debido a que existen cantidades anormales de los iones menores o a un error grave en el análisis del laboratorio. Considerar que un error es admisible depende un poco de la concentración y del tipo de agua, pero a título indicativo se establecen los valores de referencia que se observan en la tabla V-7.

Tabla V-7 Referencia de balance iónico.

Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$	50	200	500	2000	>2000
Error admisible %	30	10	8	4	4

Fuente: (Custodio & Llamas, 2001)

Teniendo de referencia la tabla anterior se realiza el cálculo del porcentaje de error, primero convirtiendo las concentraciones de mg/l a Normalidad (meq-g/l) y luego realizando la suma de los aniones y los cationes, para posterior utilizar la ecuación V-1

$$\%error = \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} * 100\% \quad \text{Ecuación V-1 Balance iónico}$$

Si el valor se encuentra dentro del rango del error admisible representa entonces una correcta ejecución en análisis de las muestras y en la selección de los parámetros. De igual manera fueron considerados aquellos errores que se encontraban un 5% cercanos al error admisible.

i. Caracterización hidrogeoquímica

La caracterización hidrogeoquímica ayudó a determinar el tipo de agua a partir de los iones mayoritarios y su interacción con la geología del lugar, para este análisis se utilizó el software AquaChem, utilizando el diagrama de Piper y Schoeller, para la época lluviosa 2020, época seca 2021 y temporada de canícula 2021.

Así mismo se hizo uso del análisis espacial con ayuda de la herramienta ArcGis para la ubicación de los diagramas pastel sobre el punto donde se ha tomado la muestra de agua, ya que es un buen método para estudiar la variación espacial de la composición del agua del acuífero.

Se analizó el comportamiento temporal de los parámetros fisicoquímicos (conductividad, ORP, pH y Turbidez) que determinarían el medio en el cual se encuentran las fuentes de agua. Así como el comportamiento temporal de los nutrientes (nitritos, nitratos y amonio) en la subcuenca. Para analizar el pH de las fuentes de agua en la subcuenca Yeguaré, se utilizó el software ArcGIS versión 10.6, aplicando el método de interpolación Kriging. Este método proporciona estimaciones precisas del pH a partir de datos de muestreo, permitiendo obtener mapas detallados con una resolución de 10 metros. La interpolación Kriging se basa en la geoestadística para predecir valores en puntos no muestreados, considerando la estructura espacial y las tendencias subyacentes en los datos, lo cual es ideal para obtener representaciones espaciales precisas del pH en el área de estudio (Henríquez et al., 2013).

En el marco de esta investigación, se ha adoptado la consideración de contaminantes para aquellos parámetros químicos que superan los valores máximos permitidos según la normativa NTNCAP, ya que esto podría implicar un riesgo para la salud. Con base en este criterio, se han identificado como contaminantes principales del entorno los metales hierro y aluminio, dado que presentaron una mayor incidencia de muestras afectadas por estos parámetros.

Con el propósito de comprender más a fondo la dinámica de estos metales en el agua y sus posibles formas químicas, se llevó a cabo la elaboración de diagramas de Pourbaix para los elementos con mayor presencia en los puntos de muestreo. Este enfoque permite determinar el estado más estable de los metales presentes en el agua, identificando las condiciones en las que pueden encontrarse de manera disuelta, precipitada u otras formas químicas estables.

La referencia utilizada para la interpretación de los diagramas de Pourbaix se basó en la información presentada en la revista *Industria Química*, específicamente en el artículo "Inhibición de la corrosión en circuitos cerrados de refrigeración en presencia de aluminio" (2020). Este análisis es crucial para comprender cómo la concentración de metales en el agua puede variar en función de cambios en el pH y el potencial redox, brindando así información valiosa sobre la movilidad y comportamiento de estos contaminantes en el medio acuático.

ii. Índice de Calidad de Agua CCME_{WQI}

Para evaluar la calidad del agua, se emplea el CCME_{WQI} debido a su flexibilidad en la selección de variables para el análisis. Además, este método considera la frecuencia de contaminación en los distintos momentos de muestreo.

Las variables que fueron consideradas para el cálculo del índice son: sólidos disueltos totales, cloruros, sulfatos, potasio, magnesio, sodio, plomo, aluminio, cadmio, cobre, nitratos, nitritos, amonio, hierro, manganeso, amonio, turbidez y zinc como parámetros fisicoquímicos y de los parámetros microbiológicos fueron considerados los coliformes termotolerantes y *Escherichia Coli*.

El objetivo (*Objetivo_j*) que menciona el índice está representado por lo valores máximos permisibles establecidos por la NTNCAP de 1995 por la Secretaria de Salud, el Reglamento Nacional de Agua Potable Primaria de 2009 por la EPA y la Guía para la calidad del agua de consumo humano cuarta edición que incorpora la primera adenda de 2018 por la OMS. Esta comparativa tiene el propósito de identificar posibles áreas de mejora en la regulación actual, garantizando así que se estén aplicando los estándares más actualizados y eficaces en términos de seguridad y calidad del agua para consumo humano. Para temas de gestión de consideración de contaminantes se utilizó los resultados proporcionados por la Normativa Nacional. Los valores de objetivo de los parámetros fisicoquímicos y químicos utilizados se describen en la tabla VI-2, mientras que los parámetros bacteriológicos y el total de parámetros analizados por normativa se presentan en la tabla V-8, siendo considerados un total de 19 parámetros con los valores de referencia de la NTNCAP, 16 parámetros con los valores de referencia de la EPA y 7 parámetros con los valores de referencia de la OMS.

Tabla V-8 Valores del objetivo de los parámetros bacteriológicos para el cálculo del Índice de Calidad de Agua

Parámetro	Unidades	Valor Máx. Admisible NTNCAP	Valor Máx. Admisible EPA	Valor Máx. Admisible OMS
Coliformes Termotolerantes	UFC	1.00	1.00	1.00
<i>E. coli</i>	UFC	---	1.00	1.00

Fuente: (Ministerio de Salud, 1995; EPA, 2009; OMS, 2018)

Según el Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME,2001), el cálculo del índice se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. En primer lugar, se realizó el cálculo del alcance (F_1) que representa el porcentaje de variables que tienen valores fuera del rango establecido por el objetivo de cada parámetro, para el uso que se está evaluando, con respecto al total de variables consideradas. Y se evaluó a través de la ecuación V-2.

$$F_1 = \frac{\text{Numero de variables fuera del rango}}{\text{Total de variables}} * 100 \quad \text{Ecuación V-2 Calculo del Alcance para el ICA.}$$

2. Se calculó la Frecuencia (F_2) que representa el porcentaje de pruebas individuales que no cumplen con los objetivos. Y se evaluó a través de la ecuación V-3.

$$F_2 = \frac{\text{Numero de datos fuera del rango}}{\text{Numero total de datos}} * 100 \quad \text{Ecuación V-3 Calculo de la Frecuencia para el ICA.}$$

3. Posteriormente se calculó la Amplitud (F_3) que representa la cantidad por la cual los valores de prueba fallan en cumplir con los objetivos. Es una medida de la desviación que existe en los datos, determinada por la magnitud de los excesos de cada dato fuera del rango, acompañada por su umbral. El cálculo de F_3 se lleva a cabo en tres pasos:

- a) Se calculó la excursión que es el número de veces que la concentración de un individuo es mayor (o menor, cuando el objetivo es un mínimo) que el objetivo y se calculó a partir de la Ecuación V-4 para cuando el valor de la prueba no debe exceder el objetivo y la ecuación V-5 para los casos en los que el valor de prueba no debe caer por debajo del objetivo:

$$excursion_i = \left(\frac{\text{Valor de la prueba fallida}_i}{\text{Objetivo}_j} \right) - 1 \quad \text{Ecuación V-4 Calculo de la excursión para el caso 1.}$$

$$excursion_i = \left(\frac{\text{Objetivo}_j}{\text{Valor de la prueba fallida}_i} \right) - 1 \quad \text{Ecuación V-5 Calculo de la excursión para el caso 2.}$$

- b) Posteriormente se calculó la suma normalizada de excursiones (nse) que representa la cantidad colectiva por la cuales las pruebas individuales están fuera de cumplimiento y se calculó sumando las excursiones de pruebas individuales desde sus objetivos y dividiendo por el número total de pruebas (tanto las que cumplen el objetivo y las que no cumplen con el objetivo), como se observa en la ecuación V-6.

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n excursion_i}{\text{Número total de datos} \# \text{ de pruebas}} \quad \text{Ecuación V-6 Calculo de la suma normalizada de excursiones.}$$

Entonces la Amplitud se calcula mediante la ecuación V-7 que es una función asintótica que escala la suma normalizada de las excursiones desde objetivos (nse).

$$F_3 = \frac{nse}{0.01nse + 0.01}$$

Ecuación V-7 Calculo de la Amplitud para el ICA.

4. Una vez obtenidos los tres factores (Alcance, Frecuencia y Amplitud) se calculó el valor cuantitativo del índice a partir de la ecuación V-8.

$$CCME_{WQI} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$$

Ecuación V-8 Calculo del ICA.

El divisor 1.732 normaliza los valores resultantes a un rango entre 0 y 100. Y se utiliza la tabla V-9 para determinar cualitativamente la calidad del agua.

Tabla V-9 Criterios para la clasificación de calidad de las agua.

CCME _{WQI}	Clasificación	Descripción
95-100	Excelente	La calidad del agua está protegida con ausencia virtual de amenazas o daños. Las condiciones son muy cercanas a niveles naturales o deseados.
80-94	Buena	La calidad del agua está protegida con algunas amenazas o daños de poca magnitud. Las condiciones raramente se apartan de los niveles naturales o deseados.
65-79	Regular	La calidad del agua es usualmente protegida pero ocasionalmente es amenazada o dañada. Las condiciones a veces se apartan de los niveles naturales o deseados.
45-64	Marginal	La calidad del agua es frecuentemente amenazada o dañada. Las condiciones con frecuencia se apartan de los niveles naturales o deseados.
0-44	Pobre	La calidad del agua está casi siempre amenazada o dañada. Las condiciones usualmente se apartan de los niveles naturales o deseados.

Fuente: (CCME, 2001)

Después de completar la clasificación, se procede a llevar a cabo la interpretación de los datos en términos de su distribución espacial. Esta interpretación implica evaluar los resultados en función de su ubicación dentro de la cuenca, y las actividades naturales/antropogénicas que se dan en las cercanías de la toma. Esta fase de interpretación desempeña un papel fundamental en la comprensión de las implicaciones ambientales y en la toma de decisiones informadas relacionadas con la gestión y protección del agua.

El análisis espacial de los resultados proporciona información valiosa para establecer medidas de mitigación, acciones de conservación y estrategias de mejora de la calidad del agua, con el objetivo de minimizar los impactos negativos en el medio ambiente y asegurar un uso sostenible y responsable del recurso hídrico.

iii. Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH)

La formulación de una estrategia que promueva la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) se apoya en los resultados derivados del índice de calidad del agua y en la contextualización de la hidroquímica. Este enfoque permite identificar los posibles riesgos hídricos que impactan en la calidad del agua subterránea que abastecen a las comunidades de la subcuenca. Después de la identificación de los riesgos hídricos que impactan a la calidad del agua, las estrategias de GIRH se basaron en:

- Participación comunitaria
- Formulación de medidas correctivas
- Prácticas sostenibles
- Implementación y monitoreo continuo
- Evaluación periódica

Dentro de las estrategias propuestas se incluye la delimitación de zonas de protección basadas en el mapa de elevaciones de recarga, elaborado con datos del laboratorio de Isotopía Hidrológica del CEIRH. Este mapa servirá para identificar áreas donde se debe restringir el uso del suelo, con el fin de preservar tanto la cantidad como la calidad del agua en la subcuenca.

D. FASE IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el análisis de resultados, se llevaron a cabo diversas interpretaciones a partir de los siguientes elementos:

- Mapa de calidad de agua: Se utilizó este mapa para identificar áreas con agua de alta calidad, que cumple con los estándares establecidos, y áreas que pueden presentar problemas de calidad debido a la presencia de contaminantes naturales y antropogénicos.
- Mapa con diagramas pastel: Se generaron diagramas de pastel para los muestreos de la época lluviosa 2020, y los tres muestreos realizados en el año 2021, así de esta manera determinar similitudes entre las fuentes de agua, mediante la distribución de los principales iones mayoritarios.
- Mapa con presencia de metales y mapa con presencia de parámetros asociados a la contaminación antropogénica: Estos mapas proporcionaron una representación visual de las zonas donde la presencia de metales y otros indicadores de contaminación antropogénica se superponían, permitiendo así enfocar los esfuerzos de gestión en áreas críticas.

En resumen, el análisis e interpretación de los resultados se enfocó en proporcionar información relevante a los tomadores de decisiones concernientes al tratamiento y gestión del recurso hídrico, asegurando su calidad y seguridad para diversos usos.

CAPITULO VI: Análisis e interpretación de los datos

Para analizar e interpretar los datos, se llevó a cabo una validación inicial mediante el balance iónico, cuyos resultados se detallan en el anexo 2. La tabla VI-1 presenta el porcentaje de datos considerados como aceptados y no aceptados.

Tabla VI-1 Evaluación de la calidad del dato

Muestreo	Aceptable	No aceptable
Lluviosa 2020 (LL2020)	81%	19%
Seca 2021 (SC2021)	100%	0%
Canícula 2021 (CN2021)	91%	9%
Lluviosa 2021 (LL2021)	100%	0%
Total	93%	7%

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, dentro de los valores aceptables un 6% fueron considerados como aceptables por estar dentro del margen de un $\pm 5\%$ del error admisible según la conductividad. Por otro lado, los datos no aceptados mostraron un error promedio del 11%.

Por lo tanto, en general se considera que la mayoría de los resultados obtenidos en el análisis químico del agua fueron precisos y confiables. Esto se indica porque la mayoría de los datos aceptados tuvieron un margen de error bajo, demostrando que los procedimientos y métodos utilizados en el laboratorio fueron adecuados y produjeron resultados precisos.

6.1 Hidroquímica

A. PARÁMETROS FÍSICOS

i. Conductividad

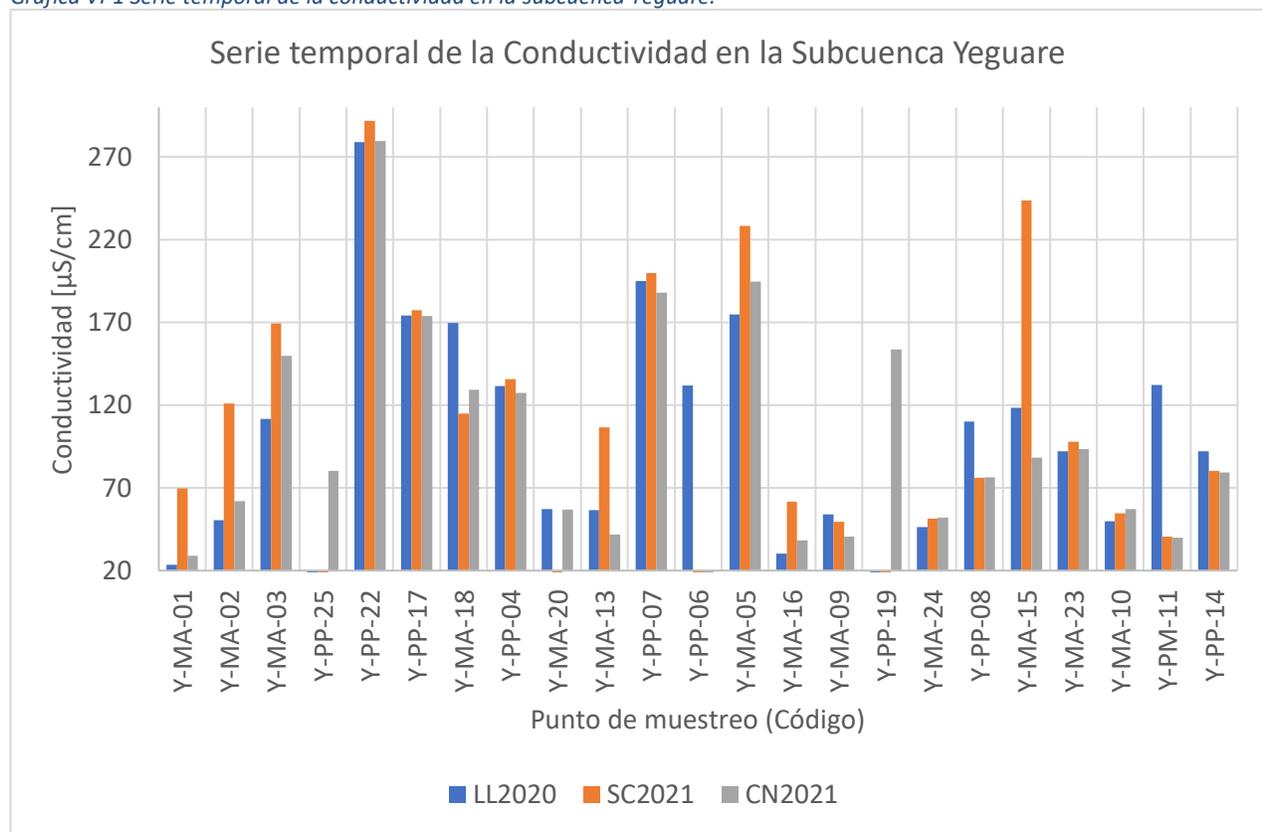
La evaluación de la conductividad en la Subcuenca Yeguaré revela que el 100% de los valores registrados se mantienen por debajo del umbral recomendado por la NTNCAP (400 $\mu\text{S}/\text{cm}$), con un valor promedio de conductividad de 110.98 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un valor máximo observado de 291.60 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este valor máximo se registró en el pozo perforado de El Censo, Morocelí (Y-PP-22) durante la época seca de 2021, indicando una calidad de agua dentro de los estándares aceptables para el consumo humano, lo que subraya la relativa pureza de las aguas subterráneas en la subcuenca, aunque se observan variaciones espaciales que requieren atención detallada.

La gráfica VI-1 muestra un patrón distintivo en la mayoría de los puntos de muestreo, donde se observan los valores más altos de conductividad durante la época seca, con una ligera variabilidad entre los tres

muestreos realizados. Por otro lado, como era de esperarse, los valores más bajos de conductividad se registran durante la época lluviosa. Este comportamiento es típico de las aguas subterráneas, ya que, en la temporada de lluvias, el agua subterránea se recarga con agua fresca proveniente de la precipitación y la escorrentía superficial, diluyendo así la concentración de iones y reduciendo la conductividad. Durante la época seca, cuando la recarga se reduce o cesa, las concentraciones de sales tienden a acumularse, provocando un aumento en la conductividad.

Sin embargo, es importante mencionar que hay puntos de muestreo que no presentan una variación significativa a lo largo de las diferentes épocas, lo que podría indicar una menor influencia de la recarga superficial o patrones de flujo más complejos. Además, se debe resaltar que el punto de muestreo Y-PP-22 mostró consistentemente los valores de conductividad más altos en todos los muestreos, lo que podría sugerir una fuente de salinidad específica o una acumulación de sales a lo largo del tiempo. Este comportamiento atípico merece una investigación más profunda para comprender las causas subyacentes y abordar posibles problemas de calidad del agua en ese punto específico.

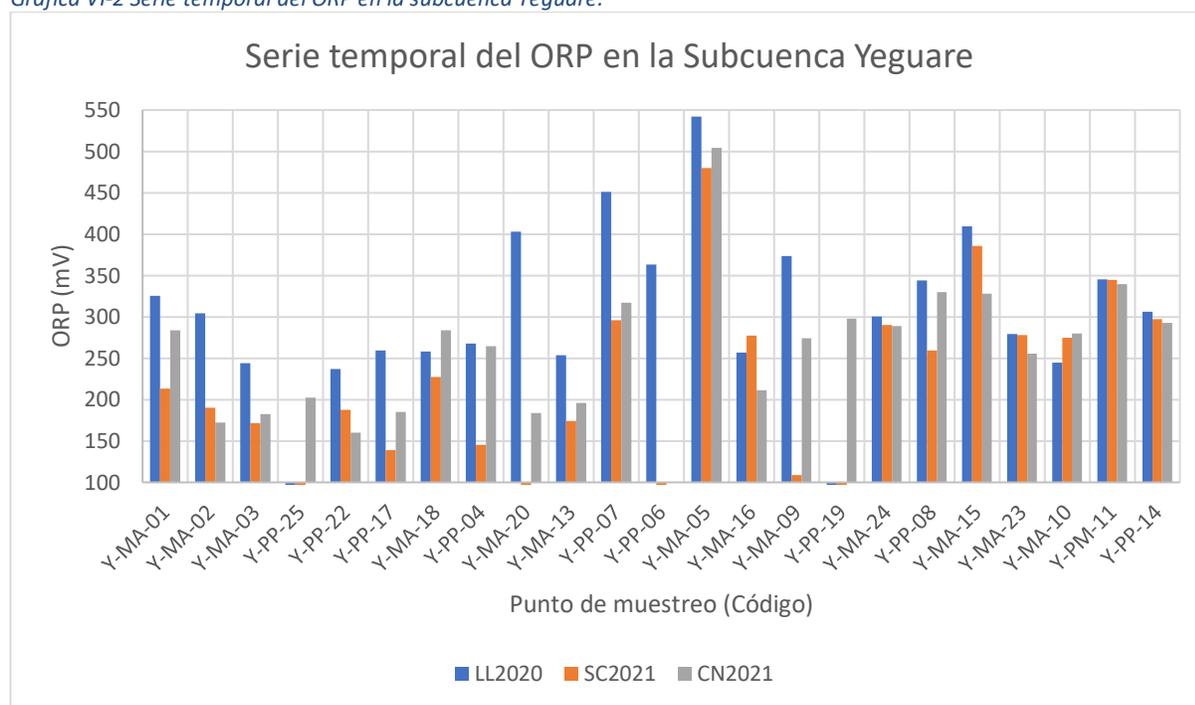
Gráfica VI-1 Serie temporal de la conductividad en la subcuenca Yeguaré.



ii. Porcentaje de Reducción de Oxígeno (ORP)

La mayoría de los valores de ORP se sitúan predominantemente en el rango de 200 a 300 mV, con un promedio general de 278.99 mV, valor característico de las aguas subterráneas puesto que el ORP varía significativamente en función de la presencia de oxígeno disuelto, la materia orgánica, la actividad microbiana y la composición química del acuífero. Los valores elevados de ORP en la época de lluviosa se puede presentar por una posible oxidación de minerales, o la rápida recarga de los acuíferos, la poca variación de los valores de ORP en la mayoría de los puntos muestreados destaca una actividad de oxidación-reducción constante en el medio. En particular, la toma #3, Macuelizo, Tatumbra (Y-MA-05), presenta los valores elevados de las 3 épocas siendo el presentado en la época lluviosa del año 2020, el mayor valor de la serie.

Gráfica VI-2 Serie temporal del ORP en la subcuenca Yeguaré.

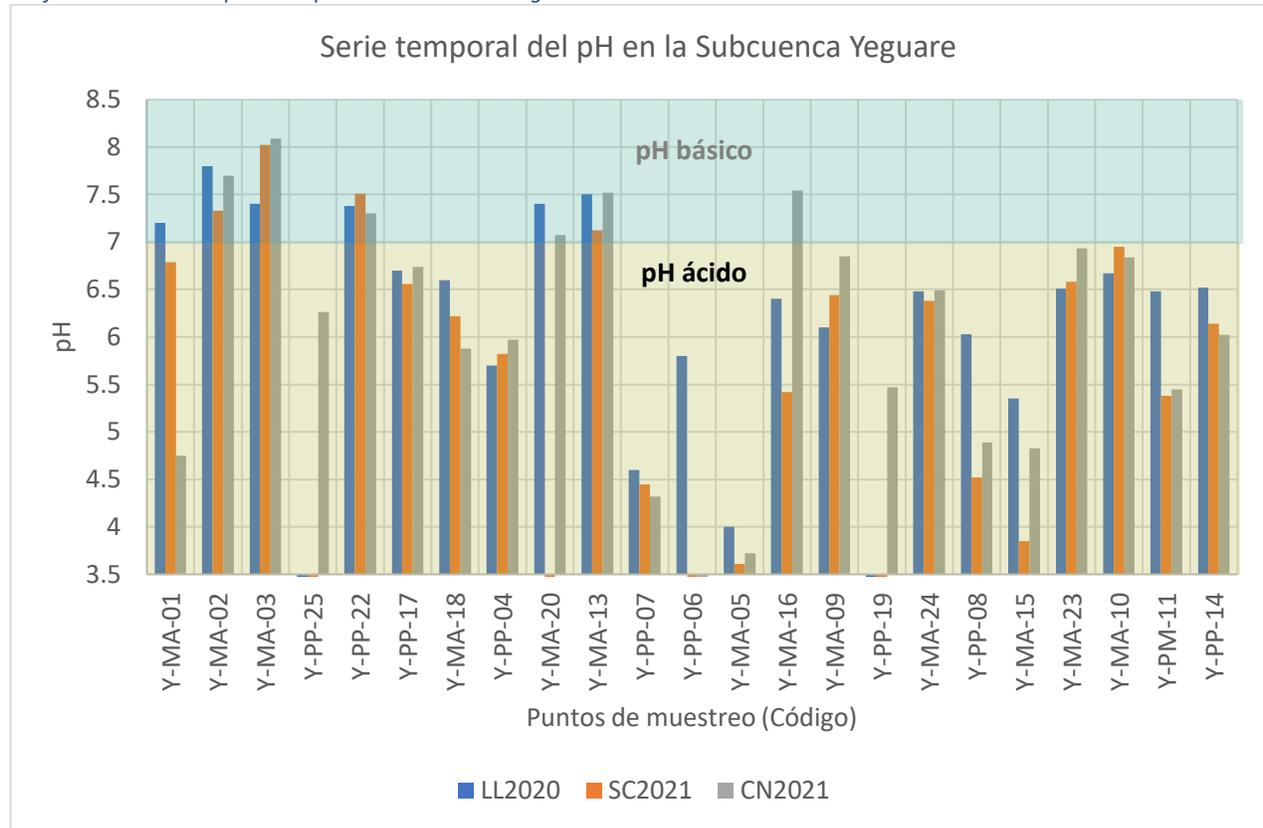


iii. Potencial de Hidrogeno (pH)

El análisis del pH de las aguas subterráneas revela una considerable variabilidad a lo largo del año hidrológico, oscilando entre 3.61 y 8.09. Este amplio rango destaca la variabilidad en la calidad del agua, desde condiciones ácidas hasta básicas. Específicamente, el pH más bajo fue medido en la Toma #3, Macuelizo, Tatumbra (Y-MA-05) durante la época seca de 2021, mientras que el valor más alto se observó en la Fuente Las Pelonas, Guanacaste, Valle de Ángeles (Y-MA-03) en la temporada de canícula de 2021. Esta diversidad de pH, con un 74% de las mediciones indicando condiciones ácidas (pH < 7) y el 26% en

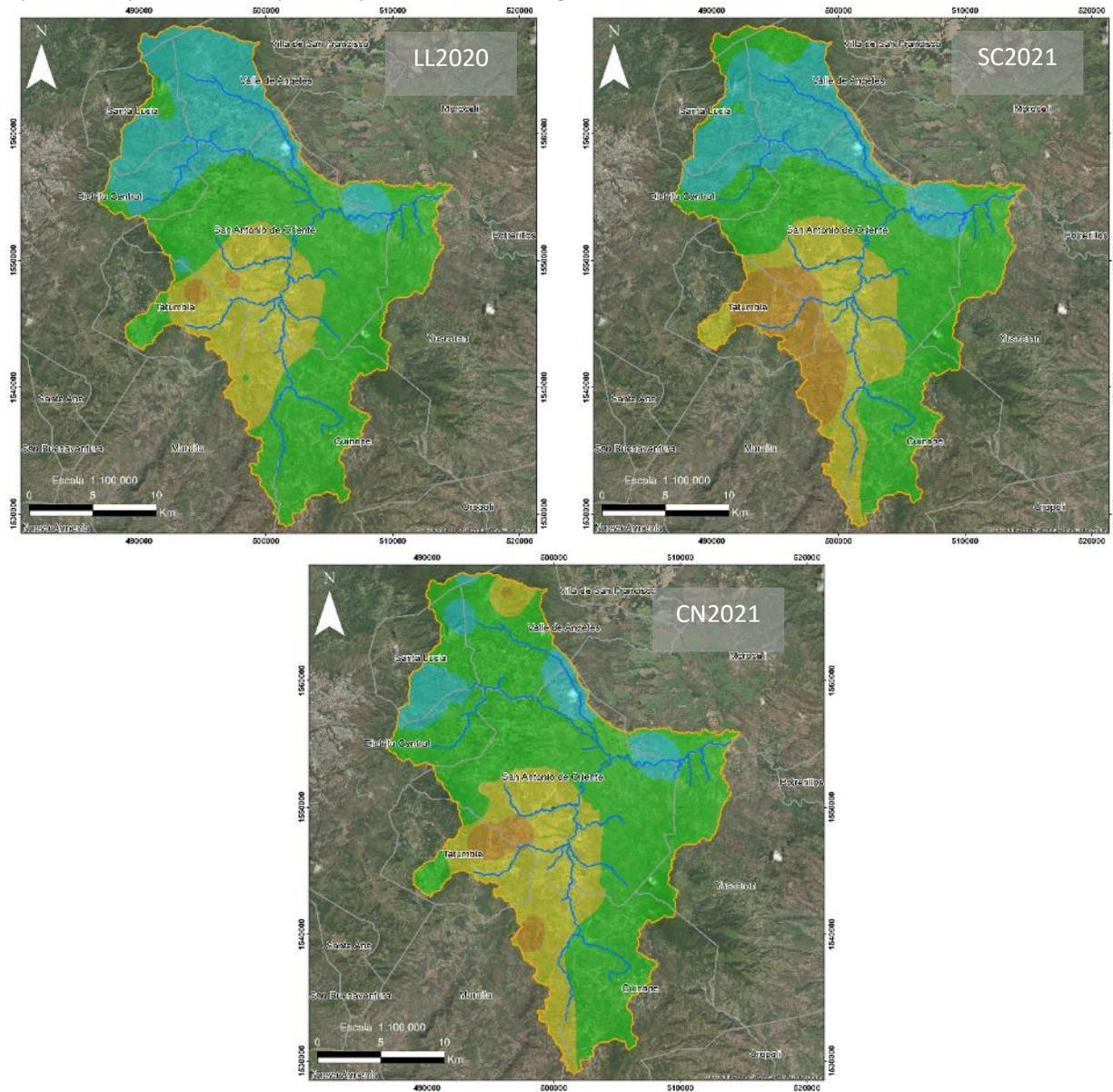
condiciones básicas ($\text{pH} > 7$), subraya la necesidad de un monitoreo continuo y gestión adaptativa para proteger los ecosistemas acuáticos y asegurar la seguridad del agua para consumo humano (gráfica VI-3).

Gráfica VI-3 Serie Temporal del pH en la subcuenca Yeguaré.



El comportamiento temporal y espacial del pH, como se ilustra en el mapa VI-1, refuerza la importancia de entender las dinámicas hidroquímicas regionales. La prevalencia de valores ácidos durante la estación seca, especialmente en la región oeste-sur de la subcuenca, resalta áreas potencialmente vulnerables que podrían beneficiarse de prácticas de manejo específicas para mitigar los impactos de la acidez en los recursos hídricos.

Mapa VI-1 Comportamiento temporal del pH en la subcuenca Yeguaré.



Potencial de Hidrógeno (pH) Subcuenca Yeguaré



Calidad del agua y evaluación hidrogeoquímica de la subcuenca Yeguaré durante el periodo 2020-2021
 Maestría en Recursos Hídricos con orientación en Hidrogeología
 Facultad de Ciencias
 Universidad Nacional Autónoma de Honduras
 Tegucigalpa M.D.C.; Honduras
 Elaboración propia, Fecha: Junio 2023
 Fuente: DEM y Divisiones Políticas - SINIT
 Delimitación y datos - IHCI-UNAH
 Projected Coordinate System UTM
 Elipsoide WGS 84 Datum Horizontal WGS 84 Z16

Simbología

-  Red Hídrica Río Yeguaré
-  Subcuenca Yeguaré
-  Límites Municipales

Comportamiento del pH

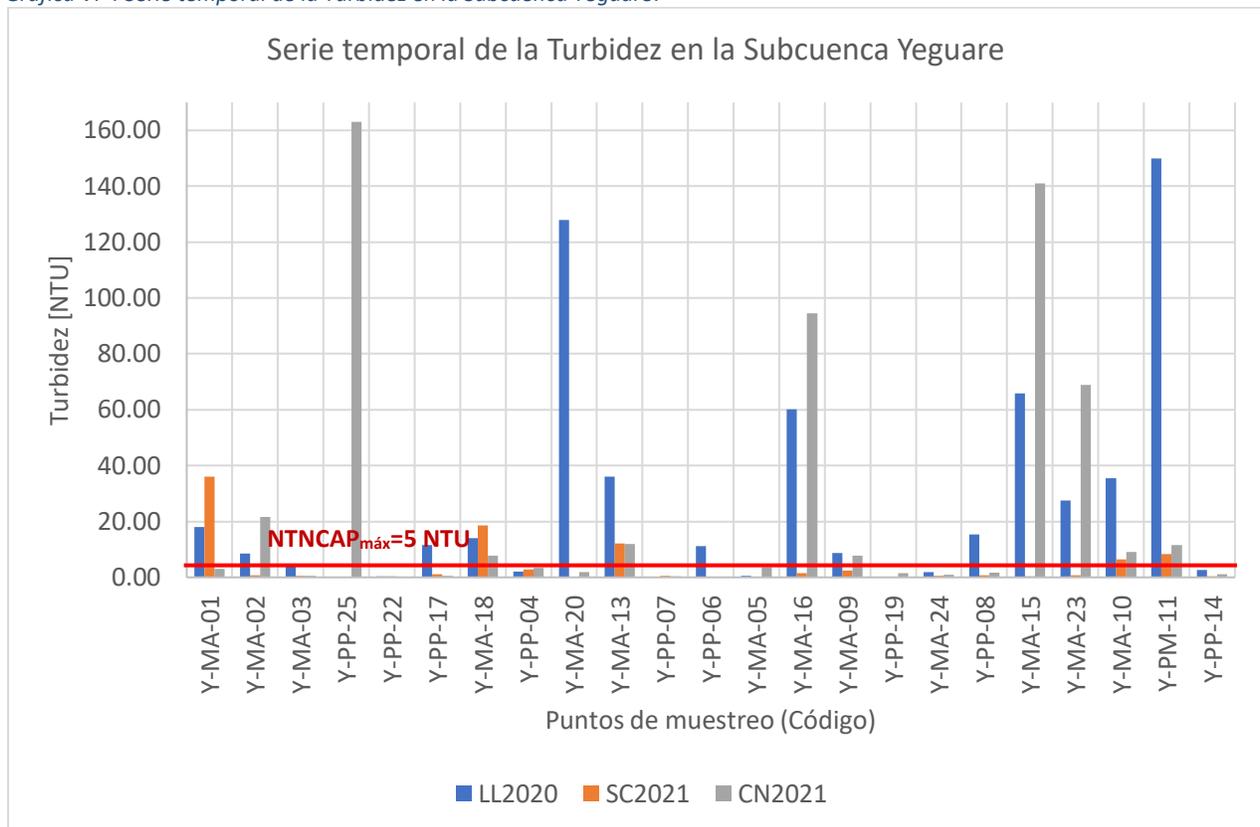
-  3 - 5
-  5 - 6
-  6 - 7
-  7 - 8



iv. Turbidez

En la subcuenca, se evidencia que el 47% de los valores de turbidez obtenidos se sitúan por debajo del valor máximo admisible (5 NTU), mientras que el 53% restante de las muestras supera el rango establecido por la normativa, afectando a 17 puntos de muestreo, este comportamiento se observa en la gráfica VI-4, también es relevante comentar que los valores más altos se presentan en la temporada de canícula y la época lluviosa siendo el pozo perforado de La Estancia (Y-PP-25) el que durante la temporada de canícula del año 2021, exhibió el valor más alto de turbidez, alcanzando los 163.00 NTU. Esta situación indica que la calidad del agua en esta fuente específica está afectada por altos niveles de turbidez, lo que puede tener implicaciones para su uso y requerir acciones de gestión específicas para mitigar este impacto.

Gráfica VI-4 Serie temporal de la Turbidez en la Subcuenca Yeguaré.



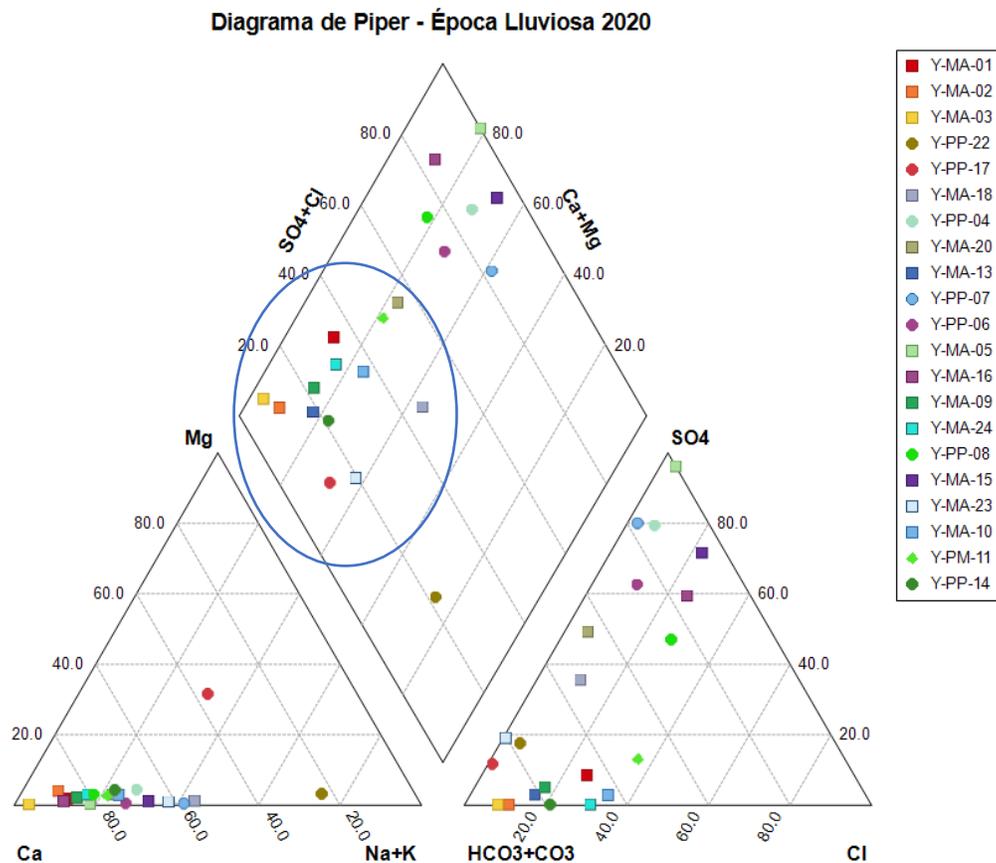
B. IONES MAYORITARIOS

Las gráficas del comportamiento temporal de cada ion se muestran en el anexo 4, es importante mencionar que los aniones mayoritarios (Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^-) no presentan variaciones temporales significativas en los datos recopilados. Sin embargo, los cationes (Ca, Mg, Na y K) exhiben cierta dinámica de intercambio catiónico entre ellos, dando lugar a variaciones en sus concentraciones.

En detalle, la concentración de calcio tiende a ser más alta durante la época lluviosa, el magnesio muestra un incremento durante la época seca, el potasio y el sodio presentan variaciones entre la época seca y la temporada de canícula, lo que sugiere dinámicas de intercambio catiónico y fuentes variables de estos iones.

El análisis de los iones mayoritarios es esencial para determinar la calidad y el tipo de agua en el acuífero, permitiendo identificar similitudes entre diferentes puntos de muestreo y comprender mejor el comportamiento hidrogeoquímico. En la figura VI-1, se muestra que, durante la temporada de lluvias, predomina el tipo de agua Bicarbonatada-Carbonatada Cálcicas-Magnésicas, indicando una influencia de procesos geológicos y climáticos específicos que afectan la composición del agua subterránea.

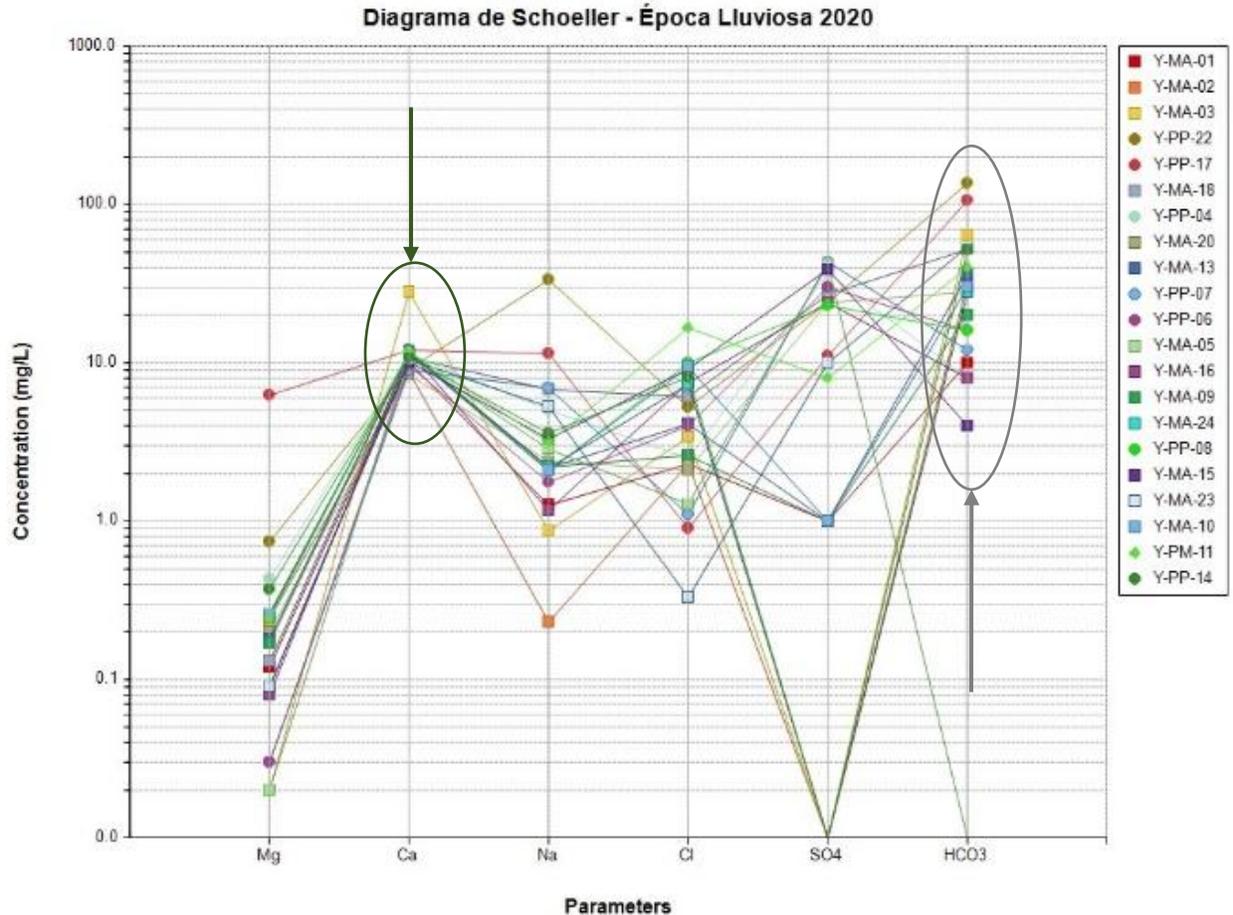
Figura VI-1 Diagrama de Piper época lluviosa 2020 en la subcuenca Yeguaré.



Con base en la información presentada en la figura VI-2, se puede observar que el anión predominante en las aguas subterráneas de la Subcuenca Yeguaré es el bicarbonato (HCO_3^-), mientras que el catión predominante es el calcio (Ca). Como resultado, el tipo de agua predominante en la región es del tipo bicarbonatada cálcica, que constituye un 57 % del total de muestras analizadas.

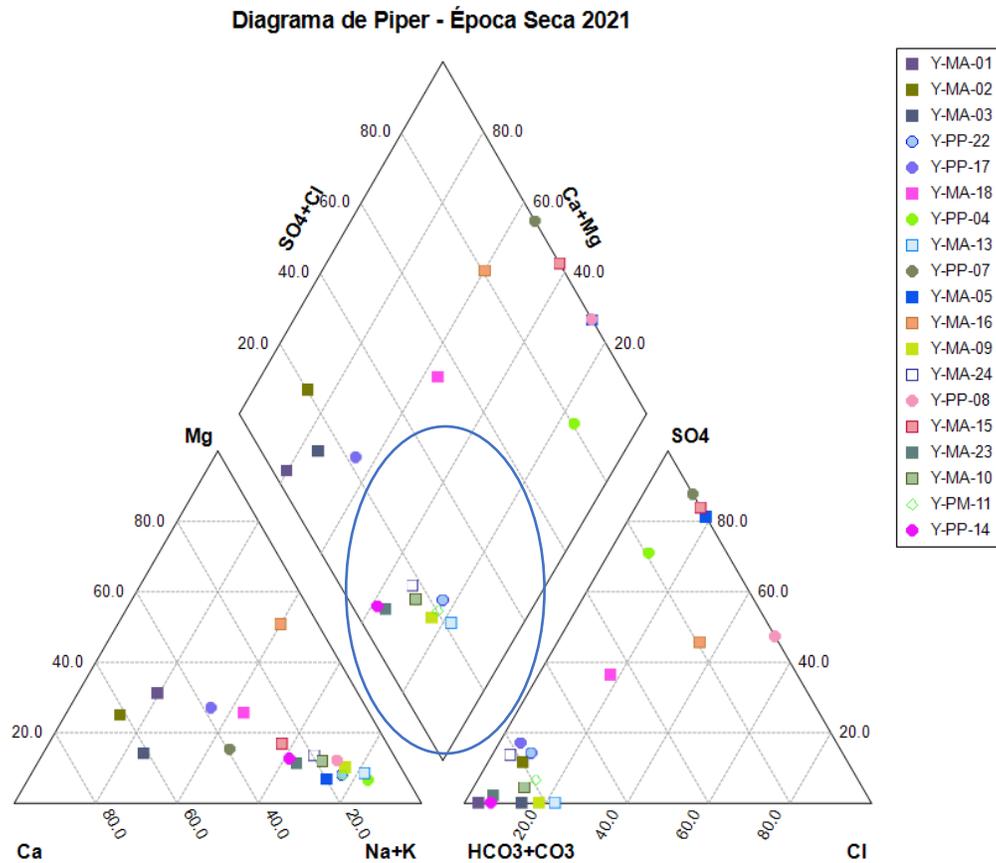
Además de este tipo de agua, se identifican otros dos tipos adicionales. El primero es el tipo sulfatada cálcica, que representa un 38 % de las muestras. El segundo tipo es el bicarbonatada sódica, que corresponde a solo el 5 % del total, señalando un bajo nivel de sodio en comparación con el calcio en la mayoría de las muestras.

Figura VI-2 Diagrama de Schoeller época lluviosa 2020 en la subcuenca Yeguaré.



La figura VI-3 muestra que, durante la época seca del año 2021, se observó una predominancia de aguas del tipo bicarbonatada-carbonatada sódica-potásica. Esta tendencia indica que, durante esta temporada, el agua subterránea contiene concentraciones significativas de iones bicarbonato y carbonato, con una alta presencia de cationes de sodio y potasio.

Figura VI-3 Diagrama de Piper época seca 2021 en la subcuenca Yeguaré.



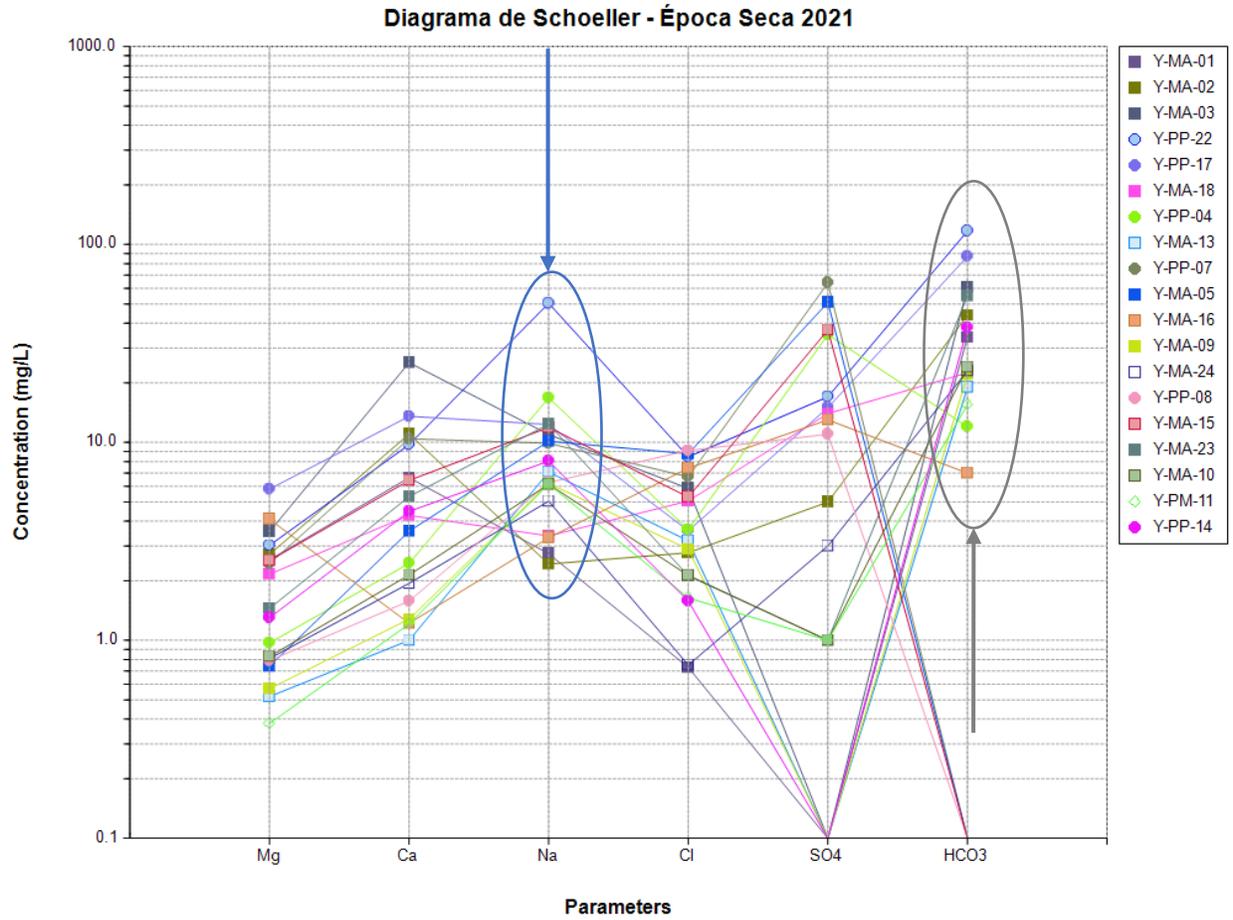
La figura VI-4 revela que el anión predominante en la subcuenca Yeguaré durante la época seca es el bicarbonato, mientras que el catión dominante es el calcio. Con esta composición química, el tipo de agua más común es el bicarbonatada sódica, representando el 42 % del total.

Además de este tipo principal, se observan otros cinco tipos de agua en la subcuenca durante la época seca:

- Bicarbonatada cálcica (21 %),
- Sulfatada sódica (16 %),
- Sulfatada cálcica (11 %),
- Sulfatada magnésica (5 %), y
- Clorada sódica (5 %).

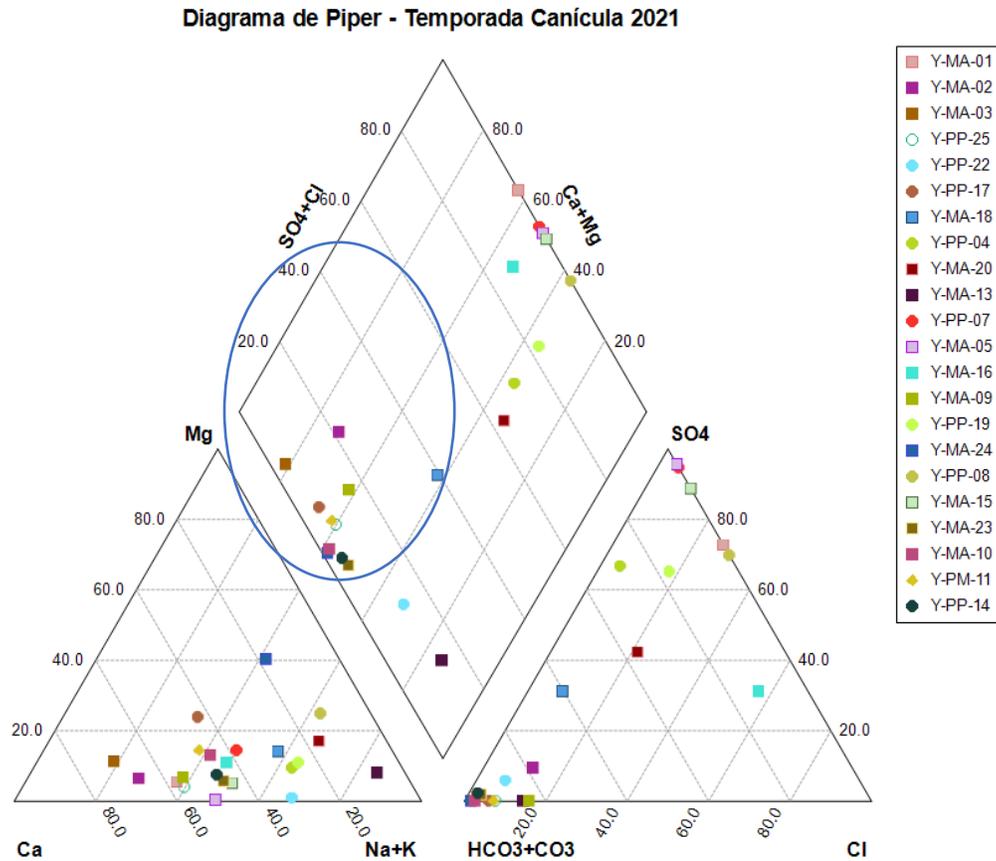
Esta diversidad en los tipos de agua resalta la variabilidad hidroquímica de la subcuenca Yeguaré.

Figura VI-4 Diagrama de Schoeller época seca 2021 en la subcuenca Yeguaré.



La figura VI-5 muestra que durante la temporada de canícula del año 2021 las aguas subterráneas en la subcuenca Yeguaré presentan una predominancia del tipo bicarbonatada-carbonatada cálcicas-magnésicas. Esto sugiere un equilibrio entre diversos cationes y aniones que mantienen la composición hidroquímica de las aguas subterráneas.

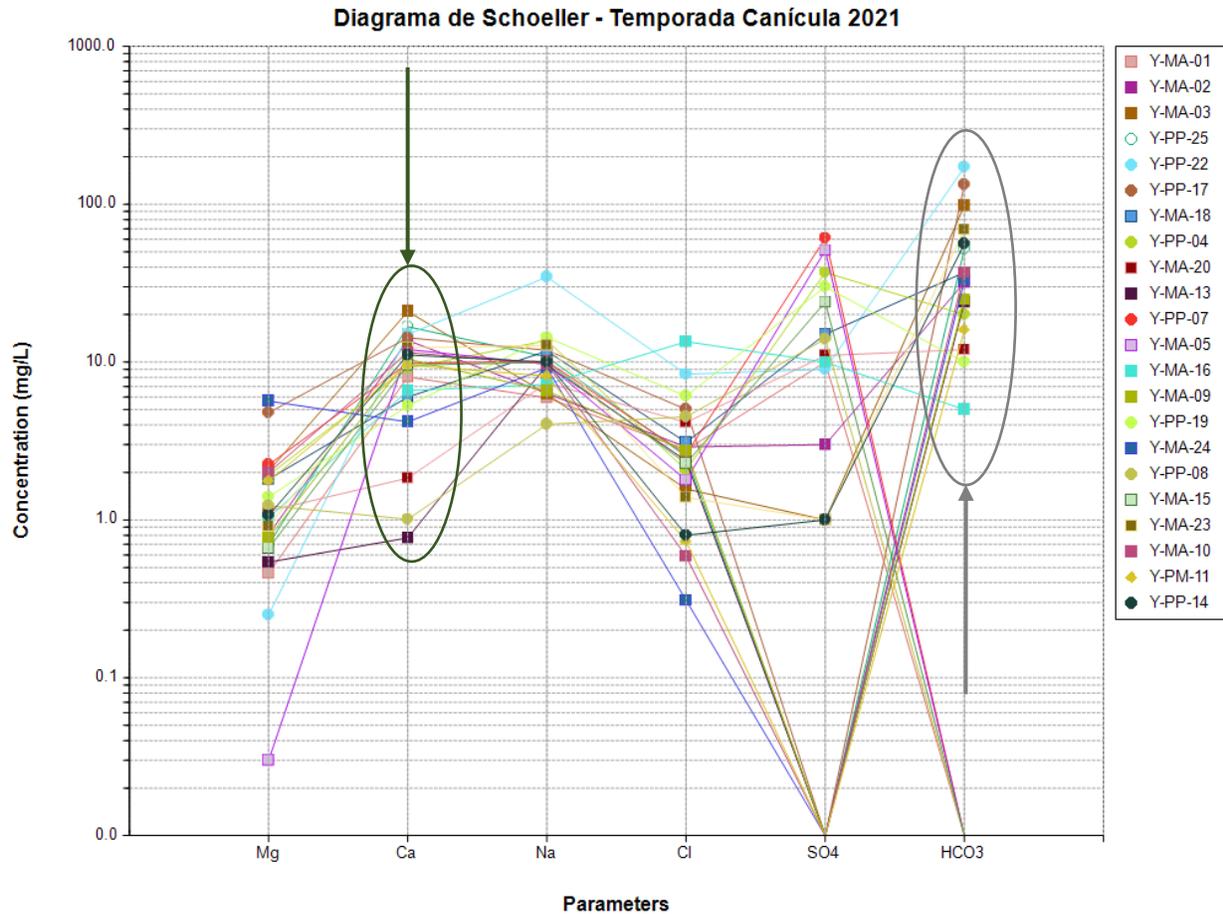
Figura VI-5 Diagrama de Piper temporada de canícula 2021 en la subcuenca Yeguaré.



La figura VI-6 detalla los tipos de agua basados en los aniones y cationes predominantes. Durante la temporada de canícula, el anión que prevalece es el bicarbonato, manteniendo un comportamiento similar al de las épocas anteriores, aunque con diferencias en los porcentajes de presencia. El catión predominante es el calcio, lo que lleva a que el tipo de agua más común sea el bicarbonatada cálcica, representando un 41 % de los datos analizados. Sin embargo, esta temporada también muestra una variedad de otros tipos de agua, lo que indica una diversidad hidroquímica:

- Sulfatada sódica (23 %),
- Bicarbonatada sódica (14 %),
- Sulfatada cálcica (14 %),
- Bicarbonatada magnésica (5 %), y
- Clorada cálcica (5 %).

Figura VI-6 Diagrama de Schoeller temporada de canícula 2021 en la subcuenca Yeguaré.

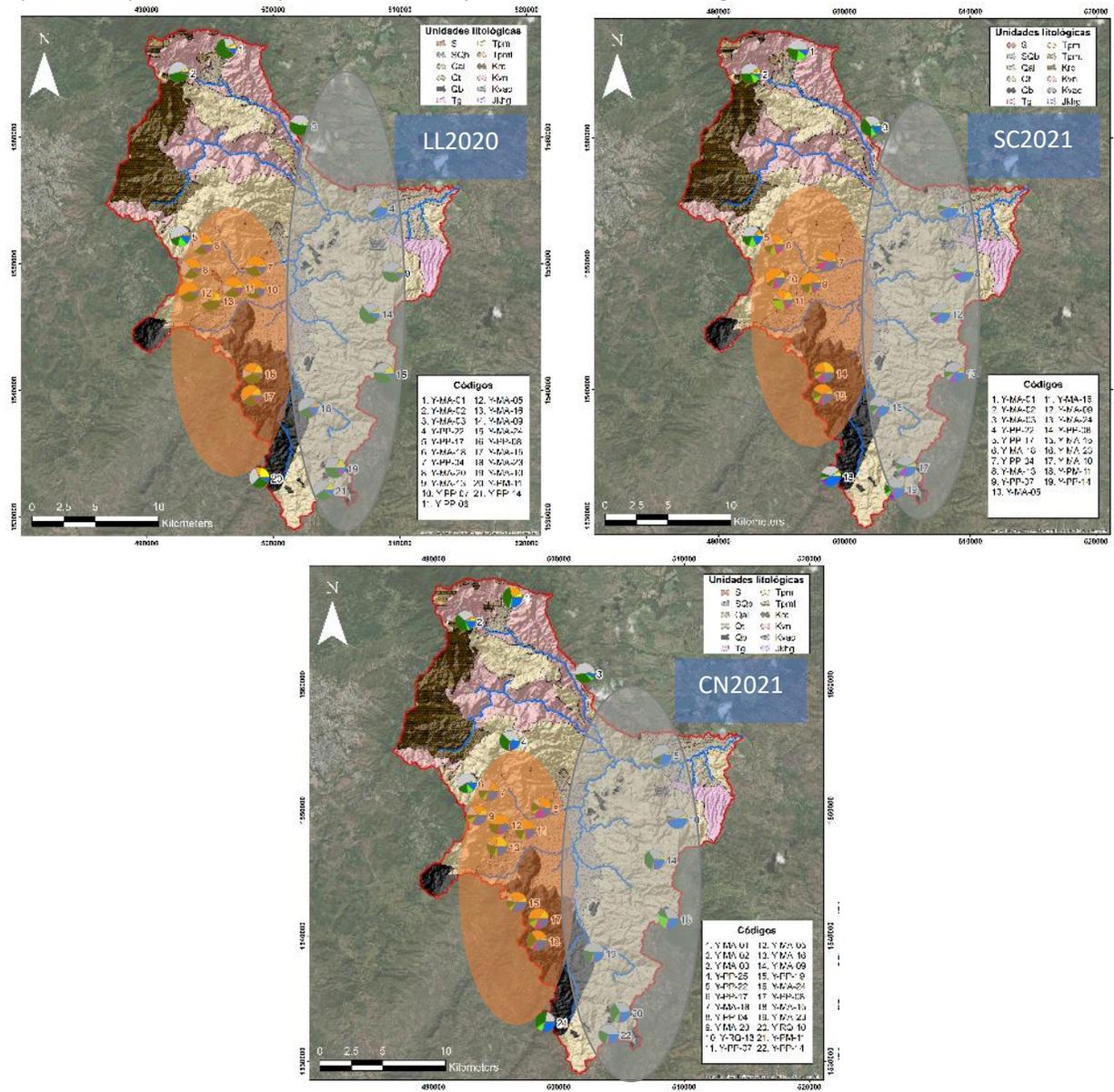


El mapa VI-2 revela similitudes destacadas entre dos grupos principales, que muestran variaciones consistentes en los cationes presentes, manteniendo el mismo anión mayoritario en los tres períodos de muestreo. Este patrón sugiere una cierta estabilidad en la composición química del agua en esas áreas específicas a lo largo del tiempo.

La identificación de estos grupos y la consistencia en sus perfiles iónicos proporciona información valiosa sobre la hidroquímica de la subcuenca. Estos hallazgos pueden tener implicaciones significativas para la comprensión de los procesos hidrológicos y la gestión de los recursos hídricos en la región, especialmente en lo que respecta a la calidad del agua y su variabilidad espacial y temporal.

La observación de estas similitudes resalta la importancia de realizar un análisis detallado de la composición química del agua y su variabilidad en diferentes puntos de muestreo a lo largo del tiempo, lo que puede proporcionar información crucial para la toma de decisiones en materia de gestión y protección de los recursos hídricos.

Mapa VI-2 Comportamiento temporal de los iones mayoritarios en la subcuenca Yeguaré.



Iones Mayoritarios Subcuenca Yeguaré

Evaluación de la calidad del agua para consumo humano y estrategias de gestión en la Subcuenca Yeguaré, 2020-2021
 Maestría en Recursos Hídricos con orientación en Hidrogeología
 Facultad de Ciencias
 Universidad Nacional Autónoma de Honduras
 Tegucigalpa M.D.C.; Honduras
 Elaboración propia, Fecha: Junio 2023
 Fuente: DEM y Divisiones Políticas - SINAH
 Delimitación y datos - IHCIT-UNAH
 Projected Coordinate System UTM
 Elipsoide WGS 84 Datum Horizontal WGS 84 Z16

Simbología

Zona de Estudio
Red Hídrica
Aniones y Cationes Mayoritarios

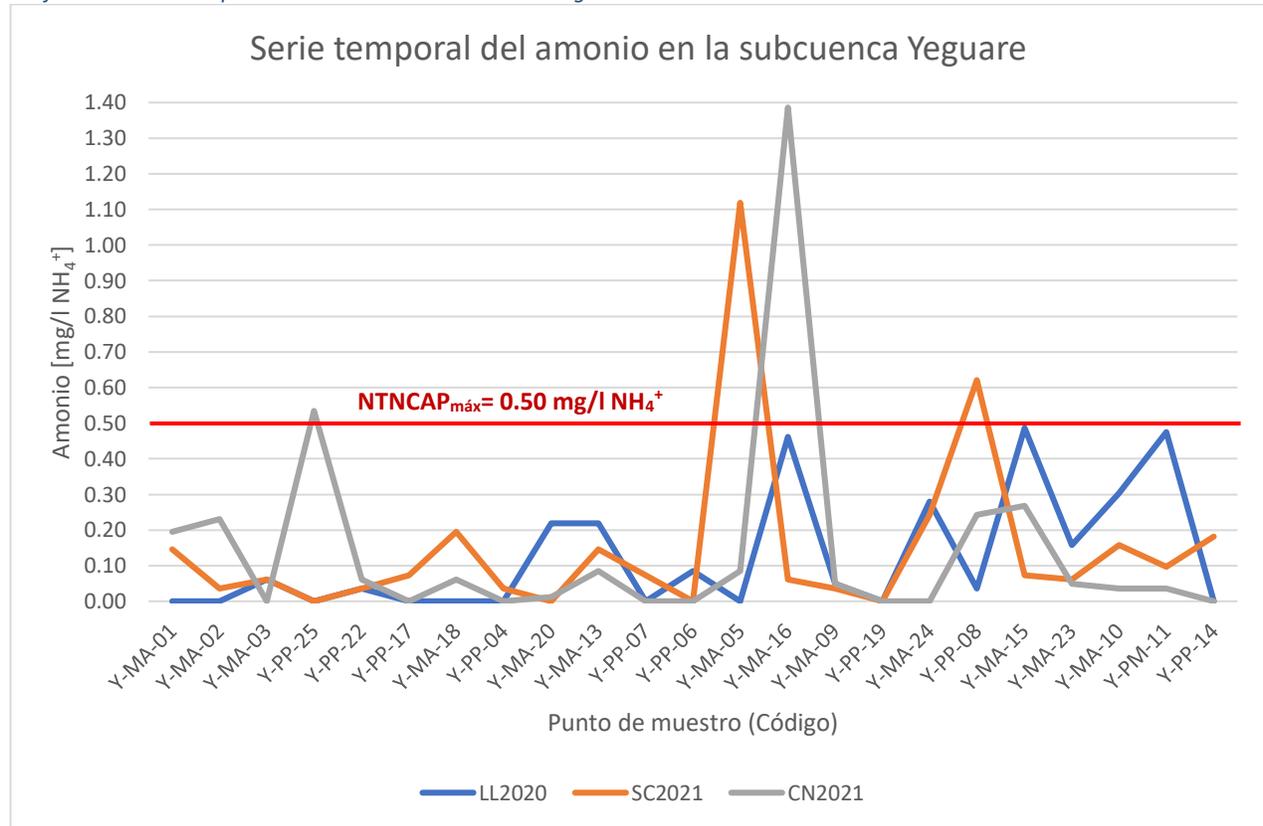
	SO4	K
	HCO3	Na
	Ca	Mg
	Cl	



C. NUTRIENTES

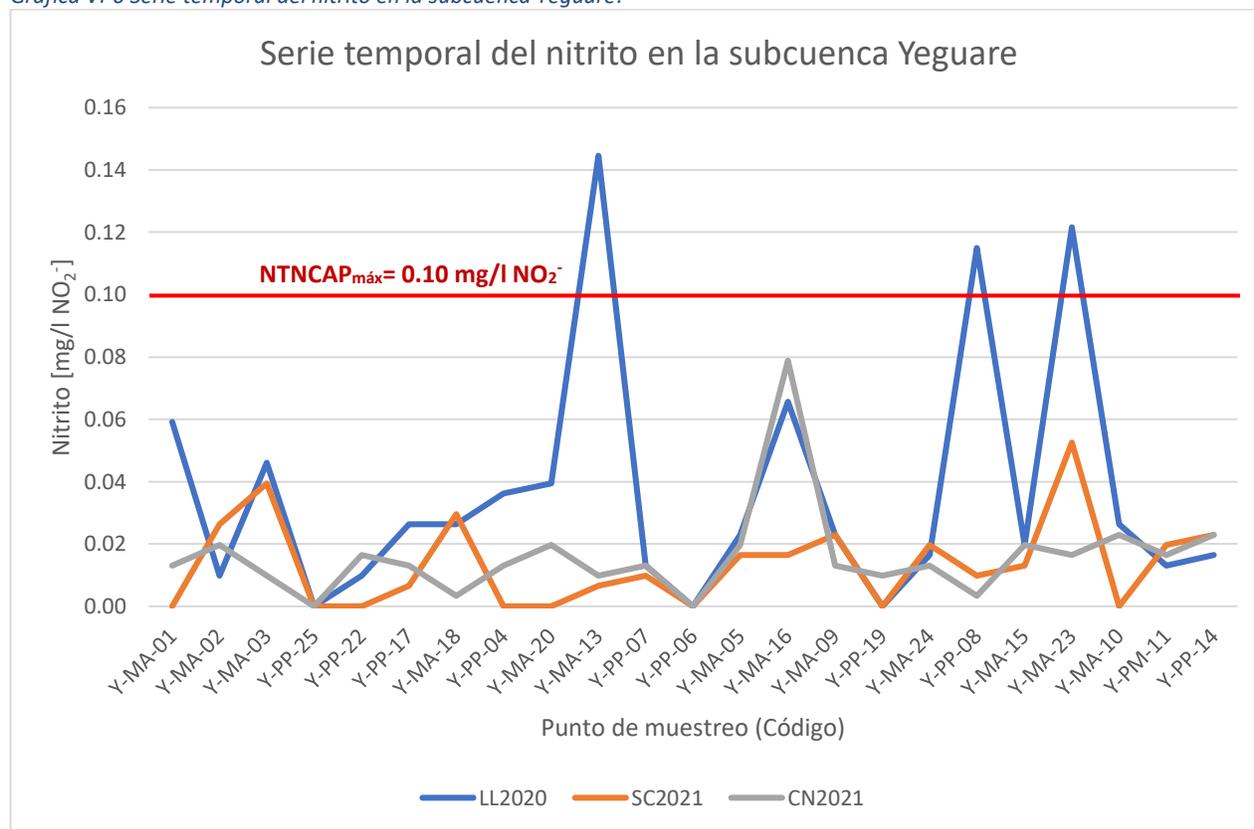
En la gráfica VI-5 se observa que el 94% de los valores de amonio obtenidos se encuentran por debajo del valor máximo admisible (0.50 mg/l NH_4^+), mientras que el 6% restante de las muestras supera el rango establecido por la normativa, afectando a 4 puntos de muestreo. Destacando que, durante la temporada de canícula del año 2021, el manantial de El Chagüite, Cuesta Grande, Tatumbla (Y-MA-16) exhibió el valor más alto de amonio, alcanzando 1.39 mg/l NH_4^+ .

Gráfica VI-5 Serie temporal del amonio en la subcuenca Yeguaré.



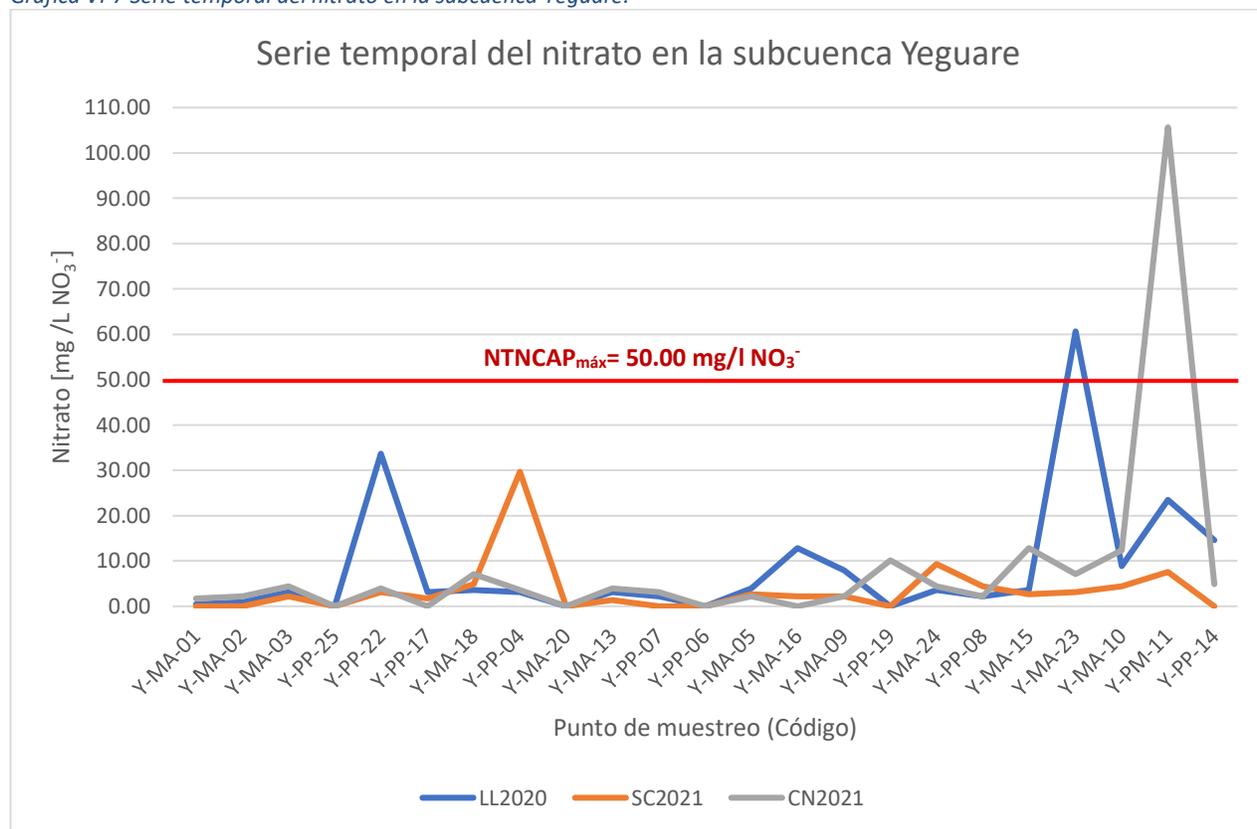
En la gráfica VI-6 se evidencia que el 95% de los valores de nitritos obtenidos se sitúan por debajo del valor máximo admisible, mientras que el 5% restante de las muestras supera el rango establecido por la normativa (0.10 mg/l NO_2^-), afectando a 3 puntos de muestreo. Es importante mencionar que, durante la época lluviosa del año 2020, la fuente de Ojo de Agua, Barrios Unidos (Y-MA-13), exhibió el valor más alto de nitritos, registrando 0.14 mg/l NO_2^- .

Gráfica VI-6 Serie temporal del nitrito en la subcuenca Yeguaré.



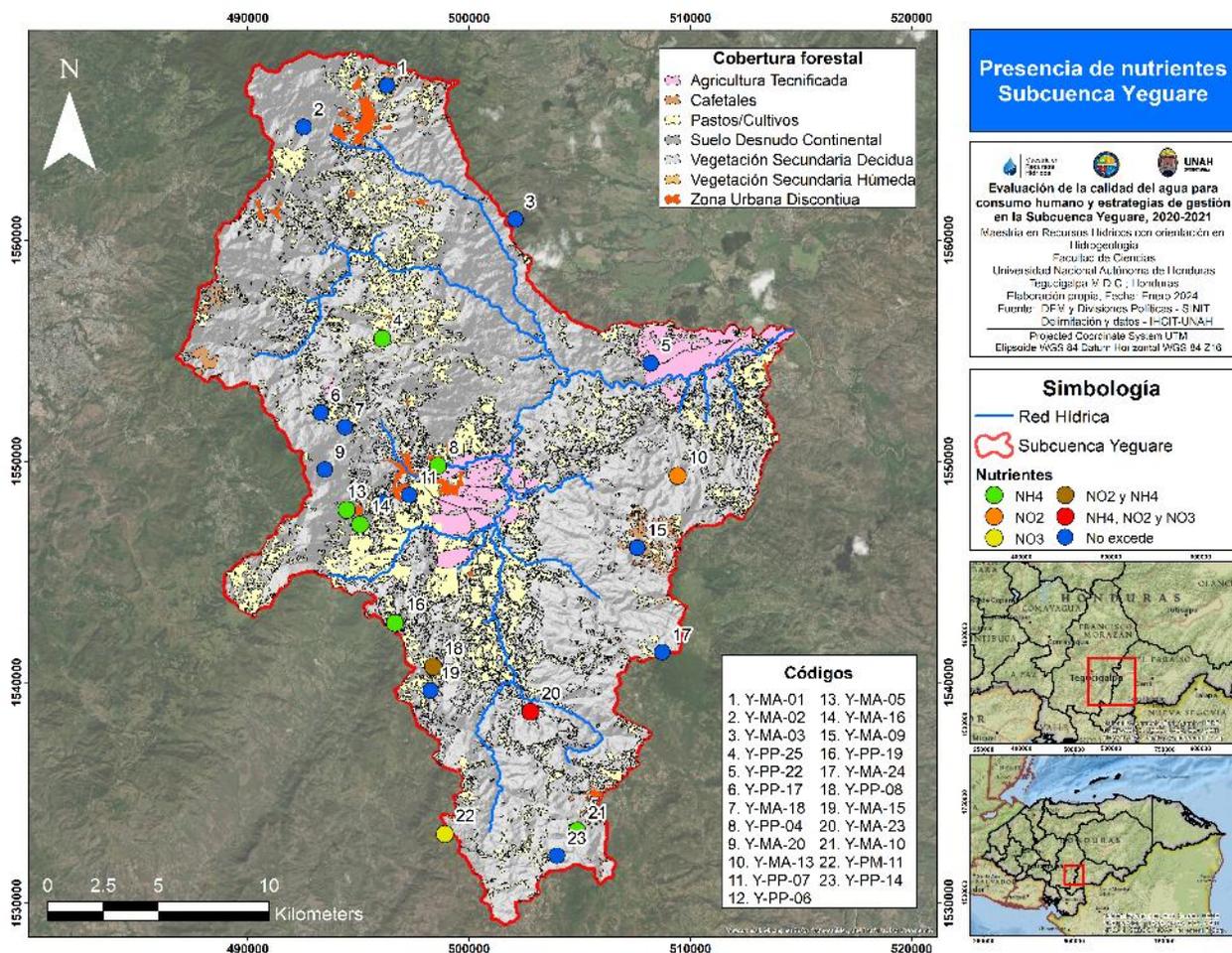
En la gráfica VI-7 se observa que el 97% de los valores de nitratos obtenidos se sitúan por debajo del valor máximo admisible (50.00 mg/l NO₃⁻), mientras que el 3% restante de las muestras supera el rango establecido por la normativa, afectando a 2 puntos de muestreo. Es relevante destacar que, durante la temporada de canícula del año 2021, el pozo malacate de Güinope (Y-PM-11), exhibió el valor más alto de nitratos, registrando 105.67 mg/l NO₃⁻.

Gráfica VI-7 Serie temporal del nitrato en la subcuenca Yeguaré.



En el mapa VI-3 se ha cartografiado la ubicación precisa de los puntos donde se han registrado concentraciones de nutrientes que exceden los límites establecidos por la NTNCAp. Estas concentraciones elevadas, particularmente prominentes en la zona sudoeste de la Subcuenca, destacan áreas específicas que requieren una atención urgente en términos de gestión y mitigación de la contaminación hídrica. La identificación precisa de estas áreas problemáticas proporciona una base sólida para la implementación de medidas correctivas específicas en torno a la contaminación por nutrientes en la zona.

Mapa VI-3 Concentraciones elevadas de nutrientes en la subcuenca Yeguaré.



Fuente: DEM y Divisiones Políticas – SINIT. Delimitación y datos - IHCIT-UNAH

D. METALES

i. Aluminio

De los valores obtenidos para el aluminio, el 41% se sitúa por debajo del límite máximo permitido (0.20 mg/l Al), mientras que el 59% restante supera el rango establecido por la normativa, afectando 14 puntos de muestreos. Es relevante señalar que, durante la temporada de canícula del año 2021, el manantial de Tierra Agría y el Encinillo (Y-MA-15) presentó el valor más elevado de aluminio, registrando 1.80 mg/l Al.

ii. Cadmio

De las muestras evaluadas para cadmio, solo se identificaron tres valores que superan el límite establecido por la normativa (0.003 mg/l Cd), representando un 9% del total de muestras analizadas, afectando 3 puntos de muestreos. Es importante señalar que el pozo malacate de Güinope (Y-PM-11) registró el valor más alto de cadmio durante la temporada de canícula del año 2021, alcanzando los 0.06 mg/l Cd.

iii. Cobre

En la subcuenca Yeguaré, se destaca que el 100% de los valores de cobre obtenidos se sitúan por debajo del valor máximo permitido según la normativa (5.00 mg/l Cu). Cabe resaltar que, durante la época lluviosa del año 2020, la toma #3, Macuelizo, Tatumbra (Y-MA-05) exhibió el valor más alto de cobre, alcanzando los 0.10 mg/l Cu. Este hallazgo sugiere que, en general, la concentración de cobre en las fuentes de agua evaluadas se mantiene dentro de los límites aceptables establecidos por la norma.

iv. Hierro

El 66% de los valores obtenidos para la concentración de hierro se encuentran por debajo del límite máximo permitido (0.30 mg/l Fe), mientras que el 34% restante de las muestras excede el rango establecido por la normativa, afectando 14 puntos de muestreos. El pozo perforado de La Estancia, San Antonio de Oriente (Y-PP-25), destaca al presentar el valor más elevado de la serie, registrando 13.87 mg/l Fe durante la temporada de canícula del año 2021. Es relevante mencionar que el promedio general de los valores es de 0.59 mg/l Fe, lo que proporciona un contexto adicional sobre la variabilidad en la concentración de hierro en las muestras analizadas.

v. Manganeso

La totalidad de los valores de manganeso obtenidos se sitúan por debajo del límite máximo permitido (0.50 mg/l Mn), indicando un cumplimiento satisfactorio con los estándares establecidos. Sin embargo, resulta notable que, durante la época seca del año 2021, el manantial de Tierra Agría y el Encinillo (Y-MA-15) exhibió el valor más elevado de manganeso, registrando 0.24 mg/l Mn.

vi. Plomo

El 87% de los valores de plomo no exceden el límite establecido por la normativa (0.01 mg/l Pb), mientras que el 13% restante supera dicho límite, afectando 4 puntos de muestreo. Destaca que, durante la época lluviosa del año 2020, la toma #3, Macuelizo, Tatumbra (Y-MA-05), presenta el valor más alto de plomo, alcanzando los 0.77 mg/l Pb.

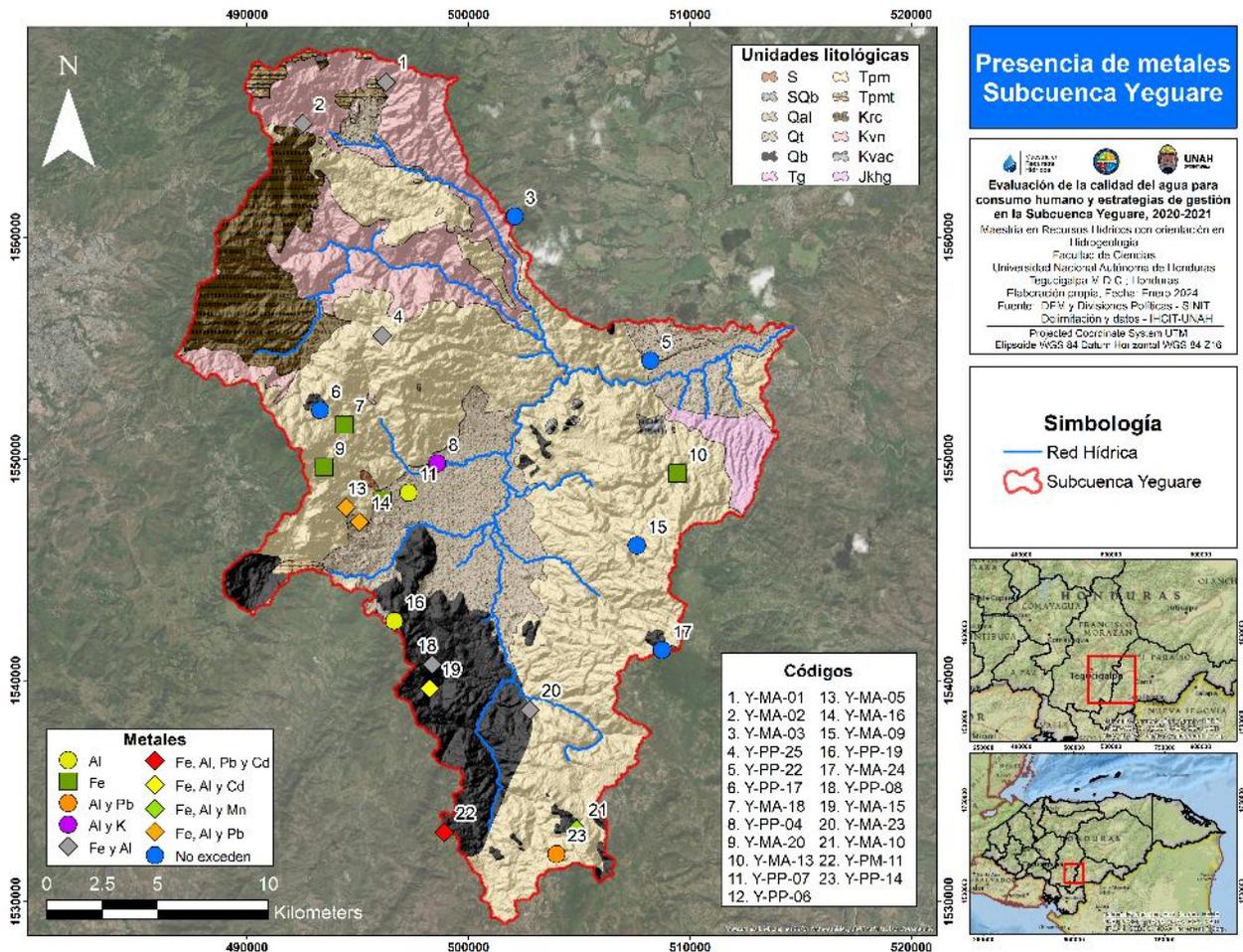
vii. Zinc

En el caso de los valores de zinc, se destaca que únicamente el pozo malacate de Güinope (Y-PM-11), durante la época lluviosa del año 2020, presenta un valor que supera la normativa (3.00 mg/l Zn), alcanzando los 7.43 mg/l Zn.

En el mapa VI-4 se detallan los puntos donde se han detectado niveles de metales superiores a los límites establecidos por la NTNCAP. Estas concentraciones, especialmente notables en la zona sudoeste de la subcuenca, resaltan áreas que requieren una acción inmediata para gestionar y mitigar la contaminación del agua.

La identificación precisa de estas áreas problemáticas proporciona una base sólida para implementar medidas correctivas específicas y asignar recursos eficazmente para abordar los desafíos de la calidad del agua entorno a la contaminación por metales en la subcuenca Yeguaré.

Mapa VI-4 Concentraciones elevadas de metales en la subcuenca Yeguaré.



Fuente: DEM y Divisiones Políticas – SINIT. Delimitación y datos - IHCIT-UNAH

E. DIAGRAMAS DE POURBAIX

De acuerdo con los datos analizados, los metales de interés principal fueron el aluminio y el hierro, y tal como se mencionó anteriormente, ambos afectan a 14 puntos de muestreo en diferentes épocas. El 59 % de los datos para el aluminio y el 3 4% para el hierro superan los límites establecidos por la normativa. Esta alta incidencia de concentración de metales en las fuentes de agua resalta la importancia de entender el estado químico de estos metales para poder ofrecer recomendaciones precisas de tratamiento y asegurar la calidad del agua.

Para lograr este objetivo, se utilizó los diagramas de Pourbaix, que permiten conocer las condiciones bajo las cuales los metales existen en diferentes formas químicas. Al aplicar esta herramienta, se pueden identificar los rangos de pH y ORP donde el aluminio y el hierro tienden a precipitarse o disolverse.

El 100 % de las muestras de hierro se presentan como óxido de hierro III ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) según la figura VI-7, lo que proporciona información valiosa sobre la forma predominante en la que se encuentra este metal en el agua. El óxido de hierro III es una forma común en la que el hierro puede precipitar en condiciones específicas de pH y potencial redox. Esta información es fundamental para comprender la movilidad y la disponibilidad del hierro en el agua, ya que diferentes formas químicas pueden tener distintos impactos en la calidad del agua y en la salud ambiental. Además, este conocimiento contribuye a diseñar estrategias de gestión específicas para controlar y mitigar los efectos adversos asociados con la presencia de óxido de hierro III.

La observación de que el 94% de las muestras de aluminio se presentan como óxido de aluminio III (Al_2O_3) en la temporada de canícula y la época lluviosa del 2021, según la figura VI-8, es indicativa de la forma predominante en la que se encuentra este metal en el agua durante esos períodos de muestreo. Sin embargo, el 4% de las muestras se encuentran en forma de ion Al^{3+} , y este porcentaje se corresponde únicamente con la toma #3, Macuelizo, Tatumbra (Y-MA-05) en ambos muestreos.

Es interesante destacar que el punto de muestreo Y-MA-05 se consideró un estudio de caso debido a sus condiciones ácidas. En todos los 5 muestreos analizados para aluminio en este punto, se observa que el 100% de las muestras se presenta como Al^{3+} , como se muestra en la figura VI-9.

Figura VI-8 Diagrama de Pourbaix del Aluminio en la subcuenca Yeguaré.

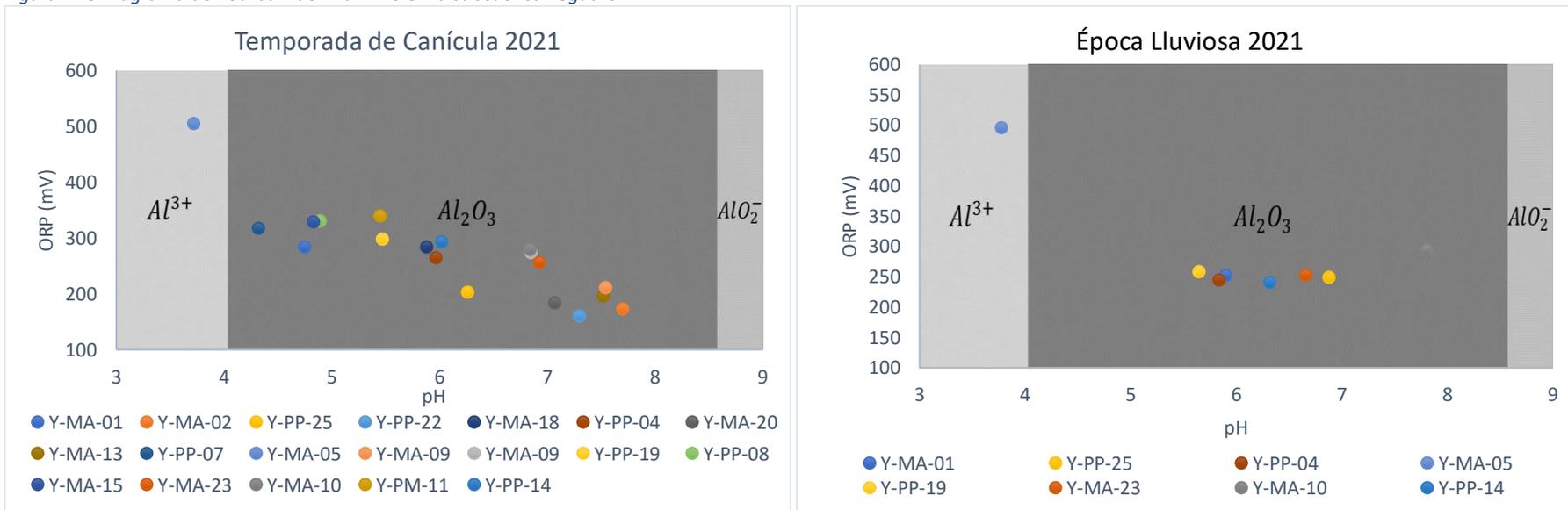
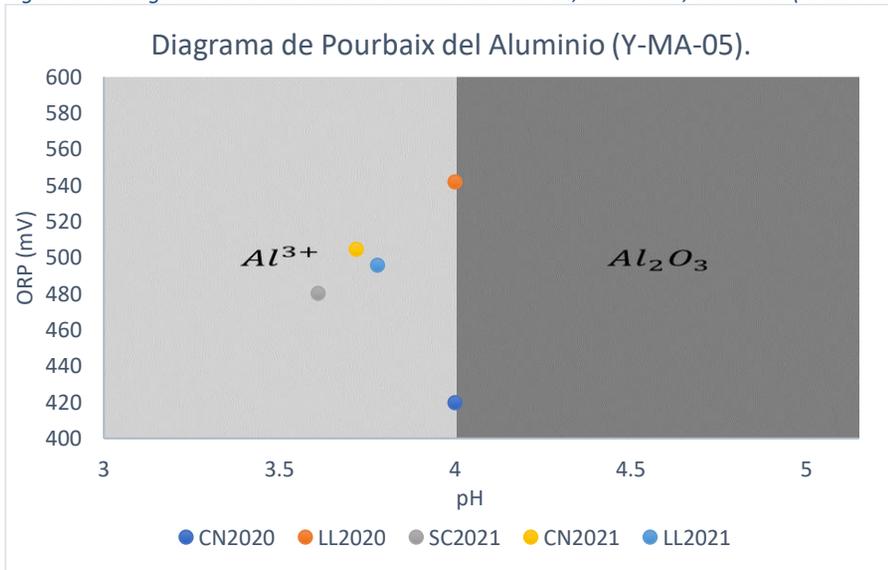


Figura VI-9 Diagrama de Pourbaix del Aluminio en toma #3, Macuelizo, Tatumbla (Y-MA-05).



La importancia del monitoreo hidroquímico de las aguas subterráneas radica en su capacidad para evaluar y garantizar la calidad del agua que se usa para consumo humano, riego, actividades industriales, entre otros. Además, proporciona datos valiosos para comprender la dinámica de los recursos hídricos subterráneos y para detectar la posible contaminación o alteraciones del agua subterránea.

En este contexto, la tabla VI-2 muestra una comparación detallada entre los valores promedio de diversos parámetros hidroquímicos y los valores de referencia establecidos para aguas subterráneas, naturales y las indicaciones definidas para consumo humano por la normativa nacional, y estándares internacionales. Esta comparación es esencial para identificar desviaciones significativas que puedan requerir medidas correctivas en la subcuenca Yeguaré.

Es particularmente relevante destacar que los valores promedios del pH, turbidez, amonio, aluminio, hierro y plomo superan los límites establecidos para consumo humano y se encuentran fuera del rango aceptable para aguas naturales. Estos parámetros son de especial importancia porque pueden tener impactos significativos en la salud pública y el medio ambiente. El pH fuera del rango ideal puede afectar la solubilidad de otros contaminantes y la corrosión de las infraestructuras. La turbidez elevada puede indicar la presencia de partículas suspendidas que pueden albergar patógenos. Los niveles elevados de amonio, aluminio, hierro y plomo son preocupantes debido a sus efectos tóxicos, y su presencia en concentraciones superiores a las recomendadas requiere atención urgente y medidas correctivas para garantizar la seguridad y calidad del agua.

Tabla VI-2 Comparación de los valores promedio de la subcuenca Yeguaré y los valores de referencia de los parámetros hidroquímicos.

Parámetro	Unidades	Resultados promedio para la subcuenca	Rango para aguas subterráneas	Rango para aguas naturales	Límites para consumo humano		
					NTNCAP	EPA	OMS
Conductividad	μS/cm	106.52	-----	Varía entre 100 y 2000	-----	-----	-----
Potencial de Hidrógeno (pH)	Adimensional	6.23	-----	6.5-8.0 excepcionalmente 3-11	6.5-8.5	6.5-8.5	-----
Porcentaje de Reducción de Oxígeno (ORP)	mV	276.60	-----	Entre +700 y -480	-----	-----	-----
Temperatura	°C	25.55	1-30	-----	-----	-----	-----
Turbidez	NTU	23.07	-----	Menor a 1	5.00	5.00	-----
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	mg/l	80.45	-----	-----	1000.00	500.00	-----
Bicarbonatos	mg/l HCO ₃ ⁻	32.40	0.00-305.08	50-350 hasta 800	-----	-----	-----
Calcio	mg/l Ca	8.47	2.01-200.40	10-250	-----	-----	-----
Carbonatos	mg/l CO ₃ ²⁻	0.41	-----	Si pH<8.3 se considera 0 pH>8.3 hasta 50	-----	-----	-----
Cloruros	mg/l Cl ⁻	4.09	1.78-70.90	10-250	250.00	250.00	-----
Magnesio	mg/l Mg	1.25	1.22-48.61	1-100	12.14	---	-----
Potasio	mg/l K	3.10	0.40-7.82	0.1-10	10.00	---	-----
Sodio	mg/l Na	8.09	2.30-45.98	1-150	200.00	---	-----
Sulfatos	mg/l SO ₄ ²⁻	14.73	0.97-480.30	2-250 hasta 500	250.00	250.00	-----
Amonio	mg/l NH ₄ ⁺	1.43	-----	< 0.1, hasta 400	0.50	---	-----
Nitratos	mg/l NO ₃ ⁻	6.97	0.07-12.41	0.1-10	50.00	44.27	50.00
Nitritos	mg/l NO ₂ ⁻	0.023	-----	----	0.10	3.28	3.00
Aluminio	mg/l Al	0.48	-----	0.005-0.3, hasta 100 en aguas muy ácidas	0.2000	0.2000	-----
Cadmio	mg/l Cd	0.00254	-----	-----	0.003	0.005	0.003
Cobre	mg/l Cu	0.011	-----	-----	2.00	1.00	2.00
Hierro	mg/l Fe	0.77	0.00-27.93	0-1	0.30	0.30	-----
Manganeso	mg/l Mn	0.04	-----	< 0.2, hasta 1	0.50	0.05	-----
Plomo	mg/l Pb	0.0154	-----	Hasta 0.012	0.01	0.015	0.01
Zinc	mg/l Zn	0.14	-----	-----	3.00	5.00	-----

¹(Vázquez-Suñé E., 2009)

²(Custodio & Llamas, 2001)

6.2 Calidad de agua

El ICA proporcionó información sobre la calidad del agua subterránea en la Subcuenca Yeguaré, así como la diferencia de parámetros a considerar y límites máximos admisibles que existe entre los criterios establecidos por la NTNCAP (1995), y las directrices de la EPA (2009) y la OMS (2018). Estos resultados permitieron identificar la calidad del agua en la zona de estudio de manera cuantitativa, lo que es fundamental para tomar decisiones informadas sobre el manejo y tratamiento del recurso hídrico. Los valores obtenidos del índice se observan en la tabla VI-3.

Tabla VI-3 Calidad del agua subterránea en la Subcuenca Yeguaré.

Punto de muestreo (código)	Según NTNCAP (1995)		Según EPA (2009)		Según OMS (2018)	
	CCME _{wqi}	Clasificación	CCME _{wqi}	Clasificación	CCME _{wqi}	Clasificación
Y-MA-01	56.39	Marginal	50.38	Marginal	45.06	Marginal
Y-MA-02	45.09	Marginal	41.74	Pobre	39.20	Pobre
Y-MA-03	82.03	Buena	79.35	Regular	64.98	Marginal
Y-PP-25	41.80	Pobre	39.31	Pobre	40.58	Pobre
Y-PP-22	100.00	Excelente	100.00	Excelente	100.00	Excelente
Y-PP-17	91.94	Buena	85.67	Buena	87.12	Buena
Y-MA-18	41.80	Pobre	38.40	Pobre	37.20	Pobre
Y-PP-04	65.90	Regular	81.70	Buena	75.70	Regular
Y-MA-20	43.67	Pobre	41.62	Pobre	38.74	Pobre
Y-MA-13	52.03	Marginal	50.53	Marginal	45.25	Marginal
Y-PP-07	86.89	Buena	77.50	Regular	87.86	Buena
Y-PP-06	82.94	Buena	73.55	Regular	100.00	Excelente
Y-MA-05	56.63	Marginal	60.48	Marginal	58.53	Marginal
Y-MA-16	53.63	Marginal	50.01	Marginal	48.11	Marginal
Y-MA-09	49.88	Marginal	45.03	Marginal	41.16	Pobre
Y-PP-19	63.68	Marginal	77.57	Regular	100.00	Excelente
Y-MA-24	88.14	Buena	82.90	Buena	71.45	Regular
Y-PP-08	65.87	Regular	63.03	Marginal	57.63	Marginal
Y-MA-15	47.97	Marginal	40.60	Pobre	41.32	Pobre
Y-MA-23	48.68	Marginal	44.77	Pobre	40.96	Pobre
Y-MA-10	53.68	Marginal	50.30	Marginal	46.73	Marginal
Y-PM-11	57.25	Marginal	53.76	Marginal	55.83	Marginal
Y-PP-14	74.07	Regular	73.14	Regular	63.66	Marginal

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos del índice de calidad del agua, aplicando criterios establecidos por la EPA y la OMS, muestran un aumento significativo en el número de fuentes de agua clasificadas como "Pobre", en comparación con las clasificaciones obtenidas aplicando la NTNCAP. Este cambio se refleja claramente en la tabla VI-4.

Tabla VI-4 Comparación de clasificaciones obtenidas para el CCME_{WQI} en la subcuenca Yeguaré.

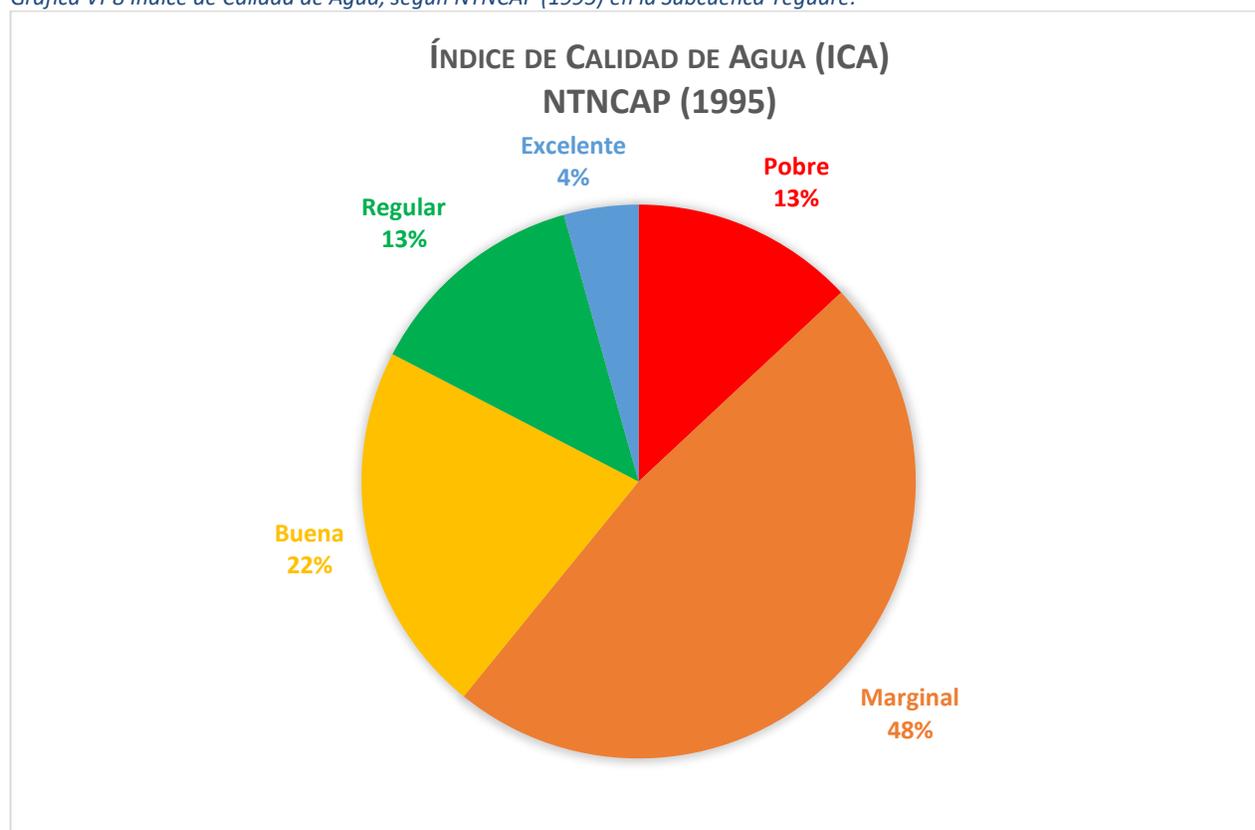
Clasificación CCME _{WQI}	Según NTNCAP	Según EPA	Según OMS
Excelente	1	1	3
Buena	5	3	2
Regular	3	5	2
Marginal	11	8	9
Pobre	3	6	7

Fuente: Elaboración propia

Este hallazgo destaca la necesidad de revisar y actualizar la normativa hondureña para armonizarla con estándares internacionales. Las diferencias en la clasificación sugieren que la normativa actual puede no ser lo suficientemente rigurosa para captar la verdadera calidad del agua, lo que podría implicar riesgos para la salud pública y el medio ambiente. Además, la inclusión de parámetros adicionales y el reajuste de los valores límite se hacen necesarios para asegurar que las evaluaciones reflejen con precisión el estado de la calidad del agua.

De acuerdo con los resultados obtenidos según los criterios establecidos por la NTNCAP (1995), como se observa en la gráfica VI-8 el 4 8% de las fuentes de agua presentan una clasificación de “Marginal”, y el 13 % presentan una clasificación de “Pobre”, es decir que el 61 % de las fuentes tienen una calidad de agua deficiente, lo que puede implicar problemas de contaminación para el consumo humano u otros usos.

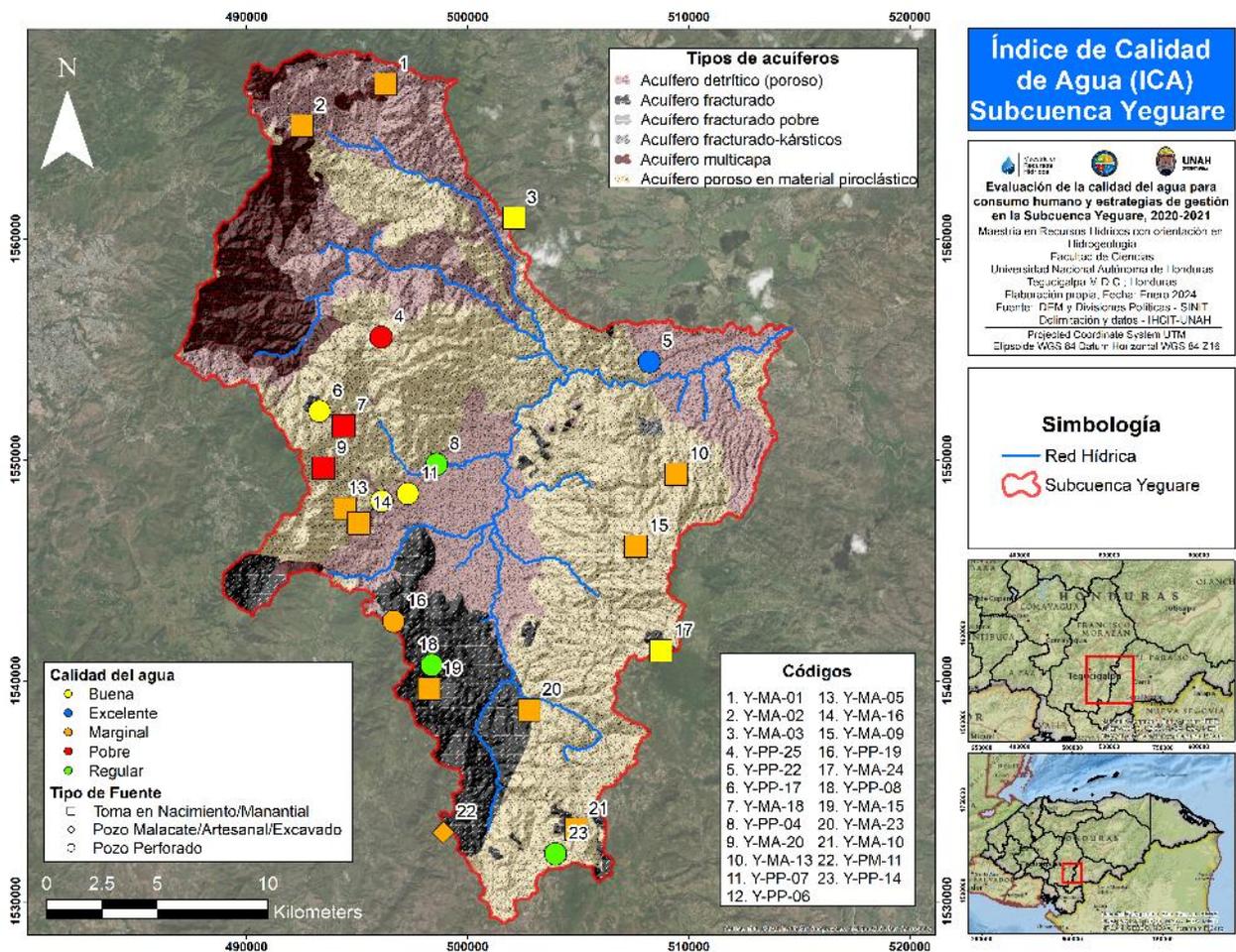
Gráfica VI-8 Índice de Calidad de Agua, según NTNCAP (1995) en la Subcuenca Yeguaré.



Por otro lado, se destaca que solo el pozo perforado de El Censo, Morocelí (Y-PP-22) alcanza la clasificación de “Excelente”, el nivel más alto en la escala de calidad del agua. Esto significa que las fuentes analizadas no cumplen con los estándares de calidad más rigurosos y que aún hay áreas de mejora para garantizar una calidad del agua óptima.

En el mapa VI-5, se aprecia claramente que los puntos de muestreo ubicados en las proximidades de la RBU (al sudoeste de la subcuenca) exhiben una diversidad en la calidad del agua, que va desde niveles aceptables hasta preocupantes. Esta variabilidad resalta la importancia de esta área como un punto focal para el análisis y la gestión de la calidad del agua, dada su relevancia ambiental y su potencial impacto en la salud de los ecosistemas circundantes.

Mapa VI-5 Índice de Calidad de Agua según NTNCAP en la subcuenca Yeguaré.



Fuente: DEM y Divisiones Políticas – SINIT. Delimitación y datos - IHCI-UNAH

6.3 Gestión Integrada del Recurso Hídrico

A. RIESGOS HÍDRICOS QUE IMPACTAN EN LA CALIDAD DEL AGUA

La Subcuenca Yeguaré es un sistema hídrico que desempeña un papel fundamental en la región, tanto por su relevancia ecológica como por su contribución al desarrollo de las comunidades circundantes. Este sistema provee agua a localidades como Tatumbla, que está experimentando un crecimiento periurbano, San Antonio de Oriente, y a las aldeas vecinas. Asimismo, la subcuenca incluye áreas protegidas de gran importancia, como la RBU, parte de la Reserva Biológica Monserrat y parte del Parque Nacional La Tigra, fuentes vitales de agua y biodiversidad. A pesar de su significado, este sistema enfrenta una serie de desafíos complejos que ponen en riesgo su integridad y sostenibilidad. Por lo tanto, la gestión integral de los recursos hídricos en la Subcuenca Yeguaré es una necesidad urgente para abordar los desafíos que enfrenta la región y para garantizar que los recursos hídricos estén disponibles y sean de calidad para las generaciones futuras. Este enfoque debe ser inclusivo y adaptativo para abordar las cambiantes necesidades y circunstancias de la subcuenca y sus comunidades.

A partir de los análisis realizados en capítulos anteriores, se pueden identificar los siguientes aspectos clave para abordar esta problemática:

i. Medio físico y uso del suelo

La geología de la subcuenca Yeguaré influye de manera significativa en la composición química y calidad del agua subterránea. Elementos como el aluminio, hierro, plomo, cadmio, manganeso y zinc están presentes debido a la naturaleza de las formaciones y procesos geológicos en curso, como la erosión, la meteorización y el lixiviado de minerales como la bauxita. Por esta razón, se destaca la necesidad de estudios hidrogeológicos detallados para entender cómo estas condiciones geológicas afectan la calidad del agua.

Por otro lado, el desarrollo y crecimiento periurbano en la subcuenca están ejerciendo una presión adicional sobre los recursos hídricos. Específicamente, el impacto humano en la calidad del agua, como la descarga de aguas residuales, está estrechamente relacionado con el uso del suelo y podría estar contribuyendo al perfil de metales pesados observado, así como a otros aspectos hidroquímicos.

En resumen, tanto la geología local como el desarrollo humano están influyendo significativamente en la calidad del agua en la subcuenca Yeguaré, lo que subraya la importancia de abordar estos factores en la gestión integral de los recursos hídricos.

ii. Calidad del agua

Los análisis físicos, químicos y microbiológicos realizados revelan una disparidad en la calidad del agua a lo largo de la subcuenca Yeguaré. Se han detectado concentraciones elevadas que superan los límites aceptables de metales como el aluminio y el hierro en 14 de los 23 puntos de muestreo. Asimismo, se han identificado puntos de muestreo con presencia de metales como el potasio, plomo, cadmio, manganeso y zinc.

Aunque la mayoría de los compuestos nitrogenados se encuentran dentro de los límites seguros, se han observado concentraciones elevadas en diversos puntos, siendo un caso destacado la Fuente de Galeras en Güinope (Y-MA-23), que presenta niveles altos de amonio, nitritos y nitratos.

Estas condiciones químicas adversas también afectan los parámetros físicos del agua, como el pH y la turbidez que muestra valores fuera de norma en 15 y 17 puntos respectivamente. Además, más del 50% de los pozos y manantiales presentan signos de contaminación biológica, lo que indica una influencia antropogénica significativa en la calidad del agua.

B. ESTRATEGIAS DE GESTIÓN

Frente a esta contextualización, los resultados indican la necesidad de estrategias de gestión que favorezcan la sostenibilidad de los recursos hídricos en la subcuenca Yeguaré. Esto implica promover medidas de conservación del agua y la implementación de prácticas de uso eficiente. Además, se destaca la importancia de delimitar zonas de aprovechamiento responsable del agua, donde se establezcan normativas y acciones para garantizar su uso adecuado y preservar la calidad del recurso hídrico a largo plazo. Estas estrategias deben ser diseñadas e implementadas de manera participativa e inclusiva, involucrando a todos los actores relevantes, desde las comunidades locales hasta las autoridades gubernamentales y los expertos en recursos hídricos.

La subcuenca Yeguaré presenta varias áreas que requieren atención para una gestión eficaz de los recursos hídricos. En términos de gobernabilidad y gobernanza del agua, es crucial fortalecer las políticas y normativas que regulan su uso y conservación, así como cumplir con las declaratorias requeridas en la zona. Además, se observa una necesidad significativa de mejorar la recopilación y actualización de datos, lo que permitirá una comprensión más completa de las dinámicas hídricas de la subcuenca y facilitará una toma de decisiones más informada.

La influencia de las actividades agrícolas y el uso del suelo subrayan la importancia de implementar estrategias efectivas para preservar la calidad del agua. Asimismo, es fundamental desarrollar mecanismos más robustos para evaluar y mitigar los riesgos hídricos, como inundaciones y sequías, protegiendo tanto a

las comunidades locales como a los ecosistemas. Estas interpretaciones resaltan la necesidad de una intervención integral y coordinada para mejorar la gestión de los recursos hídricos en la subcuenca Yeguaré.

Las estrategias destinadas a la gestión de los recursos hídricos en la Subcuenca Yeguaré requieren un enfoque integral y multifacético para abordar los desafíos desde diversas perspectivas. Esta integralidad se manifiesta a través de cuatro enfoques principales:

1. Estructuras de gobernabilidad y mejorar las prácticas de gobernanza del agua.
2. Adquisición y aplicación del conocimiento relacionado con el agua.
3. Prácticas para la conservación y uso responsable del suelo.
4. Identificación y mitigación de los peligros asociados al agua – riesgos hídricos.

En conjunto, estos cuatro enfoques proporcionan una base sólida para la gestión integral de los recursos hídricos en la Subcuenca Yeguaré. Al abordar estos aspectos de manera coordinada, es posible avanzar hacia un uso sostenible y responsable del agua, asegurando tanto el bienestar de las comunidades locales como la preservación de los ecosistemas que dependen de este recurso.

i. Estructuras de gobernabilidad y mejorar las prácticas de gobernanza del agua

Es importante entender que la gobernabilidad y gobernanza son complementarias y se refuerzan mutuamente. La gobernabilidad proporciona el marco institucional y legal para la gestión del agua, estableciendo políticas, regulaciones y normativas que guían las acciones en este ámbito. Por su parte, la gobernanza se ocupa de la implementación práctica de estas políticas, involucrando a diferentes actores, como gobiernos, comunidades locales, empresas y organizaciones no gubernamentales, en la toma de decisiones y la ejecución de proyectos relacionados con el agua (Rogers, 2003).

La gobernabilidad y gobernanza del agua es fundamental para establecer un equilibrio sostenible entre las necesidades humanas y la preservación del medio ambiente. El primer paso hacia una GIRH eficaz requiere establecer una estrategia sólida que integre ambos aspectos: gobernabilidad y gobernanza. Con una base de gobernabilidad sólida, es posible implementar políticas efectivas y garantizar el cumplimiento. Al mismo tiempo, una buena gobernanza permite adaptarse a las necesidades cambiantes y asegurarse de que todas las partes interesadas participen activamente en el proceso de gestión.

En resumen, la dualidad entre gobernabilidad y gobernanza del agua es clave para equilibrar las necesidades humanas con la conservación del medio ambiente.

a) Ordenanzas municipales para la explotación subterránea

El manejo de la explotación subterránea y la supervisión del uso del agua son aspectos cruciales que demandan una regulación precisa y un marco normativo transparente para los usuarios. En el contexto de la Subcuenca Yeguaré, se sugiere la implementación de ordenanzas municipales enfocadas en licencias de explotación, permisos de construcción que exijan un sistema de alcantarillado sanitario y la implementación de un canon por el uso del agua, a cargo del gobierno local a nivel municipal tal y como lo enmarca la Ley General de Aguas.

b) Consejo de la subcuenca Yeguaré

Para fortalecer la gobernanza hídrica a nivel regional en la Subcuenca Yeguaré, se sugiere la instauración del Consejo de la Subcuenca Yeguaré, el cual operaría bajo los principios de inclusividad, transparencia y eficacia. Este consejo se establecería como un mecanismo crucial para la implementación de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) en la subcuenca, proporcionando un espacio de diálogo, coordinación y toma de decisiones entre los diversos actores involucrados (Pahl-Wostl C. , 2015).

El Consejo de la Subcuenca Yeguaré debe estar compuesto por una amplia representación de partes interesadas, incluyendo autoridades locales, instituciones gubernamentales pertinentes, organizaciones comunitarias, líderes indígenas, académicos y expertos en recursos hídricos. Esto garantizaría una participación inclusiva y una variedad de perspectivas en la toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua (La Gaceta, 2009).

El Consejo de la Subcuenca Yeguaré tendría como objetivo principal coordinar las acciones y políticas relacionadas con la gestión del agua en la región. Esto incluiría la elaboración de planes de manejo hídrico, la implementación de medidas de conservación y restauración, la supervisión de la calidad del agua, supervisión del manejo de las aguas residuales domésticas y agroindustriales, y la resolución de conflictos relacionados con el uso del agua.

El Consejo también podría establecer mecanismos de financiamiento para proyectos relacionados con la gestión del agua y el saneamiento, promoviendo la educación y la conciencia pública sobre la importancia de los recursos hídricos y las prácticas de saneamiento sostenible. Asimismo, el Consejo puede desempeñar un papel clave al facilitar la colaboración entre diferentes sectores y comunidades, permitiendo un enfoque integrado en la gestión del agua y el saneamiento.

En resumen, la creación del Consejo de la Subcuenca Yeguaré sería un paso fundamental hacia una gestión más efectiva y sostenible de los recursos hídricos en la región, asegurando la participación activa de todas las partes interesadas y promoviendo el uso responsable y equitativo del agua.

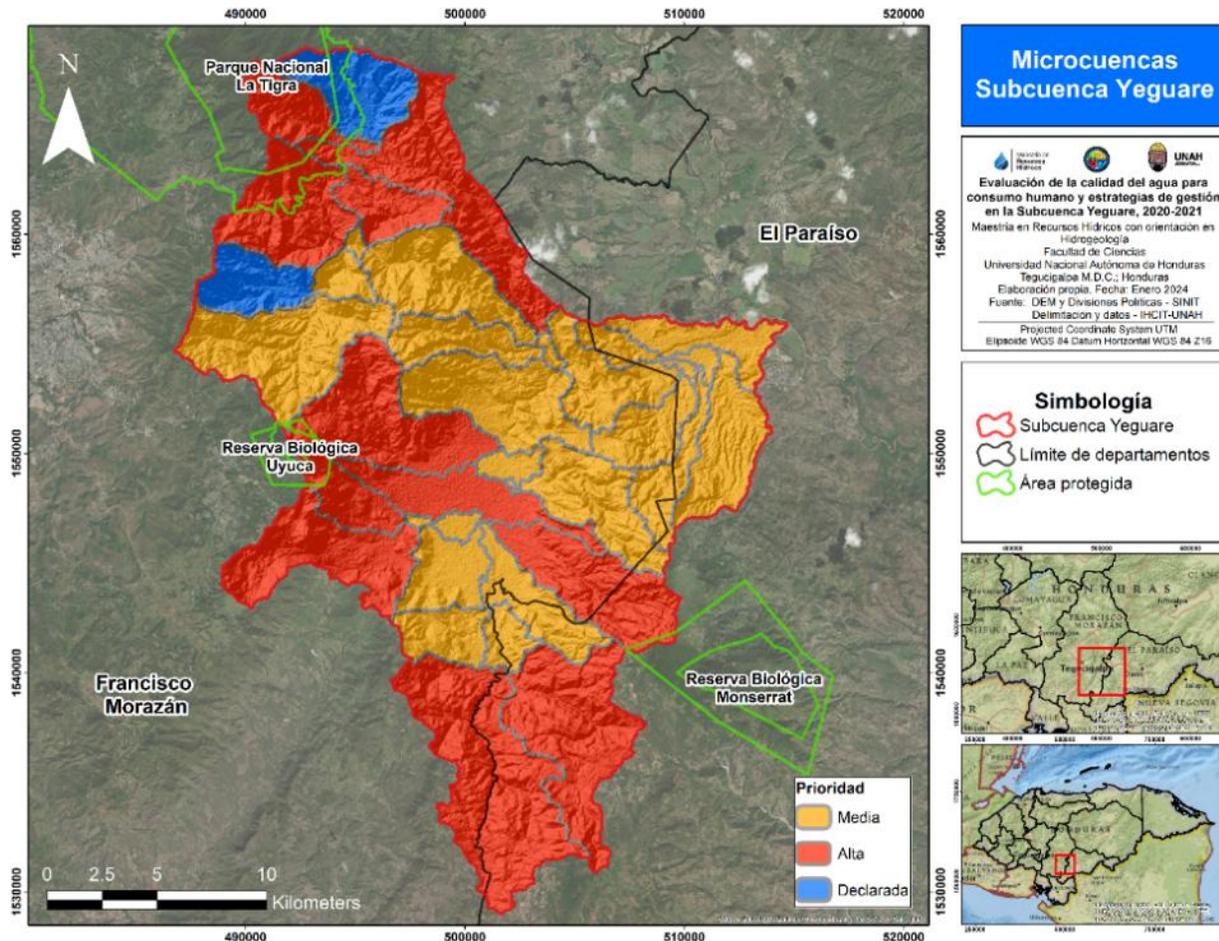
c) Declaratoria de microcuencas

Una declaración de microcuenca es un reconocimiento legal y técnico certificado, emitido por el ICF como lo establece el artículo 65 de la Ley Forestal Áreas Protegidas y Vida Silvestre (decreto No.156-2007), que designa una zona productora de agua como área de protección forestal. Esta acción implica un proceso colaborativo entre entidades gubernamentales, como las alcaldías municipales, y organizaciones de la sociedad civil, como las juntas de agua y los consejos consultivos forestales (CCM, 2021). La declaración de microcuenca es un paso crucial en la protección y gestión sostenible de los recursos hídricos. Al obtener el reconocimiento legal y técnico del ICF, las áreas designadas como microcuencas se benefician de medidas de conservación específicas, que pueden incluir la preservación de bosques, la implementación de prácticas agrícolas sostenibles y la promoción de actividades que protejan la calidad del agua. Esta colaboración entre actores locales fortalece la capacidad de las comunidades para gestionar de manera efectiva sus recursos hídricos y promueve un enfoque integral hacia la sostenibilidad ambiental.

La delimitación del territorio hondureño en cuencas, subcuencas y microcuencas fue realizada por la DGRH-SERNA en convenio interinstitucional con el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) en el 2017. Esta delimitación se basa en la topografía del terreno y utiliza el Modelo Digital de Elevación (MDE) de la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), de 30 metros de resolución, misma que posteriormente fue hidro-condicionada y corregida.

Las microcuencas se definieron a partir de las intersecciones de los drenajes con un umbral de 10,000 píxeles de acumulación sobre el MDE hidro-condicionado. Esta delimitación es fundamental para proponer la declaratoria de microcuencas en la Subcuenca Yeguaré, priorizando aquellas ubicadas cerca de áreas protegidas y aquellas con un deterioro en la calidad del agua según el CCME_{WQI}. Este enfoque de priorización se visualiza en el mapa VI-6.

Mapa VI-6 Declaratoria de microcuencas de la subcuenca Yeguaré.



Fuente: (Moserrate et al.,2017)

d) Fortalecimiento de las capacidades municipales y de actores claves

Para fortalecer el empoderamiento de las municipalidades y otros actores clave, es fundamental proporcionar capacitaciones sobre temas relevantes relacionados con la conservación y la sostenibilidad de los recursos hídricos. Estas capacitaciones permitirían que las partes interesadas adquieran un conocimiento profundo sobre los desafíos y soluciones en torno al manejo del agua, así como las herramientas y habilidades necesarias para abordarlos de manera efectiva.

La formación y la actualización constante de los actores involucrados son esenciales para garantizar una gestión hídrica sólida y sostenible a largo plazo. Esto les permite estar preparados para abordar los cambios y desafíos en el panorama del agua, así como para aprovechar las oportunidades emergentes para mejorar la gestión y conservación de los recursos hídricos. En última instancia, estas capacitaciones contribuyen a construir capacidades sólidas y a fomentar un enfoque colaborativo y proactivo hacia la gestión del agua.

Basándose en lo expuesto anteriormente, se propone la implementación de capacitaciones técnicas y programas de sensibilización que abarquen una variedad de aspectos, incluyendo el uso de herramientas tecnológicas actualizadas, la promoción de la cooperación interinstitucional y la participación activa del público en la toma de decisiones.

ii. Adquisición y aplicación del conocimiento relacionado con el agua

Para optimizar la adquisición y aplicación del conocimiento relacionado con el agua en esta área, es crucial implementar estrategias que permitan la acumulación de insumos técnicos y científicos confiables. Esto implica promover la investigación interdisciplinaria y la colaboración entre diferentes instituciones académicas, centros de investigación y actores gubernamentales y no gubernamentales involucrados en la gestión del agua.

Asimismo, es fundamental favorecer la generación de información de calidad mediante el establecimiento de sistemas robustos de monitoreo y vigilancia. Esto incluye la implementación de redes de monitoreo que abarquen diferentes puntos de la subcuenca, así como el uso de tecnologías avanzadas para la recopilación y análisis de datos en tiempo real. Además, es importante garantizar la accesibilidad y disponibilidad de esta información para todos los actores involucrados, mediante la creación de plataformas en línea y sistemas de información geográfica que faciliten el intercambio de datos y conocimientos.

En resumen, las estrategias dirigidas a optimizar la adquisición y aplicación del conocimiento relacionado con el agua en la subcuenca Yeguaré deben enfocarse en la generación de información confiable y la promoción de la colaboración y el intercambio de conocimientos entre diferentes partes interesadas. Esto permitirá una toma de decisiones informada y basada en evidencia, contribuyendo así a una gestión más efectiva y sostenible de los recursos hídricos en la región.

a) **Adquisición de conocimiento**

La mayoría de los datos utilizados en esta investigación fueron recopilados específicamente para este estudio debido a la escasez de datos disponibles, destacando la necesidad de establecer estrategias de recolección y gestión de datos a largo plazo. Esta limitación en la disponibilidad de datos previos pone de manifiesto la importancia de un esfuerzo sostenido para recolectar, almacenar y analizar datos de calidad del agua, con el fin de obtener información precisa y actualizada para el manejo efectivo de la Subcuenca Yeguaré.

Para abordar esta brecha, se proponen las siguientes estrategias:

- *Climatología*: Fortalecer y ampliar la red de estaciones meteorológicas, que se ubiquen en puntos estratégicos y recolecten datos climáticos como precipitación, temperatura y humedad. Estos datos son fundamentales para correlacionar las condiciones climáticas con la oferta hídrica y prever tendencias futuras.
- *Geología estructural*: Un estudio avanzado sobre la dinámica de las estructuras geológicas presentes en la Subcuenca Yeguaré es esencial para comprender las características subyacentes que afectan la calidad y disponibilidad del agua.
- *Mineralogía*: Llevar a cabo un estudio detallado de mineralogía permitirá identificar los minerales que predominan en el área y entender cómo pueden influir en la composición química del agua subterránea. Estos estudios son esenciales para determinar el origen y las posibles fuentes de metales pesados y otros contaminantes, así como para evaluar su impacto potencial en la salud humana y en los ecosistemas de la región. Se recomienda focalizar la investigación en las áreas circundantes a la RBU, donde se ha observado que las fuentes de agua subterránea presentan concentraciones más altas de metales. Esta priorización es fundamental para abordar las preocupaciones de calidad del agua y para desarrollar estrategias efectivas de gestión del recurso hídrico.
- *Aforo del Río Yeguaré*: Es necesario establecer estaciones de aforo a lo largo del Río Yeguaré y sus afluentes principales para medir el flujo y volumen de agua en diferentes tramos. Estas estaciones deben proporcionar datos precisos y en tiempo real sobre el flujo de agua, permitiendo evaluar la variación temporal y espacial. Este enfoque proporciona datos críticos para una gestión efectiva de los recursos hídricos y permite evaluar la variación temporal del caudal.
- *Fuentes de agua subterránea*: Establecer un programa de monitoreo regular para manantiales y pozos en la subcuenca, evaluando el caudal y los niveles freáticos. Esto permitirá tener una idea clara de la recarga de agua subterránea y la disponibilidad del recurso.
- *Calidad del agua*: La implementación de estaciones de monitoreo para evaluar parámetros de calidad del agua, tanto en aguas superficiales como subterráneas, es una medida crucial. Estas estaciones deben incluir la medición de metales pesados, sustancias orgánicas, parámetros microbiológicos e indicadores biológicos, proporcionando datos precisos sobre la calidad del agua y su idoneidad para diferentes usos, como consumo humano, riego o actividades industriales.
- *Interacción Río-acuífero*: Se sugiere diseñar puntos específicos en el río para evaluar la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas. Al establecer puntos de monitoreo estratégicos a lo largo del río y en áreas clave del acuífero, se puede obtener información valiosa sobre la recarga y

descarga de aguas subterráneas, la influencia del río en el acuífero y viceversa, y cómo estas interacciones afectan la calidad del agua. Este conocimiento es crucial para identificar áreas vulnerables a la contaminación o la sobreexplotación y para desarrollar estrategias de gestión que protejan los recursos hídricos (Custodio & Llamas, 2001).

b) Aplicaciones

- *Portal de datos sobre recursos hídricos:* Creación de un portal accesible que compile estudios, informes y datos brutos de monitoreo relacionados con los recursos hídricos de la Subcuenca Yeguaré. Se recomienda que el repositorio utilice estándares de datos abiertos para facilitar el intercambio de información y promover la transparencia y la colaboración en la comunidad científica y la sociedad en general (Borchardt, 2012). Este portal de datos será clave para permitir una mejor comprensión de la dinámica de la Subcuenca Yeguaré y para desarrollar estrategias efectivas para su manejo sostenible. Al ofrecer acceso a una gama diversa de datos, el portal puede ser una herramienta invaluable para investigadores que busquen comprender las tendencias hidrológicas y para autoridades locales que necesiten tomar decisiones informadas sobre políticas de agua.
- *Modelos numéricos:* Invertir en la creación de modelos hidrológicos que puedan captar la complejidad de las interacciones superficie-subterránea es fundamental para una gestión efectiva de los recursos hídricos. Estos modelos deben integrar una amplia gama de variables, incluyendo datos climáticos, geológicos, y de uso del suelo, para proporcionar una representación precisa del comportamiento del sistema hídrico en la Subcuenca Yeguaré (Smith, 1993). Al tener en cuenta estas interacciones y la variabilidad espacial y temporal de los recursos hídricos, los modelos pueden ayudar a predecir la disponibilidad y calidad del agua, identificar áreas de riesgo, y evaluar el impacto de diferentes escenarios de gestión. Esto permite a los responsables de la toma de decisiones implementar medidas proactivas para la conservación y el uso sostenible del agua en la región.
- *Alianza científica para la gestión del agua:* Establecer alianzas estratégicas con universidades y centros de investigación reconocidos para fortalecer la base técnica y científica en el monitoreo y análisis de datos relacionados con los recursos hídricos. Estas alianzas brindarán acceso a conocimientos especializados, tecnologías de vanguardia y recursos adicionales para el estudio y la gestión del agua en la Subcuenca Yeguaré.

iii. Prácticas para la conservación y uso responsable del suelo

La intervención en el uso del suelo puede tener efectos significativos tanto directos como indirectos en la calidad y cantidad del agua en una determinada área. Los cambios en el uso del suelo, como la deforestación, la urbanización, la agricultura intensiva o la construcción de infraestructuras, pueden alterar los patrones de escorrentía, la infiltración del agua en el suelo y el ciclo hidrológico en general (Pahl-Wostl C. G., 2018)

a) Delimitación, restauración y conservación de áreas protegidas y zonas de recarga

Delimitación de las áreas de recarga: Basada en estudios geológicos e isotópicos realizados, esta medida facilita la identificación precisa de zonas de recarga críticas que son fundamentales para el mantenimiento de sistemas de flujo de agua tanto subterránea como superficial. Se espera que el gobierno local y las instituciones responsables tomen medidas para la declaratoria de estas zonas, garantizando su protección y conservación. En el mapa IV-9 se visualizan las elevaciones potenciales de recarga, obtenidas a través del análisis isotópico realizado por el laboratorio de Isotopía Hidrológica del CEIRH. Sin embargo, se sugiere expandir el alcance del estudio mediante la inclusión de más puntos de muestreo y el análisis de las estaciones meteorológicas propuestas para monitorear el comportamiento de las precipitaciones en la región. Estas estaciones podrían ser gestionadas por organizaciones comprometidas con la preservación del agua y proporcionar datos cruciales para respaldar la toma de decisiones por parte de las autoridades pertinentes.

Restauración ecológica: Esta iniciativa se enfoca en rehabilitar áreas deterioradas dentro de la zona de amortiguamiento del Parque Nacional La Tigra y la RBU, mediante la implementación de estrategias como:

- **Reforestación:** Buscar el apoyo de escuelas y universidades con el fin de reforestar con especies nativas que sean además resilientes a condiciones de sequía, especialmente en las áreas de recarga identificadas. Esto ayuda a estabilizar el suelo, promover la infiltración del agua, y proporcionar hábitats para la vida silvestre.
- **Eliminación de especies invasoras:** Identificación y eliminación de plantas y animales no nativos que puedan desplazar a las especies autóctonas y alterar el equilibrio del ecosistema.
- **Restauración de suelos:** Mejorar la calidad del suelo mediante la adición de materia orgánica, corrección del pH, y promoción de la actividad biológica. Esto puede incluir el uso de técnicas como la bioingeniería, el uso de compost, y la recuperación de suelos contaminados.
- **Control de la erosión:** Aplicación de técnicas para reducir la erosión del suelo, como el uso de mallas de retención, plantación de coberturas vegetales, y construcción de terrazas o zanjas de retención.

- Educación y participación comunitaria: Involucrar a la comunidad local en los esfuerzos de restauración ecológica. La educación y la concienciación son clave para el éxito a largo plazo de cualquier proyecto de restauración.

b) Sistema de tratamiento de las aguas residuales de origen doméstico de la ciudad

La necesidad de abordar la problemática de las aguas grises en las zonas de expansión periurbana es imperante, considerando las deficiencias presentes en el sistema de alcantarillado sanitario. Estas deficiencias incluyen la falta de instalación del sistema en ciertas áreas, así como las fugas que se presentan en el sistema existente. Además, la instalación de fosas sépticas también contribuye a la problemática, ya que las infiltraciones resultantes pueden ser perjudiciales para el acuífero subyacente. Es fundamental implementar medidas adecuadas para gestionar y tratar adecuadamente las aguas grises, asegurando la protección de los recursos hídricos y la salud pública en estas zonas en expansión. Se requiere una revisión y mejora exhaustiva del sistema de tratamiento de aguas grises para prevenir la contaminación subterránea (Drever, 1997).

Las zonas de infiltración deben ser identificadas mediante estudios hidrogeológicos y de isotopía para aplicar soluciones focalizadas que eviten la degradación del acuífero. La degradación de la materia orgánica conlleva la producción de dióxido de carbono (CO_2), cuyo aumento puede tener varios efectos en la calidad del agua. Entre ellos, se destaca que el incremento de CO_2 puede aumentar la dureza del agua, disminuir el pH y favorecer la solubilización de ciertos metales presentes en el medio ambiente (Escuder, y otros, 2009). Estos cambios pueden tener repercusiones significativas en los ecosistemas acuáticos y en la salud humana, por lo que es importante monitorear y controlar los niveles de materia orgánica y CO_2 en el agua para mitigar sus impactos negativos. La actualización y fortalecimiento del sistema de tratamiento no solo protegerá los recursos hídricos, sino que también reducirá los riesgos para la salud pública asociados con la contaminación del agua (Domenico P. A. & Schwartz, 1997).

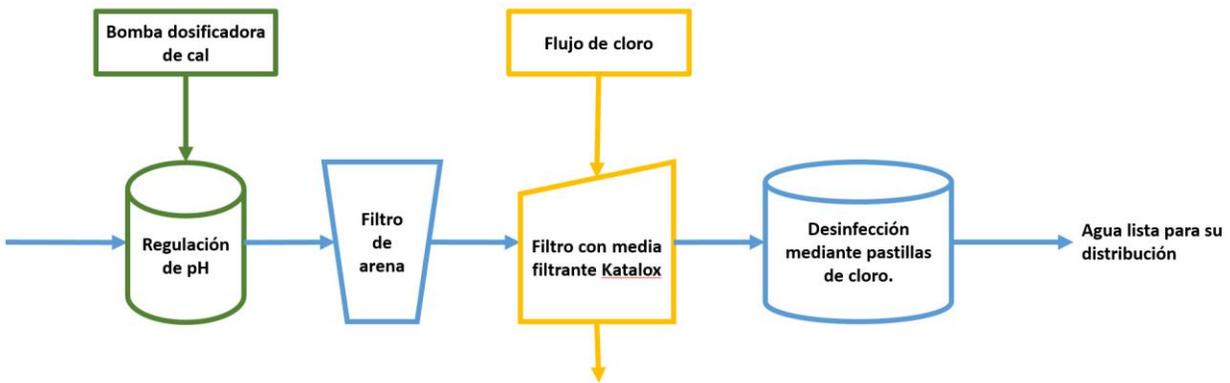
iv. Identificación y mitigación de los peligros asociados al agua – riesgos hídricos

La identificación y mitigación de los peligros asociados al agua, particularmente aquellos peligros relacionados con la contaminación por metales pesados y biológica, así como la posibilidad de sequías, representan desafíos importantes para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la subcuenca Yeguaré. La identificación precisa de las zonas de riesgo es fundamental para desarrollar estrategias efectivas que mitiguen estos peligros y protejan tanto la calidad como la cantidad del agua en la región (Foster & Chilton, 2003).

Con base en lo establecido anteriormente se propone realizar:

- *Mapeo de riesgos a contaminación hídrica:* Crear mapas detallados que identifiquen áreas de alto riesgo por la presencia de metales pesados y contaminación orgánica. Este mapeo debe basarse en análisis geoquímicos y biológicos actualizados, permitiendo focalizar esfuerzos de mitigación y control.
- *Protocolos de respuesta ante contaminación y sequías:* Desarrollar planes de respuesta rápida para mitigar los efectos de la contaminación y las sequías. Estos planes deben incluir protocolos para el tratamiento y suministro de agua segura, estrategias para la distribución de recursos en situaciones críticas y medidas para la recuperación de ecosistemas afectados.
- *Sistema de Alertas Tempranas:* Establecer un sistema de alerta temprana para monitorear y notificar a las autoridades y a la comunidad sobre condiciones críticas, como épocas de sequía y variaciones en la calidad del agua. Este sistema debe ser capaz de utilizar datos en tiempo real para proporcionar advertencias y recomendaciones precisas.
- *Reservas para emergencias:* Identificar y habilitar áreas de almacenamiento de agua para uso en casos de emergencia durante periodos de sequía, asegurando que estas reservas no compitan con la demanda actual y puedan ser gestionadas de manera sostenible.
- *Planta de tratamiento para agua potable:* Instalación de sistemas de potabilización que reduzcan la cantidad de aluminio e hierro, desinfecte y controle las condiciones de pH y ORP. En la ilustración VI-1 se presenta el sistema de potabilización que se propone teniendo las siguientes etapas:
 - *Regulación del pH:* Dentro de esta investigación se ha considerado la importancia del pH en los temas de solubilización, es por esto que es importante hacer una regulación de pH tanto para la desinfección como para la eliminación de los metales. La media filtrante Katalox requiere un pH mayor a 8.5 en el agua de entrada.
 - *Eliminación de sedimentos mediante filtros de arena:* Los filtros de arena retendrán los sedimentos que pueden generar la regulación del pH.
 - *Eliminación de aluminio e hierro:* Instalación con media filtrante Katalox ya que en el mercado hondureño es el medio filtrante más económico (L 5,000.00/ft³) y con mayor eficiencia en la retención del hierro y otros metales como el aluminio y su vida útil se mantiene con la regeneración continua de la media filtrante a través del flujo de cloro previo al paso del agua por la media filtrante (Sánchez L. , 2024; Watch Water.).
 - *Proceso de desinfección:* Se recomienda el uso de pastillas de cloro para la desinfección en los tanques de almacenamiento.

Ilustración VI-1 Propuesta de sistema de potabilización para las fuentes de agua en la subcuenca Yeguaré.



El diseño del sistema propuesto incluye varias etapas esenciales para asegurar una purificación integral del agua. La regulación del pH, fundamental para optimizar la eficiencia de la media filtrante (Katalox) en la adsorción de contaminantes. El filtro de arena y Katalox ayudan en la mejora de la calidad del agua. Finalmente, el proceso de desinfección con pastillas de cloro asegura la eliminación de microorganismos patógenos, haciendo que el agua sea segura para el consumo humano.

Desde una perspectiva económica, la utilización de Katalox es rentable y sostenible. La disponibilidad y el bajo costo del material, junto con su capacidad de regeneración, hacen que el sistema sea económicamente viable y sostenible a largo plazo. Además, la simplicidad del diseño del sistema permite su operación y mantenimiento por parte de la comunidad, reduciendo la necesidad de intervención externa y fomentando la autosuficiencia.

CAPITULO VII: Discusión

La caracterización hidroquímica de la subcuenca Yeguaré constituye un enfoque multidisciplinario que abarca variables críticas como temporalidad, uso del suelo, condiciones climáticas e hidrológicas, junto con la aplicación de técnicas de muestreo precisas. Esta metodología integral ha permitido alcanzar un alto grado de confiabilidad en los resultados, evidenciado por la consistencia en el balance iónico y la validación de los parámetros fisicoquímicos medidos, tal como lo sugieren Appelo y Postma (2005) en su fundamentación sobre la geoquímica del agua subterránea.

La evaluación de los parámetros físicos reveló una homogeneidad en los resultados de pH y conductividad, subrayando la estabilidad hidroquímica de la subcuenca. No obstante, los bajos valores de pH observados en la zona Sur-Oeste generan inquietudes sobre los procesos de acidificación, los cuales pueden tener implicaciones significativas para la calidad del agua y la viabilidad de los ecosistemas acuáticos. Este fenómeno resalta la importancia de una vigilancia continua, tal como lo argumenta Drever (1997), quien enfatiza el impacto de la química del agua en la salud ambiental.

La presencia de suelos lateríticos en las proximidades de la Reserva Biológica Uyuca (RUB) puede influir significativamente en la acidez del agua subterránea. Tibasosa (2018) señala que estos suelos, característicos de climas tropicales con alta meteorización, tienden a presentar un pH ácido, generalmente en el rango de 4 a 5. Esta acidez se debe a la descomposición y lixiviación de compuestos hidróxidos de aluminio (Al), hierro (Fe) y, en algunos casos, titanio (Ti). Cuando el agua subterránea interactúa con estos suelos lateríticos, tiende a acidificarse, lo que puede tener implicaciones para la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos. Además, esta acidez puede afectar procesos como la solubilidad de ciertos metales, aumentando el riesgo de contaminación por metales pesados.

El análisis detallado de los iones mayoritarios proporcionó una visión más profunda de la dinámica del agua subterránea en la Subcuenca Yeguaré. Se observó la presencia de dos grupos con un rápido enriquecimiento durante los episodios de precipitación, lo que sugiere una respuesta ágil del sistema hídrico a las condiciones climáticas cambiantes. Esta respuesta dinámica podría estar influenciada por procesos de intercambio catiónico, los cuales facilitan la movilidad de los elementos químicos en el agua subterránea. Este hallazgo es coherente con los principios discutidos en el trabajo seminal de Freeze y Cherry (1979) sobre la hidrogeología de aguas subterráneas, donde se examinan los mecanismos que gobiernan el movimiento y la interacción de los componentes químicos en los acuíferos.

Los bicarbonatos, identificados como un componente principal en la composición química del agua, no solo se derivan de la disolución de CO₂ atmosférico sino también de la interacción con rocas sedimentarias y

calizas, destacando la contribución geológica a la alcalinidad del agua. Este aspecto concuerda con Langmuir (1997), quien examina el papel de las interacciones agua-roca en la geoquímica ambiental.

Por otro lado, el análisis reveló que los sulfatos en la subcuenca pueden atribuirse tanto a fuentes naturales como antropogénicas, incluyendo la erosión de minerales sulfurosos y la descomposición de materia orgánica, un hallazgo alineado con la síntesis de Vázquez-Suñé et al. (2009) sobre la hidrogeoquímica de acuíferos.

La estabilidad de iones como calcio, magnesio y sodio apunta a una influencia limitada de la geología local, sugiriendo la necesidad de investigar las contribuciones antropogénicas a través de aguas residuales, en un contexto de intercambios catiónicos tal como ha sido destacado en la investigación de Hem (1985) sobre las características químicas del agua natural.

Los nutrientes en la subcuenca Yeguaré no presentan concentraciones extremas en general, pero la detección de niveles elevados cerca de cultivos, como en el pozo malacate de propiedad privada en Güinope (Y-PM-11) durante la temporada de canícula de 2021, indica la influencia de actividades agrícolas en la calidad del agua. Esta situación resalta la relación entre las prácticas agrícolas y la calidad del agua subterránea, un tema crítico en la literatura de gestión de recursos hídricos. Carpenter et al. (1998) discuten el impacto de los nutrientes en sistemas acuáticos, mientras que Custodio (1983) menciona que concentraciones superiores a 10 mg/l de nitratos sugieren procesos de contaminación que requieren atención inmediata debido a las posibles repercusiones en la salud humana y el equilibrio ecológico del ecosistema circundante. La presencia de nutrientes en estos niveles destaca la necesidad de gestionar el uso del suelo de manera que proteja los recursos hídricos.

En cuanto a los metales, el hierro y el aluminio son los metales predominantes en la subcuenca Yeguaré, un hecho atribuido a la presencia de bauxita y suelos lateríticos. La influencia del clima es notable, especialmente durante la temporada de canícula, cuando las concentraciones de hierro y aluminio aumentan considerablemente. Durante este periodo, las concentraciones de hierro superan los 10 mg/l, mientras que las de aluminio pueden superar los 1.5 mg/l. Estos valores elevados se encuentran principalmente en la zona de la Reserva Biológica Uyuca (RBU), indicando una fuerte relación entre la calidad del agua subterránea y las características geológicas y climáticas locales. La presencia de estos metales en concentraciones tan altas puede plantear riesgos para la calidad del agua y requerir tratamiento específico para asegurar su uso seguro para el consumo humano y otros fines.

Del aluminio y el hierro se destacan los estados en los que se presentarían dichos metales:

- La presencia de hierro en forma de hidróxido de hierro III (FeOH_3) facilita su remoción mediante diferentes procesos de tratamiento del agua. Sin embargo, si no se elimina adecuadamente, puede causar daños en las tuberías y otros equipos de distribución de agua debido a la formación de incrustaciones y obstrucciones. Por lo tanto, es crucial implementar medidas para su remoción y control (Guillen et al., 2021).
- La presencia de aluminio como ion aluminio III (Al^{3+}) es más difícil de eliminar y su presencia en el agua está asociada con riesgos para la salud humana, incluyendo posibles vínculos con la enfermedad de Alzheimer (Trejo Vázquez & Hernández Montoya, 2004). Por lo tanto, es vital implementar métodos efectivos para su remoción y reducción en el agua potable.

Es importante tener en cuenta que el tratamiento del agua para eliminar estos metales puede requerir ajustes en el pH y el potencial de oxidación-reducción (ORP) para facilitar su remoción. Esto resalta la necesidad de procesos de tratamiento del agua adecuados y eficaces para garantizar la calidad y seguridad del agua para consumo humano.

Esta investigación enfatiza la complejidad de la gestión de la calidad del agua subterránea y la importancia de adoptar un enfoque integral que incorpore conocimientos hidrogeológicos detallados, vigilancia continua y estrategias adaptativas para la conservación. Es fundamental implementar medidas basadas en un entendimiento profundo de la hidrogeoquímica, los procesos de contaminación y los mecanismos naturales de atenuación para proteger y mejorar la calidad del agua subterránea.

La subcuenca Yeguaré presenta una serie de características naturales que pueden influir en la calidad del agua. La geología de la zona, con suelos lateríticos y la presencia de bauxita, contribuye a la liberación de metales como el hierro y el aluminio en el agua subterránea y superficial. La alta permeabilidad de los suelos lateríticos facilita la infiltración y el transporte de estos metales, exacerbando los problemas de calidad del agua en ciertas áreas. Mientras que las actividades humanas en la subcuenca Yeguaré tienen un impacto considerable en la calidad del agua. La agricultura, en particular, juega un papel crucial, la detección de concentraciones elevadas de nutrientes en puntos de muestreo cercanos a cultivos indica que las prácticas agrícolas están contribuyendo a la contaminación del agua. El uso de fertilizantes y pesticidas puede llevar a la lixiviación de nitratos y otros compuestos al agua subterránea, afectando su calidad. Además, la presencia de asentamientos humanos en la región puede generar descargas de aguas residuales y otros contaminantes, que contribuyen a la degradación de la calidad del agua. La falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales agrava estos problemas, incrementando los riesgos de contaminación biológica y química. La topografía de la subcuenca y la influencia orográfica afectan la

distribución de las lluvias, con precipitaciones que varían significativamente entre las áreas más altas y el valle. Este patrón de lluvias puede influir en la recarga de los acuíferos y en la concentración de contaminantes en el agua.

El análisis detallado de la hidroquímica reveló una dinámica de enriquecimiento rápido durante los episodios de precipitación, indicando una respuesta sensible del sistema hídrico a las condiciones climáticas. Esta respuesta se observa especialmente en la zona de la RBU, ubicada al sudoeste de la subcuenca Yeguaré, donde los puntos de muestreo presentan una variabilidad en la calidad del agua que va desde niveles aceptables hasta preocupantes. La variabilidad en la calidad del agua en esta área puede estar influenciada por una combinación de factores naturales, como la geología y la topografía, y antropogénicos, como la agricultura intensiva y los asentamientos humanos.

La distribución espacial de la calidad del agua muestra que las áreas cercanas a la RBU son especialmente vulnerables. Estas zonas no solo tienen importancia ambiental, sino que también impactan directamente a las comunidades locales que dependen del agua para su consumo y actividades agrícolas.

Además, la ausencia de fuentes con clasificación "Excelente" y la prevalencia de fuentes con clasificación "Marginal" y "Pobre" indican que una parte considerable de la subcuenca está expuesta a riesgos de contaminación que pueden afectar tanto la salud humana como la integridad de los ecosistemas acuáticos. Estos resultados enfatizan la importancia de estrategias de manejo que puedan mitigar los impactos antropogénicos y naturales sobre los recursos hídricos (OMS, 2018). Es crucial implementar una GIRH para abordar estos desafíos. Esto implica establecer estrategias de monitoreo continuo, tratamiento adecuado, promover prácticas agrícolas sostenibles y mejorar la infraestructura de tratamiento de aguas residuales.

Las acciones para mejorar la calidad del agua deben ser multifacéticas, incluyendo tecnologías avanzadas de tratamiento, la gestión sostenible de la tierra y prácticas agrícolas que minimicen el aporte de contaminantes a las aguas subterráneas. Además, se debe mantener una vigilancia constante para prevenir la degradación adicional de las fuentes y mejorar sus condiciones de calidad. Solo a través de una gestión efectiva y coordinada se puede garantizar la calidad del agua y la sostenibilidad de los recursos hídricos en la subcuenca Yeguaré.

La discrepancia observada entre las clasificaciones de calidad del agua bajo diferentes normativas internacionales y locales plantea un desafío significativo para los gestores de recursos hídricos. Esta variabilidad en la clasificación enfatiza la necesidad de revisar y actualizar las normativas nacionales para armonizar con los estándares internacionales más recientes, asegurando así que las políticas de calidad del

agua estén alineadas con las mejores prácticas globales y los avances científicos más actuales (OMS, 2011; OMS, 2019).

La Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) emerge como un enfoque crítico para abordar estos desafíos, reconociendo la interconexión entre el agua, la tierra y los ecosistemas. La gobernabilidad y la gobernanza eficaz, la participación de la comunidad y el sector privado, y la implementación de políticas basadas en evidencia científica sólida son esenciales para el éxito de la GIRH (Rogers, 2003). La colaboración entre gobiernos locales, la sociedad civil y el sector privado es crucial para desarrollar e implementar estrategias efectivas que aborden las presiones sobre los recursos hídricos y promuevan la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas hídricos.

La sostenibilidad del sistema de tratamiento de agua potable propuesto para la subcuenca Yeguaré se basa en su capacidad para mejorar la calidad del agua de manera eficiente y económica, utilizando tecnologías verdes y regenerables como el medio filtrante Katalox. Este sistema de múltiples etapas garantiza un tratamiento integral del agua. Esta multietapa no solo mejora la calidad del agua, haciéndola segura para el consumo humano, sino que también aborda la solubilización de metales, un factor crítico identificado en la investigación. Al manejar tanto la química del agua como los contaminantes físicos y biológicos, el sistema de tratamiento asegura una solución holística que responde a los diversos desafíos de calidad del agua en la subcuenca. Además, al ser accesible en términos de costo de implementación y operación, y al promover la participación comunitaria en su gestión, el sistema asegura un impacto positivo a largo plazo en la salud y bienestar de la población, la conservación de los recursos hídricos y el desarrollo económico sostenible de la región.

En conclusión, esta investigación subraya la complejidad de los sistemas hídricos subterráneos y la necesidad de un enfoque integrado y adaptativo para la gestión del agua. Los hallazgos destacan la importancia de la monitorización continua, la evaluación de riesgos y la implementación de medidas de mitigación para proteger la calidad del agua subterránea. A través de la adopción de estrategias basadas en una comprensión detallada de la hidroquímica, las interacciones entre el uso del suelo y la calidad del agua, y la dinámica de contaminantes, es posible promover el uso sostenible de los recursos hídricos y proteger la salud pública y los ecosistemas acuáticos para las generaciones futuras.

Conclusiones

La caracterización hidroquímica integral de la subcuenca Yeguaré, mediante análisis de conductividad eléctrica y valores de pH, revela una predominancia de bajas conductividades, consistentemente inferiores a 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este hallazgo es indicativo de una concentración mínima de iones disueltos, posiblemente atribuible a la composición litológica del subsuelo y a los mecanismos de recarga del acuífero, los cuales limitan la solubilización de sales. Adicionalmente, los valores de pH, en general ácidos, sugieren una influencia significativa de la composición geológica en la acidificación natural del agua, evidenciando la interacción agua-roca como un factor determinante en la química del agua subterránea.

El análisis detallado de los iones mayoritarios demuestra la existencia de dos grupos químicos predominantes en las aguas subterráneas: uno caracterizado por concentraciones elevadas de sulfatos y otro por bicarbonatos, con fluctuaciones temporales de calcio y sodio que reflejan dinámicas de intercambio iónico. Estos patrones sugieren una fuerte correlación entre la composición química del agua y los factores ambientales locales, como la geología y el uso del suelo. El exhaustivo monitoreo de nutrientes en la subcuenca Yeguaré ha revelado que la mayoría de las muestras analizadas cumplen con los estándares de calidad del agua establecidos por la legislación hondureña, con un porcentaje superior al 90% de conformidad. Este resultado no solo refleja positivamente la calidad del agua durante el período de estudio sino también subraya la eficacia de las prácticas actuales de manejo y conservación del agua. La relación entre la presencia de metales pesados en las aguas subterráneas y la geología de la subcuenca, dominada por formaciones volcánicas, pone de manifiesto la influencia directa de la geodinámica regional sobre la calidad del agua.

La aplicación metódica del Índice de Calidad del Agua (ICA), conforme a los criterios del CCME, permite una valoración objetiva de la aptitud del agua para consumo humano, destacando que la clasificación de la calidad del agua subterránea en la Subcuenca Yeguaré durante el periodo 2020-2021 indica que el 48 % de las fuentes de agua presentan una clasificación de "Marginal", el 22 % una clasificación de "Buena", el 13 % una clasificación de "Pobre", el 13% una clasificación "Regular" y solo el 4 % presenta una clasificación de "Excelente". Por lo tanto, es de vital importancia no descuidar el monitoreo y la conservación de la calidad del agua, así como implementar acciones y políticas adecuadas que promuevan la mejora continua de la calidad del agua en la Subcuenca Yeguaré, con el objetivo de garantizar el bienestar de las comunidades y proteger el medio ambiente para las generaciones futuras.

La importancia de las variables hidroquímicas en la Subcuenca Yeguaré subraya la necesidad de desarrollar y aplicar estrategias de gestión integral que garanticen la preservación a largo plazo de la calidad del agua.

Estas estrategias son esenciales para prevenir impactos adversos tanto en la salud humana como en los ecosistemas acuáticos. Es fundamental fortalecer la gobernabilidad y la gobernanza del agua, mejorar la adquisición de conocimiento para una toma de decisiones más informada, implementar prácticas sostenibles de conservación y uso del suelo, y adoptar medidas de mitigación efectivas. La implementación de políticas específicas para la mitigación de la contaminación por metales pesados, junto con el fomento de la investigación y el desarrollo de tecnologías avanzadas de tratamiento y remediación, son componentes críticos para asegurar la sostenibilidad de los recursos hídricos en la subcuenca Yeguaré. Estas acciones colectivas y coordinadas no solo mejorarán la calidad del agua, sino que también promoverán un uso responsable y sostenible de los recursos hídricos, beneficiando tanto a las comunidades locales como a los ecosistemas que dependen de ellos.

Recomendaciones

1. **Sistemas de monitoreo:** Es imperativo establecer y mantener un sistema de monitoreo continuo que incluya parámetros físico-químicos y biológicos del agua subterránea. Este sistema debería ser capaz de detectar cambios temporales y espaciales en la calidad del agua, permitiendo intervenciones tempranas para prevenir la degradación del recurso. Además, se recomienda la actualización y mejora de la infraestructura existente para el monitoreo, incorporando tecnologías avanzadas para la recolección y análisis de datos.
2. **Actualización de normativas y estándares de calidad del agua:** Se sugiere revisar y actualizar las normativas nacionales sobre calidad del agua, tomando como referencia los estándares internacionales establecidos por entidades como la OMS y la EPA. Esta actualización debería reflejar los avances científicos más recientes y adaptarse a las realidades locales de la subcuenca Yeguaré, asegurando que las políticas de calidad del agua protejan eficazmente la salud pública y los ecosistemas.
3. **Implementación de prácticas agrícolas sostenibles:** Dada la influencia de las prácticas agrícolas en la calidad del agua subterránea, es crucial promover y adoptar prácticas agrícolas sostenibles. Esto incluye el manejo integrado de plagas, la agricultura de conservación, y el uso eficiente de fertilizantes y agroquímicos. Estas prácticas no solo ayudarán a reducir la contaminación por nutrientes y pesticidas, sino que también contribuirán a la conservación del suelo y el agua.
4. **Gestión y tratamiento de aguas residuales:** Se recomienda mejorar la gestión de aguas residuales, tanto domésticas como industriales, mediante la implementación de sistemas de tratamiento eficientes antes de su descarga o reutilización. El tratamiento adecuado de las aguas residuales reducirá la carga de contaminantes y nutrientes en el agua subterránea, mitigando los riesgos para la salud humana y el medio ambiente.
5. **Educación y participación comunitaria:** Fomentar la educación ambiental y la participación comunitaria en la gestión del agua es esencial para el éxito de cualquier estrategia de conservación. Las campañas de concienciación sobre el uso sostenible del agua y las prácticas de conservación pueden empoderar a las comunidades locales para que contribuyan activamente a la protección de los recursos hídricos.
6. **Fortalecimiento de la gobernanza del agua:** Se debe trabajar hacia el fortalecimiento de la gobernanza del agua a través de la colaboración entre diferentes niveles de gobierno, el sector privado y las organizaciones de la sociedad civil. La implementación de políticas y estrategias eficaces requiere de un marco de gobernanza sólido que promueva la gestión integrada de los recursos hídricos y facilite la toma de decisiones basada en evidencia científica.

7. Desarrollo e implementación de estrategias de adaptación al cambio climático: Considerando la sensibilidad del sistema hídrico a las variaciones climáticas, es necesario desarrollar e implementar estrategias de adaptación específicas que aborden los impactos potenciales del cambio climático en la disponibilidad y calidad del agua subterránea.

BIBLIOGRAFÍA

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1993). *Contaminación agrícola de los recursos hídricos*. Obtenido de Efectos del riego en la calidad del agua superficial: <http://www.fao.org/3/W2598S/w2598s03.htm>
- Abarca Monge, S., & Mora Brenes, B. (2007). Contaminación del agua. *Revista Biocenosis*, 1-2.
- Abbaspour, N., Hurrell, R., & Kelishadi, R. (2014). Review on iron and its importance for human health. *J Res Med Sci.*, 19(2), 164-174.
- Accostupa Quispe, G., & Mamani Tunqui, R. (2012). "ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA PARA CONSUMO HUMANO, CUANTIFICACIÓN DE ELEMENTOS QUÍMICOS ALTAMENTE TÓXICOS; ARSENICO, CROMO, CADMIO, PLOMO POR EL MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO DE ABSORCIÓN ATÓMICA EN EL DISTRITO DE ANTA". Cusco, Perú: Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.
- Adroer, N., Lladó, J., Bodas, J., Ruiz, J., Ramos, N., & Pereira, H. (2020). Inhibición de la corrosión en circuitos cerrados de refrigeración en presencia de aluminio. *Industria química*, 42-47.
- Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). (2003). *Manejo del Agua en las Cuencas de los Ríos Choluteca y Río Negro*. Valle de Yeguaré: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) . (Mayo de 2009). Reglamento Nacional de Agua Potable Primaria. *Federal Register [EPA 816-F-09-004]*.
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) . (2021). *Safe Drinking Water Act*. Obtenido de <https://www.epa.gov/sdwa>.
- Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR). (6 de Mayo de 2016). *Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR)*. Obtenido de Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR): https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs126.html
- Agua México. (08 de noviembre de 2007). *Contaminación del agua por metales*. Obtenido de Fondo para la comunicación y orientación ambiental : <https://agua.org.mx/biblioteca/contaminacion-del-agua-por-metales/>

- Apella, M., & Araujo, P. (2005). Microbiología del agua. Conceptos básicos. En *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*. Buenos Aires, Argentina: Blesa MA, Blanco-Gálvez J. Editores. Obtenido de Microbiología de agua. Conceptos básicos: sa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/02_Capitulo_02.pdf
- Appelo, C., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater, and Pollution*. (Segunda Edición ed.). Londres: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Apure. (02 de 11 de 2023). *Apure Instruments*. Obtenido de Importancia del agua limpia en el medio ambiente: <https://apureinstrument.com/blogs/importance-of-clean-water-in-the-environment/#hazards-of-water-pollution-on-biodiversity>
- Arcos Pulido, M. d., Ávila de Navia, S. L., Estupiñán Torres, S. M., & Gómez Prieto, A. C. (4 de Julio de 2005). Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. *Nova*, 3(4), 69-79.
- Asociación Americana de Salud Pública (APHA). (2018). *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (23 ed.).
- Azoulay, A. (21 de Marzo de 2023). *UNESCO*. Obtenido de Riesgo inminente de una crisis mundial del agua (UNESCO/ONU-Agua): <https://www.unesco.org/es/articles/riesgo-inminente-de-una-crisis-mundial-del-agua-unesco/onu-agua>
- Bach Plaza, J., & Mas-Pla, J. (2008). Los recursos hídricos en el sistema cuenca: disponibilidad y calidad. En P. Andrés, & R. Rodríguez, *Evaluacion y Prevencion de Riesgos Ambientales en Centroamérica* (págs. 81-123). Girona, España: Documenta Universitaria.
- Balmaseda Espinosa, C., & García Hidalgo, Y. (2014). Índice canadiense de calidad de las aguas para la cuenca del río Naranjo, provincia Las Tunas, Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 11-16.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2018). *Tegucigalpa y Comayagüela: capital sostenible, segura y abierta al público*. Tegucigalpa, Honduras: Alcaldía Municipal del Distrito Central.
- Benavides Muñoz, H. (6 de mayo de 2019). *¿Qué son los recursos hídricos y cuáles son los principales del Ecuador?* Obtenido de Dialoguemos: La academia en la comunidad: <https://dialoguemos.ec/2019/05/que-son-los-recursos-hidricos-y-cuales-son-los-principales-del-ecuador/>
- Borchardt, D. B. (2012). *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation*. Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-25071-7_1

- Brand, E. (1985). Predicting the performance of residual soil slopes. *In Proc., 11th International conference on soil mechanics and foundation engineering, San Francisco, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 5, 2541-2578.*
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2001). *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*. Canadá: Canadian Council of Ministers of the Environment.
- Carpenter, S., Caraco, N., Correll, D., Howarth, R., Sharpley, A., & Smith, V. (1998). Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen. *Ecological Applications, 8*(3), 559-568.
- CCM, Comité Central Menonita. (7 de Octubre de 2021). *Solicitud y trámite de una declaratoria de microcuenca ante el ICF*. Obtenido de Equipo de Reflexión Investigación y Comunicación (ERIC): https://issuu.com/brisconte/docs/maqueta_de_documento_microcuenca#:~:text=Una%20declaratoria%20de%20microcuenca%20es,una%20zona%20de%20protecci%C3%B3n%20forestal.&text=Solicitar%20la%20declaratoria%20de%20microcuencas%20ante%20el%20ICF.
- Cely Calixto, N. J., Becerra Moreno, D., & Cárdenas Gutiérrez, J. A. (2023). *CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES*. Colombia: Ediciones Nueva Jurídica.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Termodinámica* (Séptima edición ed.). New York, Estados Unidos: The McGraw- Hill Companies.
- Centro Experimental y de Innovación del Recurso Hídrico (CEIRH-IHCIT). (2023). *Ecología del agua. Parte alta de la Cuenca del Río Choluteca*. Tegucigalpa, Honduras: Universidad Nacional Autónoma de Honduras.
- CEO Water Mandate. (17 de enero de 2017). *CEO Water Mandate*. Obtenido de ¿Qué significan realmente “escasez de agua”, “estrés hídrico” y “riesgo hídrico”? : <https://ceowatermandate.org/posts/water-scarcity-water-stress-water-risk-actually-mean/>
- Chandrajith, C. a. (17 de Julio de 2009). Phosphate mineral fertilizers, trace metals and human health. *J.Natn.Sci.Foundation Sri Lanka, 37*(3), 153-165. Obtenido de <file:///C:/Users/isis2/AppData/Local/Temp/1219-4573-1-PB.pdf>
- Cisneros, B. E. (2005). *La contaminación ambiental en México causas efectos y tecnología apropiada*. México. Obtenido de <https://books.google.hn/books?id=8MVxlyJGokIC&pg=PA129&dq=alcalinidad+y+su+efecto+en+el+agua&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiRhs->

E5srrAhVCzlkKHbrOBogQ6AEwAHoECAQQAg#v=onepage&q=alcalinidad%20y%20su%20efecto%20en%20el%20agua&f=false

CNH, C. N. (2007). Ley Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre. *La Gaceta, Decreto No. 156-207*.

CONASA, Consejo Nacional de Agua y Saneamiento. (Marzo de 2013). Obtenido de Política Nacional del Sector Agua Potable y Saneamiento: https://es.ircwash.org/sites/default/files/politica_nacional_formato_carta_marzo-2013-_version_resumida1.pdf

Congreso Nacional de Honduras. (2003). *LEY DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL*. Honduras: República de Honduras.

Congreso Nacional de Honduras. (14 de Diciembre de 2009). Ley General de Aguas. *Gaceta Nº 32088*, págs. Decreto No 181-2009.

Consejo de Europa. (1968). *Carta del Agua*. Estrasburgo.

Coordinación General de Gobierno. (Julio 2020). *II Informe nacional voluntario de la agenda 2030: De la recuperación al desarrollo sostenible*. Honduras: Comisión Nacional de la Agenda 2030 para los objetivos de desarrollo sostenible, República de Honduras.

Córdoba, M. A., Del Coco, V. F., & Basualdo, J. A. (diciembre de 2010). Agua y salud humana. *Química Viva*, 9(3), 105-119. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/863/86315692002.pdf>

Cruz Ruiz, A. O. (2004). *Evaluación de la calidad y cantidad de agua en el Río Yeguaré, región centro oriental de Honduras*. Honduras: Universidad Agrícola Zamorano.

Custodio, E., & Llamas. (1983). Principios Básicos de Química y radioquímica de aguas subterráneas. En E. Custodio, & M. Llamas, *Hidrología subterránea* (pág. 200).

Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrología Subterránea, Tomo 1*. Barcelona: Ediciones OMEGA.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrología Subterránea, Tomo 2*. Barcelona: EDICIONES OMEGA, S.A.

Departamento de Cuencas Hidrográficas y Ambiente-ICF. (2010). *Estrategia Nacional para el Manejo de Cuencas Hidrográficas en Honduras*. Honduras: Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre.

Domenico P. A. & Schwartz, F. W. (1997). *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley & sons.

- Drever, J. I. (1997). *The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments* (Tercera ed.). Prentice Hall.
- Dueñas Jurado, C., Sánchez Araujo, V. G., Ayuque Rojas, J. C., Chanca Poma, K. A., & A., P. P. (2022). Enfermedades asociadas al sector saneamiento. *Socialium*, 6(2), 130-142. doi:<https://doi.org/10.26490/uncp.sl.2022.6.1.1557>
- EFE. (22 de Marzo de 2019). *El 70 % de población de Honduras tiene acceso al agua, pero no toda es segura*. Obtenido de Agencia EFE: <https://www.efe.com/efe/america/sociedad/el-70-de-poblacion-honduras-tiene-acceso-al-agua-pero-no-toda-es-segura/20000013-3931929#:~:text=D%C3%8DA%20AGUA%20HONDURAS-,El%2070%20%25%20de%20poblaci%C3%B3n%20de%20Honduras%20tiene%20acceso%20al%20agua,pero%20n>
- Enríquez Balcázar, L. G. (2012). *Evaluación de la presencia de Al, Fe y Mn en el Sistema de Agua Potable de Zamorano*. Honduras : Escuela Panamericana Zamorano.
- Escuder, R., Fraile, J., Jordana, S., Ribera, F., Sánchez-Vila, X., & Vásquez-Suñé, E. (2009). *Hidrogeología*. Barcelona, España: Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS).
- Espejo, R. (2008). El lado oscuro de la ganadería. *Problemas del desarrollo*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-70362008000300011
- Fortín, M. T. (2018). *Plan de Desarrollo y Programa de Inversiones: Territorio de Yeguaré*. Honduras: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Foster, S. (2020). Global Policy Overview of Groundwater in Urban Development—A Tale of 10 Cities! *Water*, 12(2), 456. doi:<https://doi.org/10.3390/w12020456>
- Foster, S., & Hirata, R. (1988). *Groundwater Pollution Risk Control from an International Perspective*.
- Foster, S., & Chilton, J. (2003). Groundwater: The Processes and Global Significance of Aquifer Degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society. Biological Sciences*, 358(1440), 1957 -1972.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.
- Gallo Guevara, J. U. (1997). *Análisis de la calidad del agua de los manantiales del Cerro Uyuca*. Honduras: Universidad Agrícola del Zamorano.

- Galvín, R. M. (2004). *Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos Tratamiento y control de la calidad de aguas*. España. Obtenido de <https://books.google.hn/books?id=k8blixwJzYUC&pg=PA22&dq=sulfatos+y+su+efecto+en+el+agua&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjFnd7F7crrAhUprFkKHV2BAA4Q6AEwAHoECAMQAg#v=onepage&q=sulfatos%20y%20su%20efecto%20en%20el%20agua&f=false>
- García Miranda, F. G., & Miranda Rosales, V. (2018). *Eutrofización, una amenaza para el recurso hídrico*. In: *IMPACTO SOCIO-AMBIENTAL, TERRITORIOS SOSTENIBLES Y DESARROLLO REGIONAL DESDE EL TURISMO*. (Vol. 2). México: Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, Coeditores.
- García, S. (15 de Diciembre de 2023). Elevaciones Potenciales de Recarga de la Subcuenca Yeguaré. (J. Nuñez, Entrevistador)
- García-Santos, S., Sánchez-Murillo, R., Peña-Paz, T., Chirinos-Escobar, M., Hernández-Ortiz, J., Mejía-Escobar, E., & Ortega, L. (2022). Water stable isotopes reveal a complex rainfall to groundwater connectivity in central Honduras. *Science of The Total Environment*.
- Global Water Partnership (GWP). (2002). *LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS) Y La gobernabilidad del agua en Centroamérica* (Vol. 1). Centroamérica: Entre Aguas.
- Global Water Partnership (GWP). (2011). *Hacia una gestión integrada de aguas urbanas*. Documento de perspectiva , Estocolmo. Recuperado el 20 de agosto de 2023, de <chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/perspective-papers/01-towards-integrated-urban-water-management-2011-spanish.pdf>
- Global Water Partnership (GWP). (2011). *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica: hacia una gestión integrada*. Regional , Tegucigalpa. Recuperado el 7 de octubre de 2022
- Global Water Partnership (GWP). (2017). *Situación de los Recursos Hídricos de Centroamérica*. Tegucigalpa, MDC. Recuperado el 7 de octubre de 2022
- Gopal, K., Tripathy, S., Bersillon, J., & Dubey, S. (2007). Chlorination byproducts, their toxicodynamics and removal from drinking water. *J Hazard Mater*, 1-6. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.10.063

- Guardado Lacaba, R. (2006). *Geotecnia de los suelos lateríticos y su incidencia en los riesgos geodinámicos*. Antigua Guatemala: Jornada Iberoamericana de Riesgos por Inundación y Desastres Naturales AECI/CYTED.
- Guillen Rivas, J. R., Jaramillo Cedeño, A. R., Baquerizo Crespo, R. J., & Córdova Mosquera, R. A. (2021). Estudio de los procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas: una revisión. *Polo del Conocimiento*, 1384-1407.
- Guillén, R., & Tabora, F. (2015). *Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica*. Honduras : GWP Centroamérica.
- Gutiérrez-Álzate, K., Acevedo-Correa, D., Urzola-Ortega, J. J., Fuentes-Berrio, L., & Beltrán-Cotta, L. A. (2023). Relación entre aluminio y la enfermedad de Alzheimer: Revisión. *Tecnura*, 22(77). doi:<https://doi.org/10.14483/22487638.18970>
- HACH. (2000). *MANUAL DE ANÁLISIS DE AGUA* (Segunda Edición en Español ed.). Loveland, Colorado, EE.UU.: Hach Company.
- Hem, J. (1985). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. *United States Geological Survey Water-Supply*, Paper 2285.
- Henríquez, C., Méndez, J. C., & Masís, R. (2013). Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el Análisis kriging y su validación. *Agronomía Costarricense*, 71-82.
- Hurlbut, D. (1960). *Manual de Mineralogía*. Madrid: Reverté S.A.
- Ibarra Turcios, Á. M. (2008). Centroamérica: Una región de múltiples amenazas y alta vulnerabilidad. Algunos apuntes conceptuales. En P. Andrés, & R. Rodríguez, *Evaluación y Prevención de Riesgos Ambientales en Centroamérica* (págs. 17-28). Girona, España: Documenta Universitaria.
- IDOM. (2015). *Estudio de crecimiento de la huella urbana*. Tegucigalpa.
- Instituto de Conservación Forestal (ICF). (2013). *Plan de Manejo Parque Nacional La Tigra 2013 -2025*. Tegucigalpa: Fundación AMitigra, Instituto de Conservación Forestal y MiAmbiente. Obtenido de <https://icf.gob.hn/areas-protegidas/>
- Instituto de Conservación Forestal (ICF). (2014). *Mapa Forestal y de Cobertura de la Tierra de Honduras: Análisis de Cifras Nacionales*. Honduras: Programa Regional de Reducción de Emisiones de la

Degradación y Deforestación de Bosques en Centroamérica y República Dominicana (REDD/CCAD-GIZ).

Instituto de Conservación Forestal (ICF). (2019). *Ficha técnica del sistema de clasificación del mapa forestal y cobertura de la tierra de Honduras 2018*. Tegucigalpa, Honduras: Unidad Nacional de Monitoreo Forestal.

Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT). (2012). *Atlas Climático y de Gestión de Riesgo*. Tegucigalpa, Honduras: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS (UNAH).

Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT). (2013). *Estudio Hidrogeoquímico de la parte alta de la cuenca del Río Choluteca*. Tegucigalpa, Honduras: Proyecto Fondo de Adaptación.

Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT). (2014). *Estudio de riesgos de contaminación de los recursos hídricos en la parte alta de la cuenca del Río Choluteca*. Tegucigalpa, Honduras: Proyecto Fondo de Adaptación.

La Gaceta, D. O. (14 de Diciembre de 2009). Ley General del Agua. *Poder Legislativo decreta, 32(088)*, págs. Decreto No 181-2009.

Langmuir, D. (1997). *Aqueous Environmental Geochemistry*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc.

Lledó, C. (2002). CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: TIPO DOMÉSTICO E INDUSTRIAL. *PRESENTE Y FUTURO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA PROVINCIA DE JAÉN*, 149-156.

López, S. J., & Roberto, A. (2015). *CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DE SANTIAGO*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.

Marcó, L., Azario, R., Metzler, C., & Garcia, M. d. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 72-82.

Marín Galván, R. (2010). *Características físicas, químicas y biológicas de las aguas*. Sevilla: Escuela de organización industrial.

Mariño, E. E., & García, R. F. (2018). *APLICACIONES AMBIENTALES DE LA HIDROGEOQUÍMICA*. Buenos Aires, Argentina: UNIVERSIDAD NACIONAL DE SALTA.

- Martel, A. B. (2001). *Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua*. Peru. Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/uno.pdf>
- Medina, J. M., & Padilla, M. R. (2022). *Atlas Cuenca del Río Choluteca*. Tegucigalpa, Honduras: GWP Centroamérica, Programa de Gobernanza Hídrica Territorial en la Región 13 Golfo de Fonseca (PGHTR13GF).
- Mejía, E. J. (15 de Noviembre de 2023). Climatología de la Subcuenca Yeguaré. (J. Nuñez, Entrevistador)
- Méndez, P. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(9), 29-44. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>
- Mesa, N. D. (2018). *Contenido en sodio y potasio en aguas de consumo de algunos municipios de Tenerife y su posible relación con la hipertensión en cada uno de ellos*. Universidad de la laguna.
- MiAmbiente. (s.f.). *MiAmbiente+*. Obtenido de DGRH ¿Quiénes somos?: <http://www.miambiente.gob.hn/dgrh/quiensomos/>
- Ministerio de agricultura, pesca y medio ambiente. (2006). *EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP) MEDIA ANUAL*. España: GeoPortal.
- Ministerio de Salud. (1995). *Norma Técnica Nacional para la Calidad del Agua Potable*. Honduras: República de Honduras.
- Monserate, F., Valencia, J., Leverón, S., Pineda, J., & Cartagena, C. (2017). Generación de los mapas oficiales de cuencas, subcuencas y microcuencas para el territorio Hondureño (Memoria Técnica). *United States Agency for International Development (USAID); Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Dirección General de Recursos Hídricos (DGRH)*., 26.
- Mora B., J. M., López Umaña, L. I., Acosta, M., & Maradiaga, P. (2013). *Plan de Manejo Reserva Biológica Uyuca 2013-2025*. Honduras: Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre y Escuela Agrícola Panamericana.
- Moreno Ramón, H., & Ibáñez Asensio, S. (2019). *Procesos formadores de suelos: Laterización*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Moreno Roncancio, N. J. (2009). *DOCUMENTACIÓN Y MONTAJE DE LOS PROTOCOLOS DEL LABORATORIO PARA DETERMINACIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE AGUA POTABLE EN LA*

PLANTA DE TRATAMIENTO DE VILLASANTANA S.A. ESP. DEL MUNICIPIO DE DOSQUEBRADAS.
Práctica universitaria conducente a título , UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, ESCUELA DE QUÍMICA, PEREIRA. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/71396143.pdf>

Muñoz Portero, M. J. (2011). *Características y usos de los diagramas de Pourbaix*. Valencia: Universidad politecnica de Valencia.

Muñoz Ventura, A. (2017). *Evaluación de la calidad del agua en el ciclo de consumo del casco urbano del municipio de Tatumbla, Francisco Morazán, Honduras*. Honduras: Escuela Panamerica Zamorano.

Naciones Unidas. (2023). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: alianzas y cooperación por el agua*. Paris: UNESCO.

Núñez Maradiaga, J., Hernández Flores, K. M., Peña Paz, T., & Montoya, D. I. (2022). Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas en la Laguna del Pedregal. *Revista Universidad y Sociedad*, 15(1), 381-391.

Ordoñez, J. (2011). *Cartilla Técnica: Ciclo Hidrológico*. (F. P.-G. Perú, Ed.) Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) . (1997). *LOS FERTILIZANTES, EN CUANTO CONTAMINANTES DEL AGUA*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/W2598S/w2598s00.htm#Contents>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1991). *Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos*. Obtenido de Los fertilizantes, en cuanto contaminantes del agua: <http://www.fao.org/3/w2598s05.htm#TopOfPage>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2003). *Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable*. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). *Guías para la calidad del Agua Potable* (Tercera ed., Vol. I). Genevé, Suiza: OMS, Organización Mundial de la Salud. Obtenido de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowsres.pdf

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2008). *Guías para la calidad del agua potable* (Vol. 1). (Tercera, Ed.) Organización Mundial de la Salud. Obtenido de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowsres.pdf?ua=1

- Organización Mundial de la salud (OMS). (2008). Hoja de información sobre sustancias Químicas. En O. M. (OMS), *Guías para la calidad del agua potable* (Vol. 1, pág. 263). Obtenido de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_12.pdf?ua=1
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2014). *Sodium intake for adults and children*. Geneva: WHO Library Cataloguing-in-Publication Data.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). *Cambio climático y salud*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud (OMS): <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (7 de febrero de 2018). *E. coli*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/e-coli>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2019). *Agua, saneamiento e higiene*. Obtenido de Enfermedades relacionadas con el agua: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/wash-in-health-care-facilities/es/
- Pacheco Ávila, J., & Cabrera Sansores, A. (mayo-agosto de 2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. (U. A. Yucatán, Ed.) *Ingeniería*, 7(2), 47-54. Obtenido de www.redalyc.org/articulo.oa?id=46770204
- Pacheco Ávila, J., Cabrera Sansores, A., & Pérez Ceballos, R. (2004). Diagnóstico de la calidad del agua subterránea en los sistemas municipales de abastecimiento en el Estado de Yucatán, México. *Ingeniería*, 165-179.
- Padron Cruz, A. C., & Cantú Martínez, P. C. (2009). EL RECURSO AGUA EN EL ENTORNO DE LAS CIUDADES SUSTENTABLES. *Culcyt*, 15-25.
- Pahl-Wostl, C. (2015). *Water governance in the face of global change: From understanding to transformation*. Springer. doi:2365-4961
- Pahl-Wostl, C. G. (2018). *Handbook on Water Security*. Edward Elgar Publishing.

- Peña-Paz, T. M., & Chirinos-Escobar, M. J. (2023). *Estudio sobre la demanda y aprovechamiento del agua en la parte alta de la cuenca del río Choluteca*. Tegucigalpa: Unidad de Recursos Hídricos del Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras.
- Ponce de Montoya, B. (2008). Análisis de la contaminación del Río Choluteca y sus efectos sobre la población a su paso por Tegucigalpa. *Revista Ciencia y Tecnología*, 19-37.
- RAE, R. A. (s.f.). *Agricultura*. Obtenido de Diccionario del Español Jurídico (DEJ): <https://dej.rae.es/lema/agricultura>
- Ramirez, Carlos Alberto Sierra. (2011). *Calidad de Agua; Evaluacion y Diagnostico*. Medellin: Universidad de Medellin.
- Ríos-Tobón, S., Agudelo-Cadavid, R. M., & Gutiérrez-Builes, L. A. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 236-247.
- Rogers, P. &. (2003). *Effective Water Governance*. TEC Background Papers, No. 7. Global Water Partnership.
- Ruiz, M. (16 de Noviembre de 2023). Geología de la Subcuenca Yeguaré. (J. Nuñez, Entrevistador)
- Ruiz, M., Rodríguez, M., Peña, T., & Chirinos-Escobar, M. (2023). *Estudio de la geología para el Corredor Boscoso Central*. Tegucigalpa: Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras.
- Sánchez, L. (29 de Enero de 2024). Sistemas de potabilización. (J. Nuñez, Entrevistador)
- Sánchez, M. J., Medina, J. L., Avendaño, L. M., & Guillín, N. U. (2018). *ANÁLISIS DE LA CALIDAD BIOLÓGICA DE LAS FUENTES HÍDRICAS ESTUDIADAS*. Colombia: Gobierno de Colombia.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *¿Qué es y para qué sirve el fertilizante?* Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/que-es-y-para-que-sirve-el-fertilizante>
- Secretaría de Agricultura y Ganadería. (2017). *Estrategia Nacional de Agricultura Familiar de Honduras 2017-2030*. Tegucigalpa, Honduras.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). (2001). *Una cartilla sobre la calidad del agua*. Obtenido de Science for a changing world: <https://pubs.usgs.gov/fs/fs-027-01/>

- Sigler, A., & Bauder, J. (2017). *Alcalinidad, pH, y sólidos disueltos totales*. Obtenido de Well Educated Educación en el Agua de Pozo: http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS
- Simanca, M., Álvarez, B., & Paternina, R. (8 de 6 de 2010). CALIDAD FÍSICA, QUÍMICA Y BACTERIOLÓGICA DEL AGUA ENVASADA EN EL MUNICIPIO DE MONTERÍA. 72. Obtenido de <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/420/813-1483-1-SM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Smith, L. &. (1993). *Groundwater Flow. Handbook of Hidrology* . Maidment D.R: McGraw Hill.
- Sotoca, S. (25 de Noviembre de 2021). *Contaminantes naturales del agua*. Obtenido de Ecología verde: <https://www.ecologiaverde.com/contaminantes-naturales-del-agua-3619.html>
- SUAREZ, D. S. (2004). *FÓSFORO TOTAL EN AGUA POR DIGESTIÓN ACIDA, METODO DEL ACIDO ASCORBICO*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA - GRUPO PROGRAMA DE FISICOQUÍMICA AMBIENTAL. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/F%C3%B3sforo+Total+en+Agua+M%C3%A9todo+del+Acido+Asc%C3%B3rbico.pdf/bf2f449b-4b9b-4270-b77e-159258d653e2>
- Tibasosa Moreno, A. T. (2018). *ANÁLISIS DE LA UTILIZACIÓN DE LAS LATERITAS COMO MATERIALES EN ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS PARA SU APROVECHAMIENTO EN COLOMBIA*. BOGOTÁ D.C : UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.
- Torres, P., Hernán Cruz, C., & Patiño, P. J. (2009). ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA EN FUENTES SUPERFICIALES UTILIZADAS EN LA PRODUCCIÓN DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO UNA REVISIÓN CRÍTICA. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 74. Obtenido de www.redalyc.org/articulo.oa?id=75017199010
- Trejo Vázquez, R., & Hernández Montoya, V. (2004). Riesgos a la salud por presencia del aluminio en el agua potable. *Conciencia Tecnológica*, 25.
- UNICEF. (2020). *Evaluación rápida de la calidad del agua en Honduras*. Obtenido de <https://www.unicef.org/honduras/media/2551/file/Evaluación-rápida-de-la-calidad-del-agua-en-Honduras.pdf>
- USGS, S. G. (2001). *Una cartilla sobre la calidad del agua*. Obtenido de Science for a changing world: <https://pubs.usgs.gov/fs/fs-027-01/>

- Valdivielso, A. (s.f.). *iAgua*. Obtenido de ¿Qué es un río?: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-rio>
- Valdivielso, A. (s.f.). *iAgua*. Obtenido de ¿Qué es un acuífero?: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-acuifero>
- Vammen, K., & Vaux, H. (2019). Una visión general de la calidad del agua en las Américas. En I. I. UNESCO, *Calidad del Agua en las Américas: Retos y Oportunidades* (págs. 12-20). México: The Inter-American Network of Academies of Sciences (IANAS).
- Vázquez-Suñé, E. (2009). Hidroquímica. En C. D. Subterránea, & C. D. Subterránea (Ed.), *Hidrogeología: Conceptos básicos de hidrología subterránea* (pág. 46). Barcelona, España, España: Artes Gráficas Torres.
- Vázquez-Suñé, E., Sánchez-Vila, X., & Carrera, J. (2009). "Introduction to the Hydrogeochemical Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems". *Springer Science & Business Media*.
- Vega Prado Leiva, J. S. (2004). *Evaluación de la calidad de agua del Río Yeguaré mediante el uso de macroinvertebrados como indicadores biológicos*. Honduras: Universidad Agrícola del Zamorano.
- Vergara Villamagua, G. (2012). *Módulo 3: Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH)*. Unión Internacional para la Conservación - UICN Mesoamérica.
- Villegas, P. (10 de enero de 2011). *Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos*. Obtenido de Agua y SIG: <https://aguaysig.com/los-diagramas-mas-usados-para-la-interpretacion-de-analisis-hidroquimicos/>
- Watch Water. (s.f.). *Katalox Light Technical Data Sheet*. . Obtenido de Watch Water. : <https://ews.com.gt/wp-content/uploads/2023/08/Comerssa-Katalox-light-Ficha-tecnica.pdf>
- Water Science School. (12 de octubre de 2019). *USGS*. Obtenido de El Ciclo del Agua: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish>
- Wilcke, W., Oelmann, Y., Schmitt, A., Valarezo, C., Zech, W., & Homeier, J. (2008). Soils Along the Altitudinal Transect and in Catchments. En E. Beck, J. Bendix, I. Kottke, F. Makeschin, & R. Mosandl, *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador*. (págs. 75-85). Springer, Berlin, Heidelberg: Ecological Studies.

Wolock, A. (2003). Should intensive use of norenewable groundwater always be rejected. En M. Llamas, & E. Custodio, *Intensive Use of Groundwater* (págs. 191-203). Balkema Publishers.

Zamora, J. R. (octubre de 2009). Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela. *Revista de pensamiento actual*(9), 125-134.

Zarza, L. F. (s.f.). *iAgua*. Obtenido de ¿Qué son las aguas superficiales?: <https://www.iagua.es/respuestas/que-son-aguas-superficiales>

ANEXOS

ANEXO 1: Norma Técnica Nacional para la Calidad del Agua Potable

Parámetro	Unidades	Valor recomendado	Valor máximo admisible
Parámetros bacteriológicos			
Coliformes Totales	UFC/100 mL	0.00	10.00
Coliformes Termotolerantes	UFC/100 mL	0.00	0.00
Parámetros Organolépticos			
Color Verdadero	mg/l (Pt-Co)	1.00	15.00
Turbiedad	UNT	1.00	5.00
Olor	Factor Dilución	0.00	2 a 12 °C 3 a 25 °C
Sabor	Factor Dilución	0.00	2 a 12 °C 3 a 25 °C
Parámetros Físico, Químicos			
Temperatura	°C	18-30	-----
Concentración Iones Hidrógeno	Valor pH	6.50-8.50	-----
Cloro Residual	mg/l		
Cloruros	mg/l	25.00	250.00
Conductividad	µS/cm	400.00	-----
Dureza			
Sulfatos	mg/l	25.00	250.00
Aluminio	mg/l		0.20
Calcio	mg/l CaCO ₃	100.00	-----
Cobre	mg/l	1.00	2.00
Magnesio	mg/l CaCO ₃	30.00	50.00
Sodio	mg/l	25.00	200.00
Potasio	mg/l		10.00
Sólidos Totales Disueltos	mg/l		1000.00
Zinc	mg/l		3.00
Parámetros para Sustancias no Deseadas			
Nitratos	mg/l	25.00	50.00
Nitritos	mg/l	-----	0.10
Amonio	mg/l	0.05	0.50
Hierro	mg/l	-----	0.30
Manganeso	mg/l	0.01	0.50
Fluoruro	mg/l	-----	0.70 (25-30 °C)
Sulfuro de Hidrógeno	mg/l	-----	0.05
Parámetros para Sustancias Inorgánicas con Significado para la Salud			
Arsénico	mg/l	-----	0.01
Cadmio	mg/l	-----	0.003
Cianuro	mg/l	-----	0.07
Cromo	mg/l	-----	0.05
Mercurio	mg/l	-----	0.001
Níquel	mg/l	-----	0.02
Plomo	mg/l	-----	0.01

Parámetro	Unidades	Valor recomendado	Valor máximo admisible
Antimonio	mg/l	-----	0.005
Selenio	mg/l	-----	0.01

Fuente: (Ministerio de Salud, 1995).

ANEXO 2: Puntos de muestreo

No.	Punto de muestreo (Código)	Tipo fuente	Municipio	Fuente	X	Y	Z
1	Y-MA-01	Nacimiento	Valle de Ángeles	Subterránea	496295	1566995	1495
2	Y-MA-02	Nacimiento	Valle de Ángeles	Subterránea	492528	1565120	1517
3	Y-MA-03	Nacimiento	Valle de Ángeles	Subterránea	502090	1560949	987
4	Y-PP-25	Pozo perforado	San Antonio de Oriente	Subterránea	496084	1555561	
5	Y-PP-22	Pozo perforado	Morocelí	Subterránea	508219	1554442	631
6	Y-PP-17	Pozo perforado	San Antonio de Oriente	Subterránea	493301	1552197	
7	Y-MA-18	Nacimiento	San Antonio de Oriente	Subterránea	494393	1551546	
8	Y-PP-04	Pozo perforado	San Antonio de Oriente	Subterránea	498601	1549796	816
9	Y-MA-20	Nacimiento	Tatumbla	Subterránea	493484	1549626	
10	Y-MA-13	Nacimiento	Yuscarán	Subterránea	509432	1549351	
11	Y-PP-07	Pozo perforado	San Antonio de Oriente	Subterránea	497290	1548475	856
12	Y-PP-06	Pozo perforado	San Antonio de Oriente	Subterránea	496115	1548134	928
13	Y-MA-05	Nacimiento	Tatumbla	Subterránea	494472	1547795	1138
14	Y-MA-16	Nacimiento	Tatumbla	Subterránea	495081	1547136	
15	Y-MA-09	Nacimiento	Güinope	Subterránea	507607	1546091	1248
16	Y-PP-19	Pozo perforado	Tatumbla	Subterránea	496655	1542693	
17	Y-MA-24	Nacimiento	Güinope	Subterránea	508735	1541365	1695
18	Y-PP-08	Pozo perforado	Distrito Central	Subterránea	498378	1540706	1066
19	Y-MA-15	Nacimiento	Maraita	Subterránea	498254	1539633	1024
20	Y-MA-23	Nacimiento	Güinope	Subterránea	502779	1538672	976
21	Y-MA-10	Nacimiento	Güinope	Subterránea	504892	1533283	1466
22	Y-PM-11	Pozo malacate	Maraita	Subterránea	498906	1533142	1475
23	Y-PP-14	Pozo perforado	Güinope	Subterránea	503977	1532162	1499

ANEXO 3: Balance iónico de los puntos de muestreo

Muestreo	Punto de muestreo (código)	Conductividad	% ser aceptado	% error calculado	Criterio
1.SC2020	Y-PP-22	258.20	10%	-18%	No Aceptable
	Y-PP-04	100.40	23%	-100%	No Aceptable
	Y-MA-05	177.90	13%	-30%	No Aceptable
2.CNC2020	Y-PP-04	123.50	20%	-19%	Aceptable
	Y-PP-07	0.00	30%	-100%	No Aceptable
	Y-PP-06	0.00	30%	-100%	No Aceptable
	Y-MA-05	194.10	11%	-31%	No Aceptable
3.LL2020	Y-MA-01	23.40	30%	40%	No Aceptable
	Y-MA-02	50.50	30%	-7%	Aceptable
	Y-MA-03	111.80	22%	12%	Aceptable
	Y-PP-22	278.90	9%	-18%	No Aceptable
	Y-PP-17	174.00	13%	-10%	Aceptable
	Y-MA-18	169.50	14%	-23%	No Aceptable
	Y-PP-04	131.40	19%	-8%	Aceptable
	Y-MA-20	57.10	29%	-28%	Aceptable
	Y-MA-13	56.50	29%	1%	Aceptable
	Y-PP-07	195.00	11%	-19%	No Aceptable
	Y-PP-06	131.70	19%	-20%	No Aceptable
	Y-MA-05	174.70	13%	-14%	No Aceptable
	Y-MA-16	30.40	30%	-11%	Aceptable
	Y-MA-09	53.90	29%	25%	Aceptable
	Y-MA-24	46.40	30%	4%	Aceptable
	Y-PP-08	109.90	22%	-16%	Aceptable
	Y-MA-15	118.30	21%	-19%	Aceptable
	Y-MA-23	92.00	24%	-13%	Aceptable
	Y-MA-10	49.90	30%	1%	Aceptable
	Y-PM-11	132.10	19%	-25%	No Aceptable
Y-PP-14	92.00	24%	-19%	Aceptable	
4.SC2021	Y-MA-01	69.60	27%	8%	Aceptable
	Y-MA-02	121.10	21%	-1%	Aceptable
	Y-MA-03	169.20	14%	12%	Aceptable
	Y-PP-22	291.60	9%	11%	No Aceptable
	Y-PP-17	177.20	13%	-2%	Aceptable
	Y-MA-18	114.90	21%	-7%	Aceptable
	Y-PP-04	135.60	19%	10%	Aceptable
	Y-MA-13	106.50	22%	12%	Aceptable
	Y-PP-07	199.80	10%	-7%	Aceptable
	Y-MA-05	228.20	10%	-19%	No Aceptable

Muestreo	Punto de muestreo (código)	Conductividad	% ser aceptado	% error calculado	Criterio
	Y-MA-16	61.70	28%	6%	Aceptable
	Y-MA-09	49.50	30%	2%	Aceptable
	Y-MA-24	51.50	30%	3%	Aceptable
	Y-PP-08	76.10	27%	5%	Aceptable
	Y-MA-15	243.70	10%	15%	No Aceptable
	Y-MA-23	98.00	24%	4%	Aceptable
	Y-MA-10	54.70	29%	10%	Aceptable
	Y-PM-11	40.40	30%	10%	Aceptable
	Y-PP-14	80.40	26%	12%	Aceptable
5.CN2021	Y-MA-01	28.90	30%	42%	No Aceptable
	Y-MA-02	62.00	28%	22%	Aceptable
	Y-MA-03	149.90	17%	-18%	No Aceptable
	Y-PP-25	80.40	26%	23%	Aceptable
	Y-PP-22	279.70	9%	-15%	No Aceptable
	Y-PP-17	173.80	13%	-17%	No Aceptable
	Y-MA-18	129.40	19%	3%	Aceptable
	Y-PP-04	127.20	20%	19%	Aceptable
	Y-MA-20	56.90	29%	1%	Aceptable
	Y-MA-13	41.80	30%	9%	Aceptable
	Y-PP-07	187.90	12%	-2%	Aceptable
	Y-MA-05	194.50	11%	3%	Aceptable
	Y-MA-16	38.40	30%	7%	Aceptable
	Y-MA-09	40.60	30%	32%	No Aceptable
	Y-PP-19	153.50	16%	5%	Aceptable
	Y-MA-24	51.90	30%	36%	No Aceptable
	Y-PP-08	763.00	7%	-1%	Aceptable
	Y-MA-15	88.40	25%	31%	No Aceptable
	Y-MA-23	93.40	24%	6%	Aceptable
	Y-MA-10	57.20	29%	34%	No Aceptable
Y-PM-11	40.00	30%	55%	No Aceptable	
Y-PP-14	79.40	26%	11%	Aceptable	
6. LL2021	Y-MA-01	15.00	30%	5%	Aceptable
	Y-PP-25	39.00	30%	29%	Aceptable
	Y-PP-04	11.00	30%	-24%	Aceptable
	Y-MA-05	176.00	13%	2%	Aceptable
	Y-MA-16	10.00	30%	11%	Aceptable
	Y-PP-19	127.00	20%	4%	Aceptable
	Y-MA-23	91.00	25%	26%	No Aceptable
	Y-MA-10	53.00	30%	4%	Aceptable
	Y-PP-14	22.00	30%	-28%	Aceptable

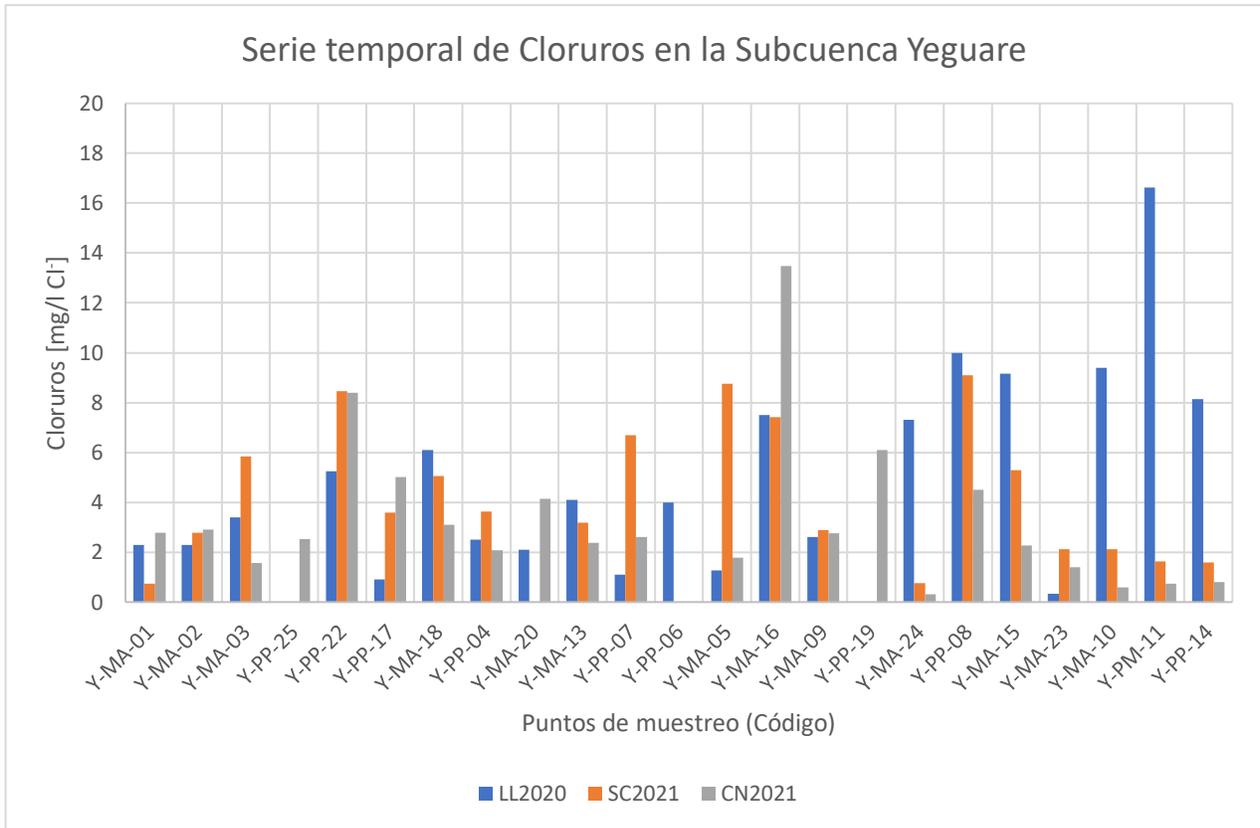
ANEXO 4: Tipo de agua

Punto de muestreo (código)	SC2020	CN2020	LL2020	SC2021	CN2021	LL2021
Y-MA-01			Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada cálcica	Sulfatada cálcica	Bicarbonatada sódica
Y-MA-02			Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada cálcica	
Y-MA-03			Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada cálcica	
Y-PP-25					Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada sódica
Y-PP-22	Bicarbonatada sódica		Bicarbonatada sódica	Bicarbonatada sódica	Bicarbonatada sódica	
Y-PP-17			Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada cálcica	
Y-MA-18			Bicarbonatada cálcica	Sulfatada cálcica	Bicarbonatada sódica	
Y-PP-04		Sulfatada sódica	Sulfatada cálcica	Sulfatada sódica	Sulfatada sódica	Sulfatada sódica
Y-MA-20			Sulfatada cálcica		Sulfatada sódica	
Y-MA-13			Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada sódica	Bicarbonatada sódica	
Y-PP-07			Sulfatada cálcica	Sulfatada cálcica	Sulfatada cálcica	
Y-PP-06			Sulfatada cálcica			
Y-MA-05	Sulfatada cálcica	Sulfatada cálcica	Sulfatada cálcica	Sulfatada Sódica	Sulfatada cálcica	Sulfatada sódica
Y-MA-16			Sulfatada cálcica	Sulfatada magnésica	Clorada cálcica	Sulfatada sódica
Y-MA-09			Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada sódica	Bicarbonatada cálcica	
Y-PP-19					Sulfatada sódica	Sulfatada cálcica
Y-MA-24			Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada sódica	Bicarbonatada magnésica	

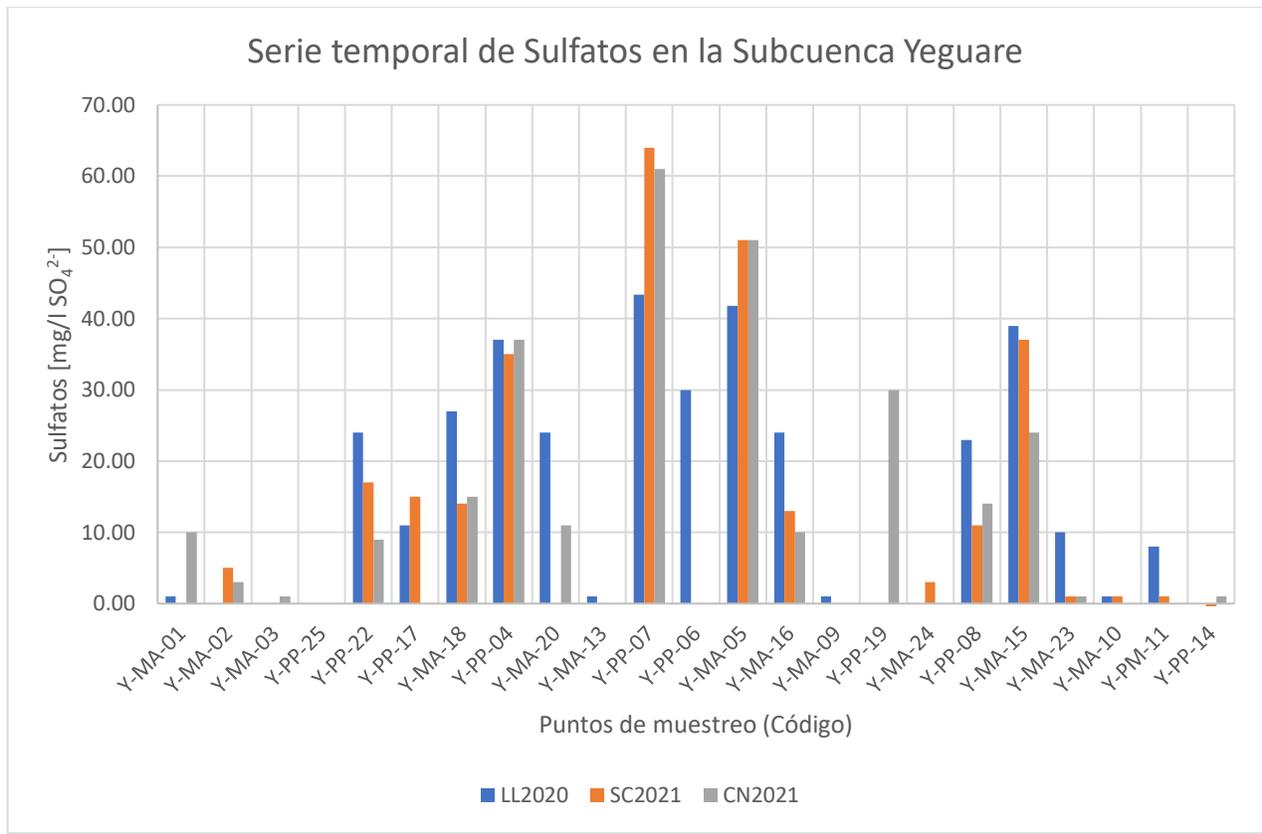
Punto de muestreo (código)	SC2020	CN2020	LL2020	SC2021	CN2021	LL2021
Y-PP-08			Sulfatada cálcica	Clorada sódica	Sulfatada sódica	
Y-MA-15			Sulfatada cálcica	Sulfatada sódica	Sulfatada sódica	
Y-MA-23			Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada sódica	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada cálcica
Y-MA-10			Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada sódica	Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada sódica
Y-PM-11			Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada sódica	Bicarbonatada cálcica	
Y-PP-14			Bicarbonatada cálcica	Bicarbonatada sódica	Bicarbonatada cálcica	

ANEXO 5: Series temporales de iones mayoritarios

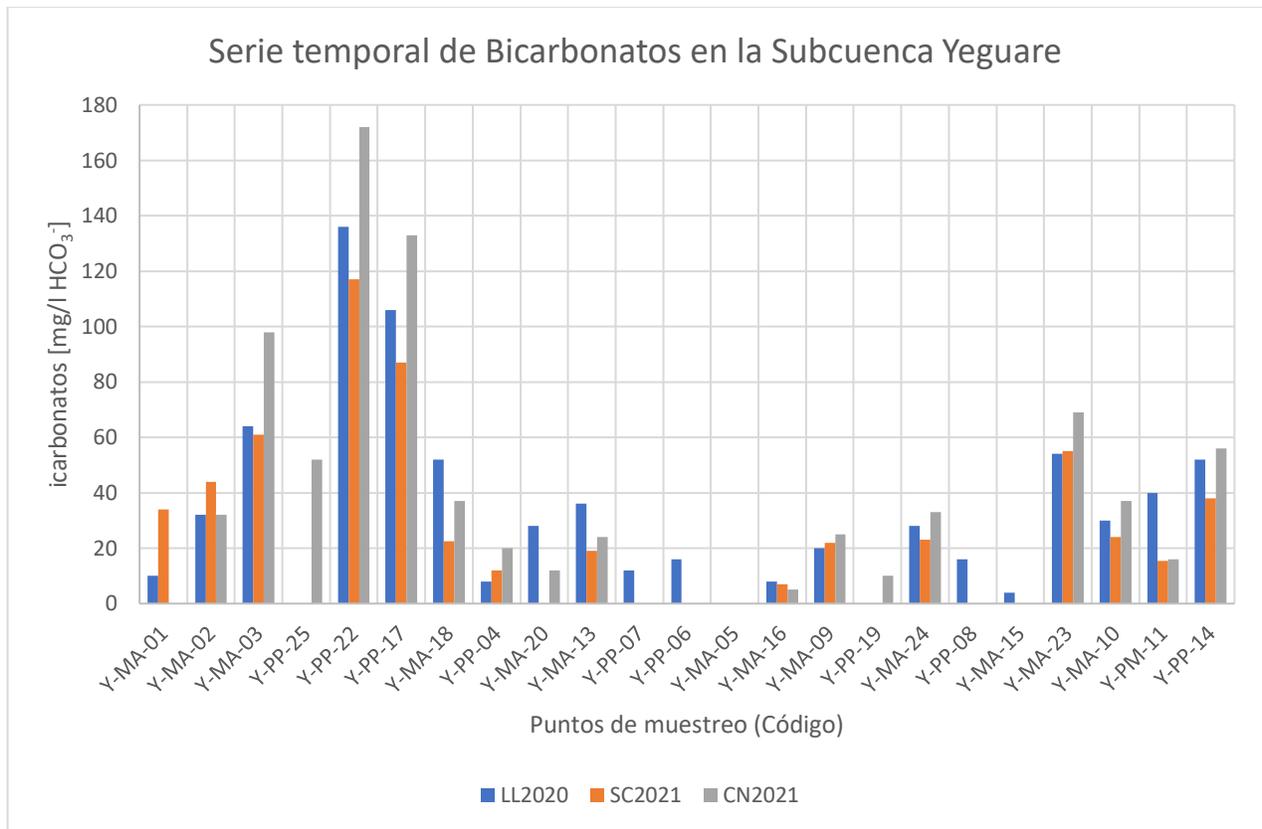
A. CLORUROS



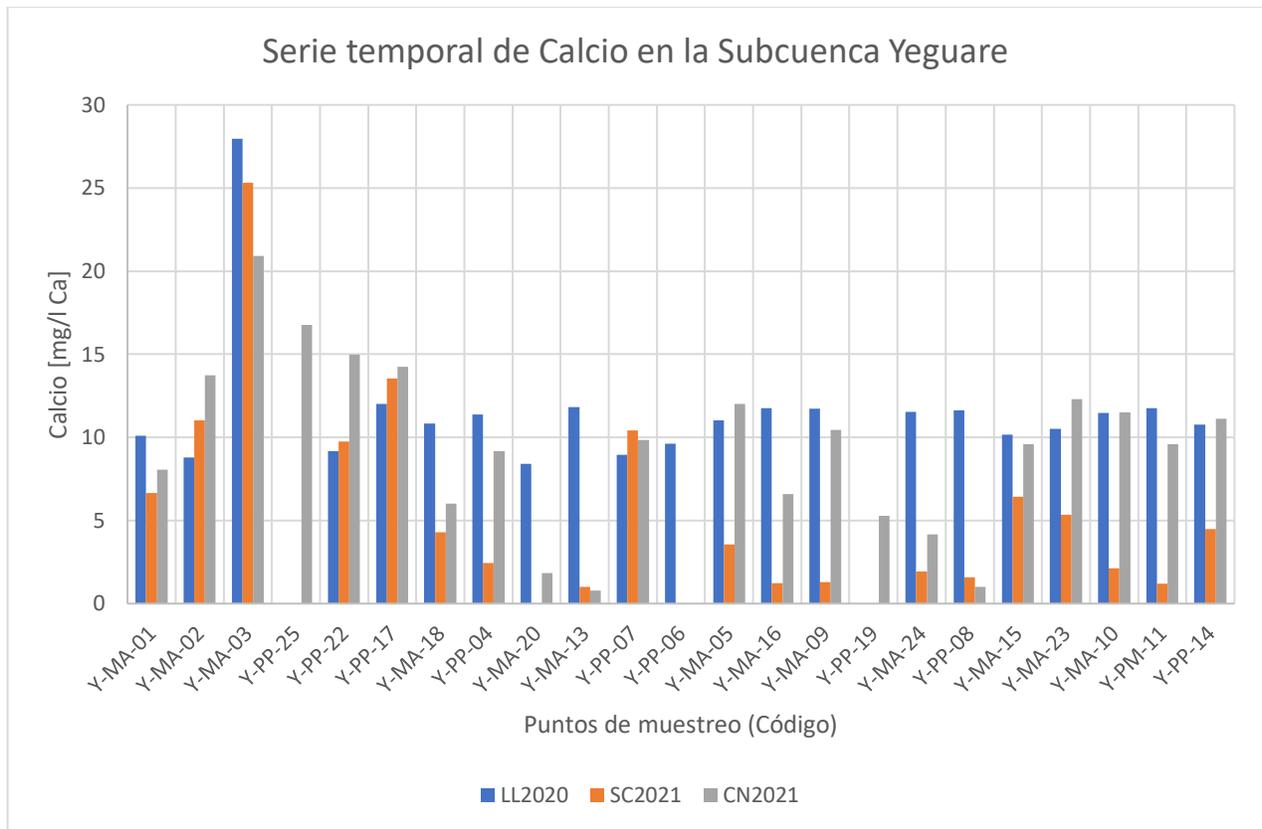
B. SULFATOS



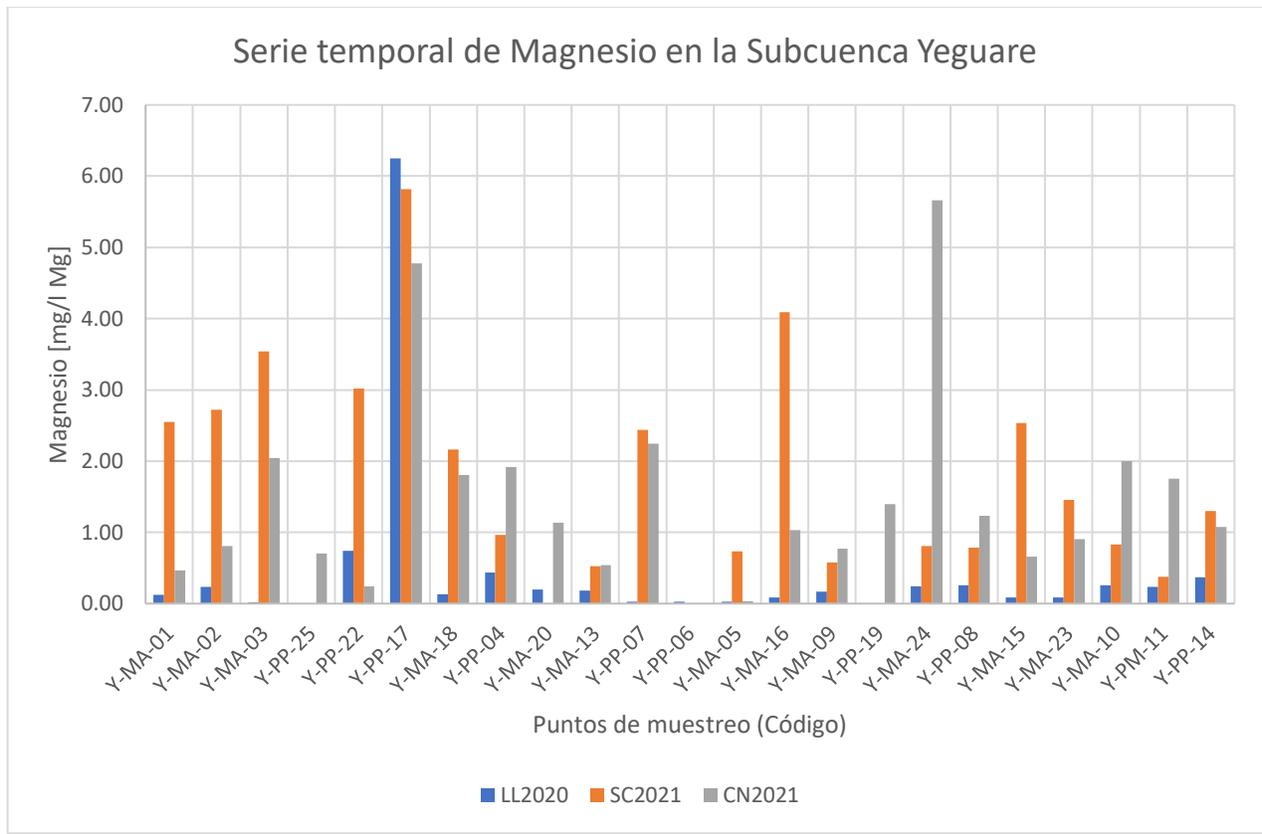
C. BICARBONATOS



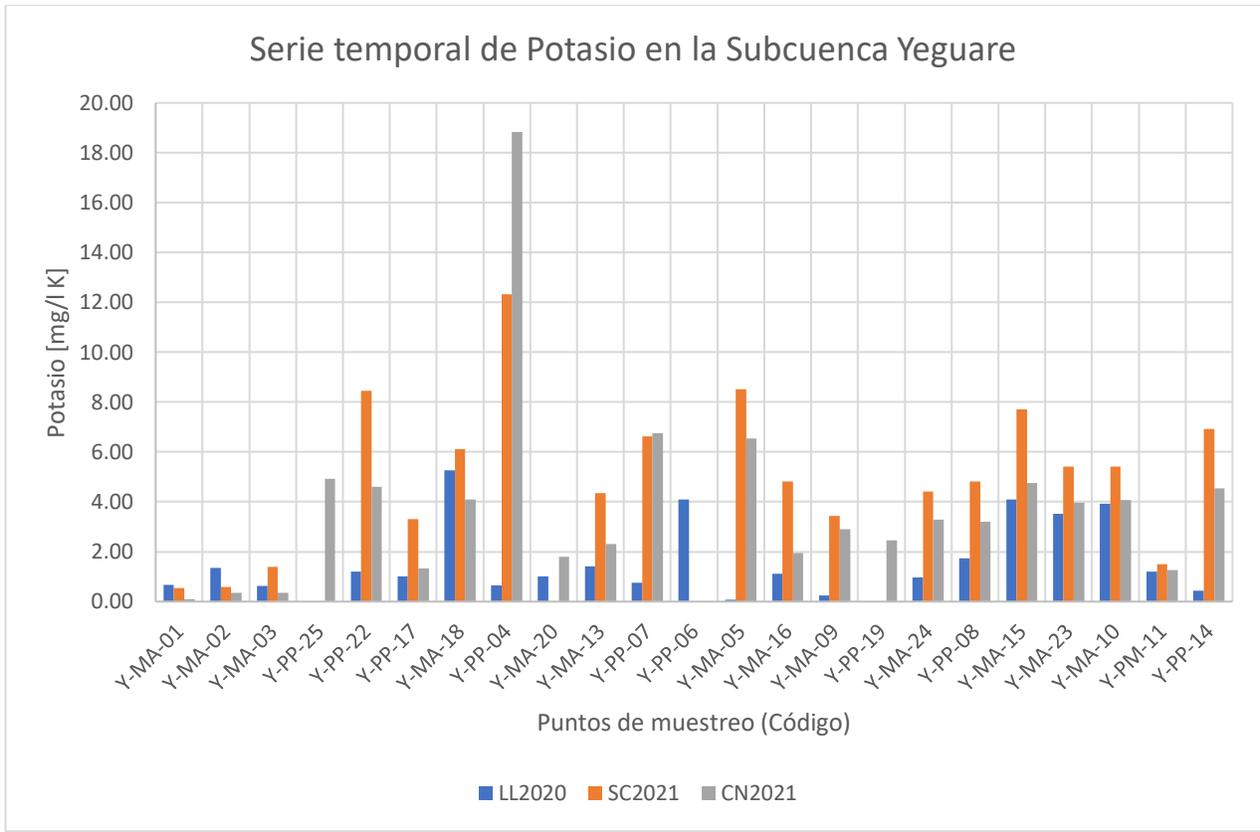
D. CALCIO



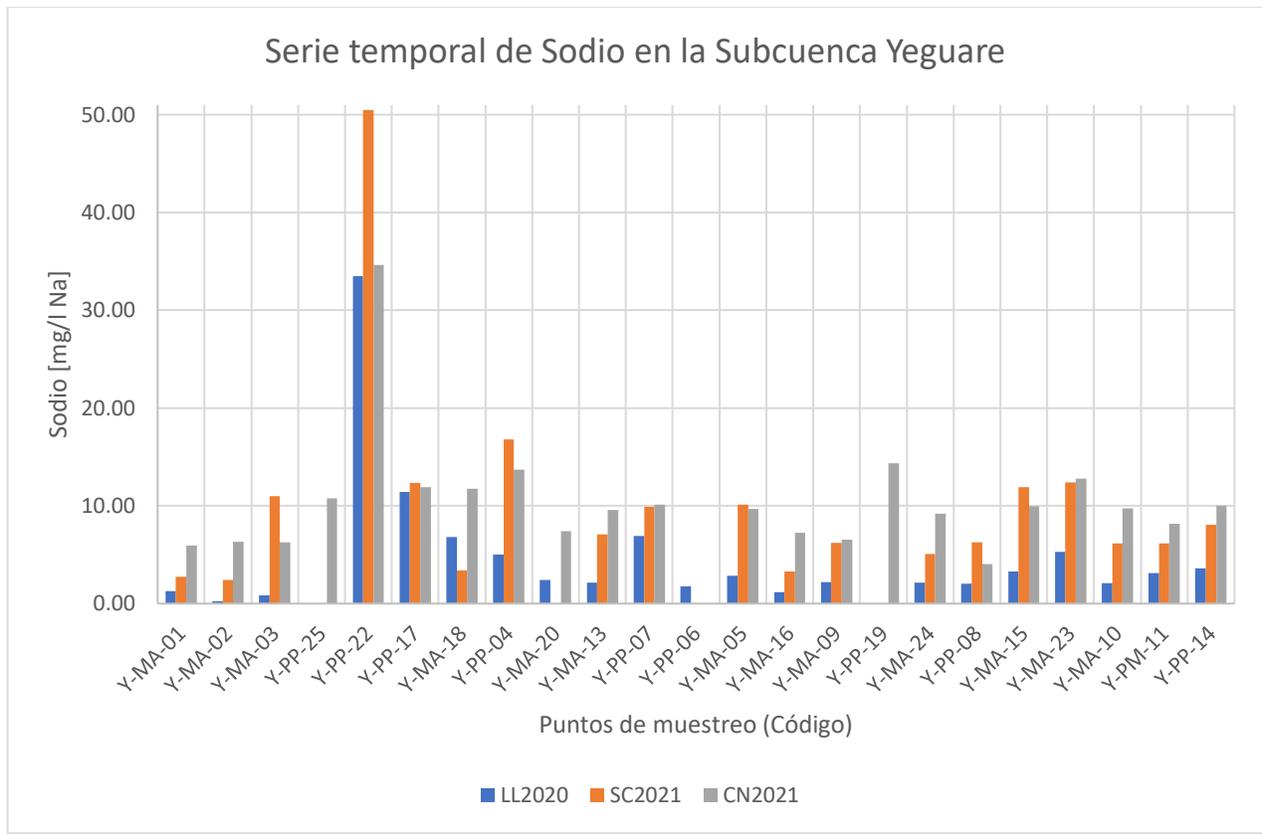
E. MAGNESIO



F. POTASIO



G. SODIO



ANEXO 6: Índice de Calidad del Agua (ICA)

A. SEGÚN NORMA TÉCNICA NACIONAL PARA LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE (NTNCAP)

Punto de muestreo (código)	CCME _{wqi}	Clasificación	F1	F2	F3
Y-MA-01	56.39	Marginal	31.58	14.29	67.11
Y-MA-02	45.09	Marginal	21.06	15.69	91.42
Y-MA-03	82.03	Buena	5.56	2.00	30.56
Y-PP-25	41.80	Pobre	31.58	31.43	90.44
Y-PP-22	100.00	Excelente	0.00	0.00	0.00
Y-PP-17	91.94	Buena	10.53	4.00	8.26
Y-MA-18	41.80	Pobre	21.06	19.61	96.62
Y-PP-04	65.90	Regular	26.32	13.19	51.22
Y-MA-20	43.67	Pobre	15.79	11.77	95.56
Y-MA-13	52.03	Marginal	22.23	16.00	78.45
Y-PP-07	86.89	Buena	15.79	12.97	9.91
Y-PP-06	82.94	Buena	16.67	19.05	15.26
Y-MA-05	56.63	Marginal	26.32	19.00	67.75
Y-MA-16	53.63	Marginal	36.85	20.84	68.26
Y-MA-09	49.88	Marginal	16.67	12.00	84.36
Y-PP-19	63.68	Marginal	21.06	13.16	57.81
Y-MA-24	88.14	Buena	10.53	10.00	14.53
Y-PP-08	65.87	Regular	36.85	17.31	42.86
Y-MA-15	47.97	Marginal	31.58	18.87	82.27
Y-MA-23	48.68	Marginal	36.85	18.06	78.86
Y-MA-10	53.68	Marginal	31.58	15.72	72.07
Y-PM-11	57.25	Marginal	42.11	24.53	55.76
Y-PP-14	74.07	Regular	26.32	9.73	35.07

B. SEGÚN AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS (EPA)

Punto de muestreo (código)	CCME _{wqi}	Clasificación	F1	F2	F3
Y-MA-01	50.38	Marginal	43.75	18.97	71.51
Y-MA-02	41.74	Pobre	31.25	23.81	92.95
Y-MA-03	79.35	Regular	6.67	2.44	35.07
Y-PP-25	39.31	Pobre	37.50	34.49	91.96
Y-PP-22	100.00	Excelente	0.00	0.00	0.00
Y-PP-17	85.67	Buena	18.75	7.32	14.53
Y-MA-18	38.40	Pobre	31.25	30.96	97.21
Y-PP-04	81.70	Buena	18.75	12.17	22.49
Y-MA-20	41.62	Pobre	25.00	17.86	96.34
Y-MA-13	50.53	Marginal	20.00	17.08	81.55
Y-PP-07	77.50	Regular	25.00	22.23	20.00
Y-PP-06	73.55	Regular	26.67	27.78	24.82
Y-MA-05	60.48	Marginal	31.25	27.50	54.34
Y-MA-16	50.01	Marginal	43.75	25.00	70.42
Y-MA-09	45.03	Marginal	33.34	19.52	87.02
Y-PP-19	77.57	Regular	25.00	18.75	23.08
Y-MA-24	82.90	Buena	18.75	15.00	17.36
Y-PP-08	63.03	Marginal	37.50	18.61	48.46
Y-MA-15	40.60	Pobre	50.00	29.55	84.92
Y-MA-23	44.77	Pobre	43.75	23.34	81.82
Y-MA-10	50.30	Marginal	37.50	18.97	75.13
Y-PM-11	53.76	Marginal	50.00	29.55	55.16
Y-PP-14	73.14	Regular	31.25	11.67	32.44

C. SEGÚN ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS)

Punto de muestreo (código)	CCME _{wqi}	Clasificación	F1	F2	F3
Y-MA-01	45.06	Marginal	42.86	16.67	83.31
Y-MA-02	39.20	Pobre	28.58	29.42	96.99
Y-MA-03	64.98	Marginal	16.67	6.25	57.99
Y-PP-25	40.58	Pobre	28.58	27.28	95.03
Y-PP-22	100.00	Excelente	0.00	0.00	0.00
Y-PP-17	87.12	Buena	14.29	6.25	15.97
Y-MA-18	37.20	Pobre	28.58	35.30	98.85
Y-PP-04	75.70	Regular	14.29	6.67	39.03
Y-MA-20	38.74	Pobre	28.58	27.28	98.48
Y-MA-13	45.25	Marginal	16.67	18.75	91.45
Y-PP-07	87.86	Buena	14.29	11.12	10.72
Y-PP-06	100.00	Excelente	0.00	0.00	0.00
Y-MA-05	58.53	Marginal	14.29	3.13	70.33
Y-MA-16	48.11	Marginal	42.86	23.08	75.56
Y-MA-09	41.16	Pobre	33.34	18.75	94.47
Y-PP-19	100.00	Excelente	0.00	0.00	0.00
Y-MA-24	71.45	Regular	28.58	20.00	35.07
Y-PP-08	57.63	Marginal	28.58	11.12	66.67
Y-MA-15	41.32	Pobre	42.86	15.79	90.81
Y-MA-23	40.96	Pobre	42.86	23.08	89.94
Y-MA-10	46.73	Marginal	28.58	16.67	86.14
Y-PM-11	55.83	Marginal	42.86	15.79	61.39
Y-PP-14	63.66	Marginal	28.58	7.70	55.56

Contribuciones científicas

Artículos científicos

Estado de la publicación: Publicado

Autores: J. Nuñez Maradiaga, K.M. Hernández Flores, T. Peña Paz, D. I. Montoya.

Revista: Universidad Y Sociedad

Título del artículo: Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas en la Laguna del Pedregal.

Fecha de publicación/aceptación/envío: Enero 2023/ noviembre 2022/ septiembre 2022

Resumen: Este trabajo presenta una evaluación de la calidad del agua subterránea para consumo humano en los alrededores de la Laguna del Pedregal. Los principales ejes abordados incluyen en primer lugar el desarrollo de un contexto teórico sobre el agua que conlleva hablar de su calidad, los posibles focos de contaminación y principales actividades que pueden ocasionar un detrimento en la misma. En segundo lugar se presenta la aplicación del índice canadiense de calidad de agua propuesto por el Canadian Council of Ministers of the Environment, conocido como CCME_WQI (por sus siglas en inglés) con el fin de obtener una caracterización de la calidad del agua que se maneja en la zona, luego se desarrollan modelos hidrogeoquímicos que ayudan a determinar el estado de solubilidades de los minerales que pueden estar en el medio según la geología presente, así como el estudio cualitativo de las actividades antropogénicas de la zona, esto con el fin de poder determinar las posibles actividades ya sean naturales o antropogénicas que afectan la calidad del agua. También se plantea la planificación hídrica desarrollada con base en las diferentes fuentes de información accesibles y en la selección del sector que se considera necesitan una inmediata atención.

ISSN: 2218 3620

Estado de la publicación: En revisión

Autores: J. Nuñez Maradiaga, Tania Peña-Paz, W. Lagos Ordoñez, Keylin Mendoza, Dilia Montoya.

Revista: Bionatura

Título del artículo: Evaluation of the Groundwater Quality of the Yeguaré Sub-Basin in Terms of Human Consumption.

Fecha de publicación/aceptación/envío: Julio 2023

Resumen: Water is essential for life and plays a fundamental role in our daily activities; both its availability and quality of water have a direct impact on human well-being. Therefore, this research assessed the groundwater quality in the Yeguaré sub-basin, Honduras, using the CCMEWQI during the period 2020-2021,

considering the presence of physicochemical and biological parameters. The results revealed that 61% of water sources obtained a classification of “Marginal” (48%) or “Poor” (13%) according to the national regulations for drinking water consumption. Furthermore, it was compared with the guidelines set by the Environmental Protection Agency (EPA) and the World Health Organization (WHO), showing an increase in the “Poor” classification. The shortage of water sources with “Excellent” rating and the significant presence of “Marginal” and “Poor” sources highlight the importance of conservation, monitoring, and water quality control to protect the health of communities and the environment. This study provides relevant information for the making of further decisions regarding the management and treatment of groundwater in the Yeguaré sub-basin, emphasizing the significance of compliance international regulations for its sustainable use in the future.

Trabajos de investigación

Título del trabajo de investigación: Ecología del agua caso de estudio: parte alta de la cuenca del Río Choluteca.

Autores:

- Tania Peña
- Josseline Nuñez
- María Lourdes Enríquez
- Keylin Mendoza
- Luis Ariel Rivera
- Marcela Matamoros
- Johan E. Rodas
- María José Bu

Institución o entidad:

- Centro Experimental y de Innovación del Recurso Hídrico del Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra.
- Instituto de Investigaciones en Microbiología
- Laboratorio de Hidrobiología - Escuela de Biología

Fecha de finalización: Noviembre 2023

Capítulos de Libro

Título del capítulo: Hidroquímica.

Autores del capítulo: Tania Peña y Josseline Nuñez.

Título del libro: Ecología del Agua: parte alta de la cuenca del Río Choluteca.

Editores del libro:

- Tania Peña
- Josseline Nuñez
- María Lourdes Enríquez
- Keylin Mendoza
- Luis Ariel Rivera
- Marcela Matamoros
- Johan E. Rodas
- María José Bu.

Editorial: Universidad Nacional Autónoma de Honduras.

Año de publicación: En revisión.