

REPORTE DE SALUD AMBIENTAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI - ECUADOR

2023

REPORTE DE SALUD AMBIENTAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI-ECUADOR

Autores: Darío Paúl Arias-Muñoz, Roberth Paul Jiménez-Illapa, Jorge Renato Oquendo-Andino, Jairo Santiago Cabrera-García

Año de edición: 2023

Créditos Fotográficos:

Franklin Perachimba, Santiago Cabrera, Andrés Ipiales, Diego Cunalata.

Revisión de estilo:

MSc. Lennys Beatriz Berutti Suarez / Docente Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Ibarra. PUCESI

Pares Revisores

Dr. Jesús Ramón Aranguren Carrera PhD/ Docente Universidad Politécnica Estatal del Carchi

Dra. Paulina Elizabeth Vilela Govea PhD/ Docente Escuela Superior Politécnica del Litoral



ISBN: 978-9942-845-44-3



9 789942 845443

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	11
2. REFERENCIAS TEÓRICAS	14
2.1. CUENCAS HIDROGRÁFICAS	14
2.1.1. <i>Uso de terminología para cuencas hidrográficas</i>	16
2.2. CLASIFICACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	17
2.2.1. <i>Clasificación de cuencas hidrográficas según el método de Pfasffeter</i>	21
2.3. EL SISTEMA CUENCA HIDROGRÁFICA	23
2.3.1. <i>Funciones y servicios de una cuenca hidrográfica</i>	24
2.3.2. <i>La cuenca hidrográfica: fuente de biodiversidad</i>	26
2.3.3. <i>La disponibilidad hídrica en la cuenca hidrográfica</i>	27
2.3.4. <i>Modelos hidrológicos para el cálculo del balance hídrico</i>	30
2.3.5. <i>Escasez hídrica</i>	32
2.3.6. <i>La calidad del agua en la cuenca hidrográfica</i>	33
2.3.7. <i>La cuenca hidrográfica como unidad de interacción social</i>	58
2.4. GOBERNANZA EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS	61
2.5. PLANIFICACIÓN TERRITORIAL: UN INSTRUMENTO PARA LA ORGANIZACIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS	64
2.5.1. <i>Diagnóstico Territorial: la primera etapa de la planificación</i>	65
2.5.2. <i>Diagnóstico Ambiental: un enfoque más integrador del diagnóstico</i>	66
2.5.3. <i>Diagnóstico morfométrico de cuencas hidrográficas</i>	66
2.6. REPORTE DE SALUD DE CUENCA: UN INSTRUMENTO PARA LA PLANIFICACIÓN	68
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	71
3.1. MORFOMETRÍA DE LA CUENCA.....	72
3.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS	74
3.3. CARACTERÍSTICAS EDÁFICAS	76
3.4. CARACTERÍSTICAS ECOLÓGICAS	76
3.4.1. <i>Zonas de vida de la cuenca del río Ambi</i>	77
3.4.2. <i>Biodiversidad</i>	83
3.4.3. <i>Principales amenazas a los ecosistemas</i>	87
3.4.4. <i>Servicios ecosistémicos de la cuenca del Ambi</i>	88
3.5. CARACTERÍSTICAS SOCIOCULTURALES	89
3.5.1. <i>Pueblo Kichwa</i>	90
3.5.2. <i>Pueblo Otavalo</i>	90
3.5.3. <i>Pueblos afrodescendientes</i>	90
3.5.4. <i>Demanda del recurso hídrico</i>	91
4. MÉTODOS	95
4.1. PROCEDIMIENTOS PARA LOS CÁLCULOS DE COMPONENTE E INDICADORES.....	98
4.1.1. <i>Componente Agua</i>	98
4.1.2. <i>Componente Biodiversidad</i>	100
4.1.3. <i>Componente de riesgo climático</i>	102
4.1.4. <i>Componente Gobernanza Ambiental</i>	103

4.2.	CALIFICACIÓN DE SALUD AMBIENTAL GLOBAL Y POR ZONAS ALTITUDINALES	106
5.	RESULTADOS	109
5.1.	RESULTADOS POR INDICADORES Y COMPONENTES DE SALUD POR ZONAS ALTITUDINALES.....	109
5.1.1.	<i>Componente Agua</i>	109
5.1.2.	<i>Componente Biodiversidad</i>	110
5.1.3.	<i>Componente Riesgo Climático</i>	113
5.1.4.	<i>Componente Gobernanza</i>	114
5.2.	LA CALIFICACIÓN FINAL DE SALUD AMBIENTAL	116
5.3.	OPORTUNIDADES PARA LA ACCIÓN: LA DEFINICIÓN DE LÍNEAS ESTRATÉGICAS.....	120
6.	CONSIDERACIONES FINALES	125
7.	REFERENCIAS	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formación de una cuenca	15
Figura 2. Diferencia en la terminología de cuencas hidrográficas al traducir del inglés.....	17
Figura 3. Representación de la clasificación de cuencas según su área	17
Figura 4. Representación de la clasificación de cuencas según su altitud.....	18
Figura 5. Representación de la clasificación de cuencas según el destino de sus escurrimientos	19
Figura 6. Clasificación del Sistema Pfafstetter	22
Figura 7. Ejemplo de código del Sistema Pfafstetter.....	23
Figura 8. Estructura de sistema de cuencas hidrográficas	24
Figura 9. Funciones de una cuenca hidrográfica	25
Figura 10. Servicios ambientales de las cuencas hidrográficas	26
Figura 11. Balance hídrico.....	29
Figura 12. Porcentaje relativo de la frecuencia de utilización de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos para cálculo de la cantidad del agua en los ICA: CCME, NSF, Dinius, UWOI, Rojas, ICAUCA e IDEAM.	53
Figura 13. Estructura general para la obtención de los Índices de Calidad de Agua.....	55
Figura 14. Número total de parámetros físicos, químicos y microbiológicos utilizados por los diferentes ICA y los rangos de clasificación, codificados de acuerdo con la Tabla 10, en base al valor máximo de los índices.....	56
Figura 15. Interacción social en la cuenca hidrográfica	61
Figura 16. Marco de análisis de la gobernanza de agua	63
Figura 17. Sistemas vinculados al desarrollo integral y al ordenamiento territorial	65

Figura 18. Mapa de ubicación de la cuenca del río Ambi	71
Figura 19. Climograma de la cuenca del río Ambi.....	75
Figura 20. Tipos de texturas del suelo de la cuenca del río Ambi.....	76
Figura 21. Ecosistemas de la cuenca del río Ambi	78
Figura 22. Mamíferos de los páramos de la cuenca del río Ambi	85
Figura 23. Mapa de zonificación altitudinal de la cuenca del río Ambi	95
Figura 24. Mapa de puntos de muestro de calidad de agua	99
Figura 25. Cobertura natural de la cuenca del río Ambi.....	101
Figura 26. Calidad de agua de la cuenca del río Ambi	110
Figura 27 Calificación del indicador de porcentaje de cobertura natural de la cuenca del río Ambi	111
Figura 28. Calificación del índice de criticidad ambiental	112
Figura 29. Indicador de ocurrencia de inundaciones y deslizamientos	113
Figura 30. Indicador de presión-demográfica de la cuenca del río Ambi.....	114
Figura 31. Indicador de oportunidades de gobernanza en la cuenca del río Ambi.....	115
Figura 32. Calificación de la cuenca del río Ambi	116
Figura 33. Calificación de la zona alta de la cuenca.....	117
Figura 34. Calificación de la zona media de la cuenca.....	118
Figura 35. Calificación de la zona baja de la cuenca.....	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de una cuenca hidrográfica por área y altitud	18
Tabla 2. Clasificación de cuencas hidrográficas por su destino de escurrimiento y permanencia	19
Tabla 3. Clasificación de cuencas hidrográficas por condiciones climáticas, hidrológicas y vocacionales	20
Tabla 4. Clasificación Sistema Pfafstetter	22
Tabla 5. Otra clasificación de modelos hidrológicos	30
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos y biológicos para el análisis de la calidad de agua	36
Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos, unidades de medida más comunes e información que indican sobre la calidad de agua	44
Tabla 8. Ventajas e inconvenientes de los ICA como herramientas de evaluación de la calidad de agua.....	48
Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, frecuencia de uso y pesos relativos asignados a los parámetros empleados por los diferentes ICA.....	52
Tabla 10. Descripción de los rangos de clasificación de los ICA expresados en la Figura 14	58
Tabla 11. Parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica.....	67
Tabla 12. Parámetros morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Ambi.....	72
Tabla 13. Valores de precipitación y temperatura en un período de 30 años	75
Tabla 14. Mamíferos registrados en la cuenca del río Ambi	84
Tabla 15. Reptiles registrados en la cuenca del río Ambi.....	86
Tabla 16. Anfibios registrados en la cuenca del río Ambi.....	86

Tabla 17. Principales amenazas a los ecosistemas.....	87
Tabla 18. Valores de caudales en un período de 30 años	89
Tabla 19. Caudales autorizados por uso de agua en la cuenca del río Ambi	91
Tabla 20. Autorización de uso de agua para consumo humano, riego y abrevadero de animales y uso productivo en la cuenca del río Ambi	92
Tabla 21. Indicadores de salud socio-ecológica.....	96
Tabla 22. Selección de indicadores.....	97
Tabla 23. Referencia de clasificación del índice de calidad de agua	99
Tabla 24. Categorías utilizadas para la clasificación de cobertura natural	100
Tabla 25. Referencia de clasificación del índice de porcentaje de cobertura natural	101
Tabla 26. Referencia de calificación del índice de criticidad ambiental	102
Tabla 27. Referencia de calificación del indicador de inundación y deslizamientos	103
Tabla 28. Censo de población del año 2010 de cantones y parroquias de la cuenca del río Ambi	104
Tabla 29. Referencia de calificación del índice de presión demográfica.....	104
Tabla 30. Instrumentos de ordenamiento incluidos para el cálculo del indicador y su respectiva cualificación del nivel de gobernanza.....	105
Tabla 31. Conversión de calificación escala 0-5.....	106
Tabla 32. Indicadores seleccionados.....	109
Tabla 33. Presión-estado-respuesta de la zona alta de la cuenca	121
Tabla 34. Presión-estado-respuesta de la zona media de la cuenca	122
Tabla 35. Presión-estado-respuesta de la zona baja de la cuenca	123

PRÓLOGO

Las cuencas hidrográficas son los límites que impone la naturaleza para la distribución de los recursos naturales. En ellas, el agua fluye bajo límites naturales en un complejo sistema de ríos y arroyos, alimentando la vida en todas sus formas. Sin embargo, su importancia trasciende la mera belleza paisajística. Las cuencas hidrográficas son ecosistemas vitales que proveen agua para el consumo humano, la agricultura, la ganadería, la generación de energía, la conservación de la biodiversidad y generación de servicios ecosistémicos.

El reporte de salud ambiental de una cuenca hidrográfica es una herramienta de diagnóstico, monitoreo ambiental y socio cultural de un territorio. Al igual que un examen médico, los resultados permiten identificar los síntomas de una posible afección. Aunque en este caso será de tipo ambiental, cultural o social. La salud ambiental es un concepto multidimensional que abarca la interacción entre los seres humanos, sus actividades y los ecosistemas. Por ello, la meta principal de este libro es proporcionar información sobre aquellas problemáticas que amenazan la salud de las cuencas hidrográficas, y al hacerlo, generar conciencia en la población, una que propicie el desarrollo de acciones concretas para la conservación ambiental.

A lo largo de estas páginas, se evidenciará la magnitud de los retos y desafíos que afrontan la conservación de cuencas hidrográficas. Desde la contaminación, la degradación de los hábitats, hasta la pérdida de biodiversidad. Por ello, se analizará en detalle las amenazas a las que está expuesta la cuenca hidrográfica del río Ambi y sus consecuencias para la salud ambiental. También se hará evidente la necesidad de un enfoque holístico que incluya la participación activa de toda la comunidad para impulsar cambios significativos y forjar un camino hacia un futuro más sustentable. Sin duda, este libro busca presentar datos y estadísticas que generen una reflexión del impacto de las actividades humanas, porque solo a través del conocimiento consiente podremos garantizar que el agua continúe fluyendo en su estado más natural.

Por estos y más motivos, estimado lector ¡Adelante, sumérgete en las páginas de este libro y comienza esta emocionante travesía por el mundo de las cuencas hidrográficas!

Los autores

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento a las autoridades de la Universidad Técnica del Norte por el apoyo al trabajo de investigación.

Dr. Miguel Naranjo Toro PhD.
Rector Universidad Técnica del Norte

Dra. Alexandra Mina PhD.
Vicerrector Académico

Dr. Hernán Cadena Pulles PhD.
Vicerrector Administrativo

Dra. Nora Benítez PhD.
Vicerrectora de Investigación

Dr. Marcelo Cevallos PhD.
Decano Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales

MSc. Rosario Espín
Subdecana Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales



Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca hidrográfica debe ser considerada un territorio en el que fluyen cuerpos de agua hacia un curso principal bajo una única dirección de flujo (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN], 2009). Son conocidas principalmente como unidades espaciales en la que se desarrolla el ciclo hidrológico, a través de la captación, recarga, almacenamiento y flujo del agua. Las cuencas marcan la dirección y acumulación de agua y por lo tanto la forma y desarrollo de la vida misma. Aquí se crean espacios constituidos de índole, natural, social, cultural e incluso de administración política. Las cuencas son espacios físicos donde existen interacciones ecológicas, se desarrollan actividades económicas bajo marcos culturales, legales e institucionales (Boelens et al., 2016).

En estas unidades territoriales existe diversidad biológica por sus condiciones climáticas y geográficas, y a la vez diversidad sociocultural por ser espacios para asentamientos sociales pluriculturales. Por estos motivos son espacios vulnerables porque con el desarrollo de diferentes actividades, los impactos pueden llegar a modificar aspectos socio ecológicos (Trindade y Scheibe, 2019).

Diagnosticar las cuencas hidrográficas debe comprenderse como fundamental para la planificación y gestión eficiente no solo de los recursos hídricos, sino también de los recursos naturales (Arai et al., 2012). Las cuencas además de ser fuente de biodiversidad brindan bienes y servicios ambientales que pueden beneficiar a los seres humanos, pero que a lo largo del tiempo estos beneficios pueden ir cambiando justamente por los impactos al ambiente consecuencia de las actividades antrópicas. (Rua de Cabo et al., 2006). El crecimiento de la población y el desarrollo socioeconómico generalmente vienen con el incremento de la demanda de agua, cuya cantidad y calidad son esenciales para la salud y el desarrollo de las

comunidades (Bueno et al., 2005).

La cuenca es un espacio territorial donde la población interactúa con el medio biofísico mediante el desarrollo de actividades. Los seres humanos al ocupar, transformar y construir su hábitat dentro de los territorios se convierten en propulsores de cambios ambientales. La población puede generar transformaciones en el entorno natural provocando alteraciones en los ecosistemas, en el régimen hidrológico, ocasionando así consecuencias que incluso afectarán a las generaciones futuras (Chamochumbi, 2010).

En este contexto, la cuenca del río Ambi no ha estado exenta a cambios de origen antrópico. Esta cuenca está ubicada en el sector suroccidental de la cuenca del río Mira, en la zona alta de la cuenca, en la provincia Imbabura al norte de Ecuador. La cuenca ha presentado una dinámica de transformación permanente por la ubicación de los principales centros poblados de Imbabura: Ibarra, Otavalo, Atuntaqui y Cotacachi. Estos cambios se han producido generalmente en la zona media y baja, mientras en la zona alta se han conservado coberturas naturales como bosques y páramo.

Las consecuencias directas de estos cambios sectorizados en la cuenca han sido crecimiento poblacional, deforestación y contaminación de las fuentes de agua en las zonas media y baja, y conservación de biodiversidad en las zonas altas (Zandbergen, 1998; Kammerbauer y Ardon, 1999). Sin embargo, el avance de la frontera agrícola está ocasionando cambios de uso de suelo hacia zonas de mayor altitud de la cuenca hidrográfica.

Bajo esos antecedentes, el diagnóstico del estado de salud de la cuenca mediante la utilización de indicadores socio ecológicos entrega la oportunidad de conocer el presente y delinear acciones para el futuro. Es decir, permite planificar la toma de decisiones a mediano y largo plazo, mediante acciones encaminadas a conseguir una buena gestión de los recursos naturales que mitigue los impactos negativos en el ambiente (WWF-Colombia, 2019). En el presente documento se presentan los lineamientos metodológicos para realizar un Reporte de



Capítulo 2

REFERENCIAS TEÓRICAS

2. REFERENCIAS TEÓRICAS

2.1. Cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas son consideradas unidades territoriales adecuadas para el ordenamiento y gestión de un territorio. A continuación, se presentan algunas definiciones aceptadas para cuencas hidrográficas.

Es un “sistema complejo, abierto donde ocurre el ciclo hidrológico y cuyos elementos naturales, sociales, ambientales, económicos, políticos e institucionales son variables en el tiempo; y se encuentran en estrecha interrelación” (Vásquez et al., 2016, p.13).

La cuenca hidrográfica es la unidad fisiográfica conformada por el conjunto de los sistemas de cursos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca o ‘divisoria de aguas’ se definen naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río (Ramakrishna, 1997, p.19).

Una cuenca hidrográfica es una unidad morfológica integral, que se define en un territorio donde las aguas superficiales convergen hacia un cauce o unidad natural delimitada por la existencia de la divisoria de las aguas, las cuales fluyen al mar a través de una red de cauces principales (Gaspari et al., 2013, p.6).

Las cuencas hidrográficas también denominadas hoyas hidrográficas deben ser consideradas como los límites que impone la naturaleza para la dotación de recursos naturales. Las condiciones naturales «impuestas» son la divisoria de aguas (contornos de relieve) y la red de drenaje en común que confluyen hacia un punto de salida (Figura 1). Si bien, el flujo hídrico y los contornos del relieve establecen los límites, el agua y el suelo no son los únicos recursos naturales que se regulan a través del sistema. Los bienes naturales y los servicios ambientales también son regulados dentro del sistema, generando un intercambio de materia y flujo de

energía a través de la interacción de los elementos estructurales del ecosistema.

Figura 1.

Formación de una cuenca



Sin duda, las cuencas hidrográficas son espacios territoriales configurados por una red de drenaje, donde se producen procesos espacio-temporales entre componentes biofísicos y socioeconómicos con el fin de soportar la interacción humana. Es decir, además de ser espacios físicos que captan el agua y establecen límites para su escurrimiento, son áreas donde la sociedad interactúa. Las cuencas presentan componentes hidrológicos, ecológicos, ambientales y socioeconómicos donde se desarrollan funciones como: regulación del ciclo hidrológico, conservación de la biodiversidad, interacciones entre el elemento biótico y abiótico y suministro de recursos naturales para las actividades humanas (Aguirre-Núñez, 2011).

No hay que olvidar que el agua y el suelo son recursos esenciales que propician el desarrollo de la vida, porque sus interacciones permiten la articulación del medio físico y biótico en el territorio (Arreguín-Sánchez et al., 2007). A la vez, al ser el espacio que soporta las actividades humanas es susceptible a cambios y modificaciones que promueven la intervención social y muchas veces culminan en zonas de producción, de aprovechamiento y

normalmente de hábitat de la población (Perales-Miranda, 2016b).

Así como las cuencas hidrográficas marcan la ruta del agua y la disponibilidad de los recursos naturales, también trazan la ruta de la contaminación. Porque a menudo actúan como vías de transporte naturales para elementos contaminantes. Debido principalmente a que cualquier contaminante presente en el agua, ya sea en forma líquida o suspendida, será transportado por el flujo hacia aguas abajo siguiendo la ruta del río. A esto se suma la descarga directa de aguas residuales domésticas e industriales y la descarga indirecta a través del escurrimiento de sedimentos o productos químicos agrícolas, como pesticidas y fertilizantes (Ellis, 1989, Peters & Meybeck, 2000, Novotny, 2002). Como resultado, las cuencas hidrográficas se convierten en un camino para la contaminación proveniente de áreas urbanas, industriales y agrícolas.

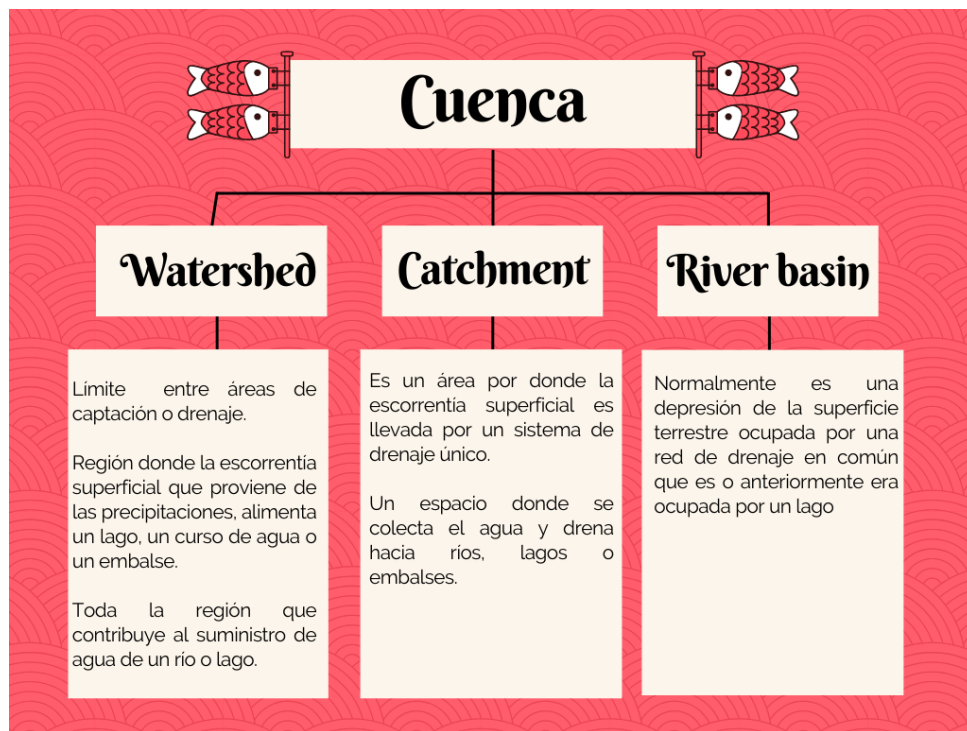
Finalmente, con todos estos antecedentes, para estudiar las cuencas se han desarrollado diferentes enfoques que van desde análisis de características físicas de la oferta, análisis de sistema integrado físico hasta análisis holístico de sistemas físico, biótico y socioeconómico (Dourojeanni et al., 2002).

2.1.1. Uso de terminología para cuencas hidrográficas

El término cuencas hidrográficas puede tener diferentes traducciones al idioma inglés. Sin embargo, puede ser la traducción de varios términos del idioma inglés: *watershed*, *catchment and river basin*. La diferencia del uso de estos términos puede parecer difusa, pero cada uno responde a una característica principal en la cuenca hidrográfica (Figura 2). Independientemente de la terminología utilizada para identificar a la cuenca hidrográfica o su sección, la cuenca es una unidad hidrográfica. Esto debido a que integra unidades de drenaje donde interactúan elementos físicos, biológicos y antrópicos.

Figura 2.

Diferencia en la terminología de cuencas hidrográficas al traducir del inglés



2.2. Clasificación de cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas se pueden clasificar por diferentes criterios. Los principales criterios para Aguirre (2007) son por área y por altitud (Figura 3, Figura 4 y Tabla 1).

Figura 3.

Representación de la clasificación de cuencas según su área

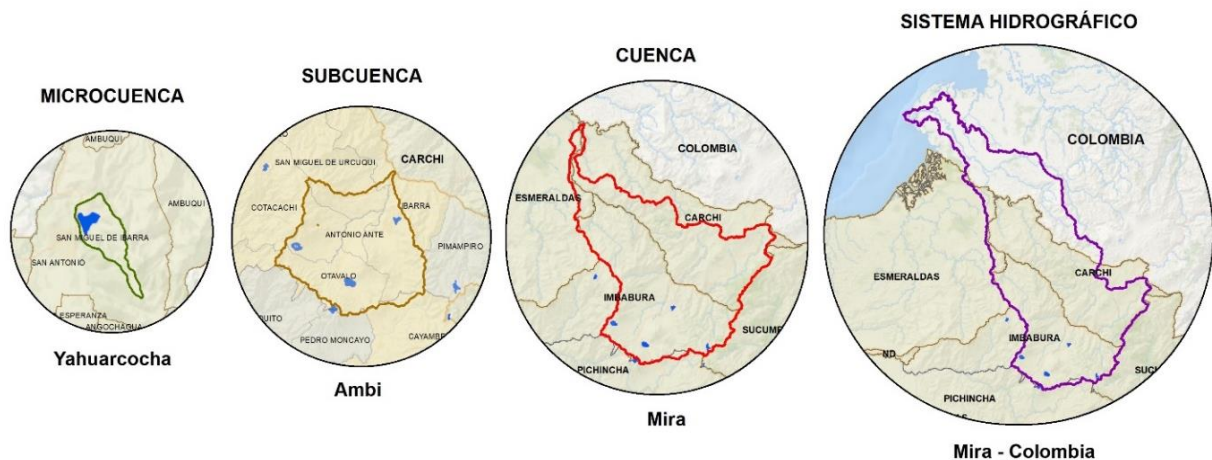
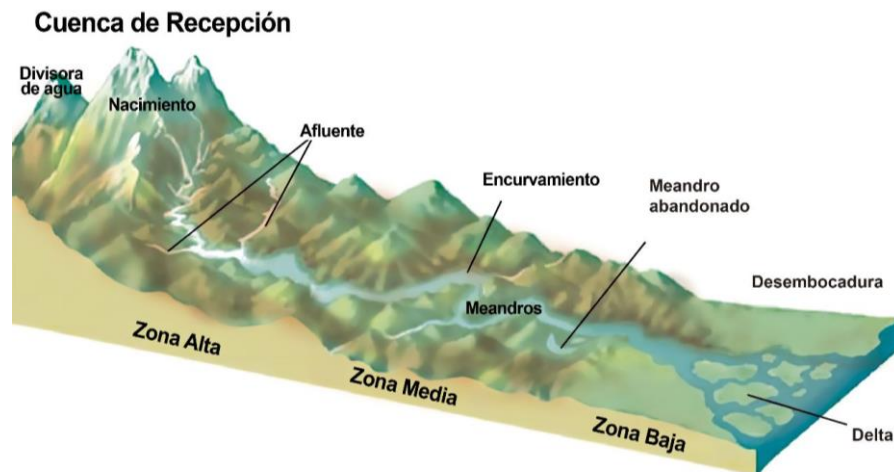


Figura 4.

Representación de la clasificación de cuencas según su altitud



Nota. Adaptado de Bordino (2021).

Tabla 1.

Clasificación de una cuenca hidrográfica por área y altitud

Clasificación de Cuencas	
Según el área	
Sistema Hidrográfico	> de 300.000 ha
Cuenca	100.000 – 300.000 ha
Subcuenca	15.000–100.000 ha
Microcuenca	4.000 – 15.000 ha
Drenajes menores	< 4.000 ha
Según la Altitud	
Cuenca o zona alta	Sección de la cuenca hidrográfica compuesta por pendientes escarpadas ubicadas en las cabeceras de los ríos. En esta sección se encuentran las cabeceras de cuenca, que es donde se capta y se recepta agua.
Cuenca o zona Media	Es la sección intermedia de la cuenca porque se ubica entre la zona baja y zona alta. En esta sección se produce el transporte del flujo hídrico y de sedimentos.
Cuenca o zona baja	Se encuentra en la confluencia o desembocadura de los ríos. En esta sección se produce la deposición y acumulación de agua y sedimentos.

Aunque a las cuencas hidrográficas también se les puede clasificar por otras características físicas como: a) el destino de sus escurrimientos; b) según la permanencia del

caudal durante el año (Tabla 2 y Figura 5).

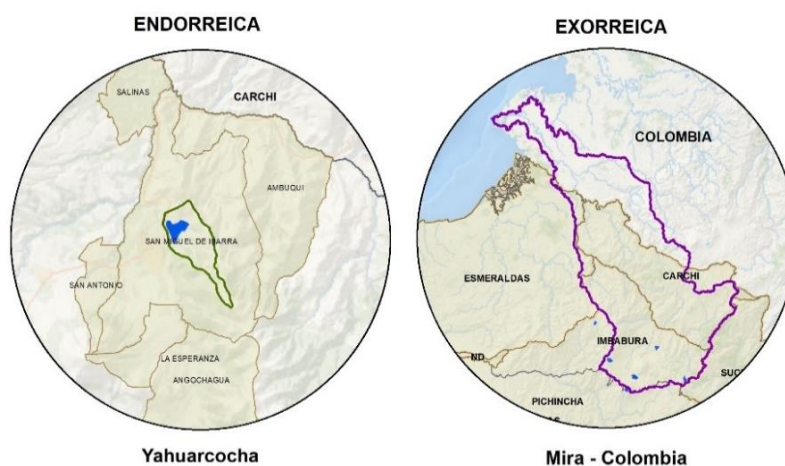
Tabla 2.

Clasificación de cuencas hidrográficas por su destino de escurrimiento y permanencia

Clasificación de Cuencas	
Según el destino de escurrimiento	
Endorreicas	La red hídrica de la cuenca hidrográfica fluye y no llega al océano, porque desemboca en un embalse o lago interior sin salida.
Exorreicas	El sistema hídrico fluye y llega al mar u océano a través de tres formas: vertiente, y lacustre con afluente.
Arreicas	La red hídrica es intermitente porque se evapora o se infiltra en el suelo, lo cual ocasionado que aparezca y desaparezca en el paisaje. Generalmente se presentan en zonas áridas o desiertos donde existen pequeños cursos de agua temporales e intermitentes.
Según la permanencia de caudal durante el año	
Cuenca permanentes	Presentan escorrentía durante todo el año.
Cuencas intermitentes	Presentan escorrentía durante los meses de precipitación.
Cuencas efímeras	Presentan escorrentía en épocas momentáneas.

Figura 5.

Representación de la clasificación de cuencas según el destino de sus escurrimientos



También existen clasificaciones que se enfocan en las características climáticas e hídricas de la cuenca hidrográfica (Tabla 2). En la clasificación climática se establecen tres climas predominantes: húmedo, seco y árido o desértico. Mientras que en la clasificación

hidrológica se diferencian los flujos torrenciales y el impacto del comportamiento de las crecidas (Aguirre, 2007). Los flujos torrenciales que se describen como una mezcla de agua y sedimentos que se transportan velozmente a través de cauces en cuencas con relieve colinado y montañoso, generan un impacto alto a las zonas bajas inundables (Koutroulis & Tsanis, 2010). Mientras que las crecidas implican la respuesta hidrológica máxima de la cuenca hidrográfica a la recepción de agua lluvia (Gaspari et al., 2013). Finalmente está la clasificación de las cuencas hidrográficas por uso vocacional (Tabla 3). En esta clasificación se considera la aptitud hídrica y edáfica para el desarrollo de actividades.

Por lo cual para tomar decisiones de uso acorde a esta clasificación se puede usar el orden de prelación del agua. El orden de prelación del agua se refiere a la jerarquía establecida para asignar prioridades en el uso y acceso al agua en situaciones de escasez o conflictos (Castillo & Alvez, 2020). Es una guía que determina qué usos tienen prioridad sobre otros en caso de que los recursos hídricos sean limitados. Para el caso ecuatoriano de acuerdo con la normativa ambiental vigente, el orden de prelación del agua es: a) agua para consumo humano, b) riesgo que garantice la soberanía alimentaria, c) caudal ecológico y d) actividades productivas.

Tabla 3.

Clasificación de cuencas hidrográficas por condiciones climáticas, hidrológicas y vocacionales

Clasificación de Cuencas	
Clima predominante	
De clima húmedo	Se caracterizan porque se ubican en ecosistemas húmedos. El manejo de la cuenca se prioriza el control los excesos de agua y problemas erosivos.
De clima seco	Se caracterizan porque se ubican en ecosistemas secos. El manejo de la cuenca se prioriza la reducción de la evapotranspiración para mantener la estabilidad del suelo.
De clima árido y desértico	Se caracterizan porque se ubican en ecosistemas secos.

Por su torrencialidad	
Cuencas de flujo torrencial	Cuando la velocidad de la crecida es mayor a 20 m/s y a la vez presentan un caudal sólido mayor del 75% en relación con el caudal total.
Cuencas de lava torrencial	Cuando tienen un caudal sólido con relación al total del 25 al 75%, la velocidad y capacidad de transporte es menor.
Comportamiento hidrológico de las crecidas	
Microcuencas de torrentes	Se produce en microcuencas y el histograma de crecidas es de tipo ascendente con una pendiente pronunciada y un pico de crecidas claramente definido.
Subcuencas de ríos torrenciales	Cuando se incluyen varias microcuencas de torrentes.
Cuencas de ríos grandes	Se incluyen subcuencas de ríos torrenciales y secciones de ríos de llanuras.
Según su uso vocacional	
Para agua de consumo humano	Son cuencas donde se prioriza el uso del agua para consumo humano.
Para agua de riego	La presencia de cultivos hace necesario el uso del agua para riego.
Para navegación	Debido a las características de su caudal fluvial se puede usar para la navegación y transporte.
Para ganadería	La presencia de ganado hace necesario la priorización de uso para abrevaderos.
Para hidroeléctrica	El caudal del principal río de la cuenca hidrográfica presenta potencial para la generación de energía hidroeléctrica.
Múltiple	Debido a que la cuenca presenta varias aptitudes hídricas y edáficas se realizan varios usos vocacionales siempre considerando los límites físicos-ambientales.

2.2.1. Clasificación de cuencas hidrográficas según el método de Pfafstetter

Se entiende por unidades hidrográficas a una o varias unidades de drenaje, en las cuales se busca una adecuada planificación y gestión del recurso hídrico. En Ecuador se aplica la metodología Pfafstetter, diseñada por Otto Pfafstetter en el año 1989, y también adoptada por organizaciones mundiales como las Naciones Unidas en su Programa del Medio Ambiente – PNUMA. El Sistema Pfafstetter considera tres tipos de unidades hidrográficas de drenaje, cuencas, intercuencas y cuencas internas (Tabla 4 y Figura 6).

Tabla 4.

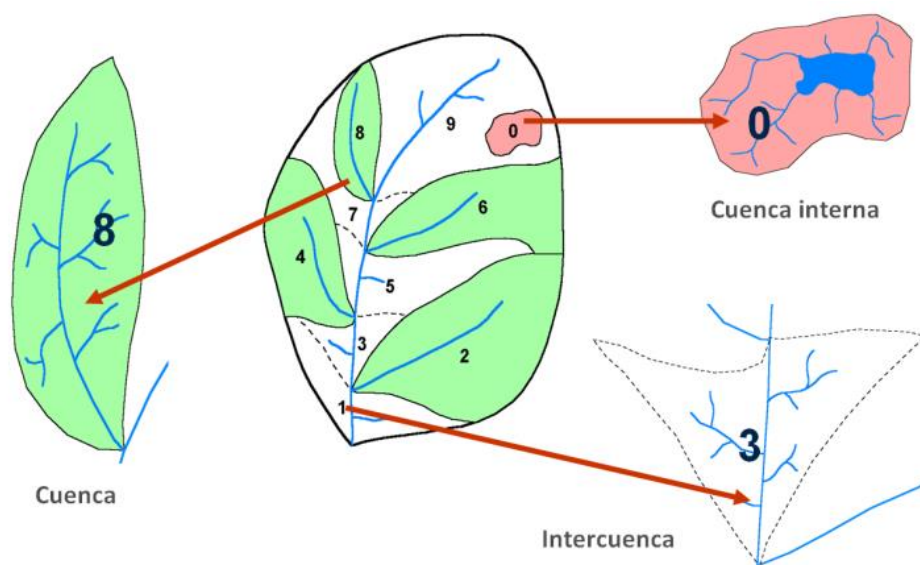
Clasificación Sistema Pfafstetter

Sistema Pfafstetter	
Cuenca	Es un área que no recibe drenaje de ninguna otra área, pero si contribuye con flujo a otra unidad de drenaje o al curso principal del río.
Inter cuencas	Es un área que recibe drenaje de otra unidad aguas arriba, a través del curso del río considerado como el principal, y permite el paso de este hacia la unidad de drenaje contigua hacia aguas abajo.
Cuenca interna	Es un área de drenaje que no recibe flujo de agua de otra unidad ni contribuye con flujo de agua a otra unidad de drenaje o cuerpo de agua.

Nota. Tomado de Secretaría Nacional del Agua del Ecuador (2009).

Figura 6.

Clasificación del Sistema Pfafstetter

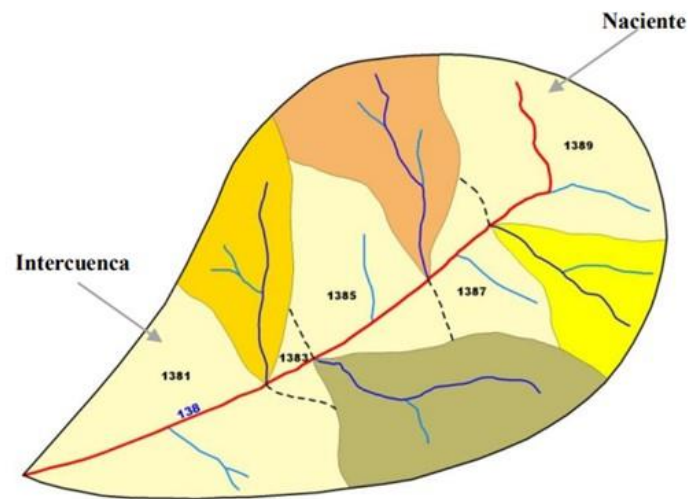


Nota. Tomado de Ruíz Ríos & Torres Giraldo (2011).

La codificación inicia con la determinación del curso principal y a los tributarios se les asignan códigos pares 2, 4, 6, 8 desde aguas abajo hasta aguas arriba. En cambio, las intercuenas son codificadas con dígitos impares 1, 3, 5, 7 y 9. El código 9 será asignado a la zona de cabecera o a la zona de mayor drenaje, siempre considerando que la naciente del río principal se encontrará entre las unidades 8 y 9. En la Figura 7 para el río principal el código es 138, en la naciente principal el código es 1.389 y en la intercuenca es 1.381.

Figura 7.

Ejemplo de código del Sistema Pfafstetter



Nota. Tomado de Ruíz Ríos & Torres Giraldo (2011).

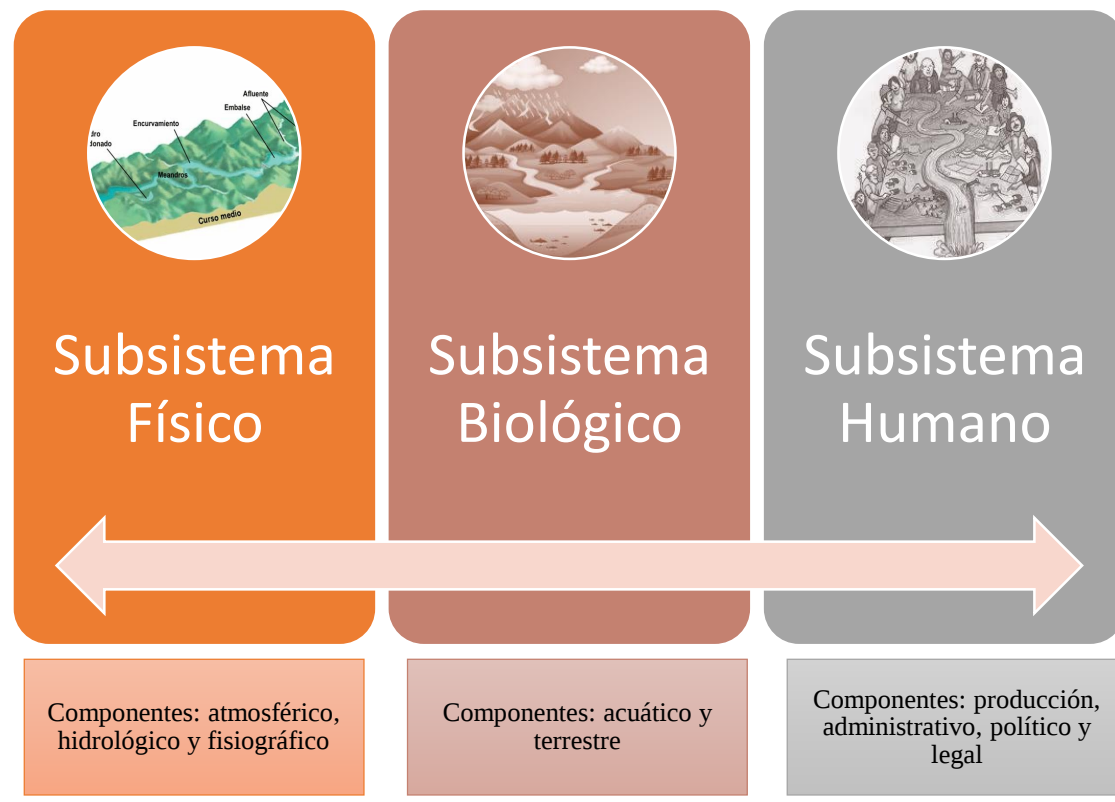
2.3. El sistema cuenca hidrográfica

Un sistema es un conjunto ordenado de elementos que interactúan entre sí y ocupan un espacio en el universo. Un planeta, un volcán, una cuenca oceánica o un río son ejemplos de un sistema. La mayoría de los sistemas contienen varios componentes que se ajustan mutuamente para funcionar como un todo y cualquier cambio en alguno de los componentes puede degenerar cambios en el resto.

La cuenca hidrográfica es un sistema compuesto por tres subsistemas: físico, biológico y humano. Cada uno de estos subsistemas está compuesto por componentes (Figura 8). El subsistema físico hace referencia al conjunto de recursos abióticos, el subsistema biológico a recursos bióticos y el subsistema humano es el conjunto de recursos administrativos, políticos y legales.

Figura 8.

Estructura de sistema de cuencas hidrográficas

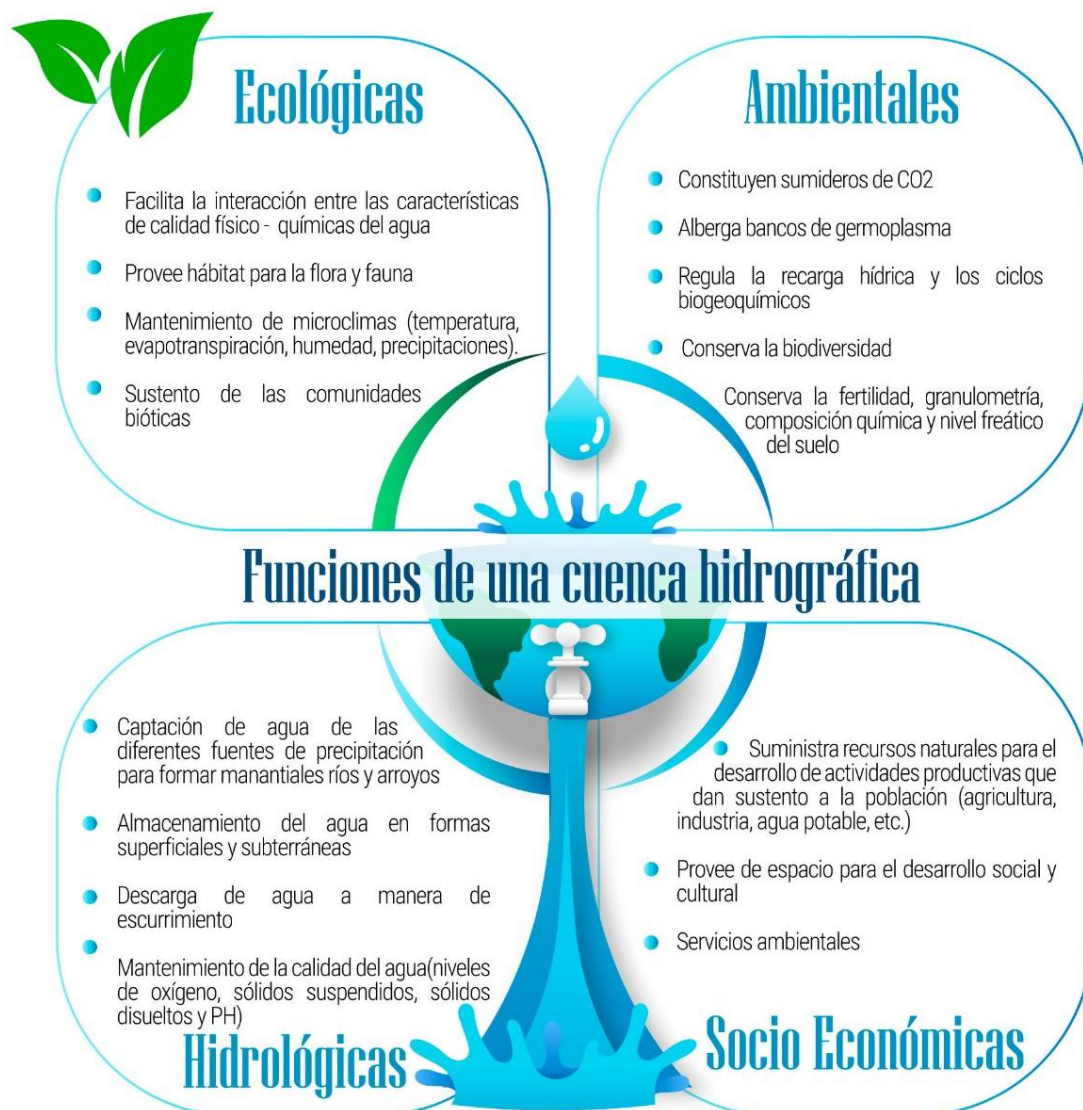


2.3.1. Funciones y servicios de una cuenca hidrográfica

Las funciones de la cuenca hidrográfica se pueden describir como las acciones que realiza el sistema cuenca en beneficio de todos los seres vivos que la habitan. Estas funciones pueden ser ecológicas, ambientales, hidrológicas y socioeconómicas (Figura 9). De esta manera, dentro de las funciones socio económicas de la cuenca esta otorga servicios ambientales. Se dice que los servicios ambientales son beneficios intangibles (beneficios que se conoce que existen, pero que son difíciles de cuantificar y evaluar), porque a diferencia de los productos o bienes ambientales que son fáciles de cuantificar como por ejemplo los frutos o la madera, los servicios ambientales son procesos ecológicos que benefician el desarrollo de la vida, algo difícil de cuantificar como el aire puro o la belleza escénica.

Figura 9.

Funciones de una cuenca hidrográfica



El funcionamiento de las cuencas hidrográficas entrega servicios como, el abastecimiento de agua, la asimilación de residuos, la fertilidad del suelo, o la belleza escénica paisajística (Lomas et al., 2005). En la actualidad se ha establecido que los principales servicios ecosistémicos de la cuenca hidrográfica se derivan de los ciclos biogeoquímicos, del ciclo hidrológico, de la producción biológica y la descomposición (Figura 10).

Figura 10.

Servicios ambientales de las cuencas hidrográficas



2.3.2. La cuenca hidrográfica: fuente de biodiversidad

Las cuencas hidrográficas albergan un sinnúmero de especies vegetales como animales que coexisten en equilibrio. Esta biodiversidad brinda servicios ecosistémicos esenciales para el desarrollo de la humanidad y el bienestar de sus poblaciones aledañas. Sin embargo, estas unidades ambientales y su biota son amenazadas por la destrucción de su ecosistema, la explotación de los recursos y la introducción de especies exóticas. La pérdida de flora y fauna ocasiona un desbalance que provoca la alteración del hábitat y ciclos de vida de los seres vivos de este ecosistema (Aguilar et al., 2010; Bonell, 2018). Por esta razón, realizar un diagnóstico del estado actual de las cuencas hidrográficas, es una herramienta esencial para tomar medidas de conservación ambiental.

Las condiciones favorables que brindan las cuencas hidrográficas saludables en cuestión de provisión de agua y servicios ecosistémicos como alimentación y albergue promueven un ambiente propicio para el desarrollo de especies en su hábitat. Sin embargo, al ser afectadas

pueden causar cambios en la composición florística y en el comportamiento de animales. Este es el caso del oso de anteojos que en un estudio de Laguna (2021) en la microcuenca del río Pisque (ubicada fuera del área de estudio) reporta una pérdida de la cobertura vegetal y con ello la fragmentación del paisaje, que afectan a una subpoblación del oso andino, evitando su libre movimiento y actividades naturales. La dependencia que poseen los animales del agua se ve mermada con la escasez hídrica y puede llegar a la migración a otros remanentes de bosque o simplemente su desaparición de la zona.

2.3.3. La disponibilidad hídrica en la cuenca hidrográfica

Las cuencas hidrográficas son sistemas hídricos compuestos por entradas y salidas de agua (Figura 11). La disponibilidad hídrica de las cuencas hidrográficas se refiere a la cantidad y calidad del agua disponible en una determinada cuenca. Esto incluye las aguas subterráneas y las aguas superficiales, como ríos, lagos y embalses. Para establecer la disponibilidad hídrica cuantitativa se calcula el balance hídrico en las cuencas hidrográficas. El balance hídrico tiene como fin determinar el equilibrio, entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado (León, 2005). La expresión general del balance hídrico se muestra en la siguiente Ecuación (1):

$$\Sigma \text{entradas (input)} - \Sigma \text{salidas (output)} = \Delta \text{almacenamiento (storage)} \quad (1)$$

Las unidades en que se expresa el balance hídrico son de volumen de agua por una unidad de tiempo. Para el sistema hidrológico cuenca, la ecuación general de balance se puede expresar como se detalla en la Ecuación (2) (León, 2005):

$$(P + C) - (Q + Et) \pm M = \Delta S_s + \Delta H + \Delta G \quad (2)$$

Donde:

P: precipitación

C: agua atmosférica condensada que es interceptada por la vegetación llamada también precipitación horizontal u oculta

Q: escorrentía generada por la cuenca

Et: evapotranspiración

M: influencia de los aprovechamientos hidráulicos con trasvase de agua

Ss: almacenamiento superficial

H: humedad del suelo

G: almacenamiento subterráneo de los acuíferos

Para Neitsch et al., (2011), el balance hídrico también está basado en el proceso de entrada, salida y almacenamiento del agua como lo describe la Ecuación (3):

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (3)$$

Donde:

SW_t: contenido final de agua en el suelo

SW: contenido inicial de agua en el suelo

t: tiempo

R_i: precipitación

Q_i: escorrentía superficial

ET_i: evapotranspiración

P_i: cantidad de agua acumulada en la zona no saturada

QR_i: cantidad de agua que retorna hacia los ríos como flujo base

La oferta hídrica en la cuenca se identifica a través del balance de las entradas, salidas naturales y antrópicas. La principal entrada natural es la precipitación, mientras que las principales salidas naturales son la evapotranspiración y la infiltración que ocasionan pérdida de agua (Amadio et al., 2003) (Figura 11). También existen entradas y salidas antrópicas. Las principales entradas artificiales son producto de infraestructura hidráulica como los trasvases. Los trasvases son obras hidráulicas cuyo fin es incrementar la disponibilidad de agua en una población adicionando agua desde una unidad hídrica vecina. Mientras que, las principales pérdidas antrópicas aumentan por la demanda de agua.

Figura 11.

Balance hídrico

CICLO DE AGUA



La demanda hídrica no es más que el consumo de agua por las actividades humanas. En general esta puede ser para consumo humano, riego, abrevaderos de animales y uso productivo. La demanda hídrica se obtuvo mediante la sumatoria de las demandas sectoriales (CORPONARIÑO, 2007), expresadas en unidades de volumen de acuerdo con la Ecuación (4).

$$DT = DUH + DURA + DUP \quad (4)$$

Donde:

DT: Demanda total de agua

DUH: Demanda de agua para consumo humano

DURA: Demanda de agua para riego y abrevaderos de animales

DUP: Demanda de agua para uso productivo

Por lo tanto, el balance hídrico es una ecuación que se basa en la relación entre la oferta

y la demanda hídrica, entendidos como las entradas y salidas de agua de un sistema, respectivamente. El concepto de balance hídrico se basa en el equilibrio que existe en un sistema entre toda el agua que entra y sale en un determinado intervalo de tiempo que puede ser diario, mensual o anual (Armstrong & Johnson, 2018; Van Beek et al., 2011). Por otro lado, el balance hídrico global depende significativamente de la intensidad, duración y características de los ciclos hidrológicos, los cuales pueden verse afectados no solo por procesos naturales, sino también por factores inducidos por el hombre (Aboelnour et al., 2019; Rosa et al., 2020).

2.3.4. *Modelos hidrológicos para el cálculo del balance hídrico*

Existen numerosos métodos para calcular el balance hídrico en una cuenca hidrográfica que incluyen tanto procesos naturales y antrópicos. Entre los más destacados están los que se realizan a través de modelos hidrológicos (Kniffin et al., 2018; Nasiri et al., 2022; Sun et al., 2023). Los modelos hidrológicos pueden clasificarse según Cabrera (2012) en: a) conceptuales, b) empíricos y c) físicos (Tabla 5). Los modelos físicos en comparación con los modelos empíricos y analíticos se caracterizan por una mayor precisión al momento de predecir la disponibilidad hídrica. Sin embargo, estos modelos requieren de datos más detallados.

Tabla 5.

Clasificación de modelos hidrológicos

Clasificación	Descripción
Modelos conceptuales	Los procesos físicos se representan, así como son observados. Los parámetros pueden ser medidos directamente, sin embargo, requieren de calibración
Modelos empíricos	Los resultados se construyen y se calibran de acuerdo con las mediciones para el modelo de entrada y salida. Sin embargo, está condicionado por el uso de la calibración y es difícil la interpretación física de los resultados
Modelos físicos	La estimación de la entrada y salida se describe por una serie de ecuaciones matemáticas que representan los procesos físicos. El modelo SWAT es un ejemplo de este tipo de modelos

Los modelos hidrológicos se pueden definir como la representación particular de un

sistema, que engloba las interrelaciones y respuestas de condiciones reales que se dan en un sistema hídrico, y que realiza pronósticos a través de un conjunto de condiciones y parámetros planteados (Cabrera, 2012; Xu & Singh, 1998). Además, en la modelación de cuencas hidrográficas puede existir modelos de eventos aislados o de procesos continuos. En los primeros modelos se simulan únicamente eventos individuales de lluvia-escorrentía, mientras que, en los segundos se toman en cuenta los componentes del escurrimiento (directo e indirecto), el consumo hídrico a través de la evapotranspiración y en otras abstracciones hidrológicas de largo plazo responsables del valor de la recuperación de la humedad durante los periodos sin lluvia (Stehli et al., 2012).

En resumen, un modelo es una representación simplificada de los fenómenos hidrológicos naturales que ocurren en el ciclo del agua, capaz de dar una aproximación a la realidad que ocurre en el sistema, dando así cierta confianza a quienes lo procesan (Armstrong & Johnson, 2018). A partir del siglo XIX, la modelación hidrológica ganó importancia y se utilizó en varios proyectos de desarrollo de energía hidroeléctrica, como canales y represas. La modelización del siglo XX se limitaba al uso de fórmulas matemáticas para describir los diversos procesos del ciclo del agua. El primer modelo capaz de representar el ciclo del agua se desarrolló en 1966. Sobre la base de los avances tecnológicos, la modelización de cuencas hidrológicas ha evolucionado significativamente, lo que permite modelar grandes escalas de tiempo (Singh et al., 2003).

Los modelos hidrológicos se convierten así en herramientas útiles para la gestión y planificación tanto de la disponibilidad como de la calidad del agua, así como la forma más adecuada de gestionar el suelo alrededor de un sistema hídrico o cuenca. Porque representan escenarios pasados y presentes, y también se pueden simular escenarios futuros (Andrews, 1972). Actualmente, la aplicación de los sistemas de información geográfica (SIG) permite seguir desarrollando la hidrología a través del estudio de modelos hidrológicos. Para ello, el

aporte de datos como los físicos que describen la cuenca a escala real y los matemáticos que aplican ecuaciones empíricas o conceptuales para describir la respuesta hidrológica de la cuenca son fundamentales.

2.3.5. Escasez hídrica

La escasez hídrica presenta una relación entre la oferta y la demanda. Se produce escasez cuando no hay suficientes recursos hídricos para satisfacer la demanda de agua (Huang et al., 2021). La escasez se puede originar tanto en función de la oferta como de la demanda. En función de la oferta, para autores como Arnell (1999) o Haddeland et al., (2014) los aspectos a considerar incluyen:

Variabilidad climática: Esto se refiere a cómo los cambios en las condiciones climáticas, como las sequías y las inundaciones, pueden afectar la cantidad de agua disponible. Por ejemplo, las sequías pueden disminuir la cantidad de agua en los ríos y acuíferos.

- a) **Disminución de los recursos hídricos:** Esto surge cuando se consume o se usa más agua de la disponible y de la que de forma natural puede ser restituida. Por ejemplo, la sobreexplotación de los acuíferos, ocasiona disminución en las reservas de agua.
- b) **Contaminación del agua:** El resultado de degradar las propiedades físicas, químicas y/o biológicas del agua por agentes externos es la contaminación. Como consecuencia, se reduce la cantidad de agua disponible para consumo u otros usos, porque esta se convierte en “no segura”.

Por otro lado, en cuanto a la demanda, autores como Jackson et al., (2001) o Buytaert y De Bièvre (2012) los aspectos a tener en cuenta son:

- a) **Crecimiento de la población:** A medida que la población crece, también lo hace la demanda de agua para beber, para la higiene, para la agricultura, la industria, etc.
- b) **Desarrollo económico:** El crecimiento y desarrollo económico implica que la demanda de agua para actividades económicas se incrementa. Por ejemplo, la demanda industrial

o agrícola.

- c) **Cambio en los patrones de consumo:** Esto puede ser debido a cambios en prácticas de consumo, cambios en los estilos de vida que implique variación en el consumo de agua.

En definitiva, la escasez hídrica se origina por problemas que se presentan, en la oferta, en la demanda o ambos. La escasez de agua surge localmente pero su impacto puede ser global, porque crea escenarios de desabastecimiento a corto, mediano y largo plazo, ocasiona crisis humanitarias e incluso conmociones sociales. Esto debido a las disputas y conflictos que emergen entre la población por su acceso y uso. Entonces no frenar la escasez del agua, es igual a no poner límites a los gastos económicos personales, al final, la cuenta bancaria de ahorros se quedará sin fondos si no se regula su uso.

2.3.6. *La calidad del agua en la cuenca hidrográfica*

El agua es esencial para la vida, se utiliza en la alimentación, en la agricultura, en la industria, entre otros; y es el medio donde se producen la mayoría de las reacciones físicas, químicas y bioquímicas que son fundamentales para la vida (Paul & Meyer, 2001). Conocer la calidad y la disponibilidad del agua para sus diferentes usos, resulta ser clave para el bienestar y el progreso de una localidad, región o país. Estos factores no solo dependen del tipo de suelo, el clima, las condiciones de drenaje, las técnicas de riego y/o los caudales disponibles, sino también en forma fundamental de la calidad físico-química del agua (Wetzel, 2001).

La valoración de la calidad del agua puede entenderse como la evaluación de su naturaleza química, física y biológica en relación con su calidad natural, así como los efectos humanos y usos posibles. La composición química natural de las aguas de una cuenca hidrográfica puede verse alterada por actividades humanas como: agrícolas, ganaderas e industriales. Las consecuencias suelen ser la incorporación de sustancias de diferente

naturaleza a través de vertidos de aguas residuales (contaminación puntual) o debido al paso de las aguas por terrenos tratados con productos agroquímicos o contaminados (contaminación difusa) (Ellis, 1989).

Las aguas naturales, al estar en contacto con diferentes medios y ambientes (aire, suelo, vegetación o subsuelo), incorporan parte de estos por disolución o arrastre, o incluso, en el caso de ciertos gases, por intercambio (Boyacioglu, 2007). Además, existen una gran cantidad de organismos que habitan el medio acuático y se interrelacionan con este mediante diferentes procesos biológicos en los que consumen y desprenden distintas sustancias (por ejemplo, de la respiración o metabolismo). Entre los compuestos más comunes que se pueden encontrar en las aguas dulces que componen una cuenca hidrográfica están: en gran proporción carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos; como constituyentes minoritarios los fosfatos y silicatos; como elementos traza los metales y algunos gases disueltos como el oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono (Brown et al., 1970).

Existen diferentes parámetros fisicoquímicos que se analizan para determinar el estado/calidad de las aguas, pero para una consideración más específica es necesario precisar el tipo de uso que se dará al agua, ya que de ello dependerá el grado de calidad que se requiere. En este sentido, existe un gran número de normativas, registros, acuerdos, tratados y convenios propios de cada país o región que dictaminan la calidad requerida de acuerdo con el uso específico. Sin embargo, para aquellas regiones donde la normativa no es clara o no existe, organizaciones internacionales e instituciones de estandarización o normalización han generado algunas guías o lineamientos donde se proporciona la información comparativa necesaria sobre distintos parámetros de calidad de agua.

En Ecuador, las normativas existentes para calidad de agua son el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULSMA), específicamente las tablas anexas del libro VI, así como los acuerdos ministeriales posteriores que actualizan a esta norma (por

ejemplo, el Acuerdo Ministerial 097-A), la Regulación 012-2022 de la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA), donde se establecen los criterios técnicos para el control a la calidad del agua destinada al consumo humano en sus diferentes fases, que proveen los prestadores del servicio de agua potable en todo el territorio ecuatoriano, La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua y, también las Normas Técnicas Ecuatorianas del Instituto Ecuatoriano de Normalización: NTE INEN 1108 (requisitos que debe cumplir el agua para consumo humano), NTE INEN 2169:98 (Calidad del agua, muestreo, manejo y conservación de muestras), NTE INEN 2176:98 (Calidad del agua, muestreo, técnicas de muestreo) y NTE INEN 2226:2013 (principios generales a ser aplicados en el diseño de los programas de muestreo para el control de la calidad, caracterización de la calidad e identificación de las fuentes de contaminación en el agua, incluidos los sedimentos y los lodos). Muchas de estas normativas utilizan principios y metodología del manual “Métodos Estandarizados para la Evaluación de Agua y Agua Residual” en su vigésima cuarta edición, desarrollado por los organismos *American Public Health Association*, *American Water Works Association* y *Water Environment Federation* de Estados Unidos (*American Public Health Association et al.*, 2023).

Existe una amplia gama de parámetros físicos, químicos y biológicos utilizados para determinar la calidad de agua en un medio acuático dentro de una cuenca hidrográfica (Tabla 6). Estos parámetros proporcionan información sobre las propiedades del agua y características y se utilizan para determinar si el agua es apta para su uso en diferentes aplicaciones, como consumo humano, riego agrícola, uso industrial o preservación de los ecosistemas acuáticos. Entre ellos los más frecuentes son aquellos que han sido ponderados como indispensables o importantes por diversos autores (Jiménez, 2000; Orozco et al., 2005; Carrera et al., 2015), especialmente por la contribución que dan a la explicación del grado de contaminación o calidad que posee el agua en dependencia o no de su uso. Los parámetros detallados en la Tabla

6 solo algunos ejemplos de los muchos parámetros utilizados para evaluar la calidad del agua. La selección de los parámetros depende del propósito de la medición y las regulaciones o estándares locales o internacionales que se apliquen.

Tabla 6.

Parámetros fisicoquímicos y biológicos para el análisis de la calidad de agua

Físicos	Químicos	Biológicos
Color	pH	Coliformes totales
Conductividad eléctrica	Alcalinidad	Coliformes fecales
Olor y sabor	Cloruros	Macrófitos
Sólidos suspendidos totales	Cloro residual	Bacterias
Temperatura	Acidez	Protozoarios
Turbidez	Nitrógeno total	Virus
	Nitrato	Helminetos
	Nitrito	Macroinvertebrados
	Amoníaco	Ictiofauna
	Dureza	Microalgas
	Fluoruros	
	Sulfatos	
	Cobre y zinc	
	Oxígeno disuelto	
	Demanda bioquímica de oxígeno	
	Demanda química de oxígeno	
	Fósforo total	
	Fosfatos	
	Sustancias tóxicas inorgánicas	
	Sustancias tóxicas orgánicas	
	Sustancias radioactivas	
	Hierro y manganeso	
	Sólidos disueltos totales	
	Cadmio y mercurio	
	Cromo total	
	Arsénico	
	Cianuro	
	Carbono orgánico total	

Las variables más utilizadas en análisis de calidad de agua superficial, tanto por investigadores como gestores (públicos y privados), y para la construcción de índices de calidad de agua, por la representatividad y ponderación que estadísticamente se ha calculado que aportan son: oxígeno disuelto (OD), potencial de hidrógeno (pH), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitratos, coliformes fecales (CF), temperatura (Temp), turbidez (Turb), sólidos

disueltos totales (SDT), fósforo total (PT), sólidos suspendidos totales (SST), conductividad eléctrica (CE), nitrógeno total (NT), demanda química de oxígeno (DQO), fosfatos, coliformes totales (CT) y color (Tabla 6; Figura 12) (Torres et al., 2009; Orjuela & López, 2011; Uddin et al., 2021).

La calidad de diferentes tipos de agua se ha estimado históricamente a partir de variables físicas, químicas y biológicas, evaluadas individualmente o en forma grupal. Los parámetros fisicoquímicos aportan información extensa de la naturaleza de las especies químicas presentes en el agua y sus propiedades físicas, sin aportar información de su influencia en la vida acuática, más que aquella conocida por influencia directa como el oxígeno indispensable para los organismos aerobios. Por otra parte, los métodos biológicos aportan información acerca del estado y la condición del medio para el desarrollo de uno o varios grupos de especies relacionadas, pero no señalan de forma específica acerca de los contaminantes responsables, por lo que muchos investigadores recomiendan la utilización de ambos métodos en la evaluación del recurso hídrico (Orozco et al., 2005).

Los métodos fisicoquímicos se basan en que sus análisis suelen ser más rápidos y pueden ser monitoreados con mayor frecuencia, en comparación con los métodos biológicos, basados en la composición y abundancia de ciertas comunidades de seres vivos en las aguas. De igual forma, los métodos biológicos generalmente solo se realizan para un uso determinado, a diferencia de los fisicoquímicos, que permiten una evaluación para diferentes tipos de uso.

Pero por el contrario, los métodos biológicos, biomonitoreo o por bioindicadores permiten una visión más integral no solo del momento de la toma de muestras, sino también de un balance histórico de la conectividad, funcionalidad y servicios ecológicos que se dan en ese medio acuático, es decir, si se encuentran diversidad y abundancia de grupos de comunidades bioindicadoras es muy probable que no existan perturbaciones ni contaminación y que la salud ambiental del ecosistema sea adecuada o buena. Independiente del tipo de variables usadas en

el monitoreo de un sistema hídrico, siempre se genera un gran número de datos (espacio-temporales), que requieren de un tratamiento e interpretación, tarea que resulta compleja en el proceso de la valoración de la calidad ya que en muchas ocasiones se incurre en la pérdida de información o gastos (en tiempo y dinero) que no justifican los resultados obtenidos (Ramírez et al., 1997).

Las condiciones del agua superficial de las cuencas hidrográficas pueden deducir a partir de aumentos o descensos en los valores de los parámetros analizados, independientemente de los valores tipos señalados en la normativa (Tabla 7). Los valores de las normativas generalmente fueron determinados en función de un concepto de calidad de agua que se basa en el uso humano de la misma y no en la integridad biótica del sistema acuático, a pesar de que el TULSMA y el Acuerdo Ministerial 097-A posee anexos donde se describen parámetros para la preservación de la vida acuática y silvestre.

Asimismo, los valores límites permisibles de algunas variables físico-químicas y microbiológicas son discutidos y actualizados desde su aprobación y se han propuesto periódicas modificaciones de acuerdo con el avance de nuevos métodos de monitoreo más efectivos y económicos (Uddin et al., 2021). Por último, es importante destacar que un estudio que integre los cambios medidos en los parámetros fisicoquímicos (monitoreo) y elementos biológicos (biomonitoreo), permite estimar con alta exactitud la calidad del agua y del ecosistema acuático, pero mientras más continuo sean los (bio)monitoreos mejor será la toma de decisiones y manejo adecuado.

2.3.6.1. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto normalmente expresado en partes por millón (ppm) o mg/L, es uno de los parámetros más importantes y utilizados en la determinación de la calidad de agua. La solubilidad del oxígeno en el agua depende de la temperatura en forma inversa, incrementa a menor temperatura (Boyacioglu, 2007). Es decir, si se detecta una concentración menor a la

que corresponde a una temperatura dada, puede indicar una situación de subsaturación y posible contaminación del agua. Una circunstancia de saturación mayor también puede darse (sobresaturación) pero es menos común en sistemas acuáticos fluviales como ríos de cuencas hidrográficas (Wetzel, 2001).

En regiones tropicales, así como en los veranos de zonas templadas, el oxígeno disuelto puede disminuir por la temperatura y también debido a la actividad microbológica que se ve beneficiada por el calor (Swamee & Tyagi, 2007). Sin embargo, existe un balance en el medio acuático ya que las temperaturas altas y la intensa luz del sol parecen acelerar la fotosíntesis del fitoplancton, que consumen el CO₂ e incrementan la cantidad de oxígeno en el agua, es decir, favorece la disolución de ambos gases en el medio (Samboni et al., 2007). Es así como el oxígeno disuelto es considerado como un indicador del balance entre la respiración y la fotosíntesis en un medio acuático, y por tanto indirectamente de la carga orgánica del sistema. Su concentración depende, además de la temperatura, de la presión (por tanto, altura) y la concentración de sales disueltas.

Se considera que en ecosistemas fluviales los valores de oxígeno son mayores que en sistemas lénticos debido a que al correr el agua genera turbulencia, que se ve incrementada en zonas rocosas o de pendientes pronunciadas (como cascadas) y por tanto se facilita la disolución y difusión de oxígeno y otros gases en el agua (Wetzel, 2001). Valores muy bajos de oxígeno (< 5 ppm) pueden revelar contaminación orgánica del agua y anoxia, Asimismo, valores muy altos (> 12 ppm), pueden significar alta producción primaria o condiciones hidromorfológicas muy favorables (aumento del caudal y turbulencia, poca profundidad) a la aireación del cauce hídrico (Orozco et al., 2005).

2.3.6.2. Potencial de hidrógeno

El potencial de hidrógeno (pH) es una medida del grado acidez, por lo que suele ser importante en la determinación del grado de corrosividad natural que tiene el agua (Adefemi

& Awokunmi, 2010). Indica la cantidad de iones hidronio (H_3O^+) presentes en determinadas disoluciones. Su medición se realiza mediante la potenciometría, con un electrodo conocido como peachímetro, pero también puede ser determinado por sondas multiparamétricas. El pH influye en la acidez, basicidad o neutralidad del agua, mientras menor sea el valor de pH mayor será el nivel de corrosión de piezas o compuestos metálicos en contacto con esta.

Por el contrario, a valores de pH mayores a 7 se suele producir precipitación de sales insolubles (incrustaciones). El pH suele estar positivamente correlacionado con la conductividad eléctrica y alcalinidad total. Los valores bajos de pH suelen ser consecuencia de una elevada concentración de dióxido de carbono y bicarbonatos en el agua provenientes de actividad química y bioquímica en el agua, así como por vertidos de agua industrial o de drenajes de minas ácidos (Sushma, 2021). Mientras que los valores altos de pH sugieren un equilibrio entre el dióxido de carbono, carbonato y bicarbonato, lo que suele ser más afectado por cambios en las condiciones fisicoquímicas (Liu et al., 2000).

En aguas naturales se espera que el pH oscile entre 6 y 9. Valores muy alejados de la neutralidad (7) deben ser considerados con precaución ya que posiblemente indican el ingreso de compuestos ácidos, anoxia o sobresaturación de oxígeno. Los efectos más letales para los organismos acuáticos suelen aparecer a valores menores a 4,5 o mayores a 9,5 (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008).

2.3.6.3. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias u otros microorganismos para degradar la materia orgánica que puede ser descompuesta en una muestra líquida bajo condiciones aerobias (presencia de oxígeno). Es un parámetro muy útil para la determinación del nivel de contaminación orgánica, se suele medir transcurridos cinco días para evitar llegar al momento de descomposición del resto de compuestos como nutrientes (especialmente nitrificación) y se expresa en $\text{mg O}_2/\text{L}$. Valores

altos de DBO suelen indicar contaminación por materia orgánica. La DBO también indica el oxígeno necesario para descomposición bioquímica de ciertos materiales inorgánicos como hierro o sulfitos (Uddin et al., 2021; Sushma, 2021).

2.3.6.4. Coliformes fecales (CF)

Las bacterias denominadas “coliformes fecales” (CF) son microorganismos que se encuentran de forma natural y espontánea en las heces de humanos y animales (especialmente mamíferos), y su presencia/abundancia en fuentes y cuerpos de agua se utiliza como un indicador de la contaminación biológica. Un elevado nivel de bacterias coliformes fecales suele ser indicador de la presencia en el agua de una gran cantidad de heces y otros materiales orgánicos sin tratar, que pueden generar un impacto considerable en el ambiente y efectos graves para la salud pública (Brown et al., 1970; Jiménez, 2000).

En los ríos que atraviesan zonas urbanas, y donde el agua residual no es tratada, se suele observar especialmente concentraciones muy elevadas de CF. Generalmente este indicador permite determinar problemas o fallos en la red de alcantarillado, desagües ilegales y/o un mal desenvolvimiento del sistema de tratamiento de agua residual, que muchas veces se mezcla con el sistema de aguas de lluvia (modelos combinados) principalmente en momentos de precipitaciones intensas (Torres et al., 2009).

2.3.6.5. Sólidos en el agua

Las partículas sólidas en el agua, de acuerdo con la capacidad de contaminar el agua, generalmente se dividen en dos grandes grupos: sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos disueltos totales (SDT). Los SST son todas aquellas partículas de tamaño superior a los disueltos, es decir mayor a 0,45 micrómetros, estos sólidos están compuestos por materia tanto orgánica como inorgánica. El incremento de estos suele indicar aumento de turbidez igualmente, y, por tanto, aportes de minerales u orgánicos provenientes de la erosión y de efluentes. Los SDT por su parte, comprenden las sales inorgánicas (macroconstituyentes) que

en mayor proporción suelen ser iones potasio, calcio, magnesio, sodio, bicarbonato, cloruros y sulfatos, y en pequeñas cantidades materia orgánica disuelta en el agua (Wetzel, 2001).

Las sales disueltas influyen en la presión osmótica interna de los organismos y en la capacidad de equilibrio iónico que posee el medio. Las concentraciones de SDT suele correlacionarse con la conductividad del agua, ya que al aumentar estas partículas disueltas en el agua también lo hace la conductividad (Ramírez et al., 1997).

2.3.6.6. Turbidez

La turbidez está causada por el aumento de las partículas en el agua, lo que ocasiona que se pierda transparencia (Kitchener et al., 2017). Estas partículas son generalmente invisibles y se suelen denominar coloides por los tamaños pequeños que poseen (entre 1 a 100 nanómetros). Técnicamente, la turbidez puede ser definida como un desorden o disturbio causado por sólidos suspendidos que no son visibles. La turbidez produce la disminución en la intensidad de la luz que ingresa al agua y por tanto de su absorción y reflexión de la luz.

El aumento de la turbidez puede afectar al crecimiento de las microalgas, otras plantas microacuáticas y plantas sumergidas que debido a la turbiedad no podría desarrollar la fotosíntesis de forma natural (Wetzel, 2001). La turbidez también suele incrementar la temperatura del agua debido a que las partículas en el agua observen más calor, llevando a la disminución, más acusada del oxígeno disuelto. La turbidez se considera una prueba importante en la determinación de la calidad de agua, siendo fácil que una persona enferme cuando incrementa el nivel de turbidez (Soros et al., 2019).

2.3.6.7. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica en el agua pura se comporta como aislante eléctrico, siendo las sustancias disueltas en esta las que le proporcionan la capacidad de conducir la corriente eléctrica. La conductividad es una medida de la capacidad que posee una solución para conducir la corriente eléctrica e incrementa con la concentración de iones (cationes y aniones),

por lo que es usada para estimar la mineralización del agua. Suele estar relacionada de forma proporcional con el aumento de los SDT y la salinidad.

Generalmente, se mide en microsiemens/cm y suele estar relacionada con la temperatura. Mientras mayor sea la temperatura, la conductividad del agua aumenta. Asimismo, la entrada de sustancias contaminantes a los sistemas acuáticos superficiales como los ríos de cuencas hidrográficas, suelen estar asociados a un incremento de los valores de conductividad (Adefemi & Awokunmi, 2010; Uddin et al., 2021).

2.3.6.8. La temperatura

En un sistema hídrico la temperatura del agua controla las reacciones químicas que suceden, y afecta al crecimiento, reproducción e inmunidad de los peces y otras especies acuáticas. Los cambios drásticos de temperatura resultan fatales para los peces (Wetzel, 2001). La temperatura influye de forma directa sobre la actividad y respiración de los organismos acuáticos, así como en la descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos, la velocidad de las reacciones (bio)químicas se acelera con el aumento de la temperatura afectando al metabolismo de todo el sistema hídrico. Es conocida la influencia de la temperatura en factores como pH, conductividad, alcalinidad y disolución de gases (ejemplo, oxígeno y dióxido de carbono) (Sushma, 2021).

Un aumento de la temperatura modifica la solubilidad de las sustancias aumentando los sólidos disueltos y disminuyendo la cantidad de gases. La oscilación natural de la temperatura en un río es afectada cuando se descargan aguas de mayor temperatura que aquella que cursa naturalmente, cuando se altera la cobertura vegetal de la ribera por perturbaciones como la deforestación o degradación y se deja expuesto el cuerpo hídrico a una mayor radiación solar, o por transferencia de temperatura desde las infraestructuras antrópicas aledañas.

En las zonas urbanas que son atravesadas por un río, el problema se incrementa debido a la cantidad de fuentes artificiales, como por ejemplo el vertido de aguas utilizadas en procesos

industriales de intercambio de calor, que pueden modificar (especialmente aumentar) la temperatura natural del cauce hídrico (Paul & Meyer, 2001).

Tabla 7.

Parámetros fisicoquímicos, unidades de medida más comunes e información que indican sobre la calidad de agua

Parámetro	Unidades	¿Qué puede indicar?
Turbidez	NTU	Valores elevados pueden indicar un aumento de sólidos suspendidos
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	Un aumento suele indicar un incremento de aportes minerales u orgánicos provenientes de la erosión y/o efluentes
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	Un aumento puede indicar un incremento de la conductividad
Conductividad	µs/cm	Un aumento puede indicar un aumento de SDT y de la salinidad. De igual forma, la contaminación de los sistemas acuáticos superficiales, por lo general, está asociada a un incremento de valores de conductividad
Oxígeno disuelto	mg/L	Valores muy bajos generalmente indican contaminación orgánica del agua. Valores muy elevados pueden indicar una elevada productividad primaria del sistema
Temperatura	°C	Un aumento puede indicar contaminación por efluentes vertidos de mayor temperatura que la del agua que fluye naturalmente
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	Valores altos pueden indicar contaminación por materia orgánica
Coliformes fecales	UFC o NMP	Niveles elevados indican la entrada de agua sin tratar. Pueden indicar también problemas o fallas en el sistema de alcantarillado y desagües ilegales
Nitrógeno total	mg/L	Un incremento puede indicar contaminación con sustancias orgánicas e inorgánicas por efluentes industriales y urbanos por fertilización de cultivos
Nitrato	mg/L	Concentraciones altas generalmente indican contaminación orgánica, pero con determinadas concentraciones de oxígeno
Fósforo total	mg/L	Un incremento puede indicar contaminación por vertidos puntuales de detergentes comunes e industriales y por contaminación difusa proveniente de actividades agropecuarias
Fosfato	mg/L	Bajos niveles pueden indicar un agotamiento de nutrientes debido a una elevada actividad biológica, Un aumento puede indicar contaminación por vertidos puntuales de detergentes y por contaminación agropecuaria

pH	UpH	Valor muy por debajo de 7 pueden indicar ingreso de sustancias ácidas y anoxia. Valores muy elevados (mayor a 7) suelen indicar una sobresaturación de oxígeno debido a actividad fotosintética, en la que se consumen iones de hidrogeno del medio. Ambos casos pueden ser ocasionados por contaminación industrial
----	-----	--

Nota. NTU: unidades nefelométricas de turbidez, UFC: unidades formadoras de colonia, NMP: número más probable, UpH: unidades de pH. Adaptado de Ramírez et al., (1997); Paul & Meyer (2001); Wetzel (2001).

2.3.6.9. Nutrientes

Los nutrientes son indispensables para el buen funcionamiento del medio acuático ya que sirven de alimento para las plantas y microalgas, que, junto con la luz solar, dióxido de carbono y oxígeno del medio pueden desarrollar con normalidad la fotosíntesis (Ramírez et al., 1997). Existe una gran cantidad de moléculas inorgánicas que pueden ser consideradas como nutrientes, pero las más importantes son aquellas que contienen nitrógeno y fósforo como componentes principales, dado que a estos se les considera macronutrientes para los productores primarios y resto de organismos. El nitrógeno suele estar presente en el agua más frecuentemente como amoníaco (NH_3), amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-).

El nitrógeno en el agua puede encontrarse absorbido a partículas o formando parte de los organismos. Por la gran cantidad de moléculas orgánicas que forma, el nitrógeno es considerado como indispensable para el metabolismo celular y actúa como limitante de la producción primaria cuando escasea (Wetzel, 2001). El amoníaco y amonio son productos de la amonificación que ocurre cuando la acción de hongos y bacterias descomponen los nitratos, una elevada concentración de ambos puede generar condiciones de anoxia, ya que reflejan procesos de contaminación a gran escala y que resultan tóxicos para la salud de la biota (Torres et al., 2009).

El nitrito es un producto intermedio de la nitrificación y se forma en un proceso anaerobio a partir del nitrato. En aguas anaerobias o muy bajas condiciones aerobias presenta sus mayores concentraciones. Por lo que un aumento de nitrito suele ser causa de una propensión a la disminución de oxígeno en el medio, lo que resulta nocivo para los organismos

acuáticos e incluso para los seres humanos si llegan a ingerir esa agua (Cude, 2001). El nitrato en el agua superficial de cuencas hidrográficas suele formarse como un producto de la fijación del nitrógeno desde la atmósfera por las bacterias que se encuentran en las raíces de plantas o también por acción directa de las cianobacterias. También es producto del proceso de nitrificación, cuando las bacterias nitrificantes transforman tanto el amonio y amoniaco a nitrato en condiciones aerobias. Los elevados niveles de nitrato generalmente indican concentraciones medias y altas de oxígeno en el medio, pero si existe un sobre enriquecimiento de este nutriente en las aguas puede causar el fenómeno de eutrofización (Wetzel, 2001).

Por otra parte, el fósforo es un elemento que utilizan los seres vivos para almacenar energía en los procesos metabólicos, la demanda de este nutriente suele ser alta en comparación a la oferta en los medios acuáticos. En las aguas continentales no existen altas concentraciones de las formas inorgánicas de fósforo asimilables por organismos, lo que suele resultar en que el fosfato (por tanto, fósforo) suele ser el nutriente limitante para la producción primaria y por tanto aquel que determina el estado trófico (Lumb et al., 2011).

Los fosfatos son liberados desde los sedimentos hacia la columna de agua cuando se genera la anoxia en el medio más profundo. Las bajas concentraciones de fosfato suelen mostrar un agotamiento de este nutriente debido a una gran actividad biológica. Mientras que el aumento de fosfato está relacionado a las crecientes actividades humanas, especialmente al uso de fertilizantes, vertido de detergentes (ricos en fosfatos), que lleva a floraciones de algas y cianobacterias potencialmente nocivas (eutrofización) (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008; Uddin et al., 2021).

2.3.6.10. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO) es otra forma de medir la carga orgánica a la que está sometido un ecosistema acuático, se suele especificar en mg/L. La DQO es la cantidad de oxígeno disuelto que se requiere para la oxidación química de la materia orgánica en el agua.

Junto con la DBO son indicadores clave de la salud ambiental del agua superficial, independientemente de su uso final. Estos parámetros son normalmente utilizados también en el agua residual para medir la eficiencia de remoción de una determinada tecnología (Swamee & Tyagi, 2007; Sushma, 2021).

2.3.6.11. Índices de Calidad de Agua

Todos los organismos en el planeta requieren de agua para su supervivencia y desarrollo. A pesar de que el planeta está cubierto en un 70% de agua, solamente entre el 0,3 al 0,5% es agua dulce disponible y útil. El crecimiento poblacional, la rápida urbanización e industrialización, el uso de fertilizantes en agricultura, la falta de saneamiento, entre otros factores han llevado a niveles elevados de contaminación del agua, disminuyendo así peligrosamente su disponibilidad para otras especies y otros seres humanos.

De aquí la importancia de evaluar la calidad del agua superficial de forma continua con monitoreos y muestreos periódicos a nivel de cuencas hidrográficas bajo una planificación que procure su manejo adecuado y sustentable. Dada la amplitud de técnicas y parámetros de muestreo desde la mitad del siglo XX empezó la implementación de nuevas metodologías que involucren más de dos parámetros y que integren la información obtenida en los muestreos y monitoreos (Torres et al., 2009).

Estas metodologías incluyen varios parámetros, en su mayoría fisicoquímicos, y en algunos casos microbiológicos, de manera que permiten reducir la información a una expresión sencilla y entendible por aquellos que gestionan el agua y son actores principales en las tomas de decisiones a nivel de cuenca, estos métodos son los conocidos como: Índice de Calidad del Agua (ICA) (Uddin et al., 2021).

Un ICA expresa en una cifra la calidad del recurso hídrico mediante la integración de las mediciones de determinados parámetros de calidad del agua (Samboni et al., 2007). Constituye así una de las mejores herramientas para calcular el potencial de contaminación de

manera comprensiva y puede utilizarse para clasificar la calidad del agua de una forma fácil de entender para todo criterio científico de calidad del agua. Los ICA son un componente importante del manejo global integrado de los recursos hídricos (Cude, 2001) ya que formulan una manera conveniente de resumir la gran cantidad de datos generados en los monitoreos y facilitan la comunicación de los resultados a una audiencia no especializada (Lobato et al., 2015) (Tabla 8).

Tabla 8.

Ventajas e inconvenientes de los ICA como herramientas de evaluación de la calidad de agua

Ventajas	Limitaciones
• Método simple, conciso y válido para expresar la importancia de los datos generados regularmente en el laboratorio • Permiten a los usuarios una fácil interpretación de los datos • Permiten priorizar para evaluaciones de calidad del agua más detalladas • Ayudan en la definición de prioridades con fines de gestión • Permiten mostrar la variación espacial y temporal de la calidad del agua • Útiles en la evaluación de la calidad del agua para usos generales • Pueden identificar tendencias de la calidad del agua y áreas problemáticas • Mejoran la comunicación con el público y aumentan su conciencia sobre las condiciones de calidad del agua	• No pueden evaluar todos los riesgos presentes en el agua • Se basan en generalizaciones conceptuales que no son de aplicación universal • Proporcionan un resumen de los datos • No son de aplicación universal debido a las diferentes condiciones ambientales que presentan las cuencas de una región a otra • Algunos científicos y estadísticos tienden a rechazar y criticar su metodología, lo que afecta la credibilidad de los ICA como una herramienta para la gestión • No proporcionan información completa sobre la calidad del agua • Pueden ser subjetivos y sesgados en su formulación

Nota. Adaptado de Torres et al., (2009); Uddin et al., (2021).

Estos índices pueden ser usados para mejorar, aumentar y difundir la información sobre la calidad del agua. Los posibles usos de los ICA están enmarcados en el manejo del recurso, al permitir un mejor nivel de decisión por parte de las autoridades, también en la clasificación de áreas y establecimiento de zonas de susceptibilidad o vulnerabilidad, y dentro de la investigación científica para la implementación de acciones correctivas, de restauración o tratamiento de agua, entre otras (Torres et al., 2009).

Varios son los países que basan sus estudios y campañas de monitoreo de calidad en el empleo de los ICA. En ocasiones se caracteriza la variación espacial y temporal de parámetros de calidad del agua y se determina la influencia del uso de la tierra sobre esta en el cauce de los ríos, y en sinergia con el uso de herramientas de información geográfica y la aplicación de estos índices, los resultados revelan variaciones graduales y diferencias en la parte alta, media y baja, permitiendo así una gestión efectiva y específica de acuerdo a las necesidades y requerimientos del área de la cuenca (Uddin et al., 2021).

La caracterización de la calidad del agua de un río implica la determinación del grado, el nivel o la intensidad de la contaminación que posee, la cual puede ser de origen físico, químico o biológico, y la capacidad del sistema de restituir de manera natural las propiedades o condiciones que poseía antes de ser afectado por el agente contaminante. El ambiente en general, y particularmente, las corrientes superficiales de los ríos poseen una capacidad de autodepuración inherente a su naturaleza, sin participación directa del hombre, se restituyen de manera natural las características que existían inicialmente y que se habían modificado debido a la intrusión de un agente contaminante (Lobato et al., 2015).

Sin embargo, la capacidad de autodepuración de cualquier cauce hídrico no es ilimitada y dependerá del grado de contaminación alcanzado. Es así como las posibilidades de recuperación o depuración de la corriente en un tiempo considerado aceptable se pueden ver sobrepasadas. En este sentido, la capacidad de autodepuración de un río o arroyo se encuentra relacionada con la velocidad de degradación biológica o de biodegradación de los compuestos vertidos al mismo, ya sea por causas naturales como antrópicas. Aunque se debe considerar durante la evaluación de la capacidad de autodepuración de los ríos la información existente, tanto histórica como actualizada, sobre la cuenca. Esto incluye el régimen de las precipitaciones, régimen hidrológico de la corriente, indicadores e índices de calidad del agua.

A nivel de cuenca también la calidad del agua está afectada por diversos factores como

los usos del suelo, la producción industrial y agropecuaria, el tratamiento que se le da al agua antes de ser vertida nuevamente a los cuerpos de agua, y a la cantidad misma del agua de los ríos y lagos que posee después de cualquier otro tipo de uso como por ejemplo presas hidráulicas, ya que de todo esto depende su capacidad de purificación.

El término “calidad del agua”, es ampliamente usado, sin embargo, la cuantificación científica resulta bastante importante y esta solución es una estrategia básica en el desarrollo de los fundamentos para el manejo de los recursos hídricos (Uddin et al., 2021), siendo importante reducir la naturaleza multidimensional y de unidades de varios parámetros y generando índices que muestren cuali y cuantitativamente dicha calidad (Boyacioglu, 2007; Sushma, 2021).

A nivel mundial se han desarrollado diferentes ICA, entre los que destacan el *National Sanitation Foundation Water Quality Index* (ICA NSF), desarrollado por Brown et al., (1970), para ríos de Estados Unidos, ampliamente empleado y validado o adaptado en diferentes estudios internacionales. Dinius (1987) también desarrolló un ICA similar teniendo como valor agregado el planteamiento de rangos de clasificación basados en usos específicos, entre los que se destaca el del consumo humano. El Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME por sus siglas en inglés) desarrolló a partir del *British Columbia Water Quality Index* (BCWQI) en 2001 un índice de la calidad de agua (Lumb et al., 2011), el que ha sido ampliamente aplicado en masas de agua superficiales. Su uso está muy extendido debido a su facilidad de aplicación y porque ofrece flexibilidad a la hora de elegir los parámetros de calidad de agua que se incluyen en el índice.

De manera más reciente se han planteado ICA para la evaluación del recurso hídrico a ser destinado al consumo humano, previo tratamiento, que incluyen parámetros fisicoquímicos y microbiológicos relacionados con el nivel de riesgo sanitario presente en el agua, como el *Universal Water Quality Index – UWQI* (Boyacioglu, 2007), basado en Directivas de la Unión

Europea.

En Colombia, Rojas (1991) adaptó el ICA-NSF a las condiciones específicas del río Cauca, uno de los ríos más importantes de este país dado que es una de las mayores fuentes de agua para diversos usos, reduciendo el número de parámetros que lo conforman con base en el análisis del comportamiento de éstos en el tiempo y en el espacio y modificando los pesos porcentuales (W_i) asignados a cada parámetro de acuerdo con su nivel de importancia en la evaluación de la calidad del agua del río Cauca. La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y la Universidad del Valle (CVC & UNIVALLE, 2007) adaptaron un índice anterior del río Cauca y lo denominaron ICAUCA, que mejoró las condiciones ambientales descritas del río en el tramo Salvajina – La Virginia, la cual se basó en el comportamiento de la calidad del agua del río en ese tramo y en la revisión de diferentes ICA desarrollados a nivel mundial a partir de los cuales se definieron los parámetros, subíndices y ecuaciones a ser considerados en el mismo. Finalmente, como parte de una Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico, se planteó el índice de calidad de agua por parte del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Orjuela & López, 2011) el cual se calcula a partir de datos de concentración de un conjunto de cinco a seis variables que determinan, en gran parte, la calidad de las aguas fluviales superficiales (Tabla 9).

Tabla 9.

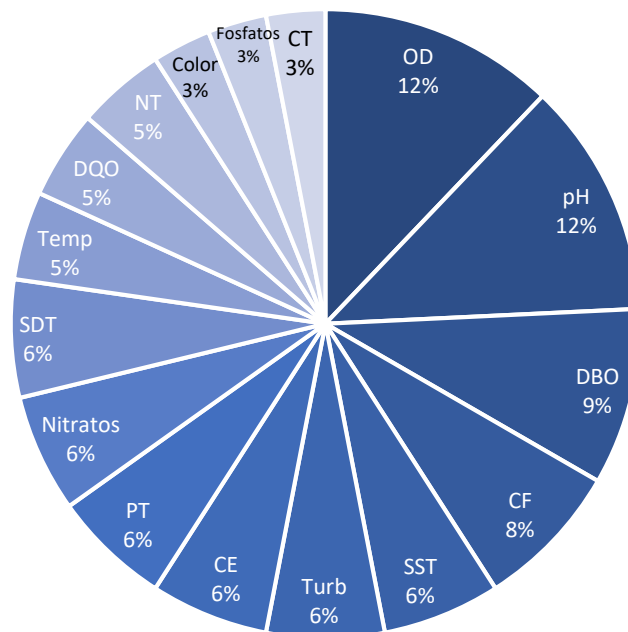
Parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, frecuencia de uso y pesos relativos asignados a los parámetros empleados por los diferentes ICA.

Región		Canadá	Estados Unidos		Unión Europea	Colombia			Frecuencia	
Índices		CCME ^a 2001	ICA NSF 1970	Dinius ^b 1987	UWQI ^c 2007	Rojas 1991	ICAUCA 2004	IDEAM 2011		
Parámetros más comunes										
							5 variables	6 variables ^d		
Físicos	SST	x					0,05	0,20	0,17	4
	Turbidez	x	0,08			0,11	0,07			4
	Temperatura	x	0,10	0,077						3
	Color	x		0,063			0,05			2
Químicos	OD	x	0,17	0,109	0,114	0,25	0,21	0,20	0,17	8
	pH	x	0,11	0,077	0,029	0,17	0,08	0,20	0,15	8
	DBO	x	0,11	0,097	0,057	0,15	0,15			6
	CE	x		0,079				0,20	0,17	4
	Fósforo total	x			0,057		0,08		0,17	4
	Nitratos	x	0,10	0,09	0,086					4
	SDT	x	0,07			0,11	0,07			4
	DQO	x						0,20	0,17	3
	Nitrógeno total	x					0,08		0,17	3
	Fosfatos	x	0,10							2
Biológicos	Coliformes fecales	x	0,16	0,116		0,21	0,16			5
	Coliformes totales	x		0,09	0,114					2

Nota. a. Puede utilizar cualquier parámetro y no utiliza pesos relativos asignados, b. Utiliza los parámetros cloruros, alcalinidad y dureza, c. Utiliza también los parámetros cadmio, mercurio, arsénico, fluoruro, cianuro y selenio, d. El nitrógeno y fósforo total ponderan con 0,17 en conjunto, bajo la relación NT/PT. Los números en negrita indican el mayor peso relativo asignado dentro de cada índice, excepto aquellos que no lo tienen o que son similares varios parámetros. Adaptado de Torres et al., (2009); Uddin et al., (2021).

Figura 12.

Porcentaje relativo de la frecuencia de utilización de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos para cálculo de la cantidad del agua en los ICA: CCME, NSF, Dinius, UWOI, Rojas, ICAUCA e IDEAM.



La estructura de cálculo de la mayoría de los ICA se basa en la estandarización o normalización de los parámetros que los conforman, para su posterior ponderación en función de su importancia como indicadores generales de la calidad del agua. Estas ponderaciones se integran a través del cálculo con diferentes funciones matemáticas (Uddin et al., 2021). Existen dos vías para el cálculo: i) mediante el producto ponderado donde los pesos (W_i) dan importancia a los puntajes, y luego todos ellos son nuevamente ponderados de acuerdo con la importancia de los pesos y finalmente son multiplicados y ii) la suma ponderada, en la que cada puntaje es multiplicado por su peso y los productos son sumados para obtener el índice (Torres et al., 2009).

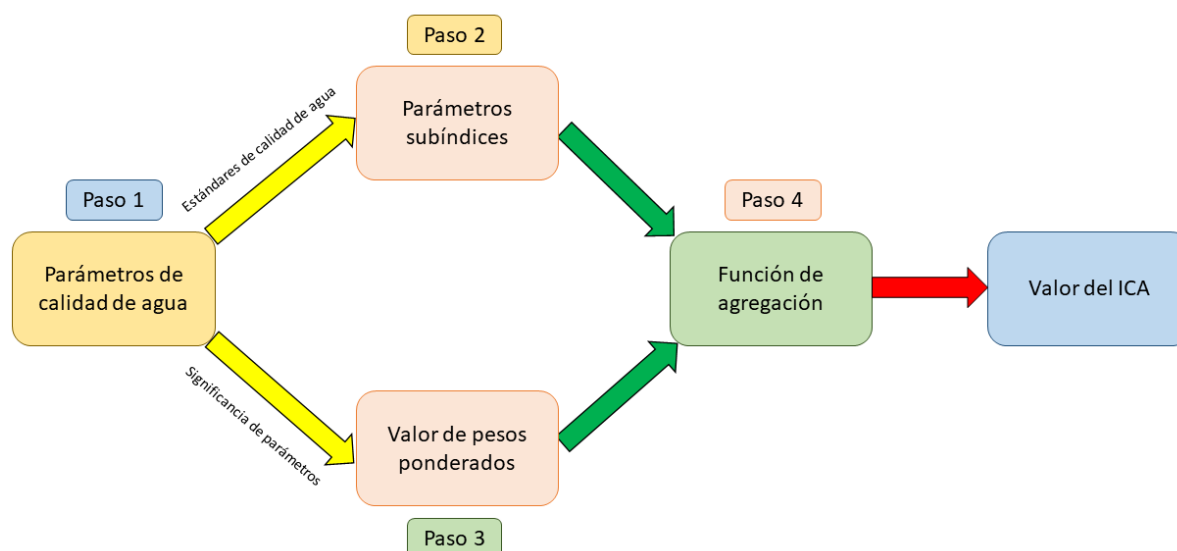
El valor del índice es llamado valor aritmético no ponderado si la suma de los pesos es

igual, mientras que, si la suma de los pesos no es igual, se conoce como valor aritmético de la calidad del agua (Figura 13). Los parámetros que suelen ser incluidos en los ICA han estado históricamente marcados por la apreciación de expertos, instituciones especializadas en el tema o entidades gubernamentales que son los que determinan en el ámbito legislativo su importancia en la definición de calidad del agua (Fernández & Solano, 2008). Dunnette (1979) recomienda seleccionar los parámetros de las cinco categorías más reconocidas: aspectos de salud, nivel de oxígeno, eutrofización, sustancias disueltas y características físicas.

La Figura 12 y la Tabla 9 muestran los parámetros más comunes empleados en los ICA presentados. En la última columna de la Tabla 9 se presenta la frecuencia de uso de cada parámetro en los siete ICA presentados, mientras que en la Figura 12 esta frecuencia es gráficamente dibujada en porcentaje relativo. Se observa que los parámetros que más se emplean pertenecen a las categorías recomendadas por Dunnette (1979), y son el oxígeno disuelto y el pH (se usan en todos los ICA), seguidos en orden decreciente por la DBO, los coliformes fecales, los sólidos (SST y SDT), la turbidez, la conductividad y los nutrientes (fosforo total y nitratos). Este comportamiento se relaciona con las tendencias actuales en cuanto a la vigilancia de la calidad del agua (especialmente para consumo humano) de acuerdo con las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011) donde se sugiere dar prioridad a aquellas sustancias que se conoce son de importancia para la salud y que están presentes en grandes concentraciones en las fuentes de abastecimiento de agua. Con respecto al riesgo microbiológico, cinco de los siete ICA comparados emplean como parámetro indicador los coliformes fecales. Esta tendencia coincide con los reportes de la OMS (2011) donde se señala que los riesgos microbiológicos siguen siendo la principal preocupación en los países desarrollados y en los países en desarrollo en temas de uso y calidad de agua.

Figura 13.

Estructura general para la obtención de los Índices de Calidad de Agua



Nota. Adaptado de Uddin et al., (2021).

La asignación de pesos (ponderación) de cada parámetro está muy relacionada con la importancia de los usos pretendidos y la incidencia de cada variable en el índice (Fernández et al., 2003). Según Sacha & Espinoza (2001) para los ICA aplicados a aguas superficiales el mayor peso (W_i) se suele asignar a los parámetros OD, DBO, nitratos, sólidos suspendidos y coliformes. En el caso de los ICA aplicables a fuentes de agua potable se suele otorgar peso al color, arsénico y boro. La Tabla 7 presenta los pesos asignados a los parámetros que conforman los ICA, de acuerdo con el grado de importancia que tienen dentro de cada uno de éstos. Los ICA mostrados en la tabla son los que emplean asignación de pesos (W_i) a cada uno de los parámetros que los conforman, excepto el ICA CCME que emplea estructuras de cálculo que no requieren de dicha asignación. Con respecto al nivel de importancia de cada parámetro de acuerdo con el peso asignado, el oxígeno disuelto y los coliformes tienen el mayor grado de importancia en los diferentes ICA (Tabla 9), presentando en general los mayores pesos.

El valor del ICA permite clasificar al agua a partir de rangos previamente establecidos

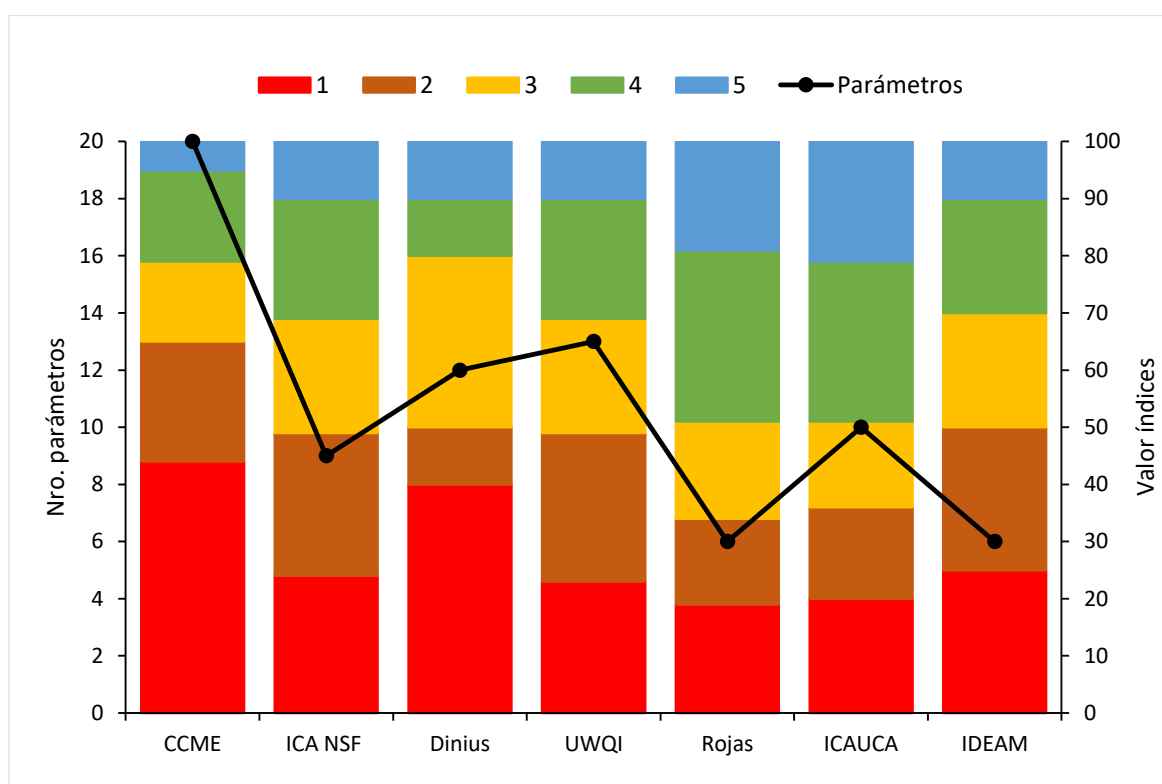
que son definidos considerando los usos a evaluar. Las categorías o escalas de clasificación son de igual o mayor importancia que el cálculo en sí del índice, pues definen finalmente el valor obtenido y lo clasifican en el rango correspondiente dentro del índice, indicando así la calidad final del agua (Fernández & Solano, 2008). En la Figura 14 y la Tabla 10 se presentan los rangos de clasificación para cada uno de los ICA analizados. En la Figura 14 además se compara el número total de parámetros que utilizan estos índices a la hora de calcular la calidad de agua, observándose que utiliza más el ICA CCME, ya que es adaptable y flexible a las circunstancias, pudiendo el investigador o gestor trabajar con un número indefinido de parámetros. Le siguen en orden decreciente el UWQI (13), Dinus (12), ICAUCA (10), ICA NSF (9), ICA Rojas (6) y finalmente ICA IDEAM (6 o 5).

En general, los ICA presentan cinco rangos de clasificación de calidad del agua los cuales varían de acuerdo con cada índice; sin embargo, los índices ICA NSF, UWQI y IDEAM por un lado y el ICA Rojas e ICAUCA por otro, presentan rangos similares en cada una de sus categorías, siendo los segundos menos restrictivos y otorgando valores más bajos al cambio de rango de calidad de agua. Los ICA CCME y Dinus son los más restrictivos y estrictos ya que los rangos de peor calidad alcanzan valores superiores a 40/100 y los rangos con mejor calidad superan los 80/100. El nivel de exigencia disminuye un poco en los ICA NSF, UWQI y el denominado IDEAM (utilizado en esta investigación) con valores en torno a 25/100 para la peor calidad de agua y desde 70/100 para los rangos de mejor calidad. Finalmente, los índices menos rigurosos son el ICA Rojas e ICAUCA donde la peor calidad de agua se encuentra cercana al 20/100, mientras que las dos mejores categorías son a partir de 50/100 (Figura 14).

Figura 14.

Número total de parámetros físicos, químicos y microbiológicos utilizados por los diferentes ICA y los rangos de clasificación, codificados de acuerdo con la Tabla 10, en base al valor

máximo de los índices.



Nota. Los colores han sido asignados de acuerdo con los estándares establecidos por los índices, de menor a mayor calidad de agua: rojo, naranja, amarillo, verde y azul. El ICA IDEAM tiene dos casos, aquí se representa al segundo que utiliza 6 parámetros, pero existe otro con 5 variables consideradas para obtener el índice. Los valores finales del ICA IDEAM han sido multiplicados x100, dado que este índice los categoriza del 0 al 1. Adaptado de Torres et al., (2009); Uddin et al., (2021).

La clasificación de cada rango, generalmente indica el nivel de calidad del agua o define los usos para los cuales es apto el recurso hídrico en dicho sistema, con base en la puntuación obtenida en cada ICA. En general, se observa que los rangos codificados con los números 1 y 2 clasifican el agua como de (muy) mala, pobre, marginal o pésima calidad, mientras que de acuerdo con los ICA que definen usos es inadecuada o inaceptable para consumo humano. A partir del rango 3 hasta el 5, las clasificaciones describen aguas de regular-mediana-aceptable a excelente-óptima calidad, que de acuerdo con las recomendaciones dadas por los ICA que definen usos, requieren de tratamiento cuya complejidad depende del rango, es así como a menor calidad mayores requerimientos en el tratamiento del agua (Tabla 10).

Tabla 10.

Descripción de los rangos de clasificación de los ICA expresados en la Figura 14

Código	Índice						
	CCME	ICA NSF	Dinius	UWQI	Rojas	ICAUCA	IDEAM
1	Pobre	Muy mala	Inaceptable su consumo	Pobre	Muy mala	Pésima	Muy mala
2	Marginal	Mala	Dudoso para consumo	Marginal	Inadecuada	Inadecuada	Mala
3	Regular	Mediana	Tratamiento necesario	Regular	Aceptable	Aceptable	Regular
4	Buena	Buena	Tratamiento menor	Buena	Buena	Buena	Aceptable
5	Excelente	Excelente	No requiere tratamiento	Excelente	Óptima	Óptima	Buena

Nota. Torres et al., (2009); Uddin et al., (2021).

2.3.7. La cuenca hidrográfica como unidad de interacción social

Las cuencas hidrográficas son superficies delimitadas naturalmente por las divisorias de aguas, por donde escurre e infiltra el recurso hídrico de origen pluvial o nival y finalmente desemboca en una nueva vertiente, embalse, lago o en el mar (Ven Te et al., 1994; Villón, 2002) (Figura 15). Si bien en la antigüedad cuencas como la de los ríos Éufrates y Tigris en la Mesopotamia asiática, y el río Nilo en Egipto fueron aprovechadas por la población para el regadío agrícola; es a partir de finales del siglo XIX en Europa y a inicios del siglo XX en América del Norte que fueron consideradas como unidades de planificación territorial forestal (Warner et al., 2008; Sun et al., 2023). Debido a que tanto en Estados Unidos como en Europa Occidental se empezó a considerar a las cuencas hidrográficas como unidades sistémicas para la corrección de torrentes y manejo integral de los recursos naturales (Warner et al., 2008).

Desde esta perspectiva las intervenciones sociales de las cuencas hidrográficas para beneficio humano no son recientes, más bien es parte de la historia de la humanidad. Incluso los recurrentes conflictos socio ambientales por el uso de las aguas entre quienes ocupan las partes altas, medias y bajas de las cuencas, o los conflictos entre los diversos usos del recurso

hídrico son parte del bagaje histórico-cultural. Esta reconceptualización permite comprender a la cuenca hidrográfica de forma distinta. De esta manera se pasa de la clásica definición, de cuenca vista como espacio hidrográfico delimitada por una línea imaginaria (divisoria de aguas) que recepta únicamente el recurso hídrico, a una que asume que la cuenca es una unidad donde interactúan procesos físicos, químicos y biológicos bajo el molde de las necesidades humanas (DeFries & Eshleman, 2004; Perales-Miranda, 2016a) .

Es decir, la humanidad históricamente ha moldeado la cuenca hidrográfica a través del uso del agua, de sus formas de asentamiento y del consumo de los recursos naturales. De ahí que, es importante reflexionar sobre lo mencionado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Agua, desarrollada en 1977, en Mar del Plata, donde se estableció que las cuencas son la unidad territorial donde se gestiona el agua a partir de las interrelaciones entre usuarios y la interdependencia de los sistemas biofísico y socioeconómico (Organización Mundial de la Salud [OMS], 1977). Esta redefinición de cuenca coincide con lo planteado por (Wittfogel, 1957) quien señala que el agua también moldea la formación de la sociedad, porque las relaciones sociales influyen en el agua y las características del agua inciden en las relaciones sociales. Por ejemplo, la agricultura intensiva consume agua, monopoliza, agota y en muchos casos, incluso contamina el recurso, lo cual ocasiona que los centros poblados aledaños se disputen el recurso con estos sectores económicos o a la vez presionen otras fuentes de recurso hídrico.

Sin embargo, no se puede caer en el error de considerar a la cuenca hidrográfica como proveedora única de agua, ya que es una unidad ambiental cuyo rol es el soporte de ecosistemas y el desarrollo de la vida misma en todas sus formas. Sin duda, el recurso hídrico es la fuente de vida y la piedra angular para el desarrollo de otros recursos como el suelo. Esta interacción constante y fluctuante de recursos en la cuenca hace a este espacio territorial como la unidad base de interacción social (Perales-Miranda, 2016a). El concepto de cuenca social también se

lo ha definido como, un traslape de varias cuencas geográficas entrelazadas por el tejido social que construyen los múltiples usuarios (Yáñez & Poats, 2007) o como espacios donde se crean redes en torno al agua entre gente de las zonas altas, medias y bajas mediante procesos de desarrollo hídrico e hidráulico con historias particulares que configuran una cuenca hidrosocial (Galván & Tapia, 2019).

En consecuencia, el desarrollo del concepto de «cuenca hidrosocial» establece un mayor énfasis en la intervención social del espacio territorial (Budds, 2012; Galván & Tapia, 2019; Perales-Miranda, 2016a; Yáñez & Poats, 2007). Además, que concibe a la cuenca como un espacio limitado tanto por límites físicos como por acuerdos sociales, implicancias políticas o marcos jurídicos. Por ejemplo, la asignación de «derechos de agua» para usuarios, se rigen bajo costos económicos, responsabilidades administrativas y legales. De hecho, la cuenca es el espacio básico para la interacción social y para la intervención social. Aunque suene similar la relación entre estas actividades no siempre es sinérgica. Porque la intervención social involucra interacción, pero la interacción no necesariamente involucra intervención. Por ejemplo, varias poblaciones humanas pueden interactuar en una cuenca hidrográfica haciéndola su hábitat y no necesariamente la intervienen al no generar disturbios en los procesos ecológicos. Si bien esta redefinición no resalta de manera clara este hecho, intrínsecamente provoca la necesidad de hablar sobre la conformación de territorialidades dentro de una cuenca debido a la interacción e intervención de varios grupos de actores, incluso solapándose entre sí. En la figura 15 se presenta la interacción social de la cuenca hidrográfica.

Figura 15.

Interacción social en la cuenca hidrográfica



Nota. Adaptado de FoEh (2020).

2.4. Gobernanza en cuencas hidrográficas

Gobernanza es un concepto cada vez más presente en el debate público. En los últimos años, a nivel mundial la hegemonía del Estado ha disminuido y la sociedad busca más participación en la toma de decisiones, por lo cual cada vez más se configuran redes y vínculos desde escalas locales. La gobernanza es un proceso donde las distintas visiones de los individuos e instituciones (públicas y privadas) gestionan asuntos comunes, mediante la búsqueda del consenso, para lo cual la integración de diversos intereses conflictivos es fundamental (Comission on Global Governance, 1995).

Para Franks & Cleaver (2007) la gobernanza ofrece otra manera de conceptualizar esta

nueva red de relaciones entre los distintos sectores e intereses en la sociedad, lo que permite analizar cómo los gobiernos, los sectores público y privado, y la sociedad civil forjan redes y vínculos para resolver sus asuntos. El estudio de la gobernanza ha tenido mucho auge en los últimos años. Se han desarrollado estudios sobre la importancia de la gobernanza a nivel empresarial, a nivel industrial, en la gestión de riesgos, en el manejo de recursos tecnológicos, y sobre todo en el manejo de recursos naturales, dentro de los cuales está el agua.

Cuando se analiza la gobernanza de los recursos naturales es común hablar de gobernanza ambiental, la cual autores como Lemos & Agrawal (2006, p. 298) la definen como “el conjunto de procesos normativos, mecanismos y organizaciones a través del cual los actores políticos influyen en las acciones ambientales y sus resultados”. En ese mismo contexto autores como Franks & Cleaver (2007) resaltan que no existe gobernanza sin la interacción de la amplia gama de sistemas: políticos, administrativos, económicos y sociales que existen para gestionar el recurso. Del mismo modo, la gobernanza del agua hace hincapié a los procesos que integran los diferentes intereses-conflictivos de los actores y se han adaptado para gestionar el recurso hídrico. Los intereses no son estáticos y de ahí la importancia de la localización y contextualización de la forma en que los sistemas de gobernanza evolucionan.

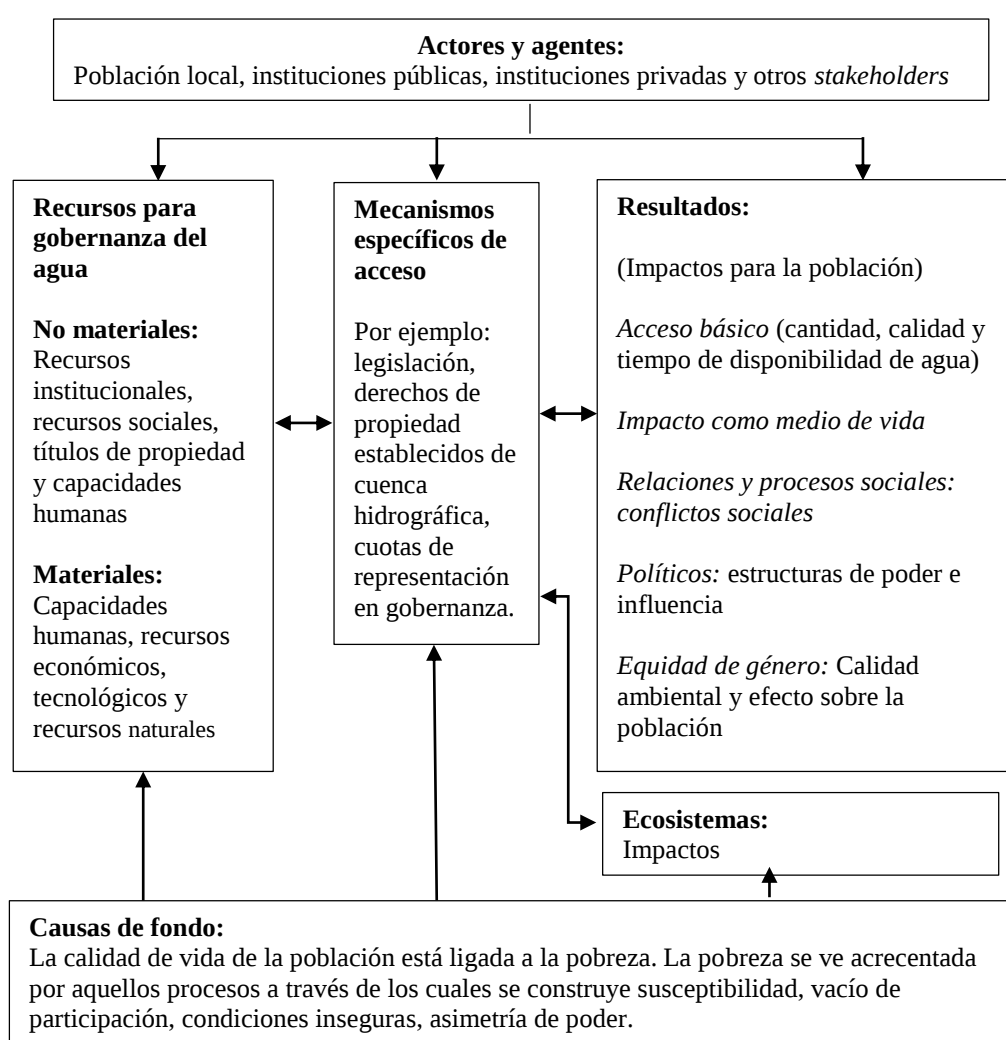
Franks & Cleaver (2007) reconocen que los sistemas públicos y privados están relacionados a través de procesos políticos en la gestión del recurso hídrico, por tanto, es inevitable la interacción de toda la gama de sistemas (antes señalados) dentro de la comunidad. Entonces, la gobernanza en cuencas hidrográficas es una herramienta útil para entender como los acuerdos sobre la gestión y manejo se forman, cuáles son sus impactos sobre los actores, la población en general. Este tipo de gobernanza debe ser un proceso que busca consenso sobre el aprovechamiento del agua y tiene una participación intersectorial, porque involucra al gobierno nacional, local, instituciones públicas, instituciones privadas y sociedad civil.

Además, es adecuado el fortalecimiento de la gobernanza, porque ayudaría a alcanzar

metas con impacto local, pero de índole mundial, como el alcance de los objetivos del Milenio y la justicia ambiental. Entonces la gobernanza del agua, como marco analítico, permite entender cómo se produce la gestión y aprovechamiento del recurso hídrico, bajo acuerdos establecidos entre diversos actores, en escenarios de constante cambio por intereses en conflicto. Además, posibilita el análisis de estos procesos y sus impactos, muchos de carácter cíclico. Franks & Cleaver (2007) diseñan un marco de análisis de la gobernanza del agua, el cual es adaptado para el manejo de cuencas hidrográficas, mediante el estudio de la interacción entre agentes, recursos, mecanismos, procesos y resultados obtenidos (Figura 16).

Figura 16.

Marco de análisis de la gobernanza de agua



Nota. Adaptado de Franks y Cleaver (2007).

2.5. Planificación Territorial: Un instrumento para la organización de cuencas

hidrográficas

El territorio es una estructura social en la cual se integra las actividades e interrelaciones que la población realiza en el medio físico. El territorio debe entenderse como un sistema, el cual consta de varios componentes, como: medio físico, población, actividades, instituciones, marco legal, canales de conexión, población y asentamientos poblacionales. El sistema territorial puede ser entendido e interpretado a través de la proyección de modelos que expresen su estructura y funcionamiento, los cuales buscan el equilibrio social, económico y ambiental, que encaminan a distintos modelos de organización (Gómez-Orea, 2007).

La organización del territorio se centra en tres elementos importantes como son: las actividades poblacionales, el espacio en las que están ubicadas, y el sistema en el que éstas se rigen. De esta manera, en la planificación territorial existen etapas como propuesta metodológica: Diagnóstico, Propuesta y Gestión (Gómez-Orea, 2007). En la etapa de diagnóstico se hace énfasis a conocer aspectos positivos, potencialidades y problemas del territorio llegando a ser una concepción teórica. La propuesta se deduce del diagnóstico estableciendo una relación directa en donde al detectarse un problema o potencialidad dará una acción posible. Por último, la gestión que busca indicar una manera de intervención a las acciones y un sistema de seguimiento (Benabent & Vivanco, 2019).

La planificación genera un análisis del estado situacional actual, enfocado a tener un modelo futuro deseado, esta brinda un apoyo para la toma de decisiones y definición de estrategias, las cuales buscan generar un equilibrio en el territorio (Armijo, 2009). Así, la planificación da la oportunidad de prever lo que pueda pasar en el futuro. De la misma manera, se anticipa a la toma de decisiones para poder planear líneas estratégicas para la conservación

de la cuenca y que permitan establecer acciones a mediano y largo plazo encaminadas a una buena gestión ambiental (Abendaño & Benavides, 2001).

2.5.1. Diagnóstico Territorial: la primera etapa de la planificación

El diagnóstico territorial, es una etapa de la planificación del territorio que busca realizar un análisis en donde se identifique potencialidad, limitaciones y problemas, causados por su modelo de desarrollo. Establece la situación actual y tendencial del territorio en base a diferentes sistemas como son: Ambiental, Socio Cultural, Económico Productivo, Asentamientos Humanos y Político Institucional (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2011) (Figura 17). El análisis para el diagnóstico territorial se obtiene mediante la utilización de herramientas, cartográficas, estadísticas, consulta ciudadana y bibliográfica. Estas herramientas permiten obtener una base técnica para la construcción de un territorio con proyectos a corto, mediano y largo plazo (Cabeza, 2001).

Figura 17.

Sistemas vinculados al desarrollo integral y al ordenamiento territorial



Nota. Adaptado de Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (2011).

2.5.2. Diagnóstico Ambiental: un enfoque más integrador del diagnóstico

El diagnóstico ambiental en una cuenca hidrográfica es la etapa inicial para conocer acerca del estado situacional de los componentes biofísicos, socioeconómicos y ecológicos, que son importantes para alcanzar un mejor manejo de la cuenca y una mejor calidad de vida en armonía con la naturaleza. Para el desarrollo de un diagnóstico ambiental existen varias metodologías. Una metodología muy utilizada es el diagnóstico participativo, el cual está basado en herramientas que permiten interactuar con comunidades para trabajar de manera dinámica y obtener la percepción de diferentes autores (Espinoza et al., 2015). También está el diagnóstico morfométrico para cuencas hidrográficas el cual consiste en una caracterización geomorfológica de la cuenca con base a parámetros de forma, relieve y drenaje (Cruz et al., 2015). Otra metodología plantea la delimitación de unidades ambientales homogéneas como herramientas de evaluación ambiental estratégica (Camino-Dorta et al., 2014), y por último WWF-Colombia et al., (2016), han realizado en la actualidad el diagnóstico de salud de cuenca socio ecológico basado en la determinación de indicadores.

Sin duda, el diagnóstico ambiental es un método de evaluación multidisciplinario que genera información del estado actual de los componentes. Mediante la información recopilada, se puede llegar a proponer acciones para prevenir o mitigar los problemas ambientales diagnosticados (Perevochtchikova, 2013). El Reporte de Salud de Cuenca es un instrumento de monitoreo, evaluación y comunicación que compara información ecológica y socioeconómica, estableciendo resultados mediante indicadores que permiten identificar acciones estratégicas para influir en el manejo y gestión de una cuenca (WWF-Colombia, 2019).

2.5.3. Diagnóstico morfométrico de cuencas hidrográficas

Las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica permiten conocer como la precipitación captada se transforma en escurrimiento. Cada característica morfométrica define la incidencia del transporte superficial del agua, sedimentos y nutrientes.

Tabla 11.*Parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica*

Parámetros de Forma	
Perímetro (P)	Es el contorno de una cuenca hidrográfica
Longitud Axial (La)	Es la distancia existente entre el punto más lejano de la cuenca y su desembocadura
Área (A)	Es el límite exterior de la cuenca hidrográfica, que delimita el espacio que ocupa y separa las divisorias de aguas
Ancho promedio (Ap)	Es la relación entre la superficie de la cuenca y la longitud axial
Factor forma (IF)	Es un factor adimensional que establece la relación entre el ancho promedio de la cuenca (Ap) y la longitud axial (La). Se calcula con la fórmula: $IF = Ap/La$ Es un parámetro que expresa la tendencia de la cuenca hacia las crecidas. Cuando IF es similar a 1, representa una cuenca de forma redondeada, y la cuenca con IF bajo
Coefficiente de Compacidad de Gravelius (Kc)	Es un factor adimensional. Se expresa como una relación entre (P) perímetro (km) y (A) área (km ²), por medio de la fórmula: $Kc = P / (2 \pi A)$ El Kc está relacionado directamente con el tiempo de concentración, que es el tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida. De acuerdo con el valor que tome este coeficiente, la cuenca tendrá diferente forma: Kc = 1,00 representa una cuenca redonda; 1,25, oval redonda; 1,50 oblonga; e igual o mayor a 1,75 cuenca rectangular-oblonga. Cuando el Kc tiende a 1, la cuenca tiende a ser redonda, delimitando una peligrosidad mayor a crecidas.
Parámetros de Relieve	
Curva hipsométrica (Ch)	Proporciona información simplificada sobre la altitud de la cuenca, al representar la distribución altitudinal por tramos.
Pendiente media de la cuenca (PM)	Establece la inclinación media de la cuenca hidrográfica respecto a la horizontal de referencia. Se calcula con la fórmula: $PM = 100 H * L / A$ Dónde, PM: Pendiente media (%); H: Equidistancia entre curvas medidas (km); L: Longitud de las curvas de nivel (km); A: Área (km ²).
Coefficiente de rugosidad (Ra)	Es un factor adimensional que expresa la relación entre el desnivel de la cuenca (H) y su densidad de drenaje (Dd).
Parámetros de Drenaje	
Densidad de drenaje (Dd)	Establece la relación entre la suma de las longitudes de toda la red hídrica (L) y la superficie de la cuenca hidrográfica (A). Se calcula con la fórmula: $Dd = L/A$
Longitud de cauce principal (Ln)	Es la sumatoria de todas las longitudes de los cursos de agua que conforman el cauce principal.
Pendiente media del cauce (J)	Establece el desnivel altitudinal sobre el cauce principal en función de la longitud de este.
Tiempo de concentración (Tc)	Es el tiempo que tarda una gota precipitada en llegar a la salida de la cuenca desde el punto más alejado de la misma. El Tc (horas) se calcula a través de la relación entre la longitud del cauce principal, expresada en kilómetro (L), y la pendiente media de la cuenca, expresada en metro/metro (J). Generalmente se calcula con la fórmula establecida por (Kirpich, 1940): $Tc = 0,06628 * (L^{0,77} / J^{0,385})$

Nota. Adaptado de Kirpich (1940); López (1998); Gaspari et al., (2013).

Para fácil entendimiento, el funcionamiento de una cuenca se asemeja al de un colector que recoge precipitación y la transforma en escurrimiento y debido a las características físicas del colector —las propiedades morfométricas —el agua fluye más rápido o más lento (Gaspari et al., 2013). La morfometría de una cuenca se analiza a través de parámetros de forma, relieve y drenaje (Tabla 11).

2.6. Reporte de Salud de Cuenca: un instrumento para la planificación

La planificación de cuencas hidrográficas debe ser considerada como una estrategia para la protección y conservación de los recursos naturales y en especial el recurso hídrico (Ferrer & Torrero, 2015). Este tipo de planificación propicia el manejo adecuado de los recursos desde un punto de vista micro o individual hasta las interacciones de producción y comportamiento, con el fin de entregar soluciones a problemas integrales, ambientales y sociales. Esta planificación establece un proceso productivo ordenado dependiendo de factores como: uso y manejo del agua, uso actual del suelo, medio físico, social y aspecto político.

Para Pantus & Dennison (2005), la salud de un ecosistema es la base para la gestión de un área específica. Así como la salud humana indica el estado de bienestar o equilibrio del ser humano, la salud de la cuenca indica el estado de bienestar o equilibrio del territorio. De la misma manera que en los humanos los síntomas de enfermedad son el manifiesto de deterioro de salud, en las cuencas son el manifiesto de deterioro del sistema ecológico, social, cultural que lo construyen. Los tomadores de decisiones se convierten en los médicos que definen el diagnóstico de dolencias en las que se debe actuar (WWF-Colombia, 2019).

El Reporte de Salud ambiental de las cuencas hidrográficas es un instrumento de información y concientización ambiental de la comunidad y una herramienta de toma de decisiones de ingeniería. Para ello se utilizan instrumentos técnicos de evaluación que permiten

diagnosticar el estado situacional de la salud ambiental de la cuenca (WWF-Colombia et al., 2016). La Universidad de Maryland de Estados Unidos ha elaborado varios informes sobre la salud de los ecosistemas utilizando una metodología basada en: visualización, selección de indicadores, definición de categorías, umbrales, calificación e informe de resultados (Costanzo et al., 2017).

Estos instrumentos de evaluación iniciaron en diferentes territorios como en la gran barrera el río Misisipi en el año 2015. En este estudio integraron varios actores para encontrar desafíos a los problemas de la gestión del río y afluentes (Somerville et al., 2015). En Oregón, Estados Unidos se realizó el reporte de salud del río *Willamette*, que identifica la calificación general para el río en diferentes zonas altitudinales (Costanzo et al., 2015). De manera similar, se han implementado en ecosistemas costeros como el de Georgia, donde informar sobre la salud de cuenca es una herramienta importante para planificar actividades de restauración y conservación (Somerville et al., 2015).

En el caso latinoamericano, *World Wildlife Fund* (WWF) Colombia realizó un estudio titulado –Mira & Mataje Ríos que unen: Reporte de Salud 2019 Ecuador y Colombia. El estudio realizado en la cuenca binacional de los ríos Mira-Mataje tuvo una metodología basada en diagnósticos participativos entre diferentes actores de instituciones gubernamentales, no gubernamentales, academia y sociedad civil (WWF-Colombia, 2019). Aquí se seleccionaron indicadores que buscan dar una calificación tanto a la cuenca binacional como a once cuencas pertenecientes, una de ellas es la cuenca del río Ambi, la cual es el área de estudio de la presente investigación.

Capítulo 3

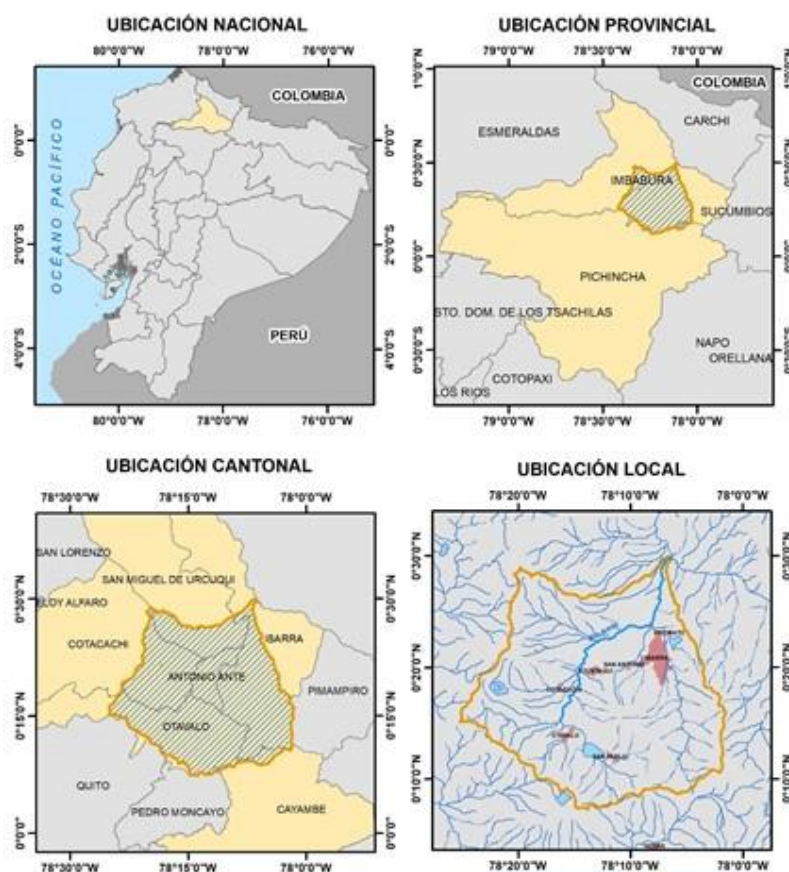
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Ambi tiene una superficie de 1129,80 km², se encuentra ubicada en la sección suroccidental de la unidad hídrica del río Mira, justo en la parte alta. Tiene su origen en los páramos y bosques andinos de los volcanes Imbabura y Cotacachi. La cuenca se sitúa dentro de la provincia Imbabura, por lo que se localizan cinco de sus cantones, Antonio Ante, Cotacachi, Ibarra, Otavalo y Urcuquí. El desnivel altitudinal en de 3.390 msnm siendo su punto geográfico más alto a los 4.902 msnm y el más bajo a los 1.512 msnm. En general la mayor parte del relieve es plano (47%). Finalmente, hasta el año 2010, la densidad poblacional era 249 Hab/km² (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2010).

Figura 18.

Mapa de ubicación de la cuenca del río Ambi



3.1. Morfometría de la cuenca

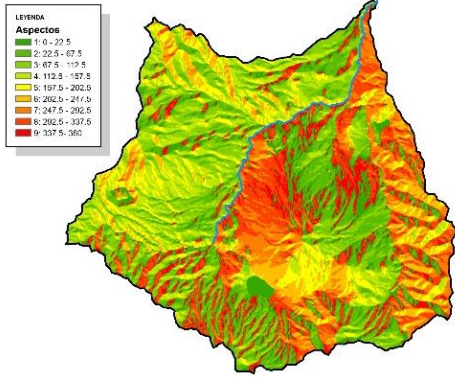
Los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica permiten analizar la forma, el relieve y los aspectos hidrológicos que tiene la cuenca (Tabla 12).

Tabla 12.

Parámetros morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Ambi

Parámetros de Forma												
Parámetro	Cálculo	Interpretación										
1. Área	En la tabla de atributos: A = 1.106,17 km ² A = 110617 Has	De acuerdo con el área calculada se clasifica como: cuenca hidrográfica										
2. Perímetro	P = 164,87 km	De acuerdo con el perímetro calculado se clasifica como: grande										
3. Longitud axial	La = 42,11 km	La longitud axial es la distancia máxima medida desde el punto de salida hacia la parte más distante de la cuenca, siguiendo la dirección del río principal										
4. Ancho promedio	Ap = A/La Ap = 1.106,17km ² /42,11km Ap = 26,27 km	El ancho promedio es la distancia medida en sentido perpendicular a la longitud axial. La longitud axial y el ancho promedio forman el rectángulo equivalente de la cuenca										
5. Altitud mínima	Hmín = 1.529 msnm	La cota mínima se encuentra en el punto de salida de la cuenca										
6. Altitud máxima	Hmáx = 4.527 msnm	La cota máxima se encuentra en la parte más alta de la cuenca										
7. Coeficiente de compacidad	$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$ Kc = 1,39	La cuenca se clasifica como: oval redonda a oval-oblonga										
<table><tr><th>Kc</th><th>Clasificación</th></tr><tr><td>1 a 1,25</td><td>Casi redonda a oval-redonda</td></tr><tr><td>1,25 a 1,5</td><td>Oval redonda a oval-oblonga</td></tr><tr><td>1,5 a 1,75</td><td>oval oblonga a rectangular oblonga</td></tr><tr><td>>1,75</td><td>Rectangular</td></tr></table>			Kc	Clasificación	1 a 1,25	Casi redonda a oval-redonda	1,25 a 1,5	Oval redonda a oval-oblonga	1,5 a 1,75	oval oblonga a rectangular oblonga	>1,75	Rectangular
Kc	Clasificación											
1 a 1,25	Casi redonda a oval-redonda											
1,25 a 1,5	Oval redonda a oval-oblonga											
1,5 a 1,75	oval oblonga a rectangular oblonga											
>1,75	Rectangular											
8. Factor forma	Ff = La ² /A Ff = (42,11 km) ² /(1.106,17km) ² Ff = 1,60	Tabla 7.7. Clasificación del factor de forma. <table><tr><th>K_f</th><th>Característica</th></tr><tr><td><1</td><td>Tiende a ser alargada, baja susceptibilidad a las avenidas</td></tr><tr><td>1</td><td>Cuadrada</td></tr><tr><td>>1</td><td>Tiende a ser achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas</td></tr></table> Según el cálculo, la cuenca tiene un factor de forma: tiende a ser achatada	K _f	Característica	<1	Tiende a ser alargada, baja susceptibilidad a las avenidas	1	Cuadrada	>1	Tiende a ser achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas		
K _f	Característica											
<1	Tiende a ser alargada, baja susceptibilidad a las avenidas											
1	Cuadrada											
>1	Tiende a ser achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas											

Parámetros De Relieve	
-----------------------	--

Parámetro	Cálculo	Interpretación
1. Altitud media	Se calcula con la herramienta <i>Zonal Statistics As Table</i> a partir del DEM de la cuenca. $H_{med} = 2.905,36 \text{ m}$	La altitud media corresponde a una cuenca de montaña.
2. Desnivel	$De = H_{máx} - H_{mín}$ $De = 4.927 - 1.529 = 3.398 \text{ msnm}$	El desnivel de la cuenca o variación de altitud es de: 3.398 msnm
3. Orientación	Las orientaciones de las laderas del terreno están determinadas en base al ángulo entre 0 y 360°.	Permiten determinar qué vertientes de la cuenca reciben más radiación solar, para ver la distribución de la flora, temperatura, sombras, humedad del suelo y así hacer zonificaciones con fines de ordenamiento del territorio. Todo lo que está de color verde recibe radiación solar en la mañana porque está orientado al este, y todo lo que está de color rojo orientado al oeste recibe radiación solar en la tarde.
4. Pendiente media	$P_{med} = 29,91\%$ $P_{med} = 15,64\%$	
		0 - 5%: Relieve plano 5 - 12%: Relieve ligeramente ondulado 12 - 25%: Relieve ondulado 25 - 50%: Relieve montañoso 50 - 70%: Relieve muy montañoso >70%: Relieve escarpado De acuerdo con el valor calculado, la cuenca tiene: relieve montañoso

Parámetros Hidrológicos		
Parámetro	Cálculo	Interpretación
1. Longitud del cauce principal	$L_{cp} = 41,72 \text{ km}$ $L_{cp} = 41.729,1 \text{ m}$	$< 10 \text{ km}$ es longitud pequeña $10 - 50 \text{ km}$ es longitud media $> 50 \text{ km}$ es longitud grande El cauce principal tiene una longitud: media
2. Pendiente del cauce principal	Cota mín = 1.529 m (donde finaliza el río) Cota máx = 2.498 m (donde nace el río) $\text{Cota máx} - \text{Cota mín}$ $P_{cp} = \frac{\text{Cota máx} - \text{Cota mín}}{L_{cp}}$ $P_{cp} = \frac{2.498 \text{ m} - 1.529 \text{ m}}{41.729,1 \text{ m}}$ $P_{cp} = 0,023 \text{ m/m} * 100$ $P_{cp} = 2,3\%$	La pendiente media del cauce principal es propia de ríos de montaña.
3. Tiempo de concentración	<i>Formulas de Kirpich</i> Según Kirpich, la fórmula para el cálculo del tiempo de concentración es: $t_c = 0.0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \dots (14)$ donde: t_c = tiempo de concentración, en min L = máxima longitud del recorrido, en m H = diferencia de elevación entre los puntos extremos del cauce principal, en m $T_c = 0,0195 * ((L_{cp})^3 / (C_{máx} - C_{mín}))^{0,385}$ $T_c = 0,0195 * ((41729.1)^3 / (2498 - 1529 \text{ m}))^{0,385}$ $T_c = 299,85 \text{ min}$ $T_c = 4,99 \text{ h}$	El tiempo de concentración de la cuenca, es el tiempo que tarda en llegar la escorrentía superficial desde el punto más alejado del río hasta la salida de la cuenca.

3.2. Características climáticas

El clima de esta cuenca hidrográfica se caracteriza porque presenta un régimen anual de lluvias de tipo ecuatorial ya que se observan dos picos pluviométricos, uno en el mes de abril y otro en el mes de noviembre. Sin embargo, existe una época lluviosa que se presenta durante todo el año y ausencia de época seca (Figura 19). En la Tabla 13 se presenta la precipitación y temperatura mensual para un promedio de 30 años. Por lo tanto, en la cuenca coexisten varios

tipos de clima de acuerdo con la clasificación de Köppen-Geiger. Los climas: alpino tropical (ETH), subalpino subhúmedo (Cwci), y templado húmedo (Cf) se presentan en las partes alta. Este último clima (Cf) continua en las secciones medias y baja junto al clima ecuatorial de montaña (Csbi) y el clima tropical monzónico (Am).

Figura 19.

Climograma de la cuenca del río Ambi

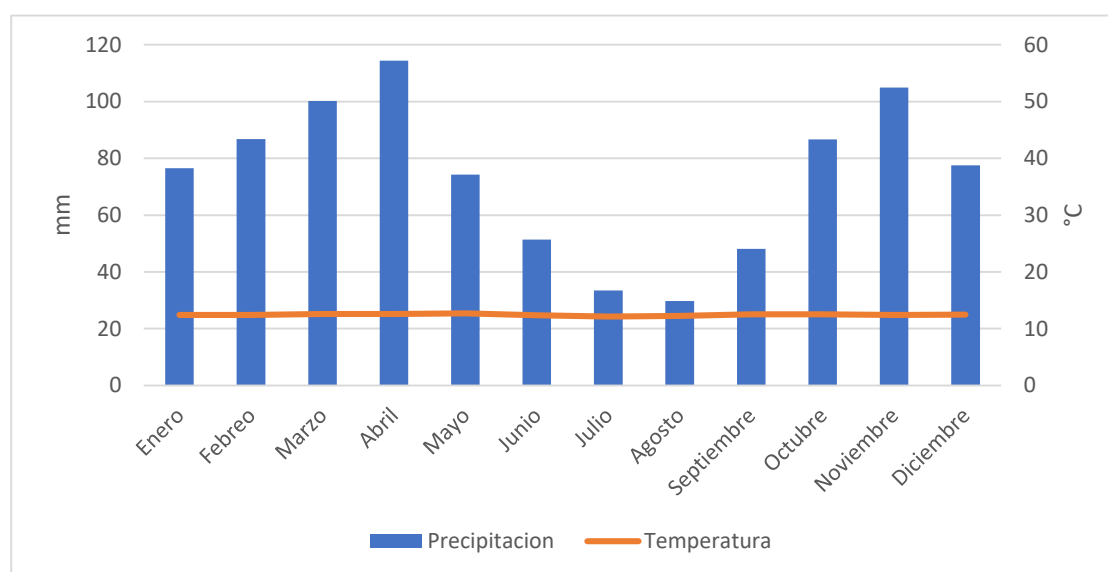


Tabla 13.

Valores de precipitación y temperatura en un período de 30 años

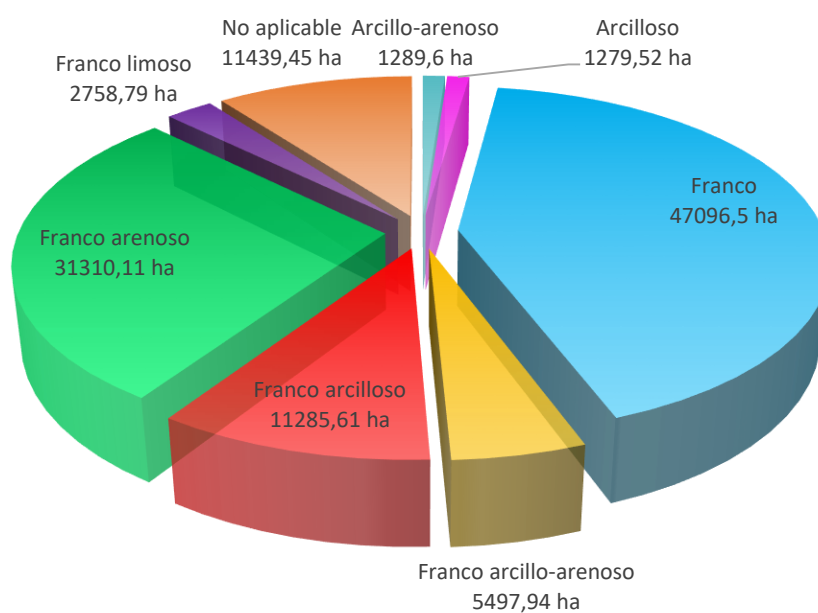
Meses	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)
Enero	76,48	12,43
Febrero	86,82	12,4
Marzo	100,23	12,57
Abril	114,39	12,61
Mayo	74,3	12,67
Junio	51,43	12,35
Julio	33,51	12,13
Agosto	29,72	12,25
Septiembre	48,06	12,51
Octubre	86,61	12,5
Noviembre	104,97	12,42
Diciembre	77,49	12,48
Total	884,01	Promedio 12,44

3.3. Características edáficas

El área de estudio que representa a la cuenca del Ambi presenta suelos de tipo Inceptisoles y gran parte del área suelos tipo Mollisoles. Los Inceptisoles son suelos jóvenes poco desarrollados en los que el comienzo o principio del desarrollo del perfil es evidente. Más habituales en los climas húmedos, existen desde el Ártico hasta los trópicos. Los Mollisoles son suelos oscuros y suaves que se han desarrollado bajo una vegetación herbosa y en general se encuentran en áreas de pradera. El horizonte superficial es rico en humus, calcio y magnesio, por lo que la fertilidad del suelo es excelente (Carrera et al., 2015). De acuerdo con cartografía de SIGTIERRAS (2020) en la cuenca del río Ambi se evidencian los siguientes tipos de texturas de suelo (Figura 20).

Figura 20.

Tipos de texturas de suelo en la cuenca del río Ambi



3.4. Características ecológicas

Hasta el año 2021 se estimó que en la cuenca del río Ambi se encontraban 9.677,97 ha de Bosque; 1.471,31 ha de cuerpos hídricos; 64.002,41 ha de tierras productivas; 30.761,02 ha de vegetación arbustiva y herbácea; y, 4.854,83 ha pertenecen a zonas pobladas (Rosero, 2021).

Las formaciones vegetales predominantes en la cuenca son el páramo de pajonal, herbazal de páramo, arbustal siempreverde y herbazal de páramo, bosque siempreverde del páramo, bosque siempreverde montano alto, bosque siempreverde montano, arbustal siempreverde montano y bosque y arbustal semidecíduo de los valles. Los páramos de pajonal son muy similares a los de la cordillera occidental, pero por lo general más húmedos. Se distribuyen en un rango de 3.400 msnm – 3.500 msnm hasta los 4.000 msnm. Estos páramos se encuentran dominados por hierbas en penacho (manejo) de los géneros *Calamagrostis* y *Festuca* entrelazados con otras hierbas y pequeños arbustos (Sierra, 1999). Su temperatura media anual oscila entre los 4°C - 9°C en las zonas altas de la cuenca superiores a 3.400 msnm, hasta los 17°C - 20 °C en la zona medias y valles secos de la microcuenca (Guachamin et al., 2015).

3.4.1. Zonas de vida de la cuenca del río Ambi

Las zonas de vida presentes en la cuenca hidrográfica son propias de las regiones andinas, por lo que presentan una gran diversidad debido a la variación altitudinal y topográfica que caracteriza a esta zona. A medida que se asciende en altitud, las condiciones ambientales cambian drásticamente, lo que da lugar a diferentes zonas de vida. A continuación, una breve descripción de las principales zonas de vida pertenecientes a la cuenca hidrográfica del río Ambi:

- a) **Zona de Vida de Bosque Nublado:** A medida que se asciende en altitud, se llega a esta zona, que se encuentra entre los 1.000 y 2.500 metros. Aquí, la humedad y la neblina son frecuentes, lo que crea un ambiente húmedo y fresco. Los bosques nublados están cubiertos por una densa vegetación, con árboles altos, musgos, orquídeas y helechos. La fauna incluye aves coloridas, insectos y anfibios, así como algunas especies de mamíferos como osos de anteojos y pumas.
- b) **Zona de Vida de Bosque Subalpino:** Esta zona se encuentra aproximadamente entre los 2.500 y 3.500 metros de altitud (Figura 21). El clima se vuelve más frío y

la vegetación consiste en árboles de menor altura, como el aliso andino, así como arbustos y pajonales. En esta zona, es común encontrar lagunas y humedales.

- c) **Zona de Vida de Páramo:** A medida que se sube aún más en altitud, se llega a la zona de páramo, que se encuentra entre los 3.500 y 4.800 metros. Esta zona se caracteriza por su clima frío y ventoso, con temperaturas bajas durante todo el año. La vegetación predominante son los pajonales, musgos y plantas resistentes al frío. Aquí, es común encontrar lagunas y frailejones, plantas características de esta zona.
- d) **Zona de Vida de Nieve y Hielo:** Esta es la zona de vida de mayor altitud, por encima de los 4.800 metros. Aquí, las condiciones son extremas, con temperaturas muy bajas, vientos fuertes y poca vegetación. Predominan las áreas cubiertas de nieve y hielo, como los glaciares y las cumbres de las montañas.

Figura 21

Ecosistemas de la cuenca del río Ambi



Nota. Foto: Andrés Ipiales.

Finalmente, dentro y entre las diferentes zonas de vida presentes, existe una distribución tanto de ecosistemas naturales como de ecosistemas antropizados producto de los cambios de cobertura y uso de suelo que se detallan a continuación.

a) Páramo

Este ecosistema es muy común en las zonas andinas de América del Sur que se localiza entre la línea de bosque y las nieves perpetuas. Generalmente se encuentra en altitudes superiores a los 3.500 metros sobre el nivel del mar, aunque puede variar según la latitud y la topografía específica de la región (Buytaert et al., 2006). El páramo se caracteriza por su clima frío y húmedo, con temperaturas bajas, fuerte radiación solar y una alta incidencia de neblina y lluvia (Mena-Vásconez et al., 2001).

El páramo está compuesto por plantas adaptadas a estas condiciones extremas, como gramíneas, frailejones (plantas en forma de roseta con hojas lanosas), musgos, líquenes y algunas especies de árboles en las zonas más bajas. Estas plantas suelen tener hojas pequeñas y resistentes para reducir la pérdida de agua debido al frío y los vientos fuertes. El páramo es considerado un ecosistema frágil, pero desempeña un papel importante en la regulación del suministro de agua para las regiones adyacentes, porque es aquí donde se produce la recarga hídrica y donde nacen las vertientes de la mayoría de los ríos (Buytaert et al., 2006).

b. Páramo arbustivo

Otros nombres con los que se lo conoce a este ecosistema es páramo bajo o páramo herbáceo. Se caracteriza por ser una zona de transición entre el páramo y los matorrales. Se puede identificar una amplia variedad de plantas vasculares conformadas tanto por plantas de bosque andino como por plantas de páramo. Algunas plantas vasculares han tenido que adaptarse a las variaciones del clima y a la fuerte intensidad de los rayos de sol que soportan estos ecosistemas. Esto ha ocasionado cambios importantes en la morfología de la planta como modificaciones en la textura o el tamaño de las hojas y tallos.

Entre las principales plantas vasculares se puede mencionar: *Lycopodium*, *Jamesonia*, *Gentiana*, *Gentianella*, *Satureja*, *Lachemilla* o *Hypericum*. Dentro de estas plantas vasculares que ocupan la mayoría del terreno se pueden encontrar pequeños parches de pajonales de

manera aleatoria en este suelo. Las principales clases de pajonales que se pueden encontrar formando estos parches son: *Werneria*, *Azorella* y *Plantago* (Ulloa & Jørgensen, 1993).

c. Matorral

En la cuenca hidrográfica este ecosistema normalmente se encuentra entre los 1.700 msnm y los 3.000 msnm y se caracteriza por presentar vegetación arbustiva sin alturas significativas. El matorral está compuesto por una mezcla de arbustos, hierbas y algunas especies de árboles dispersos. Las especies vegetales en el matorral son más variadas y adaptadas a las condiciones de temperatura y precipitación moderadas. Los géneros más comunes que se pueden encontrar en este piso son: *Delostoma* (Bignoniaceae), *Laplacea* (fheaceae), *Saurauia* (Actinidaceae), *Weinmannia* (Cunoniaceae), *Brachyotum* y *Centronia* (Melastomataceae), *Plumbago* (Plumbaginaceae), *Caesalpinia* (Caesalpinaceae), *Sida* y *Pavonia* (Malvaceae) y *Vismia* (Hypericaceaea) (Mena-Vásconez et al., 2001).

d. Bosque nativo

El bosque nativo se encuentra en espacios de difícil acceso humano, cerca de ríos, en pendientes colinadas y escarpadas, en las laderas de las montañas andinas de la cuenca hidrográfica entre los 1.700 msnm y 3.000 msnm. El bosque nativo andino está compuesto por una mezcla de árboles de hoja perenne y caduca, una diversidad de arbustos, hierbas, helechos, musgos y líquenes, lo que significa que presenta alta biodiversidad.

El bosque nativo andino también cumple una función importante en la regulación de los recursos hídricos, ya que actúa como una esponja natural, absorbiendo y almacenando agua durante las épocas de lluvia y liberándola gradualmente durante los períodos de sequía. Esto contribuye a la provisión de agua para ríos, arroyos y acuíferos, y a la protección contra inundaciones y deslizamientos de tierra.

Las plantas leñosas que pueden ser halladas en pequeñas cantidades son pequeños arbustos que generalmente no alcanzan los 2 m de altura, aunque también se encuentran árboles

que pueden alcanzar los 8m de altura. Esto de una manera indirecta ha facilitado el desarrollo de nuevas especies que han sido introducidas al sector. Entre las plantas leñosas más comunes que se pueden hallar en el sector se pueden hallar: *Baccharis* sp. (Asteraceae), *Coriaria* sp. (Coriaceae), *Calceolaria* sp. (Scrophulariaceae), *Miconia* sp. (Melastomataceae).

e. Bosque introducido.

Los bosques introducidos generalmente son conglomerados de especies de árboles que no son nativos o endémicos de la región andina. Comúnmente, estas especies son importadas de otras partes del mundo y establecen plantaciones forestales para producir madera, papel u otros productos forestales. La introducción de bosques en esta cuenca andina pudo tener efectos tanto positivos como negativos. Por un lado, pudo contribuir a la creación de empleo y desarrollo económico, protección y conservación del suelo y los recursos hídricos. Además, estas plantaciones actúan como sumideros de carbono y ayudan a mitigar los efectos del cambio climático.

Sin embargo, la introducción de especies exóticas también trajo consecuencias negativas. Algunas especies introducidas se volvieron invasoras, desplazando a las especies nativas y alterando los ecosistemas locales. Por ejemplo, especies como el eucalipto o el pino en la actualidad han formado relictos de bosques en la cuenca hidrográfica, justo alrededor de los cultivos, desplazando al bosque nativo andino. Además, otro problema ecológico viene con que estas plantaciones requieren un uso intensivo de agua y nutrientes, lo que puede afectar los recursos hídricos y la calidad del suelo.

f. Pastos.

Los pastos en esta cuenca hidrográfica son de dos tipos: nativos e introducidos. Los pastos andinos nativos son especies de plantas herbáceas que se encuentran de forma natural en la región andina de América del Sur. Estas especies han evolucionado a lo largo de miles de años y se han adaptado a las condiciones climáticas y geográficas específicas de los Andes.

Los pastos andinos nativos son conocidos por su resistencia a las bajas temperaturas, la falta de oxígeno en altitudes elevadas y la radiación solar intensa. Estas especies son valiosas porque ofrecen alimento para el ganado, conservan el suelo, protegen las fuentes de agua y contribuyen a la biodiversidad local. Algunos ejemplos de pastos andinos nativos incluyen la ichu (*Stipa ichu*), una especie de pasto alto que crece en las regiones montañosas de los Andes, y la paja brava (*Festuca dolichophylla*), que se encuentra en áreas de alta montaña.

En la cuenca hidrográfica se identificaron zonas cubiertas con pastos que son usadas para la alimentación del ganado que incluso se cree han permanecido en este lugar alrededor de 40 años sin mayor perturbación. Sin embargo, no solo pastos andinos nativos han sido utilizados por los agricultores y ganaderos de la zona, sino también se han importado pastos de otras regiones del mundo por su alta productividad y valor nutricional para el ganado. Algunos ejemplos de pastos andinos introducidos son el trébol blanco (*Trifolium repens*), el raygrass (*Lolium perenne*) y la alfalfa (*Medicago sativa*). Estas especies fueron introducidas debido a su alta productividad y valor nutricional para el ganado. Sin embargo, algunas de estas especies introducidas pueden convertirse en plantas invasoras y desplazar a los pastos nativos, lo que puede tener un impacto negativo en la biodiversidad local.

g. Zonas de cultivo.

Aproximadamente más del 40% de la superficie de la cuenca hidrográfica está destinada a actividades agrícolas y por lo tanto al desarrollo de cultivos. Esto debido a que la agricultura es una de las principales actividades económicas de la población que habita este territorio, y el comercio de los productos agrícolas fundamenta la economía del lugar. Entre las principales especies que se encuentran en la cuenca hidrográfica están: fréjol (*Phaseolus vulgaris*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), habas (*Vicia faba*), col (*Brassica oleracea*), trigo (*Triticum* sp.), cebada (*Hordeum vulgare*), maíz (*Zea mays*), pimiento (*Capsicum annum*), tomate (*Lycopersicon esculentum*).

3.4.2. Biodiversidad.

Al ser una cuenca hidrográfica andina, su diversidad biológica se debe a una combinación de factores geográficos, climáticos y ecológicos que han creado una variedad de hábitats únicos y una amplia gama de especies adaptadas a condiciones extremas. Una de las características distintivas de la biodiversidad andina es la presencia de una gran cantidad de especies nativas y endémicas. Es por esa razón que no solo en esta cuenca hidrográfica sino en los Andes, en general, se alberga una alta diversidad de plantas, aves, mamíferos, anfibios y reptiles.

3.4.2.1. Flora

La flora en las cuencas hidrográficas andinas, como es el caso del río Ambi, es muy diversa debido a la variedad de climas y altitudes presentes a lo largo del relieve montañoso propio de la cuenca. A medida que se asciende a altitudes más altas, la vegetación cambia debido al descenso de la temperatura y la disminución de la presión atmosférica. Como consecuencia se van encontrando bosques nublados y páramos, que son ecosistemas característicos de las regiones andinas. Estos ecosistemas albergan una gran cantidad de especies endémicas y son conocidos por su biodiversidad única. Las familias más comunes dentro de la cuenca hidrográfica son: Orchidaceae, Araliaceae, Columeliaceae, Asteraceae, y Poaceae. Los bosques de mayor altura tienen árboles que en promedio tienen 8 m y entre las especies más destacadas podemos mencionar a Pumamaqui (*Oreopanax sp.*) y también el peralillo (*Vallea stipularis*). En los matorrales las herbáceas son las que predominan este sector entre las que podemos destacar mortiño (*Vaccinium floribundum*) y romerillo (*Hypericum laricifolium*).

3.4.2.2. Fauna

En base a información recopilada en el sitio de “Fauna Web del Ecuador” dentro de la cuenca del río Ambi se registran 22 especies de mamíferos, 12 especies de reptiles y 20 especies de anfibios. Los Andes también son el hogar de una gran cantidad de especies emblemáticas,

como el oso andino u oso de anteojos (Figura 22), considerado una especie paraguas porque participa en la dispersión de semillas y por lo tanto en el proceso de sucesión de los bosques (Vela et al., 2011). Además, se encuentran otras especies como el lobo de páramo (Figura 22), la vicuña, o el tapir de montaña. En las Tablas 14, 15 y 16 se recopilan las especies registradas de mamíferos, reptiles y anfibios en la cuenca hidrográfica.

Tabla 14.

Mamíferos registrados en la cuenca del río Ambi

Familia	Especie	Nombre Común
<i>Canidae</i>	<i>Lycalopex culpaeus</i>	Lobo de páramo
<i>Ursidae</i>	<i>Tremarctos ornatus</i>	Oso de anteojos
<i>Cervidae</i>	<i>Pudu mephistophiles</i>	Ciervo enano
<i>Mephitidae</i>	<i>Conepatus semistriatus</i>	Zorrillo rayado
<i>Phyllostomidae</i>	<i>Anoura peruana</i>	Murciélago sin cola peruano
<i>Phyllostomidae</i>	<i>Artibeus ravs</i>	Murciélago frutero chico
<i>Phyllostomidae</i>	<i>Carollia brevicauda</i>	Murciélago sedoso de cola corta
<i>Phyllostomidae</i>	<i>Phyllostomus discolor</i>	Murciélago nariz de lanza pálido
<i>Phyllostomidae</i>	<i>Platyrrhinus dorsalis</i>	Murciélago de nariz ancha de Thomas
<i>Phyllostomidae</i>	<i>Sturnira bogotensis</i>	Murciélago de hombros amarillos de Bogotá
<i>Phyllostomidae</i>	<i>Sturnira erythromos</i>	Murciélago de hombros amarillos pequeños
<i>Vespertilionidae</i>	<i>Myotis keaysi</i>	Myotis de patas peludas
<i>Didelphidae</i>	<i>Didelphis pernigra</i>	Zarigüeya andina de orejas blancas
<i>Didelphidae</i>	<i>Philander andersoni</i>	Raposa de cuadro ojos de Anderson
<i>Soricidae</i>	<i>Cryptotis equatoris</i>	Musaraña ecuatoriana
<i>Soricidae</i>	<i>Cryptotis niausa</i>	Musaraña ratón ciego
<i>Caenolestidae</i>	<i>Caenolestes convelatus</i>	Ratón marsupial negruzco
<i>Caenolestidae</i>	<i>Caenolestes fuliginosus</i>	Ratón marsupial sedoso
<i>Cricetidae</i>	<i>Akodon mollis</i>	Ratón campestre delicado
<i>Cricetidae</i>	<i>Microryzomys minutus</i>	Ratón arrocero diminuto
<i>Cricetidae</i>	<i>Neomicroxus latebricola</i>	Ratón campestre ecuatoriano
<i>Cricetidae</i>	<i>Nephelomys albigularis</i>	Rata de bosque nublado de garganta blanca
<i>Cricetidae</i>	<i>Neusticomys monticolus</i>	Rata pescadora montana

Nota. Adaptado de Torres-Carvajal et al., (2022).

Figura 22.

Mamíferos de los páramos de la cuenca del río Ambi. (a) Oso de anteojos y (b) Lobo de páramo

a



b



Nota. Fotos: Franklin Perachimba

Tabla 15.*Reptiles registrados en la cuenca del río Ambi*

Familia	Especie	Nombre Común
Gymnophthalmidae	<i>Pholidobolus montium</i>	Cuilanes de montaña
Gymnophthalmidae	<i>Riama unicolor</i>	Palos de los Andes
Iguanidae:	<i>Stenocercus chota</i>	Guagsas del Valle del Chota
Iguanidae:	<i>Stenocercus guentheri</i>	Guagsas de Gunther
Colubridae:	<i>Dendrophidion brunneum</i>	Serpientes corredoras de bosque de Günther
Colubridae:	<i>Drymarchon melanurus</i>	Colambos
Colubridae:	<i>Tantilla petersi</i>	Culebras cabeza negra de Peters
Colubridae:	<i>Dipsas elegans</i>	Culebras caracoleras ecuatorianas
Colubridae:	<i>Dipsas ellipsifera</i>	Culebras ecuatorianas del norte
Colubridae:	<i>Erythrolamprus epinephelus</i>	Culebras terrestres occidentales
Colubridae:	<i>Saphenophis boursieri</i>	Culebras de labios manchados
Colubridae:	<i>Sibon dunni</i>	Caracoleras de Pimampiro

Nota. Adaptado de Brito et al., (2021).**Tabla 16.***Anfibios registrados en la cuenca del río Ambi*

Familia	Especie	Nombre Común
Bufonidae	<i>Atelopus coynei</i>	Jambato del río Faisanes
Bufonidae	<i>Atelopus ignescens</i>	Jambato negro
Bufonidae	<i>Atelopus pastuso</i>	Jambato pastuso
Bufonidae	<i>Osornophryne antisana</i>	Osornosapo de Antisana
Bufonidae	<i>Osornophryne puruanta</i>	Osornosapo gigante
Bufonidae	<i>Osornophryne talipes</i>	Osornosapo trompudo
Centrolenidae	<i>Centrolene buckleyi</i>	Rana de cristal altoandina de Buckley
Dendrobatidae	<i>Hyloxalus jacobuspetersi</i>	Rana cohete de Quito Rana cohete de la Espada
Dendrobatidae	<i>Hyloxalus pulchellus</i>	

Familia	Especie	Nombre Común
Hemiphractidae	<i>Gastrotheca riobambae</i>	Rana marsupial de Quito
Strabomantidae	<i>Niceforonia brunnea</i>	Rana gorda del Carchi
Strabomantidae	<i>Pristimantis buckleyi</i>	Cutín de Imbabura
Strabomantidae	<i>Pristimantis curtipes</i>	Cutín de Intag
Strabomantidae	<i>Pristimantis devillei</i>	Cutín de Ville
Strabomantidae	<i>Pristimantis eriphus</i>	Cutín de musgo
Strabomantidae	<i>Pristimantis festae</i>	Cutín paramero
Strabomantidae	<i>Pristimantis floridus</i>	Cutín de Sigchos
Strabomantidae	<i>Pristimantis gladiator</i>	Cutín gladiador
Strabomantidae	<i>Pristimantis ocreatus</i>	Pristimantis ocreatus
Strabomantidae	<i>Pristimantis thymelensis</i>	Cutín del páramo del Ángel

Nota. Adaptado de Ron et al., (2022).

3.4.3. Principales amenazas a los ecosistemas.

Las principales presiones que tienen los ecosistemas del Ambi se detallan en la Tabla 17. Las consecuencias ocasionan pérdida de los bienes y servicios ecosistémicos.

Tabla 17.

Principales amenazas a los ecosistemas

Presión o amenaza	Descripción
Deforestación	Pérdida de bosques primarios y ecosistemas estratégicos
Avance de la frontera agrícola	Ampliación de áreas de cultivos en ecosistemas frágiles como bosque seco o páramo
Obras viales	Infraestructura que atraviesan ecosistemas naturales y ocasionan fragmentación del paisaje.
Concesiones mineras	Explotación de árido, pétreos y desarrollo de canteras de minerales metálicos y no metálicos
Contaminación de fuentes de agua	Vertimiento de residuos sólidos y líquidos utilizados para la agricultura como agroquímicos y pesticidas
Fragmentación del bosque	División en fragmentos pequeños y aislados del bosque, a causa del desarrollo de infraestructura como vías de comunicación, ampliación de estructuras como torres y líneas de interconexión eléctrica
Quemas e incendios forestales	Fuego producido para limpiar terrenos con quemas no controladas

Nota. Adaptado de Gómez et al., (2017).

3.4.4. Servicios ecosistémicos de la cuenca del Ambi

Los beneficios que brindan las cuencas hidrográficas a los ecosistemas son de suma utilidad para el equilibrio de la biota que en ella habita. Entre los más relevantes están los descritos por Guerrero et al., (2016), mismos que se detallan a continuación:

3.4.4.1. Captura y almacenamiento de carbono

Los ecosistemas realizan una captura del carbono a través de todos sus procesos biológicos, reduciendo la cantidad de dióxido de carbono producido por fuentes antrópicas. Las especies vegetales de zonas de páramos y los árboles de crecimiento lento son los organismos vivos más eficientes en almacenar carbono, el mecanismo intrínseco de las plantas como es la fotosíntesis es el responsable de este servicio ecosistémico. Gómez et al., (2017) estimaron que, en la cuenca hidrográficas, las toneladas de carbono almacenado en la biomasa vegetal son de 74 toneladas por hectárea (C/ha). Esto según los mismos autores, a causa de la deforestación, hasta el año 2050 puede disminuir a 51 C/ha.

3.4.4.2. Producción y aprovisionamiento de agua.

Las zonas altas de las cuencas están ocupadas generalmente por los páramos andinos. A los páramos se los considera como zonas de recarga hídrica, porque almacenan agua durante la época de lluvia que la liberan en época de sequía (Gómez et al., 2017). También realizan una regulación de la escorrentía y prevención de inundaciones. Los ecosistemas saludables brindan también la prevención de la erosión del suelo y el control de los sedimentos. Por lo antes citado los páramos y los acuíferos son la principal fuente de agua que usan los pobladores de las ciudades, así como para el uso agrícola y pecuario de las zonas más bajas de la cuenca.

3.4.4.3. Oferta hídrica superficial

Otro servicio ecosistémico importante es la oferta hídrica expresada a través del rendimiento hídrico. Este último no es más que la cantidad de agua superficial brindada en el área de una cuenca por un tiempo determinado (Gómez et al., 2017). Esto se relaciona con el

volumen de agua que está corriendo por ríos, arrollo y quebradas o que esta almacenada en los lagos por un tiempo definido. La oferta hídrica en la cuenca en promedio es de 4,94 m³/s, y los meses que presentan menos caudal son justamente junio, julio y agosto que es el periodo donde se registra menos precipitación (Tabla 13 y Tabla 18). Mientras que, en abril el mes que presenta más precipitación (104,97 mm) es justamente el mes que tiene la más alta producción hídrica (8,02 m³/s).

Tabla 18.

Valores de caudales en un período de 30 años

Mes	Promedio mensual (m³/s)
Enero	4,48
Febrero	5,33
Marzo	6,96
Abril	8,02
Mayo	7,93
Junio	5,32
Julio	3,76
Agosto	2,49
Septiembre	1,86
Octubre	3,31
Noviembre	4,40
Diciembre	5,46
Promedio Anual	4,94

3.5. Características socioculturales

La población presenta una diversidad cultural, al coexistir diferentes grupos étnicos en el territorio como, karankis, natabuelas, cayambis, mestizos y afroecuatorianos. La población se concentra principalmente en las zonas urbanas, siendo las ciudades de Ibarra y Otavalo los principales centros políticos administrativos. Las principales actividades económicas son, agricultura, ganadería, comercio, manufactura y construcción. Existe una migración temporal de la población rural hacia las zonas urbanas únicamente por oportunidades laborales en construcción y manufactura. Los grupos poblacionales más destacados son:

3.5.1. *Pueblo Kichwa*

Descendientes del antiguo pueblo Caranqui, viven en toda la provincia de Imbabura y su idioma es el Kichwa. Esta nacionalidad comprende, entre otros, Otavalo, Natabuela, Caranqui y Cayambis. Sus actividades económicas más importantes son el comercio, la artesanía, la música y el turismo. También se dedican a la agricultura, la ganadería y a la elaboración de artesanías y otras herramientas basadas en materiales como la cabuya y fibras vegetales. Tienen creencias ancestrales que los conectan con la cosmovisión andina, montañas icónicas como los volcanes Imbabura y Cotacachi, y una fuerte conexión espiritual con lagos como Cuicocha y cascadas como Peguche donde se realizan ceremonias de purificación. (Rosero, 2014).

3.5.2. *Pueblo Otavalo*

Es un pueblo que proviene de la nacionalidad Kichwa y en la cuenca su población se concentra principalmente en los centros poblados de Otavalo, Cotacachi y Antonio Ante. La primera actividad económica es el comercio y la confección de artesanías en especial las de origen textil, que incluso los ha llevado a vender sus productos a mercados internacionales. Es un pueblo muy habilidoso para entonar melodías con instrumentos andinos como la bocina, violín zampoñas y rondadores y su música es escuchada a nivel mundial (De la Torre y Peralta, 2004).

3.5.3. *Pueblos afrodescendientes*

Se ubican principalmente en el valle del río Chota, localizado entre las provincias de Imbabura y Carchi. Su principal fuente de ingresos es la agricultura y se dedican al cultivo del plátano, yuca, fréjol y mango. Los afroecuatorianos del Valle del Chota son descendientes de esclavos africanos que fueron traídos a la región durante la época colonial para trabajar en las plantaciones de caña de azúcar. A pesar de las difíciles condiciones en las que vivieron, los afroecuatorianos han conservado su identidad cultural y han contribuido significativamente a

la diversidad étnica y cultural de Ecuador.

La comunidad afrodescendiente posee una cultura ancestral que destaca por su música, danza y tradiciones. La música afroecuatoriana, como la bomba, es una parte fundamental de su cultura y se caracteriza por ritmos contagiosos y letras que reflejan la realidad y las experiencias de la comunidad. También poseen bailes característicos con coreografías muy coloridas cuando celebran sus festividades (Rosero, 2014).

3.5.4. Demanda del recurso hídrico

El caudal total autorizado en la cuenca del Ambi es de 15.765,1 L/s (Tabla 19). El uso de agua consuntivo predominante está destinado a la actividad agrícola (62,9%), ejerciendo así la mayor presión sobre el recurso hídrico. Si bien, los principales cultivos agrícolas que demandan agua son: maíz y hortalizas, la demanda ganadera no es nada despreciable respecto a la demanda total. Por otra parte, la industria utiliza un 28,9% de este caudal, a pesar de que no se contabiliza el agua utilizada para generación eléctrica debido a que es de carácter no consuntivo y regresa al cauce natural. Finalmente, el agua para consumo humano representa un 8,1% de la demanda total, sin embargo, es la más importante en términos de calidad (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2020).

Tabla 19.

Caudales autorizados por uso de agua en la cuenca del río Ambi

Uso	Caudal (L/s)
Consumo Humano	1.280,4
Riego	9.926,4
Abrevadero	10,1
Industrial	4.548,2
Total	15765,1

Nota. MAATE (2020).

De acuerdo con datos del MAATE los principales actores sociales adjudicados con autorizaciones de agua para consumo humano son las comunas y comunidades que habitan en

la cuenca (130 autorizaciones), seguido de las Juntas Administradoras de Agua Potable Comunitarias (25) y de las Juntas Administradoras de Agua Potable y Saneamiento (18) (Tabla 20).

Tabla 20.

Autorización de uso de agua para consumo humano, riego y abrevadero de animales y uso productivo en la cuenca del río Ambi

Actor social	Número de autorizaciones
Consumo humano	
Comunas y comunidades	130
Juntas Administradoras de Agua Potable Comunitarias	25
Juntas Administradoras de Agua Potable y Saneamiento	18
Asociaciones	9
Cooperativas	7
Barrios	4
Compañías	4
Municipios	3
Total	200
Riego y abrevadero de animales	
Juntas de agua	54
Comunidades	46
Compañías	20
Asociaciones	9
Haciendas	5
Cooperativas	4
Barrios	2
Empresas	2
Demás usuarios	142
Total	284
Uso productivo e industrial	
Industrial	22
Piscícola	12
Hidroeléctrica	8
Fuerza mecánica	4
Balneología	2
Termal	1
Total	49

Nota. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (2020).

Los usuarios con mayor uso de caudal registrado para consumo humano son las empresas públicas que administran el agua. Debido a que estas empresas municipales cuentan con autorizaciones para consumo humano en los cantones: Antonio Ante, Otavalo y Cotacachi, de 200, 135 y 52 L/s respectivamente (MAATE, 2020).

La mayor presión sobre el uso de agua proviene de la demanda agrícola, lo que se evidencia en el número total de autorizaciones emitidas y la cantidad de recurso hídrico utilizado. Las autorizaciones de uso de agua para regadío y abrevadero de animales suman en total 284, siendo las autorizaciones a privados la más representativa porque equivale al 50% de esta asignación (Tabla 20) (MAATE, 2020).

Capítulo 4

MÉTODOS

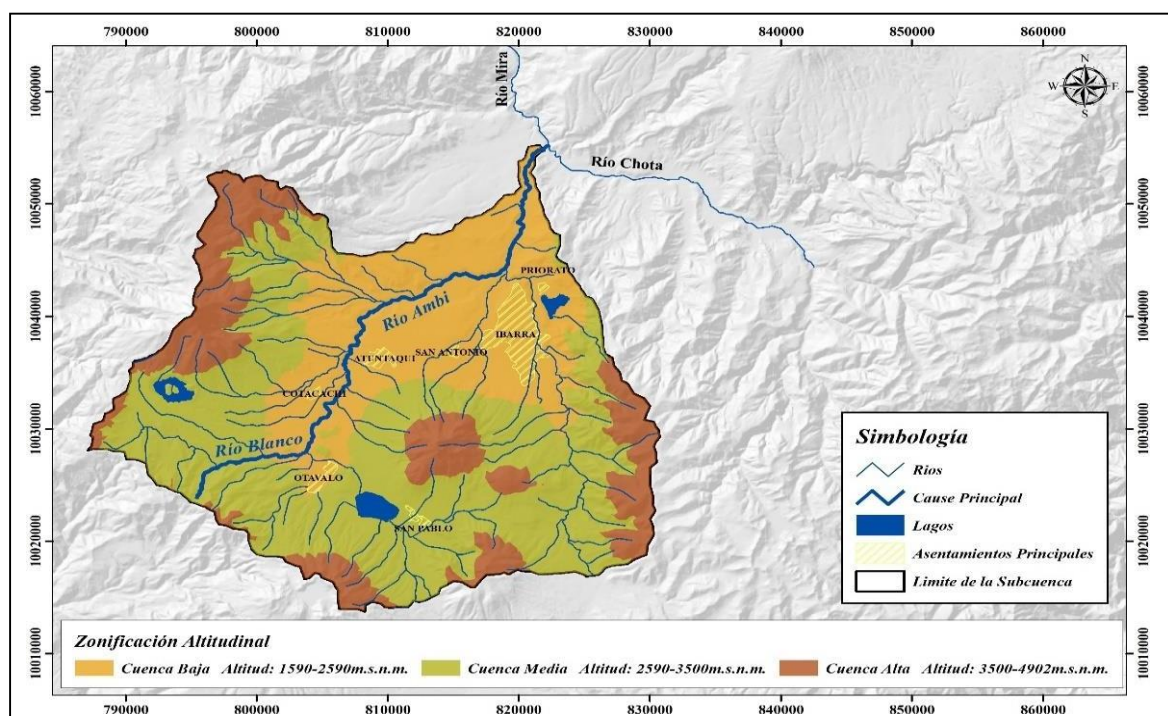
4. MÉTODOS

La investigación desarrollada fue descriptiva de tipo mixta porque contiene elementos de análisis cuantitativo y cualitativo. El proceso metodológico de la presente investigación inició con la determinación de indicadores de salud socio-ecológico y continuó con una zonificación altitudinal y análisis de los indicadores para cada zona.

En primer lugar, se delimitaron las tres zonas altitudinales dentro de la cuenca hidrográfica, utilizando el Modelo de Elevación Digital proveniente de la misión *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) a una resolución espacial de 30 m. Así, se estableció la zona alta desde 3.500 hasta los 4.902 msnm con un área de 202,44 km², la zona media desde 2.590 hasta los 3.500 msnm. con un área de 544,53 km² y la zona baja desde 1.590 hasta los 2.590 msnm con un área de 359,25 km² (Figura 23).

Figura 23.

Mapa de zonificación altitudinal de la cuenca del río Ambi



Para construir el presente Reporte de Salud Ambiental, se utilizaron los cuatro

componentes: Agua, Biodiversidad, Riesgo Climático y Gobernanza y los doce (12) indicadores sugeridos por Gómez et al., (2017) en el Reporte de Salud para las Cuencas Binacionales Mira- Mataje (Tabla 20).

Tabla 21.

Indicadores de salud socio-ecológica

Componentes	Indicadores
Agua	Calidad de Agua
Biodiversidad	Retención y Regulación Hídrica Cobertura Natural de La Tierra Presencia de Aves endémicas Criticidad Ambiental (POMCAS)
Riesgo Climático	Consecuencias en Población Humana Ocurrencia de Inundación y Deslizamientos Ocurrencia de Fuegos
Gobernanza	Supervivencia Infantil Relaciones Socio ambientales Oportunidades de Gobernanza Presión demográfica (POMCAS)

Después, se seleccionaron los indicadores en base a los siguientes criterios cualitativos:

- Relevancia:** Este criterio cualitativo responde a la pregunta ¿qué relevancia presenta el indicador en el reporte de salud ambiental frente al resto? Se calificó en tres categorías alta, media y baja.
- Complementariedad:** Este criterio se basó en la idea de que cada indicador aporta algo único y necesario para estructurar un índice de salud coherente. La complementariedad implica que cada indicador tiene un papel específico y aporta algo que los demás indicadores no pueden proporcionar por sí solos. Por lo que, aquí se identificó como los indicadores se complementan entre sí. Se calificó en tres categorías alta, media y baja.
- Prioridad:** En este criterio se analizó la importancia o relevancia relativa de un indicador en comparación con otros. Para definir la prioridad también se consideró la

cantidad y la disponibilidad de información, que existe para cada indicador en el área de estudio. Se calificó en tres categorías alta, media y baja.

La calificación final por cada indicador se obtuvo mediante el cálculo de la moda por cada categoría. Después se seleccionaron los indicadores cuya calificación final fue «alta». En la Tabla 21 se muestran los seis (6) indicadores seleccionados. El reporte de salud se determinó con estos seis indicadores, y el proceso se realizó para toda la cuenca hidrográfica y se repitió por cada zona altitudinal.

Tabla 22.

Selección de indicadores

Componentes		Índices e Indicadores		Criterios de Selección		
		Relevancia	Complementariedad	Prioridad	Calificación Total	Seleccionado
Agua	Calidad de Agua	Alta	Baja	Alta	Alta	SI
	Retención y Regulación Hídrica	Media	Baja	Baja	Baja	
Biodiversidad	Cobertura Natural de la Tierra	Alta	Baja	Alta	Alta	SI
	Presencia de Aves endémicas	Media	Baja	Baja	Baja	
	Criticidad Ambiental (POMCAS)	Media	Alta	Alta	Alta	SI
Riesgo Climático	Consecuencias en Población Humana	Baja	Alta	Baja	Baja	
	Ocurrencia de Inundación y Deslizamientos	Alta	Baja	Alta	Alta	SI
	Ocurrencia de Fuegos	Media	Baja	Media	Media	
Gobernanza	Supervivencia Infantil	Baja	Baja	Baja	Baja	
	Relaciones Socio ambientales	Media	Baja	Media	Media	
	Oportunidades de Gobernanza	Alta	Baja	Alta	Alta	SI
	Presión demográfica (POMCAS)	Media	Alta	Alta	Alta	SI

4.1. Procedimientos para los cálculos de Componente e Indicadores

4.1.1. Componente Agua

Para el componente agua únicamente está compuesto por el índice de calidad de agua (ICA). El ICA es una herramienta utilizada para evaluar y clasificar la calidad del agua en función de diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos (Orjuela & López, 2013). El valor del ICA puede variar en una escala que va desde 0 hasta 100, donde un valor más cercano a 100 indica una mejor calidad del agua, mientras que un valor cercano a 0 indica una calidad del agua deficiente o altamente contaminada. Su cálculo se realizó para toda la cuenca hidrográfica y también por zona altitudinal.

Indicador calidad de agua (ICA)

La aplicación de este indicador se realizó en dos pasos metodológicos. En el primero se hizo un levantamiento de información mediante la toma de muestras de calidad de agua. En el segundo se empleó el ICA usando 5 variables: conductividad eléctrica, demanda química de oxígeno, potencial de hidrógeno, oxígeno disuelto, y sólidos suspendidos totales. Se utilizaron tres puntos de muestreo, donde se realizaron la toma de datos de las 5 variables. (Figura 24).

Las muestras de agua se recolectaron en envases de 1 litro y se almacenaron en un enfriador con paquetes de gel para su transporte al laboratorio de la Empresa Pública de Agua Potable y Alcantarillado de Ibarra (EMAPA-I). Cada muestra se analizó utilizando el Standard Methods edición 23 del año 2017. Los resultados del análisis de las variables se entregaron con 3 días de retraso. Una vez obtenida la concentración de cada parámetro en el agua, se calculó el índice ICA empleando la ecuación (5) (Orjuela & López, 2013), y los valores obtenidos fueron clasificados mediante una escala de calificación porcentual (Tabla 23).

$$ICA_{njt} = \sum_{i=1}^n W_i * I_{ikjt} \quad (5)$$

Donde:

ICA: índice de calidad del agua de una determinada corriente superficial en la estación

de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t , evaluado con base en n variables

W_i : ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad I_{ikjt} :

I : valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación de monitoreo j , registrado durante la medición realizada en el trimestre k , del período de tiempo t .

n : número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; n es igual a 5, o 6 dependiendo de la medición del ICA que se seleccione

Figura 24.

Mapa de puntos de muestro de calidad de agua

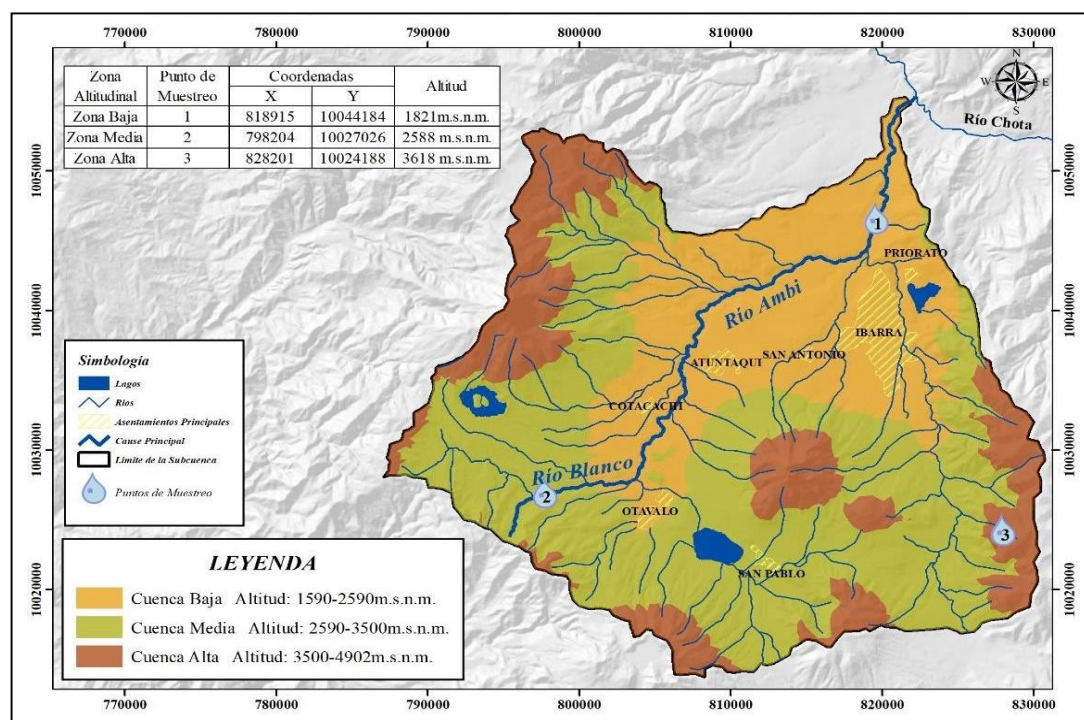


Tabla 23.

Referencia de clasificación del índice de calidad de agua

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Referencia de Calificación ICA	
	Porcentaje	Calificación
0,91 - 1,00	80-100%	Excelente
0,71 - 0,90	60-80%	Bueno
0,51 - 0,70	40-60%	Regular
0,26 - 0,50	20-40%	Bajo
0 - 0,25	0-20%	Muy Bajo

4.1.2. Componente Biodiversidad

El componente de Biodiversidad fue compuesto por dos índices: el índice porcentaje de cobertura natural (WWF-Colombia, 2019) y el de criticidad ambiental (Calle, 2000).

- **Índice de porcentaje de cobertura natural (IPC)**

Este índice relaciona el área de cobertura natural con respecto al total. Se utilizó información del mapa de uso y cobertura del Ecuador continental del año 2016, y se empleó las categorías presentadas por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (2017), para la clasificación de cobertura natural (Tabla 24).

Tabla 24.

Categorías utilizadas para la clasificación de cobertura natural

COBERTURA NATURAL	CATEGORÍAS	UNIDADES
	Bosque	Bosque Nativo
	Vegetación Arbustiva y Herbácea	Vegetación Arbustiva
		Páramo
		Vegetación Herbácea
	Cuerpo de Agua	Natural
		Artificial

Nota. MAATE (2017).

Después se realizaron las clasificaciones de estas categorías mediante la utilización de información cartográfica de cobertura y uso de suelo de Ecuador continental del año 2016, y así se obtuvo un mapa del porcentaje de cobertura natural de esta área (Figura 25). Así, se aplicó la Ecuación (6) y se obtuvo la respectiva calificación para este índice. Finalmente, los valores obtenidos fueron clasificados mediante una escala de calificación porcentual (Tabla 25).

$$IPC = \frac{\text{Área de Cobertura Natural en la zona altitudinal}}{\text{Área Total de la zona altitudinal}} * 100 \quad (6)$$

Figura 25.

Cobertura natural de la cuenca del río Ambi

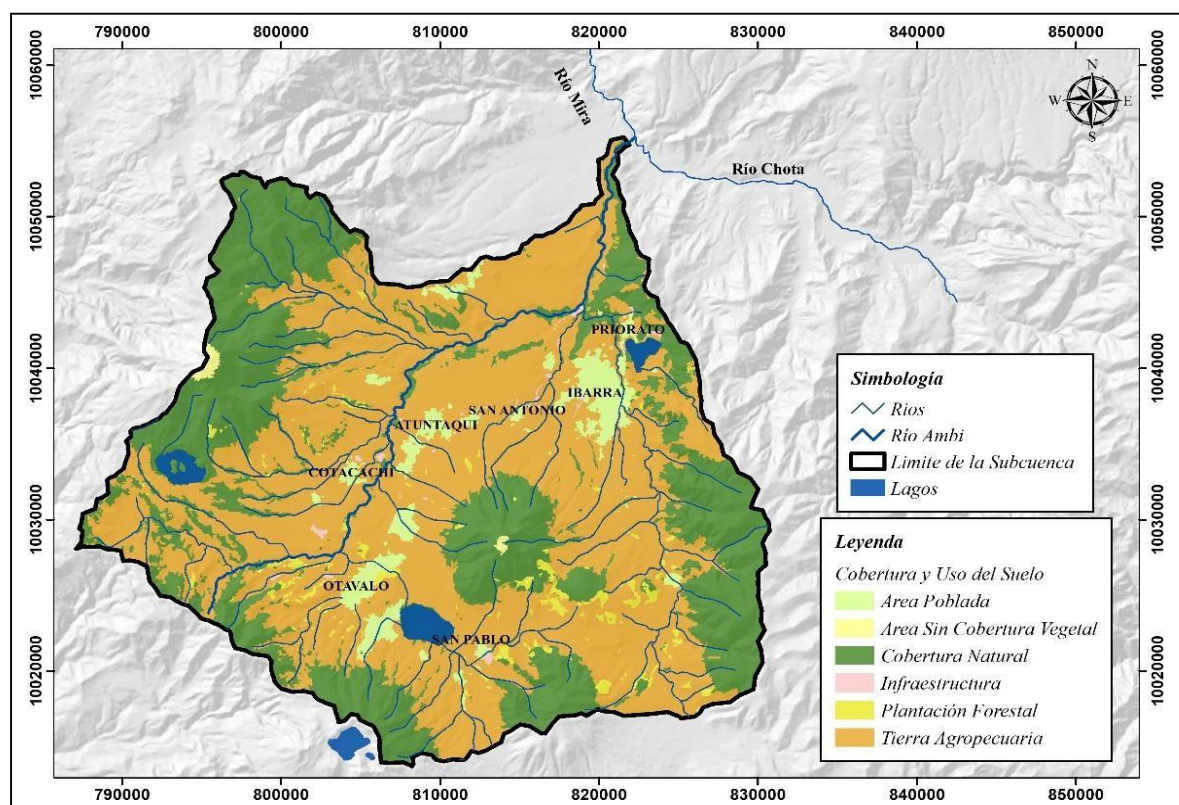


Tabla 25.

Referencia de clasificación del índice de porcentaje de cobertura natural

Referencia de Calificación ICA	
Porcentaje	Calificación
80-100%	Excelente
60-80%	Bueno
40-60%	Regular
20-40%	Bajo
0-20%	Muy Bajo

- **Índice de criticidad ambiental**

Para este índice se combinaron dos índices a) índice de porcentaje de cobertura natural (IPC) y b) índice de presión demográfica. Par su cálculo se empleó la ecuación (7) (Calle, 2000) y los valores fueron recategorizados de acuerdo a la Tabla 26

$$ICA = IPC * IPD \quad (7)$$

Tabla 26.

Referencia de calificación del índice de criticidad ambiental

Referencia de Calificación Índice de Criticidad Ambiental						
IPC	IPD				Valores del Índice	Calificación
Porcentaje	<1	>1<10	>10<100	>100		
80-100%	I	I	II	II	I	Excelente
60-80%	I	I	II	II	II	Bueno
40-60%	II	II	III	III	III	Regular
20-40%	III	III	IV	IV	IV	Bajo
0-20%	III	III	IV	V	V	Muy Bajo

4.1.3. Componente de riesgo climático

Este componente se configura con un único indicador, el cual es el indicador de ocurrencias de inundaciones y deslizamientos.

- **Indicador ocurrencias de inundaciones y deslizamientos**

En este indicador se determinó la recurrencia de los eventos de inundaciones y deslizamientos. Para este indicador se usó información histórica proveniente de la base de datos DesInventar (2019) y registros del Servicio de Gestión de Riesgos y Emergencias del Ecuador para el año 2014 al 2019 y se aplicó la ecuación (8).

$$n_{et} = n_{ee} + n_{erm} \quad (8)$$

Donde:

net: Ocurrencia de inundación y deslizamiento para el período 2014 – 2018 en la zona altitudinal n.

nee: Número de eventos de inundación en el período 2014-2018 en la zona altitudinal n.

nerm: Número de eventos de deslizamiento para el período 2014-2018 en la zona altitudinal

Los valores de este indicador se obtuvieron usando como referencia los máximos y mínimos observados en el análisis histórico de los datos (Tabla 27).

Tabla 27.*Referencia de calificación del indicador de inundación y deslizamientos*

Valores del indicador (Reclasificación)	Calificación
0 – 9,8	Excelente
9,8 – 19,16	Bueno
19,16 – 29,4	Regular
29,4 – 39,2	Bajo
39,2 – 49	Muy Bajo

4.1.4. Componente Gobernanza Ambiental

Para este componente se utilizaron dos indicadores, el índice de presión demográfica y la oportunidad de gobernanza. El primero califica la tasa de densidad de poblacional por nivel altitudinal y el segundo estima la oportunidad que genera tener esquemas de planificación y ordenación del territorio. Al ser un componente configurado por dos índices, el valor del componente es el producto del promedio de sus índices, y se aplicó la Ecuación (9).

$$\text{Calificación del Componente} = \frac{\sum(\text{Resultado de los índices})}{\# \text{ de índices del componente}} \quad (9)$$

- **Índice presión demográfica**

Para este índice se utilizó la información del VI Censo de Población y VII de Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (2010) (Tabla 28). El índice se calculó con la Ecuación (10) (Calle, 2000), para lo cual se emplearon las siguientes variables:

a) densidad poblacional y tasa de crecimiento intercensal y se aplicó la Ecuación (10).

$$IPD = D * r \quad (10)$$

Donde:

D: Es la densidad poblacional

r: Es la tasa de crecimiento intercensal

Tabla 28.*Censo de población del año 2010 de cantones y parroquias de la cuenca del río Ambi*

Cantón	Parroquias	2010	R
Urcuquí	Urcuquí	5.205	1,62%
	Pablo Arenas	2.118	0,39%
	San Blas	3.015	0,82%
	Ibarra	139.721	2,02%
Ibarra	Angochagua	3.263	-1,60%
	La Esperanza	7.363	1,09%
	Salinas	1.741	0,30%
	San Antonio	17.522	2,50%
Antonio Ante	Atuntaqui	23.299	2,14%
	Imbaya	1.279	1,57%
	San Francisco de Natabuela	5.651	3,07%
	San José de Chaltura	3.147	1,14%
Cotacachi	San Roque	10.142	1,83%
	Cotacachi	17.139	1,48%
	Apuela	1.824	-0,51%
	Imantag	4.941	0,65%
Otavalo	Plaza Gutiérrez	496	-3,06%
	Quiroga	6.454	1,65%
	Otavalo	52.753	1,98%
	Dr. Miguel Egas Cabezas	4.883	1,59%
Otavalo	Eugenio Espejo	7.357	2,26%
	Gonzáles Suárez	5.630	0,63%
	San José de Quichinche	8.476	1,63%
	San Juan de Ilumán	8.584	1,92%
	San Pablo	9.901	0,93%
	San Rafael	5.421	1,44%

Para el índice de presión demográfica se obtuvieron los valores mediante las escalas presentada por Calle (2000) (Tabla 29).

Tabla 29.*Referencia de calificación del índice de presión demográfica*

Valores de referencia del IPD	Calificación
<1	Excelente
>1<10	Bueno
>10<100	Regular
>100	Muy Bajo

- **Indicador de oportunidades de Gobernanza**

En este indicador se utilizaron los instrumentos aplicados para la planificación en el territorio, siempre considerando la jerarquía del instrumento. Se realizó la revisión de los planes de ordenamiento, planes manejo de cuencas hidrográficas, planes de vida, planes de etnodesarrollo y planes de manejo de áreas protegidas y su alcance por sección altitudinal de la cuenca (Tabla 30).

Tabla 30.

Instrumentos de ordenamiento incluidos para el cálculo del indicador y su respectiva cualificación del nivel de gobernanza

Instrumento	Nivel de Gobernanza
Plan de Desarrollo Departamental, Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Provincial	1
Plan de Ordenamiento Territorial, Esquema de Ordenamiento Territorial, Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Cantonal	2
Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Parroquial	3
Plan de Manejo de Área Protegida	4
Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA), Plan de Vida, Plan de Etnodesarrollo	5

A partir de los elementos mencionados anteriormente se calculó el Índice de Oportunidad de Gobernanza aplicando la Ecuación (11) y (12).

$$iog = I * E \quad (11)$$

Donde:

iog: Índice de Oportunidad de Gobernanza

I: Número de instrumentos de ordenamiento contenidos en cada zona de la cuenca

E: Esquema de Gobernanza, equivalente a:

$$E = \sum (Ains * Ng * V) \quad (12)$$

Donde:

Ains: Porcentaje de cada instrumento evaluado para la zona n

Ng: Nivel de gobernanza del instrumento en la zona n
V: Factor de vigencia del instrumento (1: Vigente;
0,33: vencido y 0: Sin instrumento).

Después de obtener las calificaciones por cada uno de los índices e indicadores de los 4 componentes: agua, biodiversidad, riesgo climático y gobernanza, el siguiente paso fue realizar la conversión de valor porcentual a una escala categórica con valores de 0 a 5. De esta manera, los resultados convertidos a escala y porcentaje indican el estado de alerta representado por colores (Tabla 31).

Tabla 31.

Conversión de calificación escala 0-5

Conversión		
Escala	Porcentaje	Calificación
4-5	80-100%	Excelente
3-4	60-80%	Bueno
2-3	40-60%	Regular
1-2	20-40%	Bajo
0-1	0-20%	Muy Bajo

Nota. Adaptado de WWF-Colombia (2019).

4.2. Calificación de salud ambiental global y por zonas altitudinales

La salud ambiental de la cuenca es el resultado de la combinación de sus cuatro componentes: agua, riesgo climático, biodiversidad y gobernanza. La salud se calculó en tres pasos: 1) cálculo de la salud del componente utilizando la ecuación (13), 2) cálculo de la salud por zona altitudinal utilizando la ecuación (14), y 3) cálculo global de la salud de la cuenca utilizando la ecuación (15).

$$\text{Calificación del Componente} = \frac{\sum(\text{Resultado de los índices})}{\# \text{ de índices del componente}} \quad (13)$$

$$\text{Calificación de Salud} = \frac{\sum(\text{Resultado de los componentes})}{\# \text{ de componentes}} \quad (14)$$

$$\text{Calificación de Salud río Ambi} = \frac{\sum(\text{Resultado de las zonas altitudinales})}{\# \text{ de zonas altitudinales}} \quad (15)$$

Capítulo 5

RESULTADOS

5. RESULTADOS

En la presente investigación fueron seis (6) los indicadores de salud seleccionados mediante el método cualitativo descrito en metodología. Como consecuencia, los componentes: agua y riesgo climático quedaron conformados por un indicador y los componentes biodiversidad y gobernanza por dos indicadores (Tabla 32)

Tabla 32.

Indicadores seleccionados

Componente	Indicadores
Agua	Calidad del Agua
Biodiversidad	Porcentaje de Cobertura Natural con respecto al Área de la cuenca
	Criticidad Ambiental
Riesgo Climático	Ocurrencias de inundaciones y deslizamientos
Gobernanza	Nivel de Ordenamiento de la cuenca
	Presión demográfica

5.1. Resultados por indicadores y componentes de salud por zonas altitudinales

5.1.1. Componente Agua

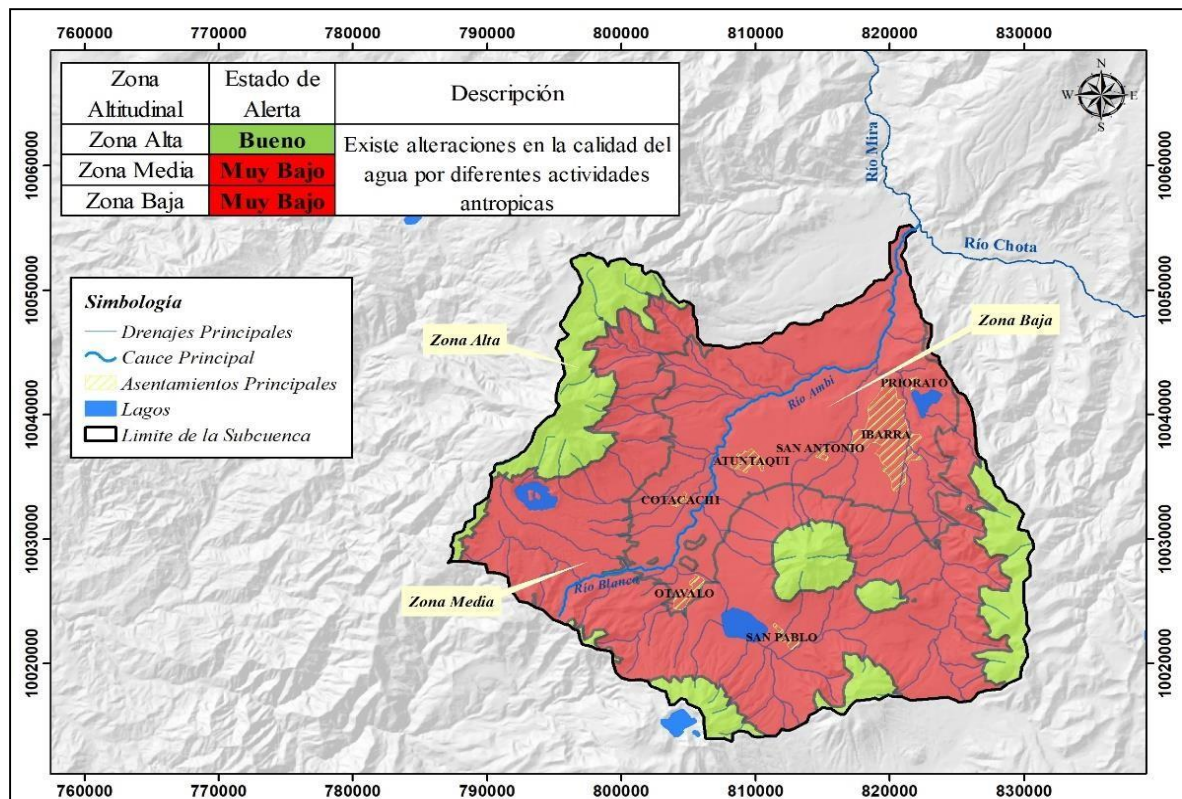
- **Índice calidad de agua**

El índice de calidad del agua de la zona alta mostró un estado de alerta de «bueno» con un puntaje de 0,89 reflejando que la zona es un área de bajo impacto. Mientras que en las zonas media y baja mostraron un estado de alerta «muy bajo» porque presentaron puntajes de 0,19 y 0 respectivamente. Estos resultados indican que la calidad del agua se está deteriorando desde la zona central hacia la zona inferior de la cuenca (Figura 26). Además, estos datos reflejan la contaminación del agua por la acumulación de fertilizantes y la descarga directa de aguas residuales a los cuerpos de agua (Quiroga et al., 2021). De acuerdo con el VII Censo de Vivienda realizado en 2010, el 35,38 por ciento de los hogares aportan directamente sus aguas residuales a ríos y quebradas. Para Álvarez et al., (2008) las principales fuentes de contaminación en las cuencas hídricas provienen de la descarga directa de aguas residuales y

del incremento de los residuos provenientes de actividades urbanas y agrícolas.

Figura 26.

Calidad de agua de la cuenca del río Ambi



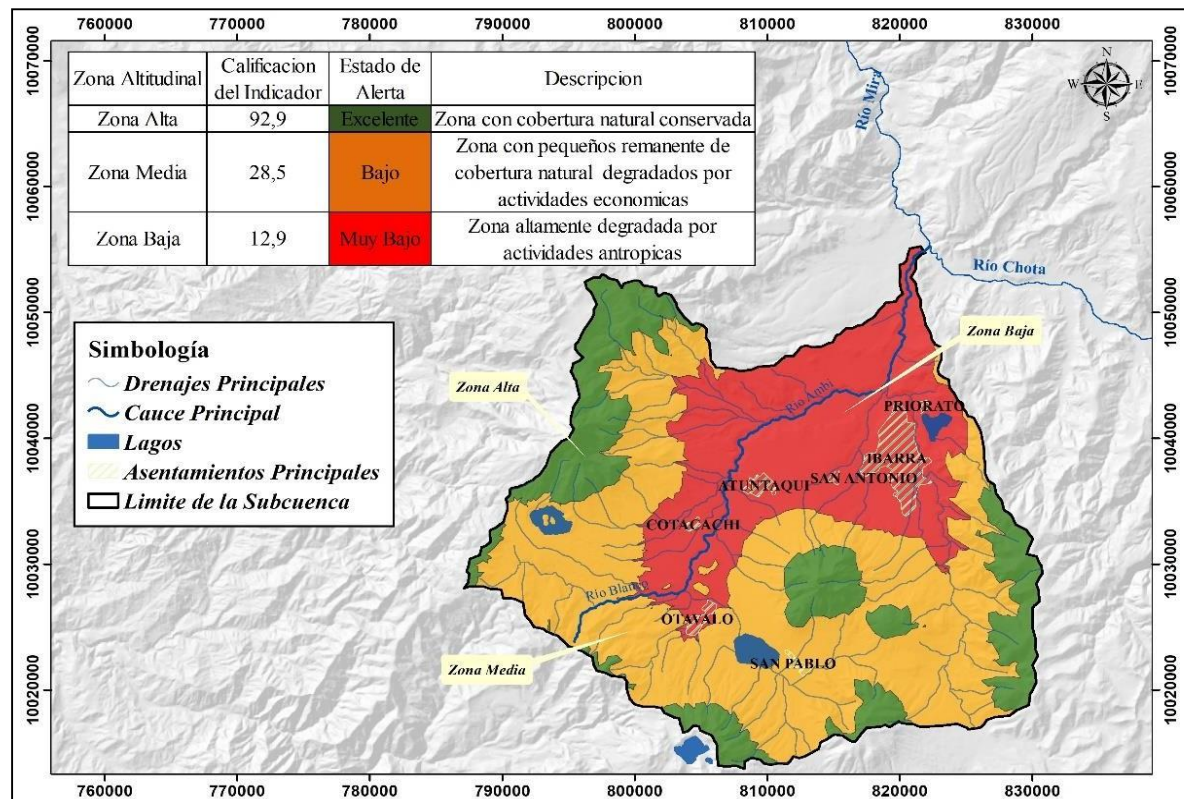
5.1.2. Componente Biodiversidad

- **Indicador porcentaje de cobertura natural**

Los valores del indicador cobertura natural varían entre las tres zonas de la cuenca. La sección alta muestra un estado de calidad «excelente», la sección media muestra un estado de calidad «bajo» y sección inferior muestra el estado de calidad «muy bajo». Estos resultados demuestran contrastes de conservación entre las tres zonas de la cuenca. El 92,9% de la zona alta tiene cobertura natural, mientras que solo el 28,5% de la zona alta y el 12,9% de la zona baja tienen cobertura natural. Estos cambios indican influencia antropogénica en la cuenca. Esto se debe a que hay poca actividad humana en la zona superior, mientras que en la zona baja la actividad humana reemplaza y degrada la cobertura natural (Fig. 27).

Figura 27

Calificación del indicador de porcentaje de cobertura natural de la cuenca del río Ambi

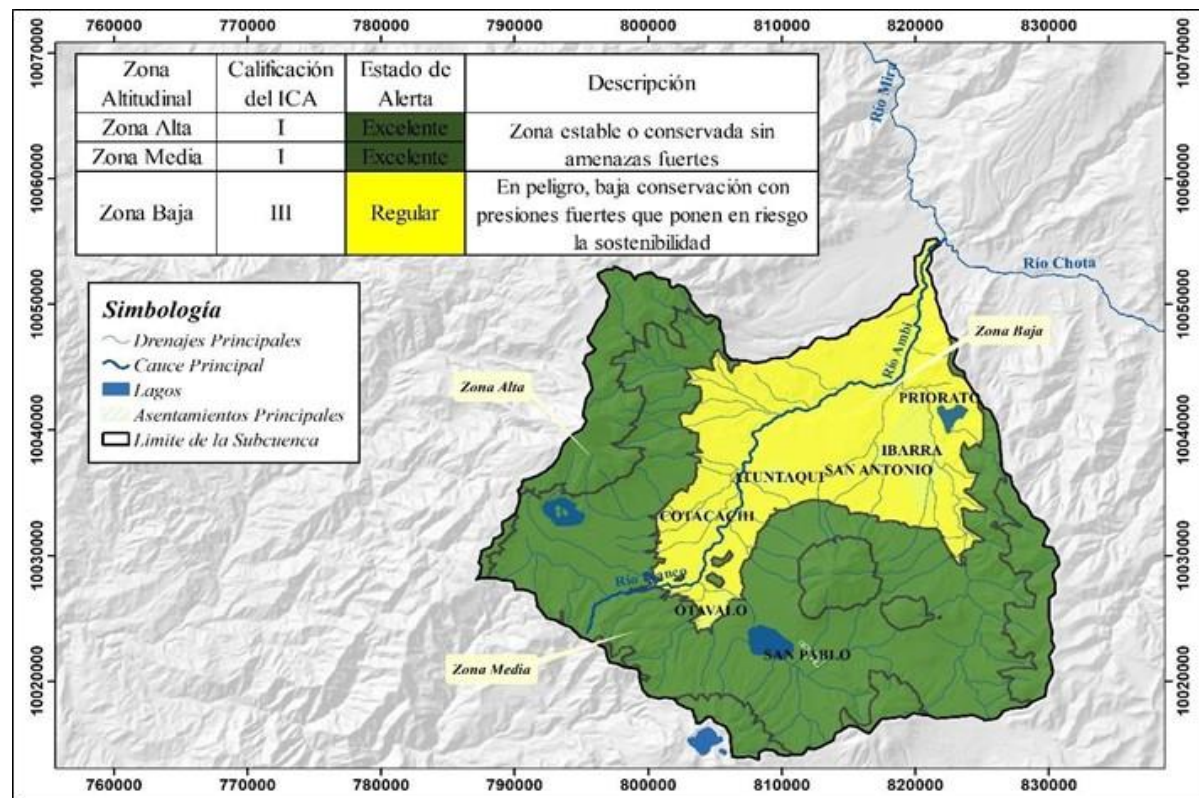


- **Índice criticidad ambiental**

La criticidad ambiental representa la calidad del medio ambiente en la zona. A diferencia de la zona baja que presentó una calidad ambiental «regular», las zonas alta y media de la cuenca presentaron una calidad ambiental «excelente» (Figura 28). Esta situación surge debido a que la cobertura natural está bien conservada en la parte alta, en contraste con la parte alta, donde existe una pérdida de las coberturas naturales a causa de la fuerte presión antrópica de los asentamientos humanos dentro de la cuenca.

Figura 28.

Calificación del índice de criticidad ambiental



En ese contexto, el modelo de desarrollo de los principales cantones ubicados dentro de la cuenca ha traído como consecuencia un estado de salud «regular» en el componente biodiversidad. Debido principalmente a la pérdida de cobertura natural y, por ende, a la degradación de los bienes y servicios ecosistémicos. Pineda et al., (2009) señalan que los modelos de desarrollo tradicionales, que propician el reemplazo de coberturas naturales por áreas urbanas e industriales, son los principales impulsores del cambio de uso del suelo.

La mayor presencia de áreas urbanas en la zona baja junto con el crecimiento de la población hace que la criticidad ambiental de esa zona sea baja. El crecimiento de la población crea una demanda constante de los recursos naturales, lo cual tiene un impacto ambiental directo. García-Orozco et al., (2011) señala que el crecimiento de la población es la principal causa de la pérdida de biodiversidad local, debido a los efectos en cascada del avance y la

expansión urbana.

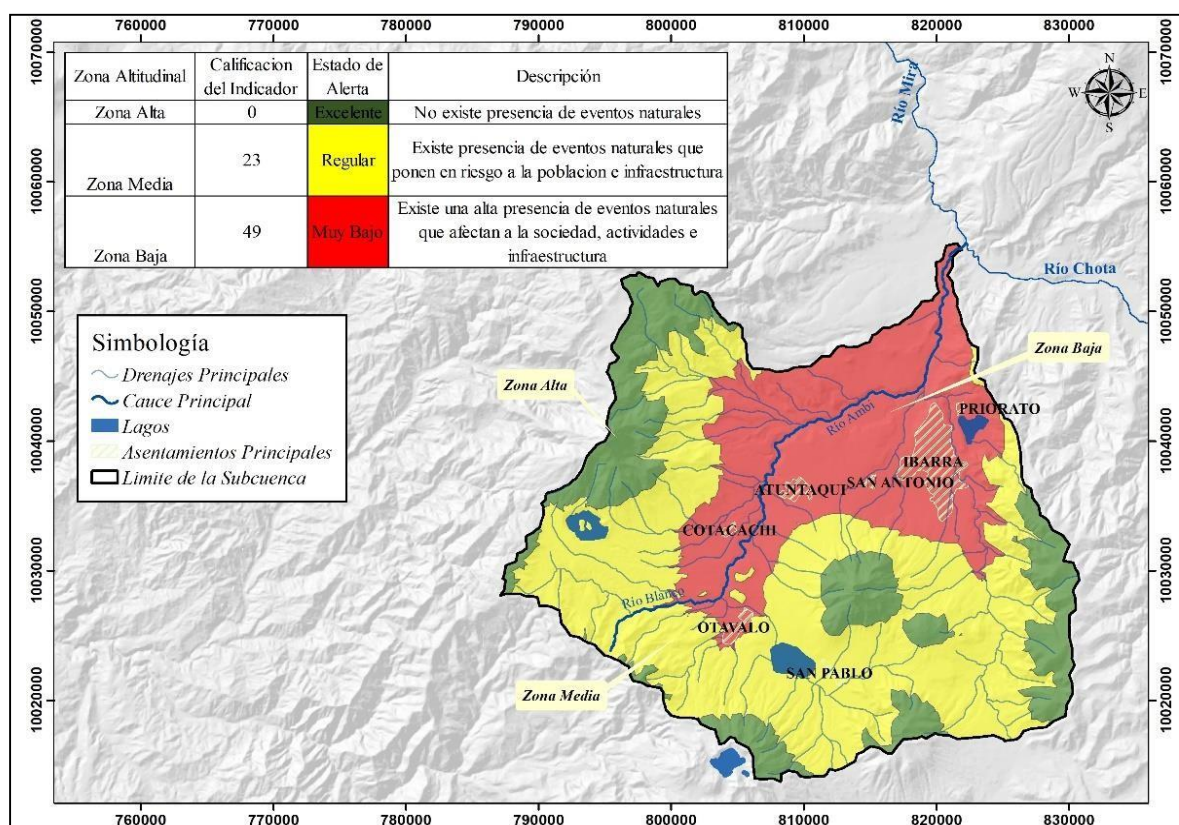
5.1.3. Componente Riesgo Climático

Indicador ocurrencias de inundaciones y deslizamientos

Este indicador que expresa el riesgo climático también varía y disminuye su calidad por zona altitudinal (Figura 29).

Figura 29.

Indicador de ocurrencia de inundaciones y deslizamientos



En la zona alta frente a inundaciones y deslizamientos la salud es «excelente», en la zona media la salud es «regular» y en la zona baja la salud ya es 'muy baja'. Estas condiciones indican que los deslizamientos e inundaciones ocurren con mayor frecuencia en áreas con baja cobertura natural y alta densidad de población. La disminución de la cubierta natural y la expansión de las áreas urbanas aumentan la vulnerabilidad a los fenómenos meteorológicos extremos, como inundaciones y deslizamientos de tierra.

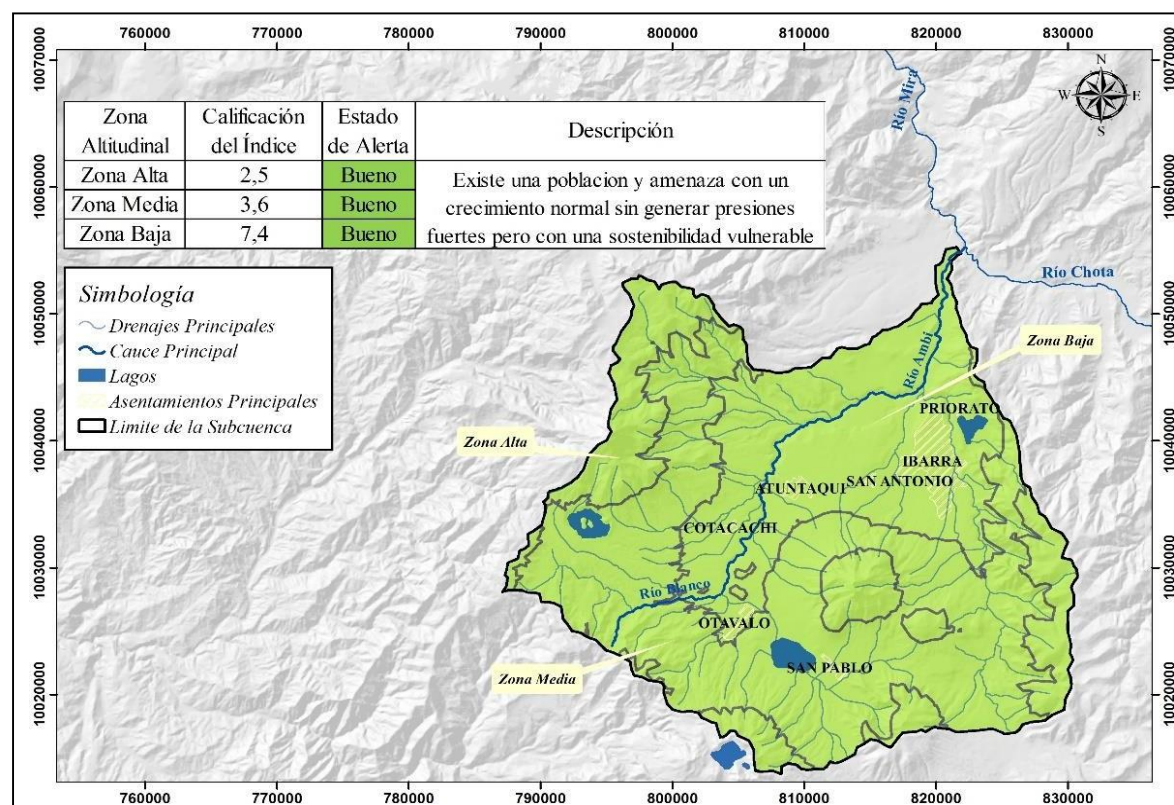
5.1.4. Componente Gobernanza

- **Índice de presión demográfica**

La presión demográfica no ocasiona una diferenciación en el estado de salud de las tres zonas altitudinales de la cuenca. Debido a que el estado de salud que se presentan en todas las zonas es «bueno». Esto significa que la población presente en la cuenca no tiene un impacto significativo por kilómetro cuadrado (Figura 30). Sin embargo, no cabe duda de que la presión demográfica genera un impacto sobre el medio ambiente y los recursos naturales de este territorio, porque la calidad ambiental no alcanza a ser excelente. Esto debido a la mayor demanda de recursos naturales, el cambio de uso de suelo, la pérdida de biodiversidad, la contaminación, y la expansión urbana. Todo ello ya demostrado en los anteriores indicadores.

Figura 30.

Indicador de presión-demográfica de la cuenca del río Ambi



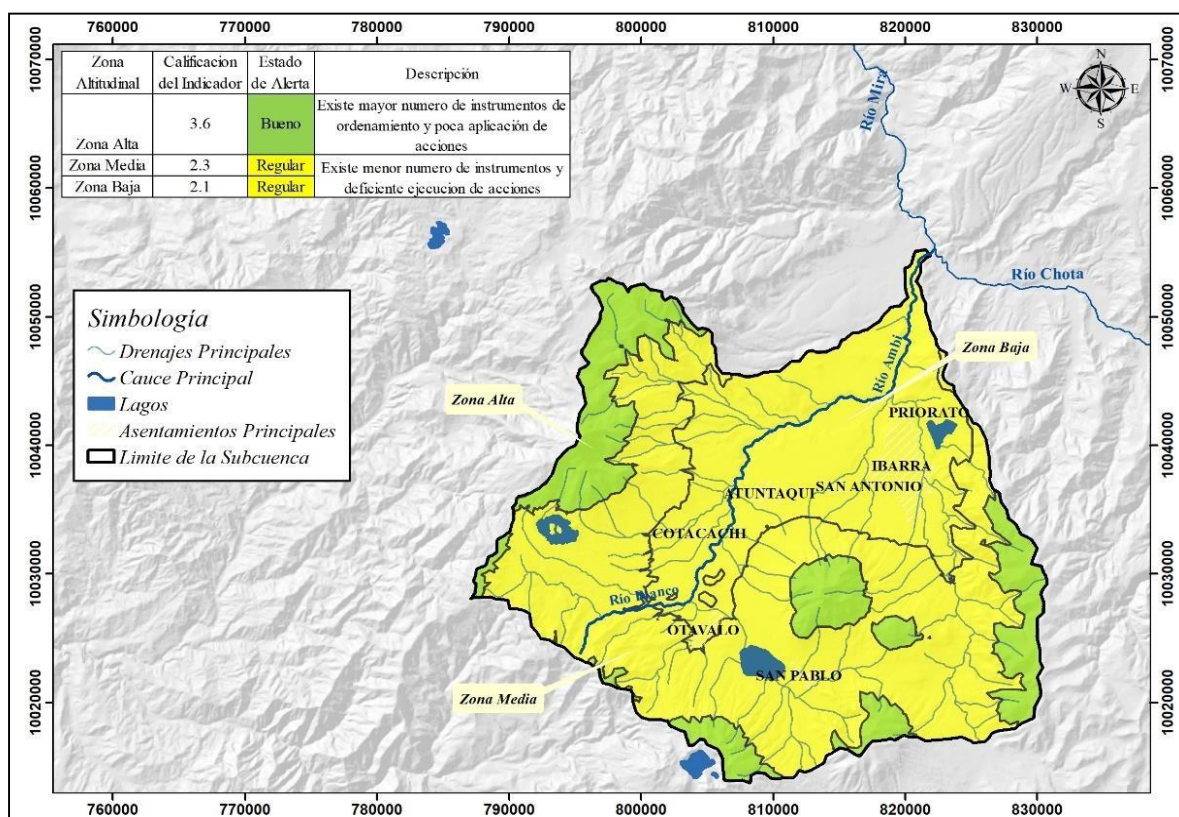
- **Indicador de oportunidades de gobernanza**

Este indicador proporcionó calificaciones regulares para las zonas media y baja, en

contraste con la zona alta, que logró un estado de salud «bueno». A pesar de que en las tres zonas existen debilidad en los instrumentos de planificación en temas ambientales y bajo presupuesto para la aplicación de política pública, es en la zona alta donde existen mejores condiciones. Esto se debe a que el área alberga el Parque Nacional Cotacachi Cayapas, un área protegida que forma parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) del Ecuador. En otras palabras, pertenecer a un sistema de manejo descentralizado brinda más oportunidades para el manejo de los recursos naturales (Figura 31).

Figura 31.

Indicador de oportunidades de gobernanza en la cuenca del río Ambi

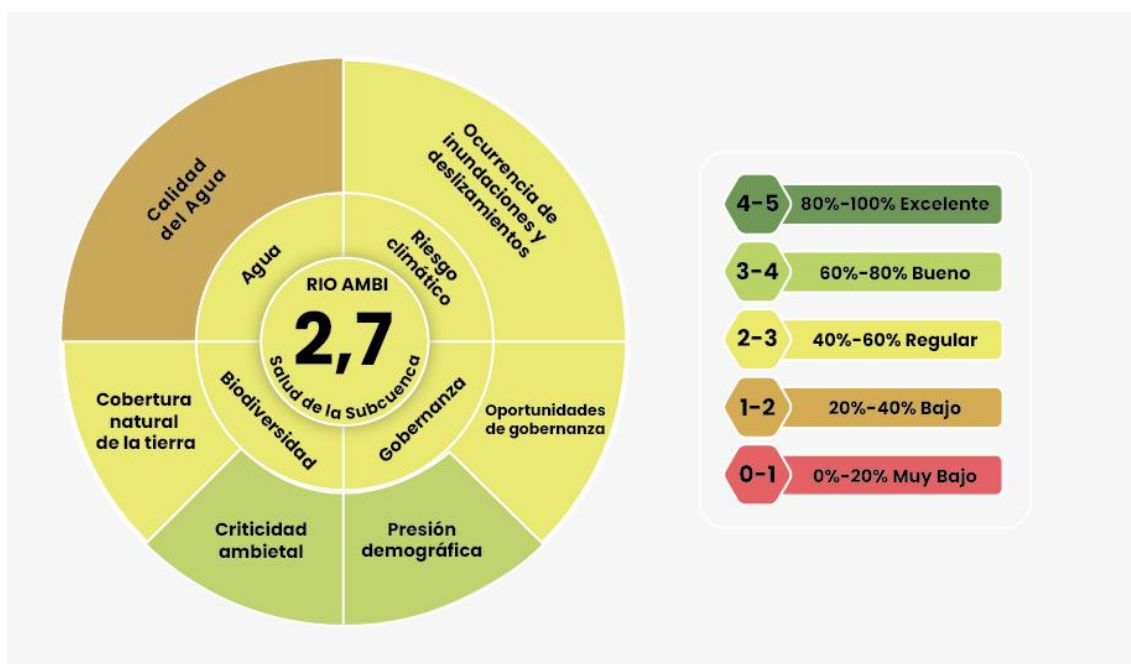


5.2. La calificación final de salud ambiental

La salud ambiental obtenida para toda la cuenca del río Ambi es «regular» porque 3 de los 4 componentes tienen un estado de salud «regular» y solo el componente Agua tiene un estado de salud «bajo» (Fig. 32). Sin embargo, este estado de salud, como ocurre con varios componentes e indicadores, se construye por toda la cuenca y al mismo tiempo se diferencia entre las zonas altitudinales.

Figura 32.

Calificación de la cuenca del río Ambi



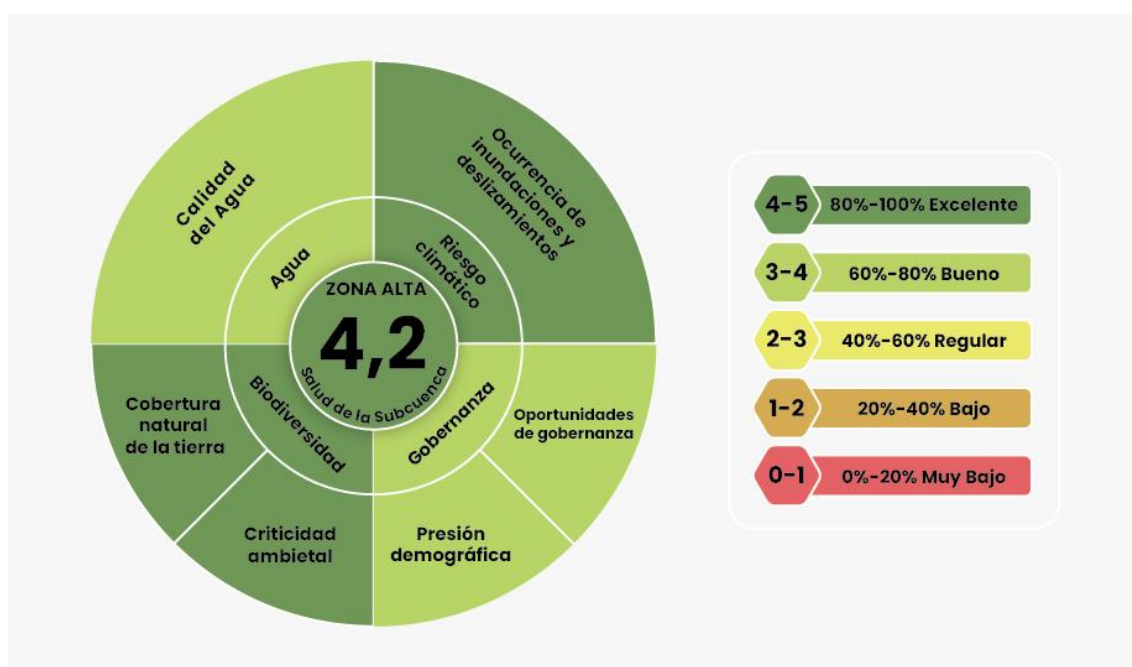
- **Zona Alta**

La zona alta obtuvo una calificación de 4,2 sobre 5 lo cual genera un estado de salud «excelente». Esto se debe a que la biodiversidad y los factores de riesgo climático se encuentran en un estado excelente. El principal motivo es el desnivel altitudinal existente en la zona que varía entre los 3.500 y 4.902 msnm y presenta un relieve volcánico montañoso, que actualmente es inaccesible, preservando así gran parte de la cobertura natural. Además, la presencia de parte del Parque Nacional Cotacachi-Cayapas tiene implicaciones para la conservación de bosques

y páramos, la solidez de las políticas ambientales y la baja ocupación humana. Como resultado, los otros dos factores, la gobernanza y el agua, se consideran «buenos» en salud, precisamente porque la calidad del agua y la gobernanza ambiental en esta región rara vez conducen a un deterioro (Figura 33).

Figura 33.

Calificación de la zona alta de la cuenca



- **Zona Media**

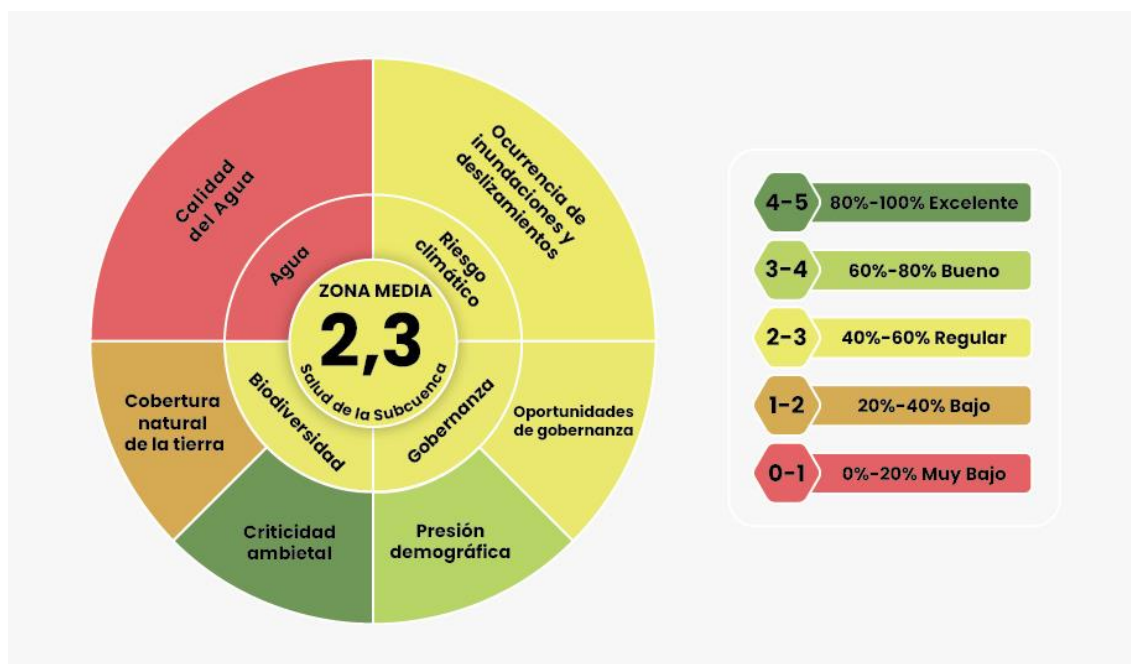
En contraste a la zona alta, en esta zona se degrada del estado de salud a «regular» al presentar una calificación de 2,3 sobre 5. El deterioro de las condiciones de salud en la zona media se debe principalmente al aumento de los centros rurales, los cambios en la cobertura y uso del suelo (CUS) y, por lo tanto, al aumento de las actividades agrícolas y ganaderas en las relieves escarpados y montañosos.

La acumulación de fertilizantes y la descarga de aguas residuales en los cuerpos de están reduciendo la biodiversidad, degradando la calidad del agua y aumentando los riesgos climáticos. La gobernanza también presenta salud regular. tiene lugar de forma regular, porque

mientras la presión demográfica es baja y buena para la conservación de los recursos naturales, las oportunidades de gobernanza son regulares (Figura 34).

Figura 34.

Calificación de la zona media de la cuenca



- **Zona Baja**

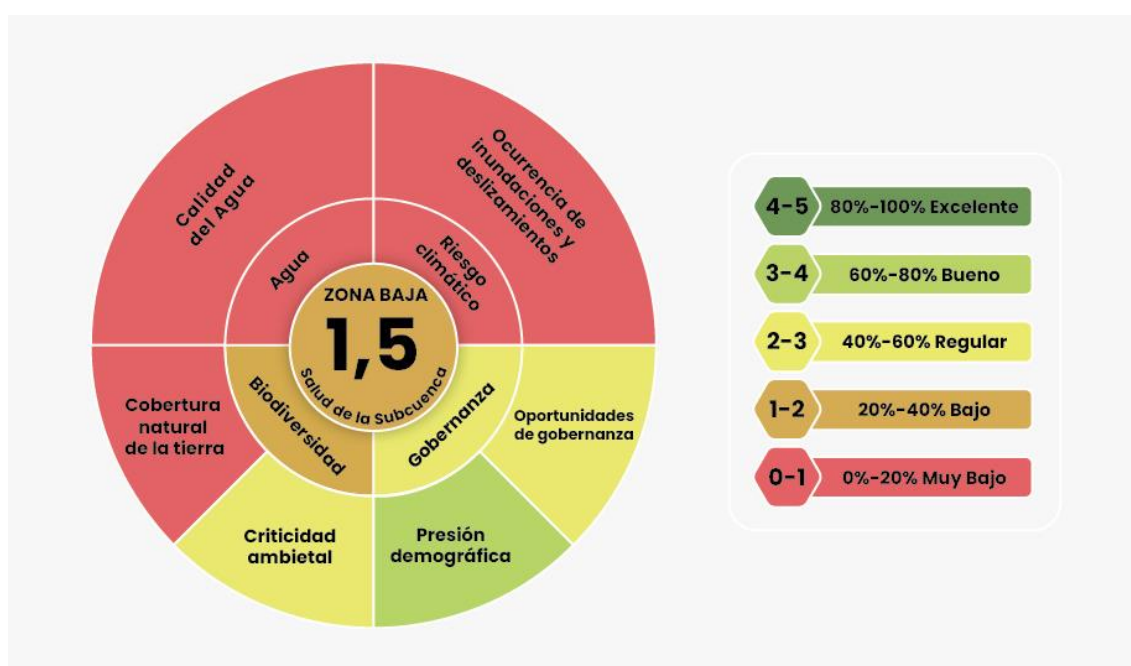
La zona baja es la sección que presentó el estado de salud más deteriorado. De hecho, la salud se calificó como «baja», alcanzando un puntaje de 1,5 sobre 5. La principal razón del deterioro de la salud ambiental es la presencia de grandes ciudades en este sector.

Esta sección es la que presentó más alertas en la salud. Los riesgos climáticos, presentan un estado de alerta “roja” debido a las frecuentes inundaciones y deslizamientos de tierra. Por el lado de la biodiversidad, el indicador de criticidad ambiental presenta un estado de alerta «regular». Esto debido a que la zona alberga la mayor parte de los asentamientos, que ejercen presión sobre la cobertura natural existente. Al mismo tiempo, debido a que el porcentaje de cobertura natural es mínimo, el índice de cobertura natural da un estado de alarma «muy bajo».

Además, debido a la gran cantidad de aguas residuales domésticas e industriales vertidas a los cuerpos de agua, la composición del agua ha alcanzado un nivel de alarma «muy bajo». Finalmente, como en la sección media, el componente de gobernanza presenta un índice de presión demográfica que produce un «buen» estado de salud. Esto último porque el número de habitantes por kilómetro cuadrado no supera la media estimada. Por otro lado, los indicadores de oportunidades de gobernabilidad sumado a la presión demográfica recibieron una calificación «regular» (Figura 35).

Figura 35.

Calificación de la zona baja de la cuenca



De acuerdo con los resultados obtenidos, el componente hídrico de la cuenca es el más afectado si se considera que la calidad en su salud es «baja». Esto debido a las diferentes presiones que amenazan sus cauces, siendo la descarga de aguas residuales el principal problema. En el componente de riesgo climático, se alcanzó un estado de alerta «regular» por la exposición de asentamientos humanos a deslizamientos e inundaciones ocasionados por lluvias torrenciales cada vez más recurrentes. Por otro lado, el hecho de que el componente de

biodiversidad muestre un estado de alerta «regular» se debe a que la cobertura y el uso del suelo cambian constantemente. Finalmente, el componente de gobernanza también está en alerta «regular». Sin embargo, en este componente, el indicador de oportunidades de gobernanza en la zona altitudinal alta presenta una calificación mayor debido a que existe influencia territorial en dos áreas de conservación, como son: el Parque Nacional Cotacachi-Cayapas y el Bosque Protector de la comuna de Zuleta.

Estas áreas protegidas contribuyen a mejorar la gobernanza en la parte alta a través de la existencia de herramientas de planificación como los planes de manejo. No obstante, la tasa de implementación de otros instrumentos de planificación territorial es baja. Si bien, se determinó que la zona alta presenta una salud ambiental adecuada por ser una región de menor presión antrópica, la implementación de medidas que conserven los ecosistemas naturales y regularicen las actividades es crucial para garantizar que ese estado de salud no se deteriore.

Costanzo et al., (2015), en una investigación realizada en el río Willmette del estado de Oregón en Estados Unidos, encontraron que los cambios en el estado de salud de la cuenca también se producen por zona altitudinal. Esto según los autores evidencia que la zona alta está mejor conservada por el poco desarrollo de actividades, a diferencia de la parte media y baja del río.

5.3. Oportunidades para la Acción: La definición de líneas estratégicas

Los reportes de salud finalmente se convierten en datos basados en evidencia que entregan información útil para la toma de decisiones. Para definir las, en el presente estudio, se establecieron líneas estratégicas de acción, y para ello se utilizó el modelo Presión-Estado-Respuesta (PER). El componente presión está integrado por el estado de salud en cada uno de los indicadores establecidos, el componente estado corresponde a situación actual en la que se encuentra la cuenca producto del estado de salud de cada indicador y el componente respuesta son las acciones definidas mediante estrategias para mejorar ese estado de salud. Las

oportunidades para la acción se presentan por las diferentes zonas altitudinales.

- **Zona Alta**

En esta zona es prioritario implementar la conservación de ecosistemas naturales, al ser la zona donde se originan las vertientes de agua y donde predominan ecosistemas como, páramo, pastos naturales y matorrales. De este modo se preservará la cobertura natural y se evitará el avance de las actividades antrópicas en el sector. Para conseguir estas metas, se debe fortalecer la gobernanza ambiental para garantizar una mejor inversión pública en la conservación de los ecosistemas. (Tabla 33). Así se asegurarán servicios ecosistémicos como, provisión de agua y regulación de caudales.

Tabla 33.

Presión-estado-respuesta de la zona alta de la cuenca

Zona	Presión		Estado	Respuesta
	Descripción del índice e indicador	Resultado		
Alta	Calidad de Agua	Baja	Actividades antrópicas que ponen en peligro las fuentes de agua en la zona alta	Estrategia de Monitoreo
	Cobertura Natural de la Tierra	Excelente	Se conserva los espacios con vegetación natural	Estrategia de Conservación
	Criticidad Ambiental (POMCAS)	Excelente	Bajo presión antrópica	Estrategia de Conservación
	Ocurrencia de Inundación y Deslizamientos	Excelente	Zona con bajo impacto, de eventos naturales extremos	Estrategia de Conservación
	Oportunidades de Gobernanza	Regular	Deficiente inversión pública ambiental	Estrategia de Gobernanza
	Presión demográfica (POMCAS)	Buena	Bajo incremento de la tasa de crecimiento poblacional	

- **Zona Media**

En esta zona además que es prioritario la restauración de los ecosistemas también es necesario la implementación de estrategias de monitoreo, conservación, resiliencia y gobernanza. Porque es aquí donde se presentan más cambios en la cobertura del suelo y donde se incrementan las

descargas de aguas residuales sobre los cuerpos de agua. (Tabla 34). Para ello, hay que identificar espacios claves para la conservación y restauración de ecosistemas frágiles como páramo y de bosques remanentes. Para controlar la contaminación de los cuerpos de agua, hay que implementar redes de monitoreo de los recursos hídricos y exigir que tanto los gobiernos locales como las industrias cumplan con la normativa ambiental vigente. A la vez, hay que desarrollar una gestión climática del riesgo de desastre que articule la gestión comunitaria con la estructura institucional ecuatoriana. De esta manera se implementarán acciones específicas que mejoren la capacidad de respuesta de la población mediante medidas que prevengan o mitiguen los efectos negativos de deslizamientos, inundaciones o incendios forestales.

Tabla 34.

Presión-estado-respuesta de la zona media de la cuenca

Zona	Presión		Estado	Respuesta
	Descripción del índice e indicador	Resultado		
Media	Calidad de Agua	Baja	Contaminación de los cuerpos de agua por incremento de actividades económicas	Estrategia de Monitoreo
	Cobertura Natural de la Tierra	Baja	Cambios de cobertura y uso de suelo que genera parches de cobertura natural	Estrategia de Restauración
	Criticidad Ambiental (POMCAS)	Excelente	Existen presiones antropogénicas que no ponen en peligro su sostenibilidad. ,	Estrategia de Conservación
	Ocurrencia de Inundación y Deslizamientos	Regular	Recurrencia de desastres naturales que se incrementa por la antropización de los ecosistemas	Estrategia de Resiliencia
	Oportunidad de Gobernanza	Baja	Deficiente inversión pública ambiental	Estrategia de Gobernanza
	Presión demográfica (POMCAS)	Buena	Incremento constante de la tasa de crecimiento poblacional	

- **Zona Baja**

Esta zona con muchos espacios degradados producto de la alteración en sus ecosistemas naturales y la contaminación hídrica, edáfica y atmosférica. Bajo estos antecedentes, es prioritario implementar acciones que mitiguen las presiones antropogénicas sobre el territorio. Para ello se proponen estrategias de monitoreo de la calidad del agua, restauración de ecosistemas degradados, la resiliencia climática y la gobernanza ambiental. (Tabla 35). Al igual que en la sección media, hay que ampliar las redes de monitoreo del recurso hídrico, identificar espacios claves para la conservación y restauración de ecosistemas frágiles de bosques remanentes, fortalecer la gestión climática del riesgo de desastre que articule la gestión comunitaria con la estructura institucional ecuatoriana y finalmente incrementar los recursos económicos destinados a fortalecer la gobernanza ambiental en la cuenca hidrográfica.

Tabla 35.

Presión-estado-respuesta de la zona baja de la cuenca

Zona	Presión		Estado	Respuesta
	Descripción del índice e indicador	Resultado		
Baja	Calidad de Agua	Baja	Contaminación de los cuerpos de agua por incremento de actividades económicas	Estrategia de Monitoreo
	Cobertura Natural de la Tierra	Muy Baja	Cambio de CUS por actividades económicas	Estrategia de Restauración
	Criticidad Ambiental (POMCAS)	Regular	Presión sobre los recursos naturales por demanda creciente de los asentamientos humanos	Estrategia de Conservación
	Ocurrencia de Inundación y Deslizamientos	Muy Bajo	Recurrencia de desastres naturales que se incrementa por la antropización de los ecosistemas	Estrategia de Resiliencia
	Oportunidad de Gobernanza	Baja	Deficiente inversión pública ambiental	Estrategia de Gobernanza
	Presión demográfica (POMCAS)	Buena	Incremento constante de la tasa de crecimiento poblacional	

Capítulo 6

CONSIDERACIONES FINALES

6. CONSIDERACIONES FINALES

El estado de salud de la cuenca del río Ambi fue clasificado como «regular» debido a diversos cambios antropogénicos. Sin embargo, el comportamiento por cada zona fue diferente, lo que ratificaría que los sistemas socio-ecológicos en la cuenca varían según la altitud. A medida que se transita desde la zona alta hacia la zona baja el estado de salud de la cuenca se deteriora. Al pasar de estado excelente en la parte alta a regular en la parte media y bajo en la parte baja.

Este deterioro se vincula al aumento poblacional que se incrementa desde la parte alta hacia la parte baja. El incremento de actividades humanas ocasiona impactos ambientales que deterioran el estado de salud de la cuenca. Bajo estos antecedentes las cinco líneas estratégicas de acción identificadas: monitoreo, conservación, restauración, resiliencia y gobernanza son una opción para priorizar actividades que propicien una mejora en el estado de salud ambiental deteriorado en la cuenca del río Ambi. De este modo, se conservarán ecosistemas naturales, se recuperarán espacios degradados e incluso se beneficiarán asentamientos humanos que dependen de los recursos naturales que otorga la cuenca hidrográfica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS

- Abendaño, A., & Benavides, V. (2001). Planificación Estratégica. *Quito-Ecuador: AFEFCE*.
- Aboelnour, M., Gitau, M., & Engel, B. (2019). *Hydrologic Response in an Urban Watershed as Affected by Climate and Land-Use Change, Water, 11 (8), 1603*.
- Adefemi, S., & Awokunmi, E. (2010). Determination of physico-chemical parameters and heavy metals in water samples from Itaogbolu area of Ondo-State, Nigeria. *African Journal of Environmental Science and Technology, 4(3)*.
- Aguilar, V., Kolb, M., Koleff, P., & Urquiza-Haas, T. (2010). Las cuencas de México y su biodiversidad: Una visión integral de las prioridades de conservación. *Las cuencas hidrográficas de México, 142-151*.
- Aguirre, N. (2007). Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas. *Universidad Nacional de Loja*.
- Aguirre-Núñez, M. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *REDESMA, 5(1), 1-12*.
- Álvarez, J. P. A., Panta, J. E. R., Ayala, C. R., & Acosta, E. H. (2008). Calidad Integral del Agua Superficial en la Cuenca Hidrológica del Río Amajac. *Información tecnológica, 19(6)*. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642008000600004>
- Amadio, P., Mancini, M., Menduni, G., Rabuffetti, D., Ravazzani, G., & others. (2003). A real-time flood forecasting system based on rainfall thresholds working on the Arno Watershed: Definition and reliability analysis. *Proceedings of the 5th EGS Plinius Conference held at Ajaccio, Corsica, France*.
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2023). *Lipps WC, Braun-Howland EB, Baxter TE, eds. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. (24th ed.). APHA Press*.

- Andrews, D. F. (1972). Plots of high-dimensional data. *Biometrics*, 125-136.
- Arai, F. K., Pereira, S. B., & Gonçalves, G. G. G. (2012). Characterization of water availability in a hydrographic basin. *Engenharia Agrícola*, 32, 591-601.
<https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000300018>
- Armijo, M. (2009). *Manual de Planificación Estratégica e Indicadores de Desempeño en el Sector Público*. ILPES-CEPAL.
- Armstrong, L. E., & Johnson, E. C. (2018). Water intake, water balance, and the elusive daily water requirement. *Nutrients*, 10(12), 1928.
- Arnell, N. W. (1999). Climate change and global water resources. *Global environmental change*, 9, S31-S49.
- Arreguín-Sánchez, F., Monte-Luna, P. del, & Lluch-Belda, D. (2007). Examen de la conservación y el aprovechamiento de los recursos vivos. *Interciencia*, 32(1), 61-65.
- Benabent, M. B., & Vivanco, L. R. V. (2019). La experiencia de los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial cantonales en Ecuador. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 8(15), Article 15.
<https://doi.org/10.18537/est.v008.n015.a11>
- Boelens, R., Hoogesteger, J., Swyngedouw, E., Vos, J., & Wester, P. (2016). Hydrosocial territories: A political ecology perspective. *Water International*, 41, 1-14.
<https://doi.org/10.1080/02508060.2016.1134898>
- Bonell, A. (2018). Ecosistemas Altoandinos: Su Importancia como Almacenes de Carbono en el Suelo bajo un Escenario de Cambio Climático. *BIODIVERSIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA Avances, perspectivas y reflexiones*, 113.
- Bordino, J. (2021). Cuencas hidrográficas: que son, tipos e importancia. *Ecología verde*.
<https://www.ecologiaverde.com/cuencas-hidrograficas-que-son-tipos-e-importancia-3334.html>

- Boyacioglu, H. (2007). Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Water Sa*, 33(1).
- Brito, J., Camacho, M., Romero, V., & Vallejo, A. (2021). *Mamíferos del Ecuador. Versión 2021.0. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador.*
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A water quality index-do we dare. *Water and sewage works*, 117(10).
- Budds, J. (2012). La demanda, evaluación y asignación del agua en el contexto de escasez: Un análisis del ciclo hidrosocial del valle del río La Ligua, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 52, 167-184. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022012000200010>
- Bueno, L. F., Galbiatti, J. A., & Borges, M. J. (2005). Monitoramento de variáveis de qualidade da água do Horto Ouro Verde-Conchal-SP. *Engenharia Agrícola*, 25(3), 742-748.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2006). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. Cuenca. Recuperado: http://www.paramo.org/files/hidrologia_paramo.pdf.
- Buytaert, W., & De Bièvre, B. (2012). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8).
- Cabeza, A. M. (2001). El diagnóstico territorial en la formulación de planes de ordenamiento. *Perspectiva Geográfica*, 33-54.
- Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú.*
- Calle, G. M. (2000). Vegetación, población y huella ecológica como indicadores de sostenibilidad en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 3(5), Article 5.
- Camino-Dorta, J., Gimeno-Ortiz, M., & Ramón-Ojeda, A. A. (2014). Las unidades ambientales homogéneas como herramienta para la ordenación territorial y la caracterización de

- litorales áridos / Use of Homogeneous Environmental Management Units as a Tool for Land-Use Planning and Characterization of Arid Coasts. *Vegueta: Anuario de la Facultad de Geografía e Historia*, 14, 199-228.
- Carrera, D., Guevara, P., Tamayo, L., & Guallichico, D. (2015). *Análisis multivariado de las aguas de la Subcuenca del Río Ambi en época de estiaje y su relación con la calidad desde el punto de vista agrícola*. 10(1), 123-129.
- Castillo, R., & Alvez, A. (2020). El Derecho Humano al agua. *Centro*.
- Chamochumbi, W. (2010). *El ordenamiento territorial en la gestión de cuencas hidrográficas: Criterios de base y nuevos elementos de discusión*. ISAT.
- Comission on Global Governance. (1995). *Our Global Neighbourhood*. Oxford University Press.
- CORPONARIÑO. (2007). *Propuesta de ordenamiento del recurso hídrico para la Quebrada Miraflores*. CARN.
- Costanzo, S., Blancard, C., Davidson, S., Dennison, W., Ecurra, J., Freeman, S., Fries, A., Kelsey, R., Krchnak, K., Sherman, J., & Thieme, M. (2017). *Practitioner's Guide to Developing River Basin Report Cards*. University of Maryland: Center for Environmental Science. <https://ian.umces.edu/publications/practitioners-guide-to-developing-river-basin-report-cards/>
- Costanzo, S., Kelsey, H., & Saxby, T. (2015). *Willamette River Report Card 2015*. University of Maryland: Center for Environmental Science. <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:lvXr37Ll42oJ:https://ecorep-ortcard.org/site/assets/files/1426/2015-willamette-methods-report.pdf+&cd=2&hl=es-419&ct=clnk&gl=ec>
- Cruz, B., Gaspari, F. J., Rodríguez, A. M., Carrillo, F. M. C., & Téllez, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y*

Ciencia, 23(64), 26-34.

Cude, C. G. (2001). Oregon water quality index a tool for evaluating water quality management effectiveness 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(1), 125-137.

DeFries, R., & Eshleman, K. N. (2004). Land-use change and hydrologic processes: A major focus for the future. *Hydrological processes*, 18(11), 2183-2186.

De la Torre, L. M., & Peralta, C. S. (2004). *La reciprocidad en el mundo andino: el caso del pueblo de Otavalo. Runapura makipurarinamanta, otavalokunapak kawsaymanta. Editorial Abya Yala.*

DesInventar. (2019). *Base de Datos Desinventar 1970-2019. Inventario histórico de pérdidas.*
<https://www.desinventar.net/DesInventar/>

Dinius, S. (1987). Design of an index of water quality 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 23(5), 833-843.

Dourojeanni R., A., Jouravlev, A. S., & Chávez, G. (2002). *Gestión del agua a nivel de cuencas: Teoría y práctica.* Naciones Unidas, CEPAL, Div. de Recursos Naturales e Infraestructura.

Dunnette, D. (1979). A geographically variable water quality index used in Oregon. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 53-61.

Ellis, K. (1989). *Surface water pollution and its control*” Macmillan press Ltd. *Hound mill, Basingstoke, Hampshire RG, 21*, 3-18.

Espinoza S, A. E., Espinoza Z, C. E., & Fuentes P, A. A. (2015). Retornando a Chaitén: Diagnóstico participativo de una comunidad educativa desplazada por un desastre sicionatural. *Magallania (Punta Arenas)*, 43(3), 65-76. <https://doi.org/10.4067/S0718-22442015000300006>

- Fernández, N., Ramírez, A., & Solano, F. (2003). *Índices fisicoquímicos de calidad del agua. Un estudio comparativo*. Conferencia Internacional Usos Múltiples del Agua: Para la Vida y el Desarrollo Sostenible, Cali.
- Fernández, N., & Solano, F. (2008). *Índices de Calidad y Contaminación del Agua*. Universidad de Pamplona.
- Ferrer, V., & Torrero, M. P. (2015). Manejo integrado de cuencas hídricas: Cuenca del río Gualjaina, Chubut, Argentina. *Boletín Mexicano de Derecho Comparado*, 1(143). <https://doi.org/10.22201/iiij.24484873e.2015.143.4941>
- FoEh, J. (2020). Integrated Watershed Management: Suatu Lompatan Ide Dan Aksi Dalam Bidang Lhk Terintegrasi. Rimba Indonesia. <https://rimbaindonesia.id/artikel-utama/integrated-watershed-management-suatu-lompatan-ide-dan-aksi-dalam-bidang-lhk-terintegrasi/>
- Franks, T., & Cleaver, F. (2007). Water governance and poverty: A framework for analysis. *Progress in development Studies*, 7(4), 291-306.
- Galván, M. G., & Tapia, F. H. (2019). La cuenca hidrosocial presa Huapango, México: Un análisis de la gestión integrada de los recursos hídricos y la gobernanza en cuerpos de agua compartidos. *Agua y Territorio/Water and Landscape*, 14, 69-84.
- García-Orozco, J. A., Gutiérrez-Cedillo, J. G., Juan Pérez, J. I., & Balderas Plata, M. Á. (2011). Cambio de Uso de suelo en una Microcuenca del Altiplano Mexicano. *Papeles de geografía*, N° 53-54, 2011.
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. *Series: Libros de Cátedra*.
- Gómez, L. F., Gallego, B., & Naranjo, L. (2017). Atlas socioambiental de las cuencas

- transfronterizas Mira y Mataje: Aportes para su ordenamiento y gestión integral Colombia-Ecuador. *Cali: WWF-Colombia.*
- Gómez-Orea, D. (2007). Marco conceptual de la ordenación territorial. *Ordenación Territorial*, 29-72.
- Guachamin, W., Cadena, J., Carvajal, J., & García, F. (2015). *Cuenca Rio Mira Mapa De Esgurrimiento.*
- Guerrero, J., Suárez, C., & Gómez-Navia, L. (2016). *Evaluación y diagnóstico de las características físicas y de los servicios ecosistémicos de las cuencas de los ríos Mira y Mataje. Informe Técnico.* WWF-Colombia.
- Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., ... & Wisser, D. (2014). Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3251-3256.
- Huang, Z., Yuan, X., & Liu, X. (2021). The key drivers for the changes in global water scarcity: Water withdrawal versus water availability. *Journal of Hydrology*, 601, 126658.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2010). *Censo de Población y vivienda.* Instituto Nacional de Estadística y Censos. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- Jackson, R. B., Carpenter, S. R., Dahm, C. N., McKnight, D. M., Naiman, R. J., Postel, S. L., & Running, S. W. (2001). Water in a changing world. *Ecological applications*, 11(4), 1027-1045.
- Jiménez, A. A. (2000). Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. *Revista interdisciplinar de gestión ambiental*, 2(23), 12-19.
- Kammerbauer, J., & Ardon, C. (1999). Land use dynamics and landscape change pattern in a typical watershed in the hillside region of central Honduras. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 75(1), 93-100. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00071-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00071-7)

- Kirpich, Z. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil engineering*, 10(6), 362.
- Kitchener, B. G., Wainwright, J., & Parsons, A. J. (2017). A review of the principles of turbidity measurement. *Progress in Physical Geography*, 41(5), 620-642.
- Kniffin, M., Sohrabi, M., Safeeq, M., & Conklin, M. (2018). Constraining annual water balance estimates with spatial calibration of evapotranspiration. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2018, H23N-2146.
- Koutroulis, A. G., & Tsanis, I. K. (2010). A method for estimating flash flood peak discharge in a poorly gauged basin: Case study for the 13–14 January 1994 flood, Giofiros basin, Crete, Greece. *Journal of Hydrology*, 385(1-4), 150-164.
- Lemos, M. C., & Agrawal, A. (2006). Environmental governance. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 31, 297-325.
- León, G. S. (2005). La cuenca del río Orinoco: Visión hidrográfica y balance hídrico. *Revista Geográfica Venezolana*, 46(1), 75-108.
- Liu, Z., Weller, D. E., Correll, D. L., & Jordan, T. E. (2000). EFFECTS OF LAND COVER AND GEOLOGY ON STREAM CHEMISTRY IN WATERSHEDS OF CHESAPEAKE BAY 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 36(6), 1349-1365.
- Lobato, T., Hauser-Davis, R., Oliveira, T., Silveira, A., Silva, H., Tavares, M., & Saraiva, A. (2015). Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: A case study in the Amazon region. *Journal of hydrology*, 522, 674-683.
- Lomas, P. L., Martín, B., Louit, C., Montoya, D., Montes, C., & Álvarez, S. (2005). Guía práctica para la valoración económica de los bienes y servicios ambientales de los ecosistemas. *Fundación Interuniversitaria Fernanda González Bernáldez. España*.

- López Cadenas del Llano, F. (1998). *Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de la erosión: Ingeniería medioambiental*. 945.
- Lumb, A., Sharma, T., & Bibeault, J.-F. (2011). A review of genesis and evolution of water quality index (WQI) and some future directions. *Water Quality, Exposure and Health*, 3, 11-24.
- Mena Vásconez, P., Medina, G., & Hofstede, R. (2001). *Los páramos del Ecuador: Particularidades, problemas y perspectivas*. 215-223.
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2020). *Autorizaciones del Recurso Hídrico*. Dirección de Información Ambiental y Agua. <https://www.datosabiertos.gob.ec/dataset/autorizaciones-del-recurso-hidrico/resource/0df3d537-8ca1-4c5a-a000-7ae2d73e8eb8>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológico. (2017). *Mapa de Cobertura Y Uso De La Tierra Del Ecuador Continental Año 2016*. <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>
- Nasiri, S., Ansari, H., & Ziaei, A. N. (2022). Determination of water balance equation components in irrigated agricultural watersheds using SWAT and MODFLOW models: A case study of Samalqan plain in Iran. *J. Groundw. Sci. Eng*, 10, 44-56.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- Novotny, V. (2002). *Water quality: diffuse pollution and watershed management*. John Wiley & Sons.
- Organización Mundial de la Salud, A. M. (1977). *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua*. Organización Mundial de la Salud.
- Organización Mundial de la Salud. (2011). Guidelines for drinking-water quality. *World health organization*, 216, 303-304.

- Orjuela, L., & López, M. (2011). *Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia—Indicadores de Calidad del agua superficial*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Orjuela, L., & López, M. (2013). *Hoja Metodológica del indicador Índice de alteración potencial de la calidad del agua (Versión 1,00)*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:-euKQ6XfSVEJ:www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/53-3.22_HM_IACAL_3_FI.pdf/0b603e3d-7b31-4b31-9e8e-71ce9bbdf2e5+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=ec
- Orozco, C., Pérez, A., Gonzáles, M., Rodríguez, F., & Alfayate, J. (2005). *Contaminación Ambiental. Una visión desde la química*. (Tercera edición). Thomson Editoriales Spain Paraninfo, S.A.
- Pantus, F. J., & Dennison, W. C. (2005). Quantifying and Evaluating Ecosystem Health: A Case Study from Moreton Bay, Australia. *Environmental Management*, 36(5), 757-771.
<https://doi.org/10.1007/s00267-003-0110-6>
- Paul, M. J., & Meyer, J. L. (2001). Streams in the urban landscape. *Annual review of Ecology and Systematics*, 32(1), 333-365.
- Perales Miranda, V. H. (2016a). La cuenca social como aproximación sociológica a las intervenciones en cuencas hidrográficas. *Temas sociales*, 39, 221-240.
- Perales Miranda, V. H. (2016b). LA CUENCA SOCIAL COMO APROXIMACIÓN SOCIOLÓGICA A LAS INTERVENCIONES EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS. *Temas Sociales*, 39, 221-240.

- Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y política pública*, 22(2), 283-312.
- Pérez-Castillo, A. G., & Rodríguez, A. (2008). Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. *Revista de Biología tropical*, 56(4), 1905-1918.
- Peters, N. E., & Meybeck, M. (2000). Water quality degradation effects on freshwater availability: impacts of human activities. *Water International*, 25(2), 185-193.
- Pineda Jaimes, N. B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., & Plata Rocha, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas*, 69, 33-52.
- Quiroga, L. M. S., Martínez, M. M., & Sigüenza, P. F. (2021). Simulación matemática de dos subcuencas del Río Ambi y Tahuando, ubicadas en Imbabura-Ecuador, usando el modelo qswat para la determinación de parámetros hidrográficos. *Domino de las Ciencias*, 7(4), 580-589.
- Ramakrishna, B. 1997. *Estrategia de Extensión para el Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas: Conceptos y Experiencias*. Deutche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)/Instituto de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Ramirez, A., Restrepo, R., & Viña, G. (1997). Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulación y aplicación. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(3), 135-153.
- Rojas, O. (1991). Índices de Calidad del agua en Fuente de Captación. *Seminario Internacional sobre calidad del agua para consumo, Cali*.
- Ron, S. R., Merino-Viteri, A., & Ortiz, D. A. (2022). *Anfibios del Ecuador. Versión 2022.0*. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <

<https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb>.

- Rosa, D. W., Nascimento, N. O., Moura, P. M., & Macedo, G. D. (2020). Assessment of the hydrological response of an urban watershed to rainfall-runoff events in different land use scenarios—Belo Horizonte, MG, Brazil. *Water Science and Technology*, 81(4), 679-693.
- Rosero, E. G. (2021). *Estudio multitemporal de uso del suelo y cobertura vegetal de la subcuenca del río Ambi, provincia Imbabura, Ecuador. (Master's thesis)*.
- Rosero, G. J. T. (2014). Caracterización poblacional de la cuenca hidrográfica Mira-Mataje. *SATHIRI*, 6, 9-21.
- Rua de Cabo, A., Valdivia, I., & Silva, E. V. da. (2006). CONFLICTOS AMBIENTALES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO QUIBÚ (Environmental conflicts in the Quibú River Basin). *Mercator*, 5(10), 55 a 64-55 64.
- Ruíz Ríos, R., & Torres Giraldo, H. (2011). *Codificación y clasificación de cursos de agua superficiales del Perú: Informe final*.
- Sacha, A., & Espinoza, C. (2001). *Determinación de Contenido Natural e Índices de Calidad:¿ Presente y Futuro de Calidad de Aguas? XIV Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS, Chile*.
- Samboni, N. E., Carvajal Escobar, Y., & Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e investigación*, 27(3), 172-181.
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2011). *LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA PLANIFICACION TERRITORIAL DESCENTRALIZADA by UNDP ART Initiative—Issuu*. SENPLADES. https://issuu.com/artpublications/docs/guia_lgptd
- Secretaría Nacional del Agua del Ecuador. (2009). *Delimitación y codificación de Unidades Hidrográficas del Ecuador. Escala 1:250000. Nivel 5. Metodología Pfafstetter* (p. 60).

- Sierra, M. (1999). *Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental*. Proyecto Inefan/Gef-Birf y Ecociencia.
- SIGTIERRAS. (2020). <http://geoportal.agricultura.gob.ec/index.php/visor-geo>
- Singh, V. P., & Frevert, D. K. (2003). Watershed models. In *Environmental and Water Resources History* (pp. 156-167).
- Somerville, C., Shorey, R., Dennison, B., Thomas, J., Donovan, C., Hawkey, J., Kelsey, H., Nuttle, B., Walsh, B., Higgins, J., & Jordahl, H. (2015). *Mississippi River Watershed Report Card*. University of Maryland: Center for Environmental Science. <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:dWrmjc1bgToJ:https://americaswatershed.org/wp-content/uploads/2020/11/2015-Report-Card.pdf+&cd=2&hl=es-419&ct=clnk&gl=ec>
- Soros, A., Amburgey, J. E., Stauber, C. E., Sobsey, M. D., & Casanova, L. M. (2019). Turbidity reduction in drinking water by coagulation-flocculation with chitosan polymers. *Journal of Water and Health*, 17(2), 204-218.
- Stehli, P. T., Weber, J. F., & Jorquera, E. (2012). Implementación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido de simulación de eventos. *Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos*. Ezeiza, Bs. As Umaña, G. & Padilla, G. *A project of environmental education with teachers in the municipality of Caldas*. *Revista Folios*, 14.
- Sun, G., Wei, X., Hao, L., Sanchis, M. G., Hou, Y., Yousefpour, R., Tang, R., & Zhang, Z. (2023). Forest hydrology modeling tools for watershed management: A review. *Forest Ecology and Management*, 530, 120755. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120755>
- Sushma, J. (2021). Physico-Chemical Parameter: An Indicator of Water Pollution. *Journal of Environmental Research*, 5(5).
- Swamee, P. K., & Tyagi, A. (2007). Improved method for aggregation of water quality

- subindices. *Journal of environmental engineering*, 133(2), 220-225.
- Torres, P., Cruz, C. H., & 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), 79-94.
- Torres-Carvajal, O., Pazmiño-Otamendi, G., Ayala-Varela, F., & Salazar-Valenzuela, D. (2022). *Reptiles del Ecuador. Version 2022.1. Museo de Zoología, Pontificia Universidad Católica del Ecuador*.
- Trindade, L., & Scheibe, L. F. (2019). Water management: Constraints to and contributions of Brazilian watershed management committees. *Ambiente & Sociedade*, 22.
- Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122, 107218.
- Ulloa, C. U., & Jørgensen, P. M. (1993). *Arboles y arbustos de los Andes del Ecuador* (Vol. 30). Aarhus Universitetsforlag.
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza-UICN. (2009). *Guía para la elaboración de planes de manejo de microcuencas* (Primera). https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:LUAWZgp6Y9AJ:https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/F8F2E9D4DD18AF4D05257BA3005F6F42/%24FILE/Guia_elaboracion_planes_microcuencas_UICN.pdf+&cd=11&hl=es-419&ct=clnk&gl=ec
- Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., Terán, R., Vásquez, I., Díaz, J., Vásquez, C., Castro, A., Tapia, M. & Alcántara, J. (2016). *Manejo y gestión de cuencas hidrográficas*. Fondo Editorial-UNALM. <https://www.fondoeditorialunalm.com/wp-content/uploads/2020/09/CUENCAS-HIDROGRAFICAS.pdf>
- Van Beek, L., Wada, Y., & Bierkens, M. F. (2011). Global monthly water stress: 1. Water

- balance and water availability. *Water Resources Research*, 47(7).
- Vela-Vargas, I. M., Domínguez, G., Galindo, J., & Pérez-Torres, J. (2011). El oso andino sudamericano, su importancia y conservación. *Ciencia*, 62, 44-51.
- Ven Te, C., Maidment, D., Mays, L., & Saldarriaga, J. G. (1994). *Hidrología Aplicada*. Ed. MacGraw-Hill.
- Villón, M. (2002). Hidrología. *Instituto Tecnológico de Costa Rica. Facultad de Ingeniería Agrícola*, 2, 15-64.
- Warner, J., Wester, P., & Bolding, A. (2008). Going with the flow: River basins as the natural units for water management? *Water Policy*, 10(S2), 121-138.
<https://doi.org/10.2166/wp.2008.210>
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and river ecosystems*. gulf professional publishing.
- Wittfogel, K. (1957). *Oriental Despotism: A Comparative Study of Total Power*. (Vol. 52). Yale University Press.
- WWF-Colombia. (2019). *Reporte de Salud de las cuencas binacionales de los ríos Mira y Mataje*.
https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:hl-9HDOhpSYJ:https://wwf.panda.org/wwf_news/%3F350772/Reporte-de-Salud-de-las-cuencas-binacionales-de-los-rios-Mira-y-Mataje-Ecuador-Colombia-2019+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=ec
- WWF-Colombia, Universidad de Maryland, Fundación Omacha, & Instituto Alexander Von Humboldt. (2016). *Reporte de Salud de la cuenca del río Orinoco*.
http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ylxDnBcf1d4J:d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/reportes_de_salud_de_la_cuenca_del_orinoco_2016.pdf+&cd=2&hl=es-419&ct=clnk&gl=ec
- Xu, C.-Y., & Singh, V. P. (1998). A review on monthly water balance models for water resources investigations. *Water resources management*, 12, 20-50.



Darío Paúl Arias-Muñoz. Docente titular de la Universidad Técnica del Norte desde el 2017. Magíster en Gobernanza de los Recursos y Riesgos por la Universidad de Heidelberg-Alemania. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables de la Universidad Técnica del Norte-Ecuador. Su área de trabajo es Ordenamiento Territorial, Manejo de Cuencas Hidrográficas y Gestión de Riesgos Naturales. Entre los años 2019-2021 fue Coordinador de las carreras de Recursos Naturales Renovables y Energías Renovables de la Universidad Técnica del Norte. Actualmente es candidato a Doctor por la Universidad de Zaragoza-España en Ordenación Territorial y Medio Ambiente.



Roberth Paúl Jiménez-Illapa. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables de la Universidad Técnica del Norte. Candidato a Magister en Desarrollo Local mención Planificación, Desarrollo y Ordenamiento Territorial por la Universidad Politécnica Estatal del Carchi. Activista por los derechos de la naturaleza, líder y promotor de procesos de educación ambiental, liderazgo, gobernanza y desarrollo local. Su campo de acción en el sector público ha sido la planificación y gestión de espacios verdes urbanos, y en el sector privado consultor en planificación territorial y gestión ambiental.



Jorge Renato Oquendo Andino. Biólogo de profesión de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Máster en Gestión Ambiental Aplicada a la Industria en la Universidad Internacional SEK. Candidato a PhD. en Ciencias Biológicas de la Universidad de la Habana-Cuba. Docente de la Universidad Técnica del Norte desde el año 2014. Coordinador de la Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables de la Universidad Técnica del Norte, desde el año 2021. Campo de acción en Ciencias Biológicas, gestión ambiental y procesos de remediación ambiental.



Jairo Santiago Cabrera García, Docente e investigador de la Universidad Técnica del Norte desde el año 2018. Máster en Ciencia y Tecnología del Agua. Universidad de Girona, España. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables de la Universidad Técnica del Norte. Tiene una especialidad en Ciencia de Datos y varias certificaciones en docencia, pedagogía y formación. Ha participado en proyectos de investigación científica internacionales con fondos VLIR-UOS de Bélgica y Proyecto LIFE de la Unión Europea. Candidato a Doctor por la Universidad de Ghent-Bélgica en Ingeniería en Biociencias, año 2020. Líneas de investigación en ecología acuática, tratamiento y remediación ambiental, toxicología ambiental y bioindicadores y calidad ambiental.



REPORTE DE SALUD AMBIENTAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI - ECUADOR

Una guía para la evaluación rápida del estado socio-ambiental en cuencas hidrográficas.

El reporte de salud ambiental de una cuenca hidrográfica es una herramienta de diagnóstico, monitoreo ambiental y socio cultural del espacio territorial. Al igual que en un examen médico, los resultados permiten identificar los síntomas de una posible afección. Aunque en este caso será de tipo ambiental, cultural o social. De esta manera se obtienen insumos para la toma de acciones que generen una adecuada gestión y desarrollo territorial.

El reporte de la cuenca hidrográfica del río Ambi determinó la salud a nivel de cuenca y en cada sección altitudinal: alta, media y baja. Se analizó la salud en cuatro componentes: Agua. Biodiversidad. Riesgo Climático y Gobernanza, mediante el uso de seis indicadores e índices.

Finalmente, el contraste de información entre las tres secciones permitió conocer la incidencia urbana en la salud de los ecosistemas.



Río Ambi, Comunidad Piava Chupa - Cotacachi

ISBN: 978-9942-845-44-3



9 789942 845443