GRUPO BLR

GESTIÓN INTEGRADA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS: FUNDAMENTOS, ANÁLISIS GEOESPACIAL, GOBERNANZA Y TOMA DE DECISIONES

ISBN: 978-9907-802-14-6

Luis Ángel Vargas Collaguazo

2026

GESTIÓN INTEGRADA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS: FUNDAMENTOS, ANÁLISIS GEOESPACIAL, GOBERNANZA Y TOMA DE DECISIONES

Luis Ángel Vargas Collaguazo

AUTOR



UTMACH

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Técnica de Machala
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupoblr.com
https://grupoblr.com/libros-investigo
REPOSITORIO



Vargas, L. (2026) Gestión integrada de cuencas hidrográficas: fundamentos, análisis geoespacial, gobernanza y toma de decisiones. Grupo Editorial BLR.

© Luis Ángel Vargas Collaguazo

Gestión integrada de cuencas hidrográficas: fundamentos, análisis geoespacial, gobernanza y toma de decisiones.

ISBN: 978-9907-802-14-6

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

Filiación del autor

Luis Ángel Vargas Collaguazo

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: lvargas@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7619-1323

PREFACIO

El agua, en su incesante recorrido desde las cumbres hasta los océanos, esculpe paisajes, sostiene ecosistemas y da forma a la vida humana. Las cuencas hidrográficas, como unidades naturales de gestión, nos ofrecen una perspectiva privilegiada para comprender la compleja red de interacciones que se teje entre el entorno físico, la biodiversidad y las actividades humanas. Actualmente, los desafíos socioambientales a los que están sometidas las cuencas son cada vez más complejos: la presión sobre los recursos hídricos, la degradación del suelo, el cambio climático y la expansión de las actividades productivas exigen enfoques integrales, pero, sobre todo, participativos.

Este libro de asignatura surge de mi convicción sobre la transdisciplinariedad del manejo integral de las cuencas hidrográficas. Considero fehacientemente que la gestión adecuada de las cuencas es una filosofía de trabajo que reconoce la interdependencia entre los procesos ecohidrológicos, la conservación de servicios ecosistémicos y sobre todo, las actividades antrópicas. Conforme avanzan los capítulos, el lector podrá encontrar una combinación de bases teóricas, herramientas metodológicas y estudios de caso que ilustran la diversidad de situaciones y soluciones posibles en diferentes contextos geográficos y sociales. Se abordan temas como la planificación participativa, la gestión del riesgo, la restauración ecológica y la gobernanza del agua, siempre con el objetivo de fomentar una visión crítica y propositiva.

Este texto está dirigido tanto a estudiantes universitarios como a profesionales y tomadores de decisiones que buscan fortalecer sus

capacidades en la gestión sostenible de cuencas. La estructura del libro permite un aprendizaje paulatino, pero sobre todo, interdisciplinario, partiendo de los conceptos fundamentales hasta llegar a la aplicación práctica en proyectos reales. Cada capítulo invita a la reflexión y al análisis, promoviendo el desarrollo de competencias para enfrentar los retos contemporáneos con creatividad, ética y compromiso.

Solo mediante el conocimiento, la cooperación y la acción informada se podrá garantizar la seguridad hídrica, la resiliencia de los ecosistemas y el bienestar de las presentes y futuras generaciones. Espero que este libro inspire a sus lectores a convertirse en agentes de cambio, capaces de liderar procesos de transformación hacia un manejo más justo, eficiente y respetuoso de nuestros recursos naturales.

ÍNDICE

PREFACIO ..... **i**

ÍNDICE ..... **iii**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **xii**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xiii**

CAPÍTULO I **14**

1 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA **14**

1.1 Elemento de apertura 14

1.1.1 Caso de estudio: Caracterización morfométrica y jerárquica de la cuenca del río Ayuquila 14

1.2 Recursos pedagógicos 15

1.2.1 Preguntas de reflexión. 15

1.3 Fundamento técnico y diagnóstico 17

1.3.1 Recorrido histórico del ciclo hidrológico: Bases científicas que aportaron a la comprensión de las cuencas hidrográficas”.... 17

1.4 Características morfométricas 25

1.4.1 Red hidrográfica 25

1.4.2 Suelos y geología 26

1.4.3 Cobertura vegetal y uso de suelo 26

1.4.4 Clima 26

1.4.5 Hidrología 27

1.5 La cuenca hidrológica 27
1.6 Niveles de jerarquía 29
1.6.1 Cuenca 29
1.6.2 Subcuenca 30
1.6.3 Microcuenca 30
1.6.4 Lote 30
1.7 Parámetros morfométricos de cuencas hidrográficas 31
1.7.1 Área de la cuenca 31
1.7.2 Perímetro de la cuenca 32
1.7.3 Índice de compacidad 32
1.7.4 Longitud del cauce principal 33
1.7.5 Altitud máxima y mínima 33
1.7.6 Relieve total y razón de relieve 33
1.7.7 Densidad de drenaje 33
1.7.8 Frecuencia de corrientes 34
1.7.9 Relación de elongación 34
1.7.10 Índice de bifurcación 35
1.7.11 Red de drenaje y orden de corriente 35
1.7.12 Textura de drenaje 35
1.7.13 Índices de forma 36
1.7.14 Pendiente media y curva hipsométrica 36
1.7.15 Uso del suelo y cobertura vegetal 37

1.8 Como hacer la delimitación de una cuenca hidrográfica 38
1.9 Pasos para delimitar una cuenca hidrográfica 38
1.9.1 Descargar un Modelo de Elevación Digital (DEM) 38
1.9.2 Proyectar y limpiar el DEM 40
1.9.3 Generar los rasters de dirección de drenaje y flujo acumulado 41
1.9.4 Generar cuenca en formato raster y convertirlo en shape 42
1.9.5 Generar red hídrica de la cuenca 43
1.10 Método Pfafstetter: Identificación y mapeo jerárquico de la cuenca 45
1.10.1 Limitaciones 49
1.11 Caracterización morfométrica y física de la cuenca 49
1.12 Erosión y producción de sedimentos: Aplicación del método USLE 50
1.13 Elementos de cierre: 57
1.13.1 Reunamos lo anterior 57
1.14 Revisión del capítulo 58
1.14.1 Cuencas hidrográficas y el ciclo hidrológico 58
1.14.2 La cuenca hidrológica: Concepto, jerarquía y delimitación .. 59
1.14.3 Método Pfafstetter: Identificación y mapeo jerárquico 59
1.14.4 Caracterización morfométrica y física de la cuenca 59
1.14.5 Erosión y producción de sedimentos: Aplicación del método USLE 60

1.14.6 Preguntas para el pensamiento crítico 60

CAPÍTULO II 64

2 MAPEO Y PRIORIZACIÓN DE ACTORES EN LA GESTIÓN DE CUENCAS 64

2.1 Elemento de apertura 64

2.1.1 Caso de estudio: Subcuenca del río Casacay, provincia de El Oro, Ecuador 64

2.2 Recursos pedagógicos 66

2.2.1 Preguntas de reflexión 66

2.3 Gobernanza y planificación participativa 67

2.4 Identificación de actores clave y su influencia en la cuenca . 69

2.4.1 Tipos de actores en la gestión de cuencas 69

2.4.2 ¿Qué es un actor clave? 70

2.4.3 Importancia de identificar actores clave 71

2.4.4 Análisis multicriterio para la priorización de actores en la participación en un fondo de agua. 73

2.4.5 Matriz de poder e interés 75

2.5 Análisis multicriterio para la priorización de actores en la participación de un fondo de agua 78

2.5.1 Tipos de métodos multicriterio 80

2.6 Proceso analítico jerárquico 82

2.7 Agrupamiento de actores con base técnica, considerando escalas espaciales (cuenca, subcuenca, microcuenca, lote) ... 86

2.8 Elementos de cierre: 88
2.8.1 Reunamos lo anterior..... 88
2.9 Revisión del capítulo 89
2.9.1 Identificación de actores clave y su influencia en la cuenca . 89
2.9.2 Tipos de actores en la gestión de cuencas 90
2.9.3 ¿Qué es un actor clave? 90
2.9.4 Importancia de identificar actores clave..... 91
2.9.5 Análisis multicriterio para la priorización de actores en la participación en un fondo de agua..... 91
2.9.6 Matriz de poder e interés 92
2.9.7 Análisis multicriterio para la priorización de actores en la participación de un fondo de agua..... 92
2.9.8 Tipos de métodos multicriterio..... 92
2.9.9 Proceso Analítico Jerárquico (AHP) 93
2.9.10 Preguntas para el pensamiento crítico 93
CAPÍTULO III 95
3 PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA COMO ENFOQUE DINÁMICO PARA LA CONSERVACIÓN Y GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS 95
3.1 Elemento de apertura..... 95
3.1.1 Caso de estudio: Planificación estratégica para la gestión de la subcuenca del río Casacay..... 95
3.2 Recursos pedagógicos 96

3.2.1 Preguntas de reflexión 96
3.3 Zonificación en cuencas hidrográficas: 97
3.3.1 Importancia de la zonificación en la gestión de cuencas..... 97
3.4 Zonificación de la cuenca hidrográfica 99
3.4.1 Basada en criterios de cobertura del suelo y uso actual. 99
3.5 Evaluación de la capacidad de uso del suelo para la planificación 102
3.5.1 Tierras para agricultura y otros usos - arables..... 102
3.5.2 Tierras para uso limitado o no adecuadas para cultivos (conservación) 103
3.5.3 Capacidad de uso de suelo en Ecuador 104
3.5.4 Zonas de amortiguamiento 104
3.6 Elementos de cierre: 108
3.6.1 Reunamos lo anterior..... 108
3.7 Revisión del capítulo 109
3.7.1 Zonificación y análisis territorial 109
3.7.2 Enfoques conceptuales para la gestión del agua 109
3.7.3 Capacidad y aptitud de uso del suelo 110
3.7.4 Clases de capacidad de uso del suelo 110
3.7.5 Evaluación de la capacidad de uso del suelo para la planificación 111
3.7.6 Zonas de amortiguamiento 111

3.7.7 Proceso de planificación de zonas de amortiguamiento..... 111

3.7.8 Funciones y beneficios de las zonas de amortiguamiento... 112

3.7.9 Preguntas para el pensamiento crítico 112

CAPÍTULO IV..... 114

4 CALIDAD DEL AGUA EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS..... 114

4.1 Elemento de apertura..... 114

4.1.1 Caso de estudio: Evaluación de la calidad del agua en la microcuenca del río Tutanangoza, Ecuador 114

4.2 Recursos pedagógicos 116

4.2.1 Preguntas de reflexión..... 116

4.3 Importancia de los monitoreos para la calidad del agua superficial y subterránea..... 118

4.4 Índice de calidad del agua 122

4.5 Tipos de Índices de calidad del agua..... 125

4.6 Índice de calidad del agua de la NSF (NSFWQI) 125

4.7 Índice de Calidad del Agua de Columbia Británica (BCWQI) 134

4.8 Índice de Calidad de Agua de Oregón (OWQI)..... 135

4.9 Elementos de cierre: 138

4.9.1 Reunamos lo anterior..... 138

4.10 Revisión del capítulo..... 139

4.10.1 Importancia de los monitoreos para la calidad del agua superficial y subterránea 139
4.10.2 Índice de calidad del agua 140
4.10.3 Índice de calidad del agua de la NSF (NSFWQI). 140
4.10.4 Índice de calidad del agua de Columbia Británica (BCWQI) 141
4.10.5 Índice de calidad de agua de Oregón (OWQI) 141
4.10.6 Preguntas para el pensamiento crítico 142
CAPÍTULO V 146
5 ÍNDICES DE VEGETACIÓN Y SU APORTE EN EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LAS CUENCAS 146
5.1 Elemento de apertura 146
5.1.1 Caso de estudio: Análisis del estado de la vegetación de una microcuenca Amazónica mediante el NDVI. Caso de estudio microcuenca del rio Sandalias 146
5.2 Recursos pedagógicos 147
5.2.1 Preguntas de reflexión 147
5.3 ¿Qué es el NDVI? 149
5.4 ¿Qué es el EVI? 151
5.5 ¿Qué es el LAI? 152
5.6 ¿Cómo obtener el NDVI, EVI, LAI? 153
5.6.1 A partir de productos de MODIS 153

5.6.2 A partir de imágenes satelitales y SIG 158
5.7 Variables climáticas 160
5.7.1 Precipitación 160
5.7.2 Radiación solar 161
5.7.3 Evapotranspiración 162
5.8 ¿Cómo influyen variables climáticas sobre los índices de vegetación? 163
5.9 Elementos de cierre: 164
5.9.1 Reunamos lo anterior 164
5.10 Revisión del capítulo 166
5.10.1 ¿Qué es el NDVI? 166
5.10.2 ¿Qué es el EVI? 166
5.10.3 ¿Qué es el LAI? 167
5.10.4 ¿Cómo obtener el NDVI, EVI y LAI? 167
5.10.5 Variables climáticas y su influencia 167
5.10.6 Preguntas para el pensamiento crítico 168
BIBLIOGRAFÍA 172

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tasas de tolerancia a la pérdida de suelo. 51
Tabla 2. Valores del Factor "K". 52
Tabla 3. Estimación del Factor LS. 54
Tabla 4. Factor "C" – Cultivos. 55
Tabla 5. Factor "C" – Labranza. 56
Tabla 6. Factor "P". 57
Tabla 7. Tipos de Actores. 70
Tabla 8. Tipos de Actores. 74
Tabla 9. Tipos de AMC. 81
Tabla 10. Etapas del AHP. 83
Tabla 11. Etapas del AHP. 86
Tabla 12. Ejemplo de agrupamiento técnico de actores. 87
Tabla 13. Clases de capacidad de uso. 100
Tabla 14. Enfoque y funciones de las zonas de amortiguamiento. 107
Tabla 15. Calidad del agua asociada al valor del ICA-NSF. 128
Tabla 16. Factores de ponderación asignados a cada parámetro según la ICA-NSF. 129
Tabla 17. Ajuste de curvas para la determinación de factores de escala Q_i. 131
Tabla 18. Rangos de clasificación para NDVI. 150
Tabla 19. Expresiones en Landsat 8 & Sentinel-2. 159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El proceso para delimitar una cuenca. 39
Figura 2. Proyección del DEM. 40
Figura 3. Rasters de dirección de drenaje y flujo acumulado. 41
Figura 4. Cuenca en formato Raster. 42
Figura 5. Cuenca en formato Shape. 43
Figura 6. Colocación de los Valores. 44
Figura 7. Generación red hídrica de la cuenca. 44
Figura 8. Sistema Pfafstetter. 47
Figura 9. El proceso para delimitar una cuenca. 77
Figura 10. Esquema de criterios y alternativas. 84
Figura 11. Zonas de amortiguamiento en un paisaje agrícola. ... 105
Figura 12. Diagramas originales del ICA-NSF. Factores de escala, para los parámetros involucrados en el (a) demanda bioquímica de oxígeno; (b) porcentaje de saturación de oxígeno; (c) coliformes fecales; (d) nitratos; (e) potencial de hidrógeno; (f) cambio de t. 130
Figura 13. Icono cuadrado. 154

CAPÍTULO I

1 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

1.1 Elemento de apertura

1.1.1 Caso de estudio: Caracterización morfométrica y jerárquica de la cuenca del río Ayuquila

La cuenca del río Ayuquila, ubicada en el occidente de México, constituye un ejemplo emblemático de cómo el análisis morfométrico y el mapeo jerárquico son herramientas fundamentales para la gestión integral de los recursos hídricos. Con una superficie de 3,642 kilómetros cuadrados, esta cuenca evidencia una red de drenaje de tipo dendrítico, conformada por más de 10,000 cursos de agua que se distribuyen en 24 subcuencas tributarias principales (Guevara Gutiérrez, Olquín López, Mancilla Villa, & Barreto García, 2019).

Según el estudio morfométrico se evidencia que la cuenca tiene un factor de formas bajo (0.33), esto indica que posee una configuración alargada lo que reduce el riesgo de inundaciones súbitas, esta favorece a una distribución más gradual de la escorrentía lo largo del cauce principal. Este parámetro, junto con una densidad de drenaje de 0.31 km/km², sugiere la presencia de suelos relativamente permeables y una cobertura vegetal que favorece la infiltración y la regulación natural del flujo hídrico. Además, el relieve de la cuenca se caracteriza por pendientes pronunciadas en las zonas de cabecera, superiores al 15%, que contrastan con los valles planos de las zonas bajas, condicionando los procesos de erosión, transporte y sedimentación (Liza Chamorro, 2018).

La identificación y el mapeo jerárquico de la red fluvial, basados en la metodología de Strahler, permitieron distinguir cinco órdenes de drenaje, donde el río Ayuquila alcanza el cuarto orden al integrar tributarios de menor jerarquía. Esta jerarquización fluvial, realizada mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos digitales de elevación, facilita la segmentación funcional de la cuenca en tres zonas principales: la zona alta, destinada a la captación hídrica y conservación ambiental; la zona media, caracterizada por valles agrícolas y transporte de sedimentos; y la zona baja, donde predominan las planicies de descarga y deposición (Cotler Avalos, Mondragón Bonilla, Díaz Ponce, & Garrido Pérez, 2007).

1.2 Recursos pedagógicos

1.2.1 Preguntas de reflexión.

a. Morfometría de Cuencas Hidrográficas: ¿Qué se entiende por morfometría de las cuencas hidrográficas y cuál es su importancia?

La morfometría de cuencas hidrográficas implica el análisis cuantitativo de la forma, tamaño y estructura de una cuenca, permitiendo comprender la influencia de estas características en la dinámica hidrológica. En la cuenca del río Ayuquila, el análisis morfométrico muestra un factor de forma bajo (0.33), lo que indica una configuración alargada que favorece la distribución gradual de la escorrentía superficial y reduce el riesgo de inundaciones súbitas. Además, la densidad de drenaje de 0.31 km/km² sugiere suelos permeables y una cobertura vegetal que promueve la infiltración y la regulación natural

del flujo hídrico. Las pendientes superiores al 15% en las zonas de cabecera condicionan los procesos de erosión y sedimentación (Liza Chamorro, 2018).

b. Jerarquización y Ordenamiento de la Red de Drenaje. ¿En qué consiste la jerarquización de la red de drenaje de según al método de Strahler?

El método de Strahler para la jerarquización de la red de drenaje permite clasificar los cursos de agua dependiendo de su orden y relaciones dentro de la red fluvial. Se identificaron cinco ordenes de drenaje en la cuenca del rio Ayuquila, el río principal alcanza el cuarto orden tras la incorporación sucesivas de tributarios de menor jerarquía. Este análisis, apoyado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos digitales de elevación, facilita la segmentación funcional de la cuenca y la planificación de estrategias de manejo y conservación (Cotler Avalos, Mondragón Bonilla, Díaz Ponce, & Garrido Pérez, 2007).

c. Zonificación Funcional de la Cuenca. ¿Qué es la zonificación funcional de una cuenca hidrográfica?

La zonificación funcional divide la cuenca en áreas con características y funciones específicas. En la cuenca del río Ayuquila, se distinguen tres zonas principales: la zona alta, destinada a la captación hídrica y conservación ambiental; la zona media, caracterizada por valles agrícolas y transporte de sedimentos; y la zona baja, donde predominan las planicies de descarga y deposición (Guevara Gutiérrez, Olquín López, Mancilla Villa, & Barreto García, 2019).

1.3 Fundamento técnico y diagnóstico

1.3.1 Recorrido histórico del ciclo hidrológico: Bases científicas que aportaron a la comprensión de las cuencas hidrográficas"

Las cuencas hidrográficas constituyen unidades territoriales que mantienen una relación indivisible con la hidrología y el ciclo del agua. Estos ecosistemas son delimitados por divisorias topográficas que reciben y canalizan los flujos hídricos, esto convierte a la cuenca en un espacio idóneo para entender cómo se comporta el agua en territorios determinados. Para entender completamente se requiere adoptar un enfoque sistémico que examine los procesos hidrológicos que ocurren el ellas como parte de un mismo sistema interconectado.

De acuerdo con Deming, (2005); Deming, (2014) y Deming, (2017) el problema más antiguo y significativo de la hidrogeología es comprender la naturaleza del ciclo hidrológico.

En el estudio de las cuencas hidrográficas, los científicos han planteado la fundamental cuestión de cómo se logra mantener el equilibrio hídrico que distribuye el agua entre la atmósfera, la tierra y los océanos. Estas interrogantes impulsaron investigaciones sistemáticas del ciclo hidrológico y su concepto que conocemos en la actualidad. "Sin embargo comprender cómo ocurría fue un problema durante miles de años" (Deming, 2017).

El inglés Edmond Halley (1656-1743), un reconocido astrónomo, físico, matemático y geofísico, hizo una contribución crucial para comprender el funcionamiento del ciclo hidrológico. En el siglo XVII, se preguntó

cómo era posible que el equilibrio entre el agua que fluía constantemente en los ríos y salía a los océanos mantuviera su nivel sin que estos aumentaran su cauce. Halley centró su conocimiento en experimentos sobre la evaporación, lo que lo llevó a convertirse en uno de los cofundadores, junto a Pierre Perrault (1611-1680) y Edme Mariotte (c. 1620-1684), de lo que hoy conocemos como hidrología experimental.

Halley, en 1687, demostró experimentalmente que la cantidad de agua que se evapora de los océanos y los cursos de agua se precipita en forma de lluvia y que era suficiente volumen para reponer el caudal de los ríos (Biswas, 1970). En su primer trabajo hidrológico titulado "An Estimate of the Quantity of Vapour Raised Out of the Sea by the Warmth of the Sun", Halley (1687) condujo un experimento donde calentó un recipiente con agua hasta alcanzar la temperatura del aire en los veranos más calurosos y midió la cantidad evaporada, concluyendo que esta era "abundantemente suficiente para proporcionar todas las lluvias, manantiales y rocíos" (Halley, An estimate of the quantity of vapour raised out of the sea by the warmth of the sun, 1687).

Según Halley, una parte de los vapores que son llevados a la tierra es devuelta por medio de los ríos que desembocan al mar, de donde provienen originalmente, y la otra parte de estos vapores cae en forma de rocío durante la noche; en los mares se precipita en forma de lluvia antes de poder alcanzar la tierra, y una tercera parte cae en tierras bajas nutriendo los ecosistemas. Este autor concluye que es un proceso progresivo mas no inmediato en el cual cada partícula de agua es devuelta al mar, y esto lo definió como la "circulación" en su segundo trabajo hidrológico "An Account of the Circulation of the Watry

Vapours of the Sea, and of the Cause of Springs" (Halley, 1691; Biswas, 1970).

Pierre Perrault (1611-1680) realizó contribuciones significativas en su obra De l'origine des fontaines (1674), donde argumentó que el flujo de las corrientes de agua depende tanto de la precipitación como de la infiltración del agua en el suelo. A través de un enfoque metódico, se propuso medir la cantidad de lluvia que caía en una región específica y comparó el volumen de agua que generaba en afluentes y ríos.

Perrault usó registros de precipitaciones y mediciones del caudal de las fuentes para llevar a cabo sus análisis. Sus observaciones le permitieron concluir que existe una correlación directa entre la cantidad de lluvia y el flujo de agua en los ríos. En este sentido, manifestó que la capacidad de un río para transportar agua está relacionada directamente con la superficie de su cuenca y la cantidad de precipitación que recibe (Perrault, 1674). El trabajo de Perrault establecido así las bases que permite comprender de manera más cuantitativa la hidrología y el ciclo del agua.

Edme Mariotte (1620–1684) realizó avances importantes en la comprensión del ciclo hidrológico, consolidando y ampliando las teorías planteadas inicialmente por Pierre Perrault. A diferencia de su predecesor, Mariotte respaldó sus conclusiones mediante análisis cuantitativos considerablemente más rigurosos y sistemáticos. En 1686, publicó su obra Traité du Mouvement des Eaux et des Autres Corps Fluides, en la cual presentó estudios detallados sobre la infiltración relacionados con los regímenes de precipitación y aportó metodologías

mejoradas para la medición de caudales fluviales. A través de experimentos meticulosos, Mariotte demostró que, en las zonas cercanas a las fuentes del Río Sena, la cantidad de agua de lluvia que caía era al menos siete veces mayor que la que el río evacuaba, confirmando así que las teorías de Perrault eran acertadas. Además, en su trabajo reconoció que el agua de lluvia infiltrada continúa descendiendo "hasta encontrar un suelo arcilloso o rocoso que, al no poder atravesarlo, fluye a lo largo, hasta encontrar una salida al aire, donde se convierte en manantial" (Dooge, The development of hydrological concepts in Britain and Ireland between 1674 and 1874, 1974, pág. 285).

Esta observación demostró que Mariotte comprendió el papel determinante que los diferentes tipos de suelo y las capas restrictivas desempeñan en el proceso de infiltración y la formación de manantiales, complementando la comprensión moderna del movimiento del agua subterránea.

El cierre conceptual del ciclo hidrológico se alcanzó a principios del siglo XIX, cuando John Dalton presentó la primera descripción completa y basada en observaciones fiables del ciclo del agua, integrando procesos como la evaporación, la precipitación, la escorrentía y el almacenamiento subterráneo (Dooge, 1974; Rosbjerg, 2019). Mediante experimentos Dalton demostró que la evaporación resulta proporcional al déficit de presión de vapor y que se pude cuantificar tanto la cantidad de agua evaporada como la precipitada. Mediante estos hallazgos se formularon los balances hídricos regionales y la modelación matemáticas de procesos hidrológicos (Dooge, 1974).

Durante el siglo XIX y principios del siglo XX, el desarrollo de la hidrología estuvo muy vinculada a la ingeniería hidráulica, sobre todo debido a la necesidad de diseñar infraestructuras como presas, canales y sistemas de drenaje urbano. En este periodo se desarrollaron conceptos fundamentales, como la ecuación de Darcy para el flujo subterráneo (1856), el método racional para el cálculo de caudales máximos en cuencas urbanas y la curva de masa para el diseño de embalses (Rosbjerg & Rodda, 2019; Rippl, 1883).

Durante el siglo XX la hidrología se convirtió en una ciencia más técnica a diferencia a la hidráulica tradicional. Durante esta transición se desarrollaron ecuaciones matemáticas más avanzadas, como el análisis estadístico de series temporales y la modelización de sistemas, esto permitió enfrentar de mejor manera la incertidumbre y la variabilidad que caracterizan a los procesos hidrológicos. Innovaciones como la ecuación de Richards para el flujo no saturado ampliaron el alcance de la hidrología, integrando procesos tanto de superficie como de subsuelo (Rosbjerg & Rodda, 2019).

A nivel institucional, la creación de la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS) en el siglo XX fue clave para la consolidación de la hidrología como ciencia global, promoviendo la cooperación internacional ,la estandarización de métodos y la formación de una comunidad científica propia (Rosbjerg & Rodda, 2019).La hidrología adquirió gran relevancia en la planificación y la gestión de los recursos hídricos, especialmente tras la segunda Guerra mundial, cuando la demanda de información hidrológica fiable se volvió esencial

para el desarrollo económico y la mitigación de riesgos asociados a inundaciones y sequías.

En las últimas décadas, la hidrología ha incorporado enfoques interdisciplinarios y ha respondido a nuevos retos como el cambio climático, la contaminación del agua, la gestión sostenible de cuencas y la reducción de la incertidumbre en la predicción hidrológica. El avance en la recolección y análisis de datos ,junto con el desarrollo de modelos numéricos y sistemas de observación remota ,ha permitido una comprensión más profunda y precisa de los procesos hidrológicos a múltiples escalas (Rosbjerg & Rodda, 2019).

En 1802, Dalton logró dar "una descripción completa y correcta del ciclo hidrológico basada en observaciones fiables" (Rosbjerg & Rodda, 2019, pág. 114), consolidando así su posición como figura clave en el desarrollo de la hidrología científica. El legado de la hidrología moderna está marcado por los aportes científicos pioneros que sentaron las bases conceptuales matemáticas y la comprensión de los procesos relacionado con el agua.

Henry Darcy (1856) dio uno de los primeros grandes pasos en la hidrología, al demostrar con experimentos de agua fluyendo por arena dentro de tubos, que el flujo subterráneo a través de medios porosos depende del gradiente hidráulico y de las propiedades del material por el que pasa. Con esto se comprendió que la velocidad del agua en el subsuelo está determinada por la diferencia de presión y la distancia recorrida, esto permitió sentar las bases de la hidrología cuantitativa moderna. Este descubrimiento, recogido en su obra “Les fontaines

publiques de la ville de Dijon", se convirtió en el punto de partida para la modelización y el cálculo del flujo subterráneo, permitiendo abordar problemas de abastecimiento y gestión del agua con un enfoque científico (Darcy, 1856).

Para el diseño de embalses, Wanzel Rippl (1883) se introdujo una metodología innovadora importante: la "Curva Masa". Esto lo explica en su publicación "The Capacity Of Storange-Reservoirs for Wter-Supply", un embalse existe para "equilibrar las fluctuaciones de suministro y demanda durante cualquier periodo para el cual las observaciones de lluvia están disponibles (Rippl, 1883, pág. 271). Rippl demostró que la capacidad de almacenamiento requerida no se define únicamente por el año con menor precipitación, sino por el periodo en el que ocurre la mayor diferencia acumulada entre el suministro y la demanda. Esta visión permitió diseñar embalses más seguros y eficientes, capaces de garantizar el abastecimiento incluso en situaciones de sequía prolongada.

La comprensión del proceso de infiltración avanzó significativamente con Green y Ampt (1911), quienes aplicaron directamente la ley de Darcy para proponer un modelo matemático del proceso. En su trabajo "Studies on Soil Physics:The Flow of Air and Water through Soils".definieron tres constantes fundamentales del suelo: "el espacio poroso específico, la permeabilidad al agua y el coeficiente de capilaridad (Green, 1911, pág. 3). Su modelo consideraba un suelo homogéneo como una conductividad hidráulica constante y un frente de humectación saturado que avanza como un desplazamiento tipo pistón,

proporcionando así una base matemática para predecir cuánta agua penetrará en el suelo y cuánta se convertirá en escorrentía superficial.

Howard Penman (1948) integró dos enfoques teóricos sobre la evaporación: el aerodinámico, que considera la evaporación como resultado del transporte turbulento de vapor, y el energético, que la interpreta como una forma de degradar la radiación entrante. En su investigación "Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass", desarrolló una ecuación combinada que elimina el parámetro más difícil de medir la temperatura superficial y que permite, por primera vez, realizar estimaciones teóricas de las tasas de evaporación a partir de datos meteorológicos estándar (Penman, 1948, pág. 120). Este método permitió realizar estimaciones retrospectivas de evaporación, constituyendo una contribución fundamental para la gestión integral de los recursos hídricos.

Para la caracterización de una cuenca es necesario analizar detalladamente los factores físicos, biológicos y sociales, esto permite entender cómo se relacionan entre sí para gestionarlos de manera adecuada.

La consolidación de la compresión del ciclo hidrológico permitió que la visión y el manejo de las cuencas experimente un cambio profundo. Cada descubrimiento realizado acerca del movimiento del agua en sus diferentes fases, sea subterránea, superficial y atmosférica trajo consigo métodos y conceptos que hacen que sea más eficiente y responsable el análisis y la gestión de estos espacios.

El paso de las teorías iniciales a los modelos actuales de gestión adaptativa ha llevado a considerar las cuencas como sistemas vivos, donde la naturaleza y la sociedad interactúan de forma constante y recíproca. De este modo, el ciclo del agua no solo revela los mecanismos que rigen el flujo y la distribución del recurso hídrico, sino que también sirve de guía para la conservación, el aprovechamiento sostenible y la adaptación de las cuencas ante los retos ambientales y sociales que enfrentamos hoy y en el futuro.

1.4 Características morfométricas

Las características morfométricas son fundamentales para entender el comportamiento hidrológico de una cuenca. Farrukh destaca que estas características permiten analizar la forma y el tamaño de una cuenca lo que es crucial para predecir su respuesta hidrológica, comprende la complejidad de las redes hidrográficas y su influencia en los procesos hidrológicos (Farrukh, Meraj, & A.S., 2013).

1.4.1 Red hidrográfica

La red hidrográfica comprende la manera en la que se distribuye el agua en una cuenca. Strahler (1957) desarrolló un método de análisis que determina la complejidad de las redes hidrográficas, lo que ayuda a entender el funcionamiento, usando este sistema de información geográfica (SIG) y la teledetección permite evaluar con precisión los parámetros lineales geométricos y de textura en las cuencas hidrográficas (Farrukh et al., 2013;Amatulli et al., 2022)

1.4.2 Suelos y geología

Los suelos y la geología son factores determinantes en la hidrología de una cuenca hidrográfica influye en múltiples procesos del ciclo hidrológico. Las propiedades físicas del suelo que controlan directamente el movimiento del agua a través del perfil edáfico. Schoonover y Crim, (2015) exponen que las características del suelo están intrínsecamente relacionadas con el movimiento del agua, la calidad hídrica y la productividad de la vegetación.

1.4.3 Cobertura vegetal y uso de suelo

La cobertura vegetal y el uso del suelo son esenciales en la caracterización de las cuencas. Turner Gardner, y O'Neill (2001) explican que diferentes estudios sobre las interacciones entre la tierra y el agua conduce a la escorrentía, pues a medida que el porcentaje de cobertura vegetal impermeable aumenta al 10-20% la escorrentía se duplica, mientras que al 35-50% se triplica; los problemas que se asocian a este factor han relacionado la escorrentía con la carga de nutrientes en los sistemas acuáticos con la dinámica de tierras altas (Turner, Gardner, & O'Neill, 2001).

1.4.4 Clima

El clima en el régimen hidrológico destaca la influencia de la evapotranspiración. Pielke (1990) destaca como el clima influye en la evapotranspiración y, por lo tanto, en la disponibilidad de agua. Además, Barry (2010) explica cómo los patrones climáticos afectan la distribución y cantidad de precipitaciones.

1.4.5 Hidrología

La hidrología es una disciplina esencial que permite comprender las dinámicas del agua en el medio ambiente y como interactúa con los demás componentes del sistema terrestre. Ward & Trimble (2004) definen a la hidrología como el estudio del agua, sus movimientos, su distribución y su influencia en los procesos físicos y biológicos dentro de una cuenca hidrográfica. En su obra Environmental Hydrology, los autores mencionan que se debe entender los procesos hidrológicos de manera integral, donde se fusionen el enfoque cualitativo y cuantitativos, y hacer énfasis en la necesidad de aplicar estos conocimientos para solucionar problemas ambientales reales.

Para Ward & Trimble (2004) la hidrología no puede entenderse aisladamente, sino que requiere una perspectiva interdisciplinaria donde involucre elementos de la geología, la ecología, la ingeniería y la geografía. Esta visión holística permite analizar cómo los cambios en el uso del suelo, la urbanización, la agricultura intensiva y otras actividades humanas alteran el ciclo hidrológico natural, provocando fenómenos como la erosión del suelo, el aumento de la escorrentía superficial y la degradación de los ecosistemas acuáticos. También mencionan la importancia que tienen las nuevas tecnologías como los sistemas de informacion geográfica y la teledetección para monitorear y gestionar los recursos hídricos.

1.5 La cuenca hidrológica

La cuenca hidrográfica es el espacio donde la naturaleza y la sociedad se entrelazan en un sistema dinámico y complejo. Vista de forma

integral, la cuenca no es solo un área delimitada que canaliza las escorrentías superficiales y subterráneas, también reúne elementos biofísicos como el clima, suelo, vegetación y fauna, junto con factores sociales, económicos, culturales y jurídicos. Estos componentes interactúan y condicionan tanto el funcionamiento ecológico como la organización y el desarrollo humano del territorio (Gaspari, et al., 2013, págs. 5-6).

La delimitación de la cuenca, basada en criterios topográficos, establece el marco físico de un sistema de drenaje que incluye ríos, afluentes y diversas unidades ecológicas. Sin embargo, su verdadera dimensión se revela al considerar la cuenca como un sistema de relaciones sociales y económicas, en el que la gestión de los recursos naturales y la toma de decisiones requieren la integración de saberes y la participación de los actores involucrados (Gaspari, et al., 2013, págs. 6-7).

Un enfoque metodológico para el manejo de cuencas hidrográficas debe reconocer la necesidad de abordar la complejidad del sistema mediante la investigación interdisciplinaria, el diagnóstico detallado de sus componentes y la aplicación de herramientas tecnológicas, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Este proceso permite subdividir la cuenca en unidades más pequeñas, subcuencas y microcuencas, facilitando la gestión diferenciada y adaptada a las particularidades de cada sector (Gaspari, et al., 2013, págs. 7,13-14).

La subdivisión jerárquica de la cuenca hidrográfica constituye una de las bases metodológicas del modelo SWIM, tal como lo exponen Krysanova, Müller-Wohlfeil, y Becker (1998) .En su trabajo, los autores

proponen la segmentación de la cuenca en subcuencas gestionadas mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), así como en unidades hidrológicamente homogéneas denominadas hidrotopos, con el objetivo de simular de manera detallada los procesos hidrológicos y el transporte de contaminantes a distintas escalas espaciales. Esta aproximación permite abordar la complejidad de los sistemas de cuenca mediante la integración de información espacial y la representación de la variabilidad interna del territorio, lo que resulta fundamental para el diagnóstico y la planificación de intervenciones orientadas a la gestión sostenible de los recursos hídricos (Krysanova, Müller-Wohlfeil, & Becker, 1998).

Asimismo, los umbrales de área de drenaje aplicados en herramientas semi distribuidas, como SWAT, facilitan la delimitación de subcuencas y su posterior subdivisión en microcuencas y unidades de respuesta hidrológica similares a lotes de manejo, mejorando la precisión del modelo y respaldando la disposición óptima de prácticas de conservación (Minh Tuan Bui, 2021).

1.6 Niveles de jerarquía

1.6.1 Cuenca

Una cuenca hidrográfica se define como "un área de tierra en la que toda la precipitación que cae drena (es decir, 'fluye') hacia el mismo lugar, hacia una misma salida, como un arroyo, río, lago u océano" (Edwards, Williard, & Schoonover, 2015, pág. 1).Las cuencas hidrográficas son unidades fundamentales para la gestión de los recursos hídricos y están delimitadas por divisorias topográficas.

1.6.2 Subcuenca

Las subcuencas son divisiones más pequeñas dentro de una cuenca hidrográfica mayor, formadas al subdividir la cuenca principal en áreas de drenaje más pequeñas que alimentan a los afluentes del río o arroyo principal. El tamaño y número de subcuencas puede afectar significativamente los procesos hidrológicos y las prácticas de gestión dentro de la cuenca principal (Tripathi et al., 2006, citado en Chen et al., 2021).

1.6.3 Microcuenca

Una microcuenca puede entenderse como una unidad hidrológica de pequeña extensión, generalmente entre 100 y 1,000 hectáreas, donde una comunidad gestiona de manera integrada los recursos naturales, como el suelo, el agua, la vegetación y la fauna, tanto doméstica como silvestre. Esta escala permite planificar y desarrollar acciones de conservación y manejo sostenible adaptadas a las características y necesidades locales (Kumar, Bhardwaj, Kumar, & Padaliya, 2017).

1.6.4 Lote

En la jerarquía de unidades dentro de una cuenca hidrográfica, el lote representa la unidad mínima de manejo y análisis, ubicada por debajo de la microcuenca y la subcuenca. Un lote se define como una parcela individual de terreno, delimitada dentro de una microcuenca o subcuenca, utilizada para actividades agrícolas, experimentales o de monitoreo ambiental (FAO, 2000).

En la jerarquía de unidades de una cuenca hidrográfica, el lote constituye la unidad mínima de manejo, definida como una parcela individual dentro de una microcuenca o subcuenca, donde se implementan y evalúan prácticas específicas de gestión de recursos. Este enfoque es coherente con la perspectiva de Nabi, (2017), quienes, al analizar la efectividad de intervenciones de conservación en microcuencas mediante modelación hidrológica, demuestran la importancia de trabajar a escala de pequeñas unidades de terreno para optimizar la gestión y el control de procesos como la erosión.

Estos conceptos resultan fundamentales para delimitar una cuenca hidrográfica en un entorno de coordenadas, el identificar y jerarquizar de manera ordenada los elementos que definen su estructura: la red de drenaje principal y secundaria, los puntos de cota que marcan las pendientes y, finalmente, las líneas divisorias de aguas. Así, cada etapa del análisis aporta información importante para trazar de manera precisa los límites de la cuenca.

1.7 Parámetros morfométricos de cuencas hidrográficas

1.7.1 Área de la cuenca

El área de la cuenca se define como la superficie total proyectada sobre un plano horizontal y delimitada por la divisoria de aguas, constituyendo uno de los parámetros más importantes en el análisis morfométrico, ya que determina el volumen potencial de agua que puede ser interceptado y el potencial de escurrimiento y descarga del sistema fluvial (Chimdesa et al., 2020 ; Rai, et al., 2019).El tamaño del área de la cuenca influye directamente en la cantidad de precipitación capturada, generando

mayores volúmenes de escurrimiento y descargas máximas en cuencas extensas; sin embargo, cuencas de menor tamaño también pueden experimentar inundaciones y sedimentación significativas debido a la influencia de otros parámetros morfométricos, como la forma, la red de drenaje y el relieve (Chimdesa et al., 2020 ; Rai, et al., 2019; Rahaman et al.,2015).

1.7.2 Perímetro de la cuenca

El perímetro de una cuenca se define como la longitud total que delimita su contorno, representando la extensión de la divisoria de aguas. Este parámetro es fundamental para el cálculo de índices morfométricos como la forma y la compacidad de la cuenca (Chimdesa Abdeta et al., 2020; Rai et al., 2019). Según Chimdesa Abdeta et al. (2020), el perímetro no solo indica el tamaño de la cuenca, sino que también contribuye significativamente a la determinación de la respuesta hidrológica del sistema.

1.7.3 Índice de compacidad

El índice de compacidad hace una comparación entre el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de igual área, lo que permite inferir la tendencia de la cuenca a concentrar escurrimientos. Los valores que se acercan a uno indican formas más circulares y mayor capacidad de concentración de caudales. Este índice es fundamental para determinar la susceptibilidad de una cuenca a crecidas repentinas y al potencial de erosión (Dar, et al., 2013).

1.7.4 Longitud del cauce principal

La longitud del cauce principal establece la distancia máxima que recorre el río principal de la cuenca, desde su nacimiento en la cabecera hasta su desembocadura. Este parámetro influye directamente en el tiempo de concentración y en el desplazamiento del flujo hídrico, ya que determina el trayecto por donde se moviliza el mayor volumen de agua en la cuenca (Dar et al., 2013). De acuerdo con Chimdesa Abdeta et al. (2020), la longitud del cauce principal es representativa del canal principal de la cuenca y resulta fundamental para estimar los tiempos de respuesta hidrológica ante eventos de precipitación.

1.7.5 Altitud máxima y mínima

La altitud máxima y mínima representan las cotas extremas dentro de la cuenca, determinando el rango altitudinal. Estas cotas condicionan el gradiente de energía, la erosión potencial y la dinámica del flujo superficial (Chimdesa Abdeta et al., 2020).

1.7.6 Relieve total y razón de relieve

El relieve total es la diferencia entre la altitud máxima y mínima de la cuenca. La razón de relieve se calcula como la relación entre el relieve total y la longitud máxima de la cuenca, indicando la pendiente media y la energía disponible para el flujo superficial (Rai et al., 2019).

1.7.7 Densidad de drenaje

La densidad de drenaje se define como la relación entre la longitud total de todos los cursos de agua y el área de la cuenca. Este parámetro es un

indicador importante del grado de disección del terreno, así como de potencial de escurrimiento superficial (Rahaman et al., 2015; Chimdesa Abdeta et al., 2020). Según Rai et al. (2019), valores elevados de densidad de drenaje suelen asociarse a materiales del subsuelo poco permeables, vegetación escasa y relieves montañosos, lo que genera respuestas hidrológicas más rápidas ante eventos de precipitación.

1.7.8 Frecuencia de corrientes

La frecuencia de corrientes es el número de cauces por unidad de área. Junto con la densidad de drenaje, permite evaluar el grado de desarrollo de la red hidrográfica y la susceptibilidad a la erosión y a procesos de escurrimiento superficial (Rai et al., 2019).

1.7.9 Relación de elongación

La relación de elongación se define como la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la cuenca y la longitud máxima de la misma, clasificando la forma de la cuenca desde muy alargada hasta casi circular, lo que influye en la rapidez de respuesta hidrológica (Dar et al., 2013; Chimdesa Abdeta et al., 2020). Según Chimdesa Abdeta et al. (2020), los valores típicos varían entre 0.6 y 1.0, donde las cuencas con valores cercanos a 1.0 presentan formas más circulares y generalmente se desarrollan en regiones de bajo relieve, mientras que las cuencas elongadas suelen asociarse con regiones de relieve pronunciado.

1.7.10 Índice de bifurcación

El índice de bifurcación mide la relación entre el número de cauces de un orden y el número de cauces del orden siguiente, siendo útil para describir la ramificación de la red de drenaje y la influencia de la estructura geológica sobre el desarrollo de la red fluvial (Rahaman et al., 2015; Rai et al., 2019). Rai et al. (2019) indican que valores bajos de este índice caracterizan a cuencas que han sufrido pocas perturbaciones estructurales y cuyo patrón de drenaje no ha sido distorsionado por el control geológico o estructural.

1.7.11 Red de drenaje y orden de corriente

La red de drenaje es el conjunto de cursos de agua que canalizan el escurrimiento hacia el punto de salida. El orden de corriente, generalmente determinado por el método de Strahler, clasifica jerárquicamente los cauces y permite analizar la estructura y ramificación de la red hidrográfica (Rai et al., 2019).

1.7.12 Textura de drenaje

La textura de drenaje es la relación entre el número total de cauces y el perímetro de la cuenca. Depende de la litología, la pendiente y la capacidad de infiltración del terreno, clasificándose en texturas muy gruesas, gruesas, medias, finas y muy finas (Rai et al., 2019).

1.7.13 Índices de forma

Factor de forma: Relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de su longitud máxima; valores bajos indican cuencas alargadas y valores altos, cuencas más circulares (Rai et al., 2019).

- ***Relación de elongación****:* Relación entre el diámetro de un círculo de igual área que la cuenca y la longitud máxima; clasifica la forma desde alargada hasta circular, influyendo en la rapidez de respuesta hidrológica (Chimdesa Abdeta et al., 2020).
- ***Índice de compacidad*****:** Relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área; valores cercanos a 1 indican formas más compactas y mayor tendencia a concentrar escurrimientos (Rai et al., 2019).
- ***Razón de circularidad:*** Relación entre el área de la cuenca y la de un círculo con el mismo perímetro; valores bajos indican cuencas alargadas y valores altos, cuencas circulares (Rai et al., 2019).

1.7.14 Pendiente media y curva hipsométrica

La pendiente media es el promedio de las pendientes de la cuenca, influyendo en la velocidad del escurrimiento y el potencial erosivo. La curva hipsométrica describe la distribución de áreas en función de la altitud, permitiendo inferir el grado de desarrollo y erosión del relieve (Chimdesa Abdeta et al., 2020).

1.7.15 Uso del suelo y cobertura vegetal

El uso del suelo y la cobertura vegetal influyen directamente en la infiltración, el escurrimiento y la erosión. Son parámetros fundamentales en la caracterización física y en la modelación hidrológica, ya que modifican la capacidad de retención, la generación de escurrimientos y la dinámica sedimentaria (Rahaman et al., 2015).

La caracterización morfométrica y física de una cuenca es esencial porque permite cuantificar y analizar objetivamente la forma, el relieve y la red de drenaje, aspectos fundamentales para comprender la dinámica hidrológica, la respuesta ante eventos extremos y la gestión sostenible de los recursos hídricos. Estos parámetros aportan información clave sobre el grado de infiltración, escorrentía, erosión y transporte de sedimentos, también facilitan la comparación entre distintas cuencas y la identificación de áreas prioritarias para la conservación y el manejo. El análisis morfométrico representa una de las primeras etapas en los estudios hidrológicos, ya que permite interpretar y predecir cómo se comportan los caudales, la susceptibilidad a inundaciones y la disponibilidad de agua, incluso en contextos donde es limitada la información primaria. La integración de estos parámetros en la caracterización física de la cuenca es relevante no solo para la planificación y gestión de los recursos naturales, sino también para la toma de decisiones en la prevención de riesgos y el desarrollo territorial sostenible (Chimdesa Abdeta et al., 2020; Rahaman et al., 2015; Rai et al., 2019).

1.8 Como hacer la delimitación de una cuenca hidrográfica

La delimitación de cuencas hidrográficas es una etapa esencial para entender y gestionar los recursos hídricos, pues establece los límites del territorio que aporta escorrentía a un punto de interés. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han revolucionado este proceso al automatizar la delimitación de cuencas hidrográficas utilizando Modelos Digitales de Elevación (DEM) y algoritmos de dirección y acumulación de flujo (Morad & Pérez, 2001). En la actualidad existen varios programas de SIG que permiten delimitar una cuenca hidrográfica de manera automática y precisa, entre ellos se encuentra QGIS. Este es un sistema de información geográfica de uso abierto que permite editar, visualizar y analizar datos geoespaciales. Además, también permite integrar complementos con enfoque específicos en diferentes áreas de SIG.

1.9 Pasos para delimitar una cuenca hidrográfica

1.9.1 Descargar un Modelo de Elevación Digital (DEM)

El proceso para delimitar una cuenca inicia con un DEM. Según Roa & Kamp (2008), un DEM es una representación digital de altitud como variable continua sobre la superficie bidimensional, a través de una red regular de valores Z referenciado a un datum común. Radares como PALSAR fueron diseñados para adquirir imágenes con alta capacidad de penetración en la vegetación y en condiciones meteorológicas adversas (Ni, 2014). A través de su modo interferométrico (InSAR), PALSAR generó pares de imágenes desde posiciones ligeramente distintas que, al ser procesadas, permiten estimar diferencias de fase y,

por ende, variaciones altimétricas con precisión centimétrica (Xiong, 2017). Todas estas imágenes de acceso libre se pueden descargar gratuitamente desde portales como el Alaska Satellite Facility, este pone a disposición Vertex y la ASF search, donde los usuarios pueden definir áreas de interés en un visor interactivo, aplicar filtros y descargar paquetes de datos preprocesados en formatos GeoTIFF listos para generar DEM de alta resolución.

Los pasos para poder descargar un DEM desde el portal ASF search se resumen en cuatro. El primero es escoger el conjunto de datos como es el de ALOS PALSAR, segundo se debe trazar un polígono sobre el área de interés, luego se debe filtrar el tipo de resultado que queramos obtener y finalmente se inicia la búsqueda y se selecciona el mejor resultado. Cabe aclarar que antes de todo el proceso debes crear una cuenta de usuario para el portal ASF. Para un mejor entendimiento a continuación se resumen los pasos para poder descargar un modelo de elevación digital dentro del portal ASF search.

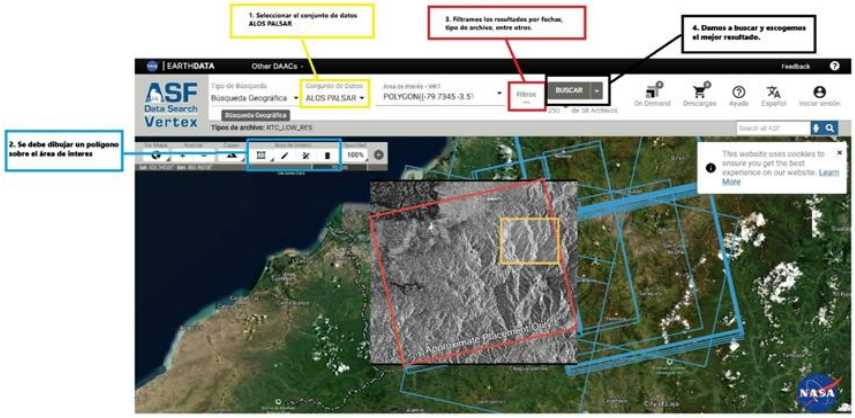


Figura 1. El proceso para delimitar una cuenca.

Fuente: Los autores (2025).

1.9.2 Proyectar y limpiar el DEM

Como segundo paso, procederemos a descargar e instalar el complemento GRASS desde el menú de complementos de QGIS. Este complemento actúa como un motor de procesamiento geoespacial que permite trabajar de forma eficiente con datos ráster, vectoriales y series temporales (Zambelli, 2013).

Una vez instalado se procede a proyectar el DEM descargado. El primer paso dentro de GRASS consiste en limpiar el modelo de elevación digital (DEM). Para ello, abrimos la Caja de herramientas de procesos de QGIS, ubicamos el grupo de herramientas GRASS, seleccionamos la categoría Ráster, y luego accedemos a la herramienta r.fill.dir. En esta herramienta, cargamos el DEM en la primera casilla y dejamos seleccionada únicamente la opción Depressionless DEM, que genera un modelo corregido sin depresiones.

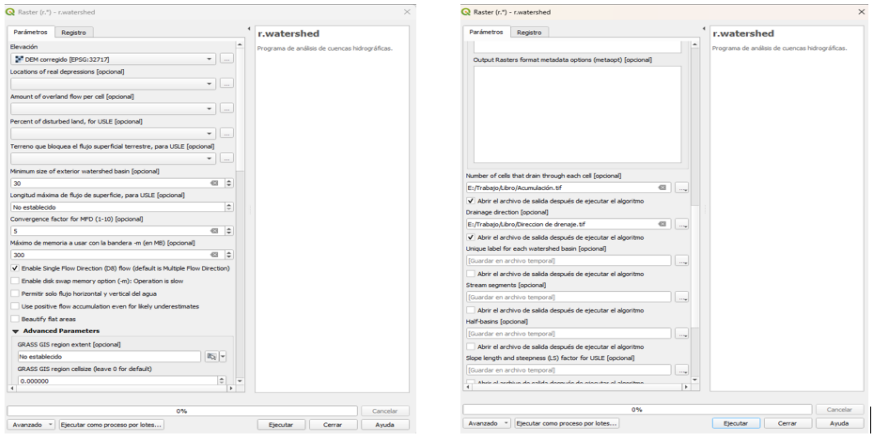


Figura 2. Proyección del DEM.

Fuente: Los autores (2025).

1.9.3 Generar los rasters de dirección de drenaje y flujo acumulado

A continuación, volvemos a la categoría Raster dentro de las herramientas de GRASS, esta vez para utilizar la herramienta r.watershed. En el primer campo, cargamos el DEM corregido previamente generado. A continuación, en la opción Minimum size of exterior watershed basin, ingresamos el tamaño del píxel de dicho DEM.

Una vez ingresado el tamaño del píxel, activamos la opción Enable Single Flow Direction (D8) para emplear el algoritmo de dirección de flujo simple. Por último, en la sección Advanced Parameters, dejamos seleccionadas las dos primeras casillas para generar las salidas correspondientes a la dirección de drenaje y a la acumulación de flujo.

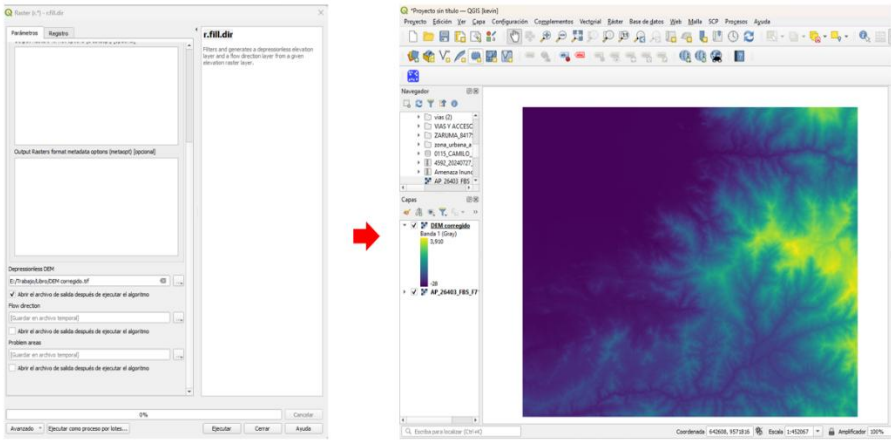


Figura 3. Rasters de dirección de drenaje y flujo acumulado.

Fuente: Los autores (2025).

1.9.4 Generar cuenca en formato raster y convertirlo en shape

Regresamos nuevamente a las herramientas Raster de GRASS, pero esta vez utilizaremos la herramienta r.water.outlet. En el primer campo, debemos cargar la capa de dirección de drenaje generada previamente. Luego, en la casilla Coordinates of outlet point, especificamos las coordenadas del punto de salida de la cuenca. Este punto debe ubicarse guiándonos con la capa de acumulación de flujo, seleccionando un área donde converjan los mayores valores acumulados. Por último, guardamos la cuenca (en este caso Casacay).

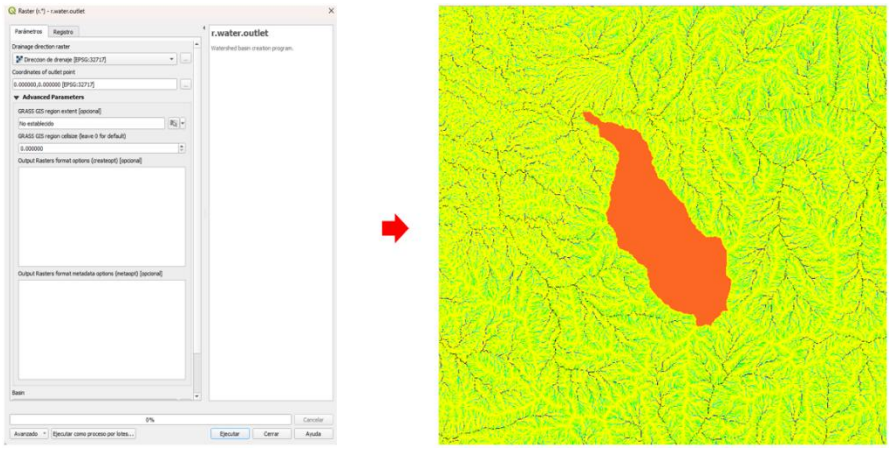


Figura 4. Cuenca en formato Raster.

Fuente: Los autores (2025).

El último paso de la delimitación de la cuenca consiste en convertir el resultado de ráster a vector. Para ello, utilizamos la herramienta r.to.vect, disponible en el grupo Raster de GRASS. Esta herramienta permite transformar cualquier capa ráster en un archivo vectorial, ya sea en formato de línea o polígono, dependiendo del tipo de análisis requerido.

En este caso, seleccionamos la opción de polígono para obtener la delimitación vectorial de la cuenca.

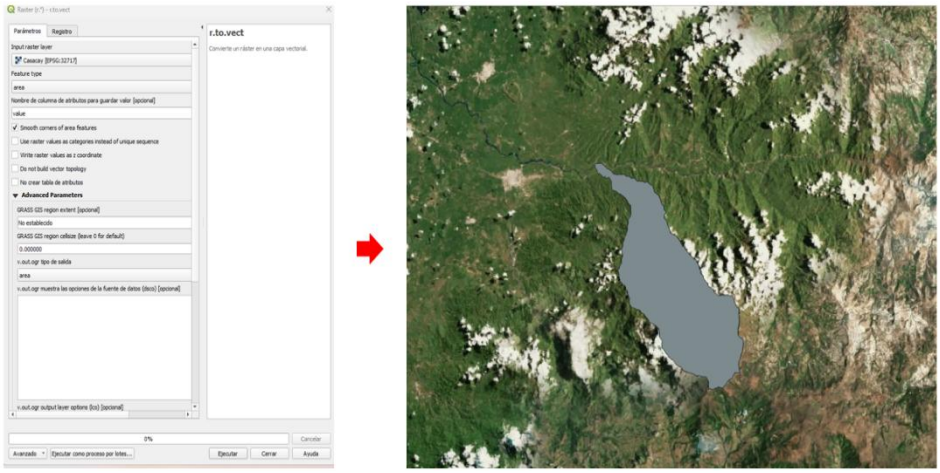


Figura 5. Cuenca en formato Shape.

Fuente: Los autores (2025).

1.9.5 Generar red hídrica de la cuenca

Para poder generar la red hídrica dentro de la cuenca hidrográfica, utilizaremos la herramienta r.stream.extract, ubicada en la sección Raster de GRASS. En la primera casilla se debe ingresar el DEM corregido, y en la segunda, la capa ráster de acumulación de flujo. A continuación, en el campo Minimum flow accumulation for stream, establecemos el valor mínimo de acumulación necesario para que se reconozca una corriente. Este parámetro controla la densidad de la red hídrica, permitiendo ajustarla según el nivel de detalle requerido. A continuación, definimos el tipo de salida como líneas y especificamos un nombre para guardar el resultado en formato vectorial. El proceso generará como salida la red de drenaje. Para finalizar cortaremos esta

red con nuestra cuenca en formato shape y así obtendremos únicamente la red de nuestra cuenca hidrográfica.

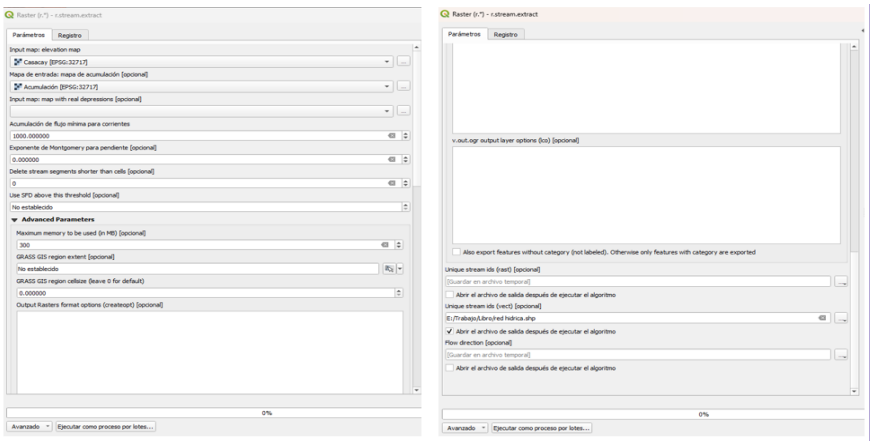


Figura 6. Colocación de los Valores.

Fuente: Los autores (2025).

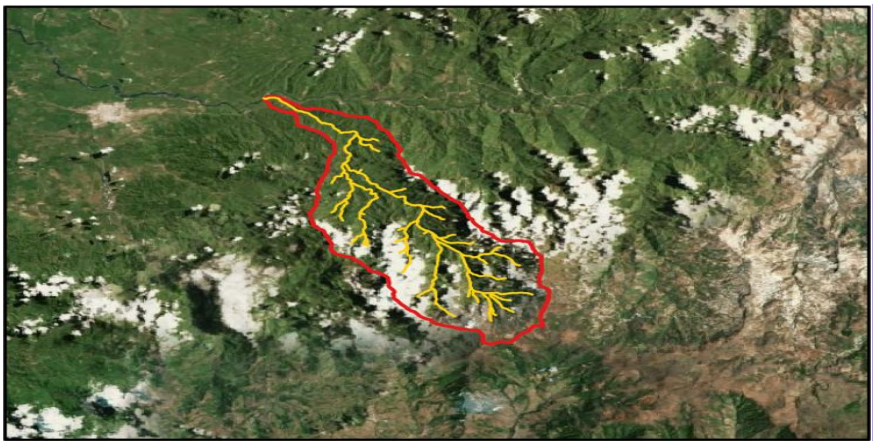


Figura 7. Generación red hídrica de la cuenca.

Fuente: Los autores (2025).

La gestión sostenible de los recursos hídricos exige una comprensión precisa de la organización espacial y funcional de las cuencas

hidrográficas. En este contexto, el Método Pfafstetter se presenta como una herramienta eficaz y estandarizada para la identificación jerárquica y el mapeo sistemático de cuencas y subcuencas. Desarrollado por Otto Pfafstetter en la década de 1980, este método ha sido implementado y promovido por instituciones como la FAO y organismos de planificación hídrica de diversos países por su capacidad de representar de manera lógica y coherente la estructura de drenaje de una red hidrográfica.

Al contrario de otros sistemas de clasificación, el Método Pfafstetter ofrece la posibilidad asignar un código numérico a cada unidad hidrográfica en función de su posición en la red de drenaje, lo que facilita el análisis jerárquico y la gestión integral de cuencas. Esta codificación estructurada no solo mejora la visualización y organización del territorio hídrico, sino que también mejora la toma de decisiones en planificación territorial, conservación ambiental, monitoreo hidrológico y gestión del riesgo. Este capítulo incluye los fundamentos teóricos y prácticos del Método Pfafstetter, su lógica de codificación, su aplicación cartográfica y las ventajas de su uso frente a otros esquemas. Mediante ejemplos ilustrativos y ejercicios aplicados, se propone dotar al lector de las competencias necesarias para utilizar esta herramienta con eficacia en distintos contextos de análisis y planificación de cuencas.

1.10 Método Pfafstetter: Identificación y mapeo jerárquico de la cuenca

El Sistema Pfafstetter se propuso como un sistema de referencia global para la delimitación y codificación de cuencas hidrográficas (Andino &

López, 2017; Stein, 2018). Esta metodología usa conjuntos de datos de cuencas hidrográficas globales y jerárquicamente anidados basada en los conceptos articulados de Otto Pfafstetter, ingeniero del Departamento Nacional de Obras de Saneamiento (DNOS) en Brasil (Stein, J., 2018; Verdin & Verdin, 1999).

Es un sistema natural basado en el control topográfico de las áreas drenadas sobre la superficie terrestre y la topología de la red hidrográfica resultante (Verdin & Verdin, 1999). La identidad de una cuenca hidrográfica se encuentra en el tamaño, la forma y la red de drenaje. Todos los tramos de la red de drenaje tienen una dirección única y, por tanto, un orden, y están dispuestos en una red bifurcada (Verdin & Verdin, 1999).

De acuerdo con Verdin & Verdin (1999) el método Pfafstetter está diseñado para aprovechar las características del sistema de numeración de base 10 que reflejan estas características de la cuenca:

- Los valores impares indican la posición relativa aguas arriba / aguas abajo.
- Los valores pares indican la posición de la red dentro o fuera del canal principal.

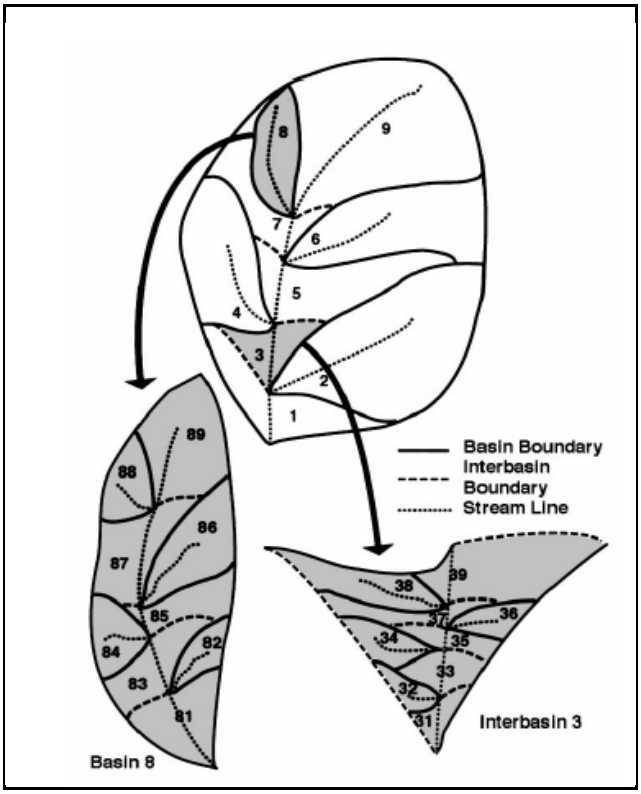


Figura 8. Sistema Pfafstetter.

Fuente: Verdin & Verdin (1999).

Debido a que el sistema Pfafstetter se deriva de la topografía y topología de la red de drenaje, se requiere implementar modelos digitales de elevación (DEM) y sistemas de información geográfica (SIG) (Verdin & Verdin, 1999).

Norteamérica fue la primera región en implementar el sistema de numeración de cuencas de Pfafstetter (Verdin & Verdin, 1999). Europa y Australia han diseñado modelos de análisis de esquemas de codificación utilizando el sistema Pfafstetter para las bases de datos de

sus cuencas hidrográficas y ríos (Stein, An Enhanced Pfafstetter Catchment Reference System, 2018).

Este sistema identifica de forma única cada canal, captura información sobre la topología y reconoce la jerarquía de los arroyos y de las cuencas hidrográfica.

La idea principal es utilizar un dígito entre 1 a 9 por nivel de jerarquía ya que un arroyo puede tener más de nueve afluentes, sólo los de mayor área de captación se seleccionan a un nivel (2, 4, 6 y 8), y las Inter cuencas y la naciente reciben dígitos impares (1, 3, 5, 7, 9) hasta codificar todos los segmentos fluviales (Fürst & Hörhan, 2009).

El cauce principal siempre se considera el curso de agua que drena la mayor superficie (Fürst & Hörhan, 2009). Si existe un arroyo con el mismo nombre del curso principal, este tiene prioridad, independientemente de si comienza o no en el recorrido aguas abajo más largo, pero

al permitir esto contradice la aplicación estricta de las reglas de Pfafstetter entre la metodología aplicada y la reportada por Verdin y Verdin en 1999 (Fürst & Hörhan, 2009).

Este método implica que las cuatro cuencas más grandes, según la superficie drenada, se codifican con un número par y las intermedias o intercuencas con números impares (De Jager & Vogt, 2010)

1.10.1 Limitaciones

- Si bien, sólo permite codificar cuencas endorreicas de gran extensión en cada nivel de descomposición, las cuencas más pequeñas pueden combinarse con una adyacente y aumentar su tamaño para poder ser codificada (Stein, 2018).
- Puede producir un nivel variable de descomposición de las cuencas y el tamaño desigual de las subcuencas hidrográficas. Esto es una consecuencia natural de la densidad de drenaje, por lo que el sistema codifica a las cuencas entre 0 y 9 (Stein, 2018).

1.11 Caracterización morfométrica y física de la cuenca

La caracterización morfométrica es fundamental para comprender el funcionamiento físico e hidrológico de una cuenca, ya que permite cuantificar objetivamente la forma, el relieve y la red de drenaje a través de parámetros matemáticos y geométricos. Estos parámetros, como el área de la cuenca, el perímetro, la longitud del cauce principal, la densidad de drenaje, el índice de compacidad, la relación de elongación y el índice de bifurcación, describen la estructura física y ayudan a predecir el comportamiento hidrológico y geomorfológico de la cuenca (Rai et al., 2019; Chimdesa Abdeta et al., 2020). Por ejemplo, la densidad de drenaje es un indicador clave del grado de desarrollo de la red hidrográfica y de la susceptibilidad a la erosión, mientras que el índice de compacidad permite inferir la rapidez con la que una cuenca puede generar crecidas y su tendencia a concentrar escurrimientos superficiales (Rahaman et al., 2015; Chimdesa Abdeta et al., 2020). El análisis de estos parámetros es esencial para la evaluación hidrológica,

la gestión de riesgos y la planificación sostenible de los recursos hídricos, ya que proporciona información objetiva sobre la dinámica del escurrimiento, la erosión y la respuesta de la cuenca ante eventos extremos (Rai et al., 2019; Chimdesa Abdeta et al., 2020; Rahaman et al., 2015).

1.12 Erosión y producción de sedimentos: Aplicación del método USLE

La tasa de producción de sedimentos puede depender de variables físicas y la gestión del uso del suelo del lugar de estudio. Se han desarrollado ecuaciones para estimar la pérdida de suelo y así permitir a los conservacionistas proyectar datos limitados de erosión (Wischmeier & Smith, 1978).El modelo de USLE se diseñó para predecir las pérdidas promedio de suelo por escorrentía a largo plazo; es idóneo para zonas con sistemas de cultivo, aunque también es aplicable en condiciones no agrícolas, así como en obras de construcción (Wischmeier & Smith, 1978).

McKague (2023) expresa las siguientes ecuaciones para estimar la pérdida de suelo en un lugar determinado.

$$\mathbf{A} = R \times K \times LS \times C \times P \text{ (ton/acre/año).}$$

$$\mathbf{A} = 2.24 \times R \times K \times LS \times C \times P \text{ (ton/ha/año).}$$

Descripción de variables

“A” representa la pérdida de suelo promedio anual, puede estar expresada en ton/ha/año o ton/acre/año, y los resultados se comparan

con la tabla de los límites tolerables de pérdida de suelo (McKague & Eng, 2023).

Tabla 1. Tasas de tolerancia a la pérdida de suelo.

Tasas de tolerancia a la pérdida de suelo	
Clasificación de erosión del suelo	***Pérdida de suelo potencial***
muy baja o tolerable	*< 6.7 ton/ha/año; 3 ton/acre/año*
baja	*6.7 - 11.2 ton/ha/año; 3 - 5 ton/acre/año*
moderada	*11.2 - 22.4 ton/ha/año; 5 - 10 ton/acre/año*
alto	*22.4 - 33.6 ton/ha/año; 10 - 15 ton/acre/año*
severo	*> 33.6 ton/ha/año; 15 ton/acre/año*

Fuente: (McKague & Eng, 2023).

"K" representa el factor de erodabilidad del suelo; es decir, representa la susceptibilidad de las partículas del suelo al desprendimiento y transporte a causa de lluvia o escorrentía (McKague & Eng, 2023). Wischmeier & Smith (1978) definen al factor "K" como la pérdida de suelo medida en una parcela arbitraria de 22.8 m de largo con un pendiente uniforme de 9 %. Además, argumentan que, en condiciones convencionales con arado y labranza, los valores de los factores L, S, C y P son iguales a 1.0 cada uno, y K es igual a A/EI.

Las mediciones directas de K de acuerdo con los lineamientos de Wischmeier & Smith (1978) reflejan los efectos de todas las propiedades del suelo que influyen sobre la erosionabilidad por la lluvia y la escorrentía si el suelo está desnudo.

Los edafólogos han establecido tablas sobre el valor de K para la mayoría de los tipos de suelo y clases texturales (Wischmeier & Smith, 1978). A continuación, se presentan la data de McKague (2023):

Tabla 2. Valores del Factor "K".

Valores del Factor "K"			
Leyenda:	**OMC**	**Contenido de materia orgánica**	**Leyenda:**
Clase textual	**OMC promedio**	**Menos del 2 % de OMC**	**Más del 2 % de OMC**
Arcilloso	0.22	0.24	0.21
Franco arcilloso	0.30	0.33	0.28
Franco arenoso grueso	0.07	-	0.07
Arena fina	0.08	0.09	0.06
Franco arenoso fino	0.18	0.22	0.17
Arcilla pesada	0.17	0.19	0.15
Franco	0.30	0.34	0.26
Arena fina franca	0.11	0.15	0.09
Arena franca	0.04	0.05	0.04
Arena muy fina franca	0.39	0.44	0.25
Arena	0.02	0.03	0.01
Franco arcilloso arenoso	0.20	-	0.20
Franco arenoso	0.13	0.14	0.12
Franco limoso	0.38	0.41	0.37
Arcillo limoso	0.26	0.27	0.26
Franco arcillo limoso	0.32	0.35	0.30
Arena muy fina	0.43	0.46	0.37
Franco arenoso muy fino	0.35	0.41	0.33

Traducido y tomado de: McKague (2023).

"LS" o factor de longitud de pendiente-gradiente representa la relación entre la pérdida de suelo en determinadas condiciones con una pendiente estándar de 9 % y una longitud de 22.13 m; es decir, mientras más pronunciada y larga sea la pendiente, será más susceptible a erosionar (McKague & Eng, 2023).Wischmeier & Smith (1978) definen a esta variable como Factor Topográfico, ya que tanto la longitud (L) como el grado de inclinación de la pendiente (S) afectan a la tasa de erosión

hídrica; si bien, cada variable ha sido evaluada por separado, en aplicaciones de campo resulta conveniente considerarlas como un único factor topográfico “LS”.

Asumiendo que la longitud corresponde a 22.8 m y que la pendiente uniforme es de 9 %, Wischmeier & Smith (1978) generaron una tabla de valores para el factor topográfico LS en condiciones específicas misma que está asociada a la siguiente ecuación:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{72.6}\right)^{m} * \left(65.41\ sen^{2}(\theta) + 4.56\ sen(\theta) + 0.065\right)$$

$\boldsymbol{Donde}$: $\lambda = Longuitud\ de\ la\ pendiente\ en\ ft;$ $\boldsymbol{\theta} = inclinacion\ de\ la\ pendiente$;

m= 0.5 si la pendiente es igual o mayor a 5% **m=**0.4 si oscila entre 3.5 a 4.5%;

m=0.3 si oscila entre a 3%; m=0.2 en pendientes uniformes menores a 1%

No se ha determinado hasta qué grado las relaciones derivadas de los datos siguen siendo precisas mediante mediciones directas de la pérdida de suelo (Wischmeier & Smith, 1978)

Por otra parte, McKague (2023) presenta una tabla convencional y estándar para trabajar la estimación del factor LS, basada en el mismo principio y valores de la parcela unitaria.

Tabla 3. Estimación del Factor LS.

Estimación del Factor LS		
Longitud de la pendiente (m)	**Pendiente (%)**	**Factor LS**
15	10	0.98
	8	0.70
	6	0.48
	5	0.38
	4	0.30
	3	0.22
	2	0.16
	1	0.10
	0	0.06
30.5	10	1.38
	8	1.00
	6	0.67
	5	0.54
	4	0.40
	3	0.30
	2	0.20
	1	0.13
	0	0.07
46	10	1.70
	8	1.22
	6	0.83
	5	0.66
	4	0.47
	3	0.35
	2	0.23
	1	0.15
	0	0.08
…	…	…
244	10	3.90
	8	2.82
	6	1.91
	5	1.52
	4	0.92
	3	0.68
	2	0.37
	1	0.24
	0	0.11

Fuente: McKague (2023).

"R" representa el factor de precipitación y escorrentía del lugar de estudio; es decir, mientras mayor sea la intensidad y la duración de la tormenta, el potencial de erosión también aumentará (McKague & Eng, 2023). Es decir, este factor cuantifica el impacto de las gotas de lluvia en el suelo y proporciona información relativa sobre la tasa de escorrentía asociada a la pluviosidad en una región, pero no incluye el efecto de los sistemas de riesgo (Wischmeier & Smith, 1978).

"C" representa la eficacia relativa de los sistemas de manejo del suelo y de los cultivos para controlar o mitigar la pérdida de suelo (McKague & Eng, 2023). Es la relación entre la pérdida de suelo de tierra cultivada y la pérdida del mismo por un barbecho continuo con labranza (Wischmeier & Smith, 1978).Es decir, este factor mide el efecto sobre la cobertura y el manejo del suelo, la pérdida de suelo que se produciría por el tipo de cultivo, aunque también dependerá de la etapa del crecimiento y de desarrollo de la cobertura vegetal. Para esto, McKague (2023) propone dos tablas para estimar los valores correspondientes al Factor "C".

Tabla 4. Factor "C" – Cultivos.

Factor "C" - Cultivos	
Tipo de cultivo	**Factor**
Maíz en grano	0.40
Maíz, frijol y canola	0.50
Cereales	0.35
Cultivos hortícolas	0.50
Frutales	0.10
Heno y pasto	0.02

Tomado y traducido de: McKague (2023).

Tabla 5. Factor "C" – Labranza.

Factor "C" - Labranza	
Método de labranza	**Factor**
Arado de otoño	1.0
Arado de primavera	0.90
Labranza con mantillo	0.60
Labranza en caballones	0.35
Labranza por zonas	0.25
Sin labranza	0.25

Tomado y traducido de: McKague (2023).

Para obtener el valor de "C" se debe multiplicar el factor obtenido de la labranza y el del tipo de cultivo; y, se debe considerar que, el resultante es un valor generalizado para un cultivo específico ya que no considera las rotaciones de cultivos, clima o la pluviosidad de la zona sobre las diversas regiones agrícolas, pero al ser un valor específico permite evaluar las ventajas de los cultivos sobre la erosión del suelo (McKague & Eng, 2023).

Cuando se habla de suelos cultivados en pendientes y expuestos a lluvias erosivas, se debe implementar un sistema de soporte con cultivos densos que se complementan con prácticas agrícolas que minimicen la escorrentía y reduzcan la cantidad de suelo arrastrado y transportado (Wischmeier & Smith, 1978). El factor "P" representa los efectos de las prácticas que se realizan para reducir la cantidad y la velocidad de la escorrentía hídrica, y, por ende, la erosión. Las técnicas de cultivo de soporte más usadas son el cultivo transversal, el cultivo en curvas de nivel y el cultivo en franjas (McKague & Eng, 2023).Cada cultivo de soporte representa un valor asignado al factor "P" según McKague (2023), tal como se visualiza en la siguiente tabla.

Tabla 6. Factor "P".

Factor "P"	
Cultivo de soporte	**Factor "P"**
Pendiente arriba y pendiente abajo	1.0
Pendiente transversal	0.75
Cultivo en curvas de nivel	0.50
Cultivo en franjas, pendiente transversal	0.37
Cultivo en franjas, curvas de nivel	0.25

Tomado y traducido de: McKague (2023).

1.13 Elementos de cierre:

1.13.1 Reunamos lo anterior

Caso de Estudio: Caracterización Morfométrica y Jerárquica de la Cuenca del Río Ayuquila

En este capítulo aprendimos que la caracterización morfométrica y la jerarquización de la red de drenaje son fundamentales para el diagnóstico ambiental y la gestión adaptativa de las cuencas hidrográficas, como se demuestra en el caso de estudio de la cuenca del río Ayuquila, donde estos análisis ayudan a comprender la dinámica hídrica y planificar estrategias de manejo sostenible ante eventos hidrometeorológicos extremos.

En este capítulo, el estudio del río Ayuquila muestra cómo la integración de herramientas técnicas y análisis espaciales (como SIG y modelos digitales de elevación) ayuda a segmentar la cuenca en zonas funcionales y jerarquizar su red de drenaje, lo que resulta fundamental para la conservación y el desarrollo regional, el caso de la cuenca del río Ayuquila demuestra que la caracterización morfométrica y la

jerarquización de la red de drenaje no solo aportan información esencial para el diagnóstico ambiental, sino que constituyen la base para una gestión adaptativa y eficiente de las cuencas hidrográficas, especialmente en regiones sujetas a eventos hidrometeorológicos extremos.

1.14 Revisión del capítulo

1.14.1 Cuencas hidrográficas y el ciclo hidrológico

Las cuencas hidrográficas son unidades territoriales delimitadas por divisorias topográficas que canalizan los flujos de agua superficial y subterránea. Son importantes para entender la dinámica del ciclo hidrológico, el cual describe el movimiento continuo del agua entre la atmósfera, la tierra y los océanos. La interpretación moderna del ciclo hidrológico es resultado de siglos de investigación, desde los experimentos de Halley, Perrault y Mariotte, hasta la integración matemática de Dalton y los avances del siglo XX en modelización y gestión de recursos hídricos.

- ¿Qué es una cuenca hidrográfica y por qué es fundamental para el estudio del agua?;¿Cómo contribuyeron Halley, Perrault y Mariotte a la comprensión del ciclo hidrológico? ¿Qué procesos principales integran el ciclo hidrológico? ¿Por qué la hidrología requiere un enfoque interdisciplinario?

1.14.2 La cuenca hidrológica: Concepto, jerarquía y delimitación

La cuenca hidrográfica es un sistema complejo donde interactúan factores biofísicos y sociales. Su delimitación se basa en criterios topográficos y su estructura jerárquica incluye cuencas, subcuencas, microcuencas y lotes. La subdivisión facilita la gestión diferenciada y la aplicación de modelos como SWIM y SWAT, que permiten simular y planificar intervenciones precisas a diferentes escalas.

- ¿Cómo se define una cuenca hidrográfica? ¿Qué niveles jerárquicos existen dentro de una cuenca? ¿Por qué es importante subdividir una cuenca en subcuencas y microcuencas? ¿Qué herramientas tecnológicas se emplean para su delimitación?

1.14.3 Método Pfafstetter: Identificación y mapeo jerárquico

El método Pfafstetter es una herramienta estandarizada para la identificación jerárquica y codificación de cuencas hidrográficas. Utiliza la topografía y la topología de la red de drenaje para asignar códigos numéricos, facilitando el análisis, la gestión y la toma de decisiones en la planificación hídrica a nivel global.

- ¿En qué consiste el método Pfafstetter? ¿Cómo se codifican las cuencas según este método? ¿Qué ventajas ofrece frente a otros sistemas de clasificación? ¿Cuáles son sus limitaciones?

1.14.4 Caracterización morfométrica y física de la cuenca

La caracterización morfométrica cuantifica la forma, el relieve y la red de drenaje de una cuenca mediante parámetros como área, perímetro,

longitud, densidad de drenaje, índices de forma y relieve. Estos parámetros permiten predecir el comportamiento hidrológico, la respuesta ante eventos extremos y la susceptibilidad a la erosión y sedimentación.

- ¿Cuáles son los parámetros morfométricos más relevantes en una cuenca? ¿Cómo influyen estos parámetros en la dinámica hidrológica? ¿Por qué es importante analizar la red de drenaje y la pendiente?.¿Cómo se relacionan uso del suelo y cobertura vegetal con la respuesta de la cuenca?

1.14.5 Erosión y producción de sedimentos: Aplicación del método USLE

El método USLE permite estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica a partir de factores como erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo, pendiente, cobertura vegetal y prácticas de manejo. Es una herramienta clave para la conservación de suelos y la planificación de intervenciones para mitigar la degradación y la sedimentación en cuencas hidrográficas.

- ¿Qué variables considera la ecuación USLE para calcular la pérdida de suelo? ¿Por qué es importante controlar la erosión en una cuenca? ¿Cómo influyen las prácticas agrícolas y la cobertura vegetal en la erosión? ¿Qué limitaciones tiene el modelo USLE?

1.14.6 Preguntas para el pensamiento crítico

1 ¿Por qué es fundamental la caracterización morfométrica y la jerarquización de la red de drenaje para la gestión de cuencas

hidrográficas, particularmente en regiones expuestas a eventos hidrometeorológicos extremos?

- *Reflexiona sobre cómo el análisis de la forma, tamaño y estructura de la cuenca ayuda a predecir riesgos y planificar acciones de manejo sostenible.*

1 ¿Cómo influyen las características físicas de la cuenca (como el factor de forma, la densidad de drenaje y las pendientes) en la dinámica hídrica y la susceptibilidad a la erosión o inundaciones?

- *Considera el ejemplo de la cuenca del río Ayuquila y cómo sus valores específicos condicionan el comportamiento del agua y los sedimentos.*

2 ¿Qué ventajas ofrece la zonificación funcional (alta, media y baja) de una cuenca para la conservación ambiental y el desarrollo regional?

- *Analiza cómo la segmentación en zonas permite priorizar acciones de conservación, manejo agrícola y control de inundaciones.*

3 ¿Por qué es importante utilizar herramientas tecnológicas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos digitales de elevación en el análisis de cuencas hidrográficas?

- *Reflexiona sobre la eficiencia, precisión y posibilidades de simulación que ofrecen estas herramientas en comparación con métodos tradicionales.*

4 ¿Cuáles son los principales retos y presiones antropogénicas que enfrenta la cuenca del río Ayuquila, y cómo afectan a su funcionalidad ecológica y social?

- *Considera la contaminación, la extracción de agua, la regulación de cauces y el cambio de uso de suelo, y su impacto en la calidad del agua y los ecosistemas.*

5 ¿Cómo puede el análisis morfométrico y la jerarquización de la red de drenaje contribuir a la prevención de riesgos como inundaciones y erosión en cuencas como la del río Ayuquila?

- *Relaciona los parámetros morfométricos con la capacidad de la cuenca para distribuir la escorrentía y regular el flujo hídrico.*

6 ¿Qué papel juega el uso del suelo y la cobertura vegetal en la infiltración, escorrentía y erosión dentro de una cuenca hidrográfica?

- *Reflexiona sobre la importancia de mantener coberturas vegetales adecuadas y prácticas de manejo sostenible para reducir la pérdida de suelo y mejorar la regulación hídrica.*

7 ¿Cómo puede el método Pfafstetter facilitar la gestión integral y el monitoreo de cuencas hidrográficas?

- *Considera la importancia de la codificación jerárquica y el análisis topológico para la planificación y la toma de decisiones.*

8 ¿Qué consecuencias tendría la pérdida de cobertura forestal en las zonas altas de la cuenca del río Ayuquila sobre la disponibilidad de agua y la estabilidad de los suelos?

- *Analiza cómo la deforestación puede afectar la captación de agua, la erosión y la calidad de los recursos hídricos.*

9 ¿Qué estrategias propondrías para mejorar la gestión adaptativa y sostenible de la cuenca del río Ayuquila, considerando tanto los aspectos ambientales como los sociales y económicos?

- *Propón acciones concretas basadas en el análisis morfométrico, la zonificación funcional y la participación de los actores locales.*

CAPÍTULO II

2 MAPEO Y PRIORIZACIÓN DE ACTORES EN LA GESTIÓN DE CUENCAS

2.1 Elemento de apertura

2.1.1 Caso de estudio: Subcuenca del río Casacay, provincia de El Oro, Ecuador

La gestión integral de cuencas hidrográficas comprende una visión holística del territorio, donde confluyen diversos intereses, funciones y competencias (Downs, 1991). En el contexto ecuatoriano, la subcuenca del río Casacay, ubicada en la provincia de El Oro, representa un ejemplo relevante de los desafíos y oportunidades que enfrenta la gobernanza hídrica participativa. En esta subcuenca, la presión sobre los recursos hídricos es creciente debido a la expansión agrícola, la urbanización y los impactos del cambio climático, lo que exige el reconocimiento y la priorización de actores clave que influyen en la planificación, uso y conservación del agua (Vega Espinoza, Sánchez Valladolid, & Vargas Collaguazo, 2024).

El estudio de la subcuenca del río Casacay inició con la delimitación física y administrativa del área, lo que permitió identificar a los actores directos e indirectos involucrados, desde agricultores y comunidades locales hasta entidades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales y el sector privado (Vega Espinoza et al., 2024). La aplicación de herramientas como la matriz de poder-interés y el análisis multicriterio, en particular el Proceso Analítico Jerárquico (AHP),

permitió ponderar la influencia, el compromiso y los recursos de cada actor, así como priorizar su participación en iniciativas como los fondos de agua. Estos métodos facilitan la organización y sistematización de información respecto de los actores involucrados, lo que es fundamental para diseñar estrategias de gestión adecuadas y anticipar conflictos (Tapella, 2007; den Haan, Driessen, & Runhaar, 2019).

Este análisis de la información relevante pone en evidencia que la gestión integral del agua requiere ir más allá de una perspectiva técnica para involucrar a los intereses de todos los actores relevantes. La matriz de poder-interés permite comprender las relaciones de influencia y compromiso, identificando a aquellos actores con mayor capacidad de movilización de recursos o de toma de decisiones, así como a los grupos tradicionalmente marginados cuya inclusión es esencial para la equidad y la sostenibilidad (Gutiérrez, López-Gunn, & Martínez Santos, 2019). Por su parte, el análisis multicriterio ofrece un marco sistemático para evaluar y priorizar alternativas considerando aspectos económicos, sociales, ambientales y técnicos, promoviendo decisiones más robustas y legitimadas por la participación activa de los involucrados (Belton, 2002; Saaty, 2008).

La implementación de estas metodologías en la subcuenca del río Casacay permitió articular estrategias de gestión adaptativa, fortalecer la cooperación entre actores y anticipar conflictos potenciales. La participación de la comunidad local, el sector público y el privado en la toma de decisiones permitió la construcción de acuerdos colectivos y a la implementación de acciones orientadas a la conservación y el uso eficiente del agua. Además, el análisis metódico permite mantener un

registro sistemático de información sobre actores clave con el fin de establecer estrategias asociadas a las dinámicas sociales, políticas y ambientales del territorio (Vega Espinoza et al., 2024).

2.2 Recursos pedagógicos

2.2.1 Preguntas de reflexión

a. Identificación de actores clave en la gestión de cuencas ¿Por qué es fundamental identificar a los actores clave en la gestión de cuencas hidrográficas?

La identificación de actores clave es un paso esencial en la planificación participativa de cuencas, ya que permite reconocer a los individuos, grupos u organizaciones que tienen intereses, responsabilidades, influencia o impacto directo o indirecto sobre el uso, conservación y gobernanza de los recursos naturales presentes en una cuenca (den Haan, Driessen, & Runhaar, 2019). Esto posibilita comprender quiénes están involucrados, qué intereses defienden, qué capacidades poseen y cómo se relacionan entre sí, lo cual es clave para diseñar estrategias que promuevan la cooperación, reduzcan conflictos y optimicen los esfuerzos de gestión.

b. Herramientas para el análisis de actores ¿Qué herramientas se utilizan para analizar y priorizar actores en la gestión de cuencas hidrográficas?

Se emplean herramientas como el mapeo de actores, la matriz de poder-interés y los análisis multicriterio para identificar, clasificar y priorizar

a los actores según su interés y capacidad de influencia (Tapella, 2007; Belton & Stewart, 2002). El mapeo de actores evidencia la dinámica de interacción y roles, mientras que la matriz de poder-interés ayuda a clasificar a los actores según su nivel de influencia y grado de interés en la gestión del agua. El análisis multicriterio, especialmente el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), permite ponderar criterios como influencia, compromiso, legitimidad y recursos disponibles para priorizar la participación de actores clave y plantear mecanismos de negociación para cada actor en particular.

c. Mecanismos de participación y gobernanza colaborativa ¿Cómo se fomenta la participación y la gobernanza colaborativa en la gestión de cuencas hidrográficas?

La participación y la gobernanza colaborativa se garantizan a través de la inclusión activa de todos los actores relevantes en los procesos de diagnóstico participativa, la toma de decisiones consensuada, la creación de espacios de diálogo y la implementación de mecanismos formales e informales de participación social y comunitaria (GWP, 2009). Esto implica una gestión transversal y reconocer el valor de la diversidad de intereses, capacidades y recursos de los actores, que no necesariamente deben converger en "resolver" dichas diferencias sino en negociar esto conflictos entre actores de manera responsable y transparente.

2.3 Gobernanza y planificación participativa

La gestión integral de cuencas hidrográficas implica una visión holística del territorio, donde confluyen diversos intereses, funciones y

competencias (Downs, 1991).Esta realidad hace indispensable la participación y coordinación de múltiples actores, sociales, institucionales, económicos y ambientales que interactúan en distintos niveles y escalas territoriales. La toma de decisiones en torno al recurso hídrico ya no puede sustentarse únicamente en criterios técnicos o sectoriales, sino que debe incorporar enfoques participativos que garanticen inclusión, equidad y sostenibilidad

En este contexto, esta unidad pretende abordar y analizar a los actores clave en las cuencas hidrográficas, su identificación y categorización, así como comprender a las metodologías que existen para evaluar su influencia en los procesos de gobernanza del agua. Se exploran herramientas como el mapeo de actores en diferentes escalas (cuenca, subcuenca, microcuenca, lote), el análisis poder-interés, y la aplicación de enfoques multicriterio para priorizar su participación, especialmente en mecanismos financieros para la seguridad hídrica como los fondos de agua. Además, se abordan los marcos institucionales que rigen la gobernanza hídrica y los mecanismos formales e informales de participación social y comunitaria.

A través del estudio de esta unidad, el estudiante desarrollará la capacidad de identificar y comprender el rol de los actores que intervienen en la gestión de cuencas, reconocer cómo influyen en el diagnóstico, en la planificación y en el manejo de los recursos hídricos, además de aplicar herramientas para fortalecer la participación y la toma de decisiones colaborativas. Asimismo, se busca fomentar una comprensión crítica de los desafíos de la gobernanza hídrica en América Latina y, en particular, en el contexto ecuatoriano, así como las

oportunidades que ofrecen los procesos de planificación participativa para una gestión más eficaz e inclusiva.

2.4 Identificación de actores clave y su influencia en la cuenca

En la gestión integral de cuencas hidrográficas, el término ¨actor¨ hace referencia a cualquier individuo, grupo, organización o institución que tiene un interés, responsabilidad, influencia o impacto directo o indirecto sobre el uso, conservación y gobernanza de los recursos naturales presentes en una cuenca (den Haan, Driessen, & Runhaar, 2019).

Estos actores pueden involucrarse en la gestión y manejo de la cuenca, desde el diagnóstico de las principales amenazas en la gestión del agua, hasta el diseño de proyectos.

La identificación clara de estos es el principal objetivo de la gestión participativa, ya que permite comprender quiénes están involucrados, qué interés defienden, qué capacidades poseen, y cómo se relacionan entre sí (Krupa et al., 2018). Solo de esta forma, es posible diseñar estrategias que promuevan la cooperación, reduzcan los conflictos y optimicen los esfuerzos de gestión.

2.4.1 Tipos de actores en la gestión de cuencas

Para facilitar su análisis, los actores suelen agruparse en distintas categorías según su naturaleza, escala de acción y función. A continuación, se presentan algunas de las tipologías más comunes:

Tabla 7. Tipos de Actores.

Categorías	Definición
Actores directos	Tienen una interacción inmediata con el recurso hídrico o el territorio de la cuenca. Por ejemplo, agricultores que utilizan agua de riego o juntas de agua potable que extraen agua de una microcuenca.
Actores indirectos	Aunque no interactúan físicamente con el agua o el territorio, sus decisiones o políticas tienen un efecto sobre el sistema socioambiental. Por ejemplo, una institución financiera que otorga créditos para expansión agrícola sin evaluar el impacto hídrico, o una autoridad que emite permisos sin coordinar con otros actores.
Actores institucionales	Organismos públicos nacionales o locales encargados de normar, fiscalizar o administrar el recurso hídrico. Ejm: Ministerios de ambiente, Juntas de Agua Potable, gobiernos municipales o juntas parroquiales.
Actores comunitarios	Pobladores o representantes de comunidades locales, pueblos indígenas o asociaciones que interactúan cotidianamente con el entorno de la cuenca. Suelen tener conocimientos tradicionales y gran dependencia del agua para consumo, riego o pesca.
Actores privados	Empresarios agrícolas, mineras, industriales o turísticas que usan o transforman el recurso hídrico para fines productivos, y que pueden ejercer presión significativa sobre los ecosistemas si no se regulan adecuadamente.
Actores académicos y científicos	Universidades, centros de investigación y técnicos especializados que aportan con estudios, diagnósticos, monitoreo y herramientas de apoyo a la gestión.
Actores de la sociedad civil y ONG	Organizaciones no gubernamentales, fundaciones o colectivos ciudadanos que promueven la participación, la conservación ambiental y los derechos humanos.

2.4.2 ¿Qué es un actor clave?

Entre la diversidad de actores, algunos se consideran ¨actores claves¨ debido a su alto nivel de influencia, su capacidad de movilización de recursos, o su rol en la toma de decisiones estratégicas. Identificarlos

permite focalizar los esfuerzos de gobernanza y articular acciones más eficientemente (Gutiérrez, López-Gunn, & Martínez Santos, 2019). Un actor clave puede tener poder formal (por ejemplo, un ministerio con competencia legal sobre el agua) o poder real (por ejemplo, una mancomunidad con legitimidad social y conocimientos tradicionales para conservar una subcuenca).

2.4.3 Importancia de identificar actores clave

La Gestión Integral de Cuencas Hidrográfica (GICH) requiere de la participación de una gran cantidad de actores, cuyos intereses y conflictos por el uso de los recursos pueden impactar positiva o negativamente en el éxito o fracaso de las estrategias implementadas. Si se conocen con antelación estos actores, permite considerar los intereses, potenciales, responsabilidades y grados de poder de cada uno. Este tipo de información es trascendental para lograr una gobernanza hídrica. A su vez, contribuye a adelantar acciones que sean congruentes con el contexto social, institucional y ecosistémico del área geográfica.

Una identificación adecuada de la red de actores permite prever situaciones de conflictos alrededor del uso, distribución o conservación del recurso hídrico. Por ejemplo, si no se priorizan, los intereses y derechos de los usuarios agrícolas, industriales y las comunidades locales, pueden escalar tensiones. Identificar actores también permite crear procesos de diálogo, negociación y toma de decisiones que apoyen la gobernanza colaborativa y como resultado, el riesgo de desigualdad o exclusión es reducido.

Cuando los actores perciben que sus criterios han sido incluidos en el proceso de planificación, aumenta su sentido de pertenencia y apego a los objetivos de gestión de la cuenca. Esto aporta en gran medida al involucramiento de las comunidades en la consecución de los proyectos planificados futuros, por lo que las iniciativas no dependen exclusivamente de intervención de un agente externo, sino que se vuelven parte de *ethos* de las comunidades asentadas en la cuenca.

De hecho, la mayoría de los recursos de la cuenca son manejados y administrados por sus usuarios, por lo que reconocer a los actores con valiosos recursos técnicos, financieros y humanos no solo es lo pertinente, sino que es estratégico. Por ejemplo, las universidades pueden realizar investigaciones, las ONG comunitarias ofrecen su experiencia, los gobiernos locales tienen conocimiento territorial y las empresas privadas pueden contribuir financiando soluciones sostenibles. Reconocer adecuadamente a estos actores ayuda a fomentar sinergias estratégicas y asociaciones.

La identificación de las partes interesadas también es importante para el enfoque de la GIRH a nivel internacional y nacional. La Autoridad Nacional del Agua o las Secretarías de Medio Ambiente necesitan incorporar en sus planes la atención a decisiones socialmente y políticamente aceptables con respecto a las partes interesadas relevantes en la región.

2.4.4 Análisis multicriterio para la priorización de actores en la participación en un fondo de agua.

La identificación de actores clave en la gestión de cuencas hidrográficas es un proceso esencial para garantizar una gobernanza efectiva y participativa de los recursos hídricos. Este proceso permite reconocer a las personas, grupos e instituciones que influyen o se ven afectados por las decisiones relacionadas con el agua, facilitando la creación de estrategias inclusivas y sostenibles.

Iniciar un proceso de identificación de actores clave en la gestión integral de recursos hídricos es un paso esencial para asegurar que la planificación, ejecución y seguimiento de estrategias sean representativas, inclusivas y sostenibles. Esta identificación debe entenderse no como un proceso puntual, sino como un componente continuo de la gobernanza del agua, que se ajusta a las dinámicas sociales, políticas y ambientales de la cuenca.

El primer paso consiste en definir el contexto territorial y social de la cuenca, lo que implica delimitar física y administrativamente el área de estudio. Esto permite determinar qué actores podrían estar directa o indirectamente involucrados. Como destacan Tapella (2023) y el Global Water Partnership (2009), el análisis debe considerar aspectos como los recursos disponibles, los conflictos existentes, los usos del agua y las estructuras institucionales que ya operan en el territorio.

Una vez contextualizada la cuenca, se procede al uso de herramientas específicas para el mapeo de actores. Este paso combina técnicas cualitativas y cuantitativas para identificar personas, organizaciones o

instituciones con intereses, poder o responsabilidad en torno al recurso hídrico. Algunas de las herramientas más efectivas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 8. Tipos de Actores.

Herramienta	Descripción
Entrevistas semi-estructuradas	Permiten obtener información detallada sobre el rol, intereses y percepciones.
Revisión documental	Incluye análisis de planes, proyectos, leyes y bases de datos existentes.
Talleres participativos	Espacios colectivos donde los actores mismos ayudan a identificar a otros.
Análisis de redes sociales (ARS)	Visualiza relaciones de poder, cooperación e influencia entre actores.
Matriz de poder e interés	Clasifica actores según su nivel de influencia y grado de afectación.

Estas herramientas permiten mapear a los actores, distinguir entre actores directos, que interactúan físicamente con el recurso (como agricultores, juntas de agua o municipios), y actores indirectos, que intervienen a través de normativas, investigación, financiamiento o gobernanza (como ONGs, universidades o ministerios). Esta clasificación, propuesta por Cap-Net (2008), facilita una lectura estratégica del sistema de gobernanza.

Posteriormente, se debe realizar un análisis de relaciones entre actores. Esta etapa busca identificar coincidencias, conflictos y liderazgos. Por ejemplo, el análisis de redes sociales permite descubrir qué instituciones están más conectadas, cuáles son excluidas del proceso y qué actores podrían asumir roles articuladores. Este paso es clave para diseñar

mecanismos de participación efectivos y para anticipar obstáculos en la implementación de políticas de gestión hídrica (CONAGUA, 2015).

Otra variable de esta fase es fomentar la participación de actores invisibilizados o tradicionalmente marginados, como mujeres, jóvenes, pueblos indígenas o poblaciones urbanas informales. Incluir estos actores desde el inicio garantiza un enfoque de equidad social y mejora la calidad de los acuerdos construidos colectivamente. Según GWP (2009), la participación efectiva no solo se trata de convocar actores, sino de crear condiciones para que su voz tenga peso en la toma de decisiones.

Por último, es recomendable consolidar los resultados del proceso de identificación en un registro sistemático, que contenga información como nombre del actor, tipo, nivel de influencia, área geográfica de acción, intereses principales, relaciones institucionales y disponibilidad para participar. Este documento debe actualizarse con frecuencia y ser utilizado como base para futuras fases del proceso de planificación, implementación y evaluación.

2.4.5 Matriz de poder e interés

El análisis de los actores involucrados en la gestión de los recursos hídricos es fundamental para garantizar una administración eficiente, equitativa y sostenible del agua. Este proceso requiere la identificación y participación activa de diversos grupos sociales e institucionales, tales como organismos gubernamentales, entidades privadas, organizaciones comunitarias y sociedad civil, con el fin de asegurar que sus intereses,

necesidades y capacidades sean considerados en los procesos de toma de decisiones (T. F. Fabrice, 2020).

Como señalan estudios recientes, incorporar múltiples perspectivas, mejorando la legitimidad de las decisiones, sino que también fortalece la implementación de estrategias de gestión. En este sentido, (Ben-Daoud et al., 2023) destacan la importancia de reconocer a los actores más influyentes dentro del sistema hídrico y de evaluar tanto su nivel de poder como su grado de incidencia en la GIRH, elementos esenciales para fomentar procesos colaborativos y adaptativos en contextos complejos.

Las matrices de influencia e interés son herramientas clave para analizar los procesos de gestión participativa, ya que permiten organizar y evaluar la información respecto a los actores involucrados. Estas matrices permiten clasificar a las personas, instituciones u organizaciones de acuerdo con su nivel de interés en el proyecto y su capacidad de influencia sobre las decisiones o resultados. Esta categorización permite diseñar estrategias de gestión adecuadas, especialmente en el ámbito de la gestión integrada del agua, donde los conflictos de uso y los intereses diversos son frecuentes. La figura 9 ilustra cómo se grafican los actores en función de su grado de interés y poder, subrayando la relevancia de identificar a aquellos con influencia media o alta, independientemente de si su postura es favorable o contraria a la intervención. Esta información entrega un insumo fundamental para anticipar resistencias, promover alianzas estratégicas y garantizar una participación equilibrada y efectiva en los procesos de gobernanza hídrica.

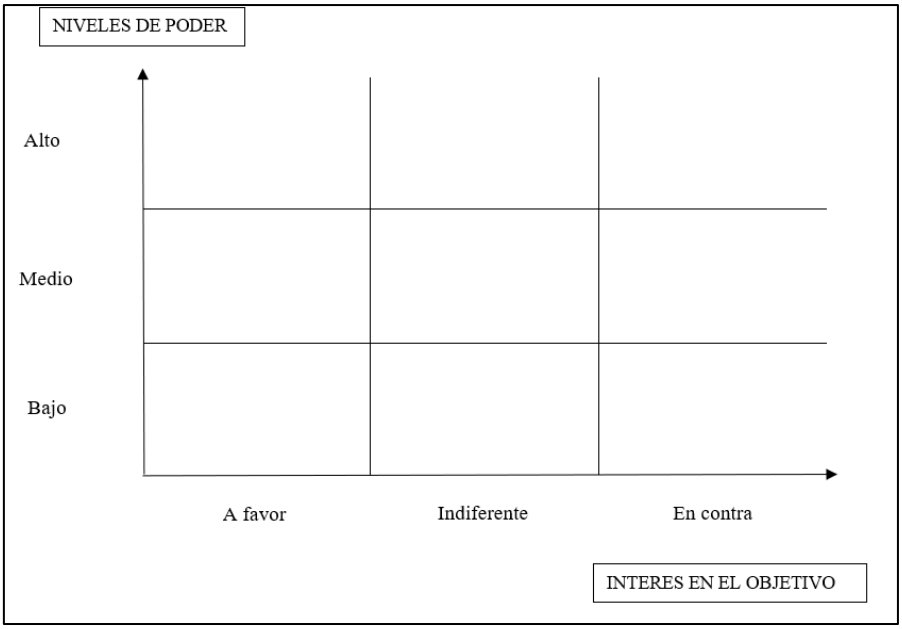


Figura 9. El proceso para delimitar una cuenca.

Fuente: (Tapella, 2007).

Graficar e implementar el mapeo de los actores dentro de la gestión de cuencas hidrográficas se puede hacer utilizando matrices de clasificación de actores clave. Este tipo de diagramas permite sistematizar toda la información recolectada en el proceso de identificación de actores para su análisis a partir de tipo, nivel de influencia, grado de interés y rol en la toma de decisiones. A través de esta matriz, resulta sencillo presentar los vínculos y roles, así como contribuciones que cada actor tiene dentro del sistema de gestión hídrica. Esta representación permite, además, identificar espacios de participación, conflictos e integrar elementos para abordar cada grupo diferenciadamente con respecto a sus características y capacidades definidas. Como se puede comprobar, la matriz se convierte en un

recurso útil encaminado a sostenibilidad en gobernanza del agua que se utiliza en la planificación participativa con diferentes interesados.

2.5 Análisis multicriterio para la priorización de actores en la participación de un fondo de agua

El Análisis Multicriterio (AMC) es un enfoque sistemático que ayuda en la toma de decisiones por lo que permite evaluar, jerarquizar y seleccionar alternativas sobre la base de múltiples criterios tanto cualitativos como cuantitativos (Belton & Stewart, 2002). A diferencia de los métodos tradicionales de decisión, que generalmente se centran en una sola variable, el AMC ofrece una estructura para integrar las variables de manera jerarquizada con el fin de determinar de forma objetiva el resultado.

Este enfoque resulta es muy valioso en el contexto de la GIRH, ya que dicha gestión exige equilibrar múltiples intereses y variables complejas. La aplicación del AMC en este campo permite ponderar cuales son las razones, para los actores, en orden de prioridad, porque quisieran participar de un fondo de agua, considerando simultáneamente elementos como la disponibilidad hídrica, la equidad en el acceso, la sostenibilidad ambiental, y las necesidades económicas locales (Hajkowicz & Collins, 2007).

Uno de los principios fundamentales del AMC es la inclusión activa de los actores sociales e institucionales en el proceso de evaluación. La incorporación de diferentes grupos de interés tales como comunidades locales, entidades gubernamentales, organizaciones no gubernamentales (ONGs), el sector privado y la academia asegura que el análisis refleje

una diversidad de perspectivas y valores. Esto no solo legitima el proceso de toma de decisiones, sino que también mejora la aceptación social y la implementación efectiva de las soluciones seleccionadas (De Marchi, Funtowicz, & Munda, 2000).

Dentro de los métodos específicos del AMC, uno de los más ampliamente utilizados es el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), desarrollado por (Saaty, 1980). Esta técnica permite descomponer un problema complejo en una jerarquía de criterios y subcriterios, facilitando la comparación entre alternativas mediante juicios expertos. El AHP resulta especialmente útil para priorizar actores en el marco de un fondo de agua, ya que permite ponderar su influencia, compromiso, legitimidad, recursos disponibles, y grado de interés en función de los objetivos del proyecto.

Además, el AMC contribuye significativamente a encontrar puntos de equilibrio entre distintas alternativas, permitiendo seleccionar aquellas que representan el mayor beneficio colectivo. Al proporcionar una estructura lógica y transparente para integrar y comparar múltiples criterios, el AMC facilita la construcción de estrategias consensuadas, adaptadas a contextos locales y con un enfoque de largo plazo (Dodgson et al.,2009). En la gestión de cuencas hidrográficas, esto se traduce en decisiones más robustas, sensibles a las complejidades del territorio y a los intereses de sus actores clave.

Uno de los aspectos más importantes del AMC es su capacidad para guiar procesos participativos. Mediante una serie de procedimientos bien definidos, esta metodología permite que los diferentes actores

involucrados participen en la definición de criterios, la asignación de pesos y la evaluación de opciones, lo cual resulta clave para construir consensos y fortalecer la legitimidad de las decisiones adoptadas (H. Huang, 2021). Esta característica cobra particular relevancia en contextos como el de la subcuenca del río Casacay, donde confluyen actores con intereses diversos: desde comunidades locales y organizaciones sociales hasta sectores productivos como el agrícola, gubernamental y de agua potable.

La inclusión de los factores de éxito que plantean el interés en participar de un posible fondo de agua a los actores permite que se visibilicen los distintos intereses y percepciones, se genera un espacio propicio para la deliberación democrática y la construcción de soluciones compartidas (De Marchi, Funtowicz, & Munda, 2000).

2.5.1 Tipos de métodos multicriterio

En el ámbito de la GIRH, la toma de decisiones suele involucrar múltiples criterios que deben ser evaluados de manera objetiva. Para ello, el AMC se presenta como un conjunto de metodologías que permiten comparar y priorizar alternativas considerando tanto criterios cualitativos como cuantitativos. Estas metodologías son particularmente útiles cuando existen múltiples actores con distintos intereses, valores y niveles de influencia, como ocurre en el caso de la participación en un Fondo de Agua.

A continuación, se presenta un cuadro comparativo con los principales tipos de AMC utilizados en procesos de evaluación y toma de decisiones ambientales, destacando AHP por su aplicabilidad, sencillez y utilidad

en el mapeo y priorización de actores claves dentro de procesos participativos relacionados con la gestión del recurso hídrico.

Tabla 9. Tipos de AMC.

Tipo de AMC	Descripción	Características principales	Aplicaciones comunes	Ventajas	Limitaciones
AHP (Analytic Hierarchy Process)	Método jerárquico desarrollado por Saaty (1980) para priorizar alternativas según juicios expertos.	Estructura jerárquica (objetivo → criterios → alternativas). Comparaciones pareadas. - Cálculo de pesos y consistencia	- Gestión del agua - Evaluación de actores - Planificación ambiental	- Fácil de aplicar y entender - Participativo - Permite inconsistencias controladas	- Subjetivo si los expertos no son representativos - Requiere juicio experto coherente
ANP (Analytic Network Process)	Extensión del AHP que considera interdependencias entre elementos.	- Redes en lugar de jerarquías - Relaciones de retroalimentación	- Sistemas complejos interrelacionados	- Mayor realismo - Útil para decisiones con múltiples relaciones	- Más complejo de implementar - Mayor carga computacional
ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality)	Métodos de sobre clasificación para comparar alternativas en base a concordancia y discordancia.	- Compara pares de alternativas - No requiere valores cardinales - Usa umbrales	- Selección de sitios - Evaluación ambiental	- No necesita compensación entre criterios - Bueno para datos cualitativos	- Dificultad en interpretación - Complejo para grandes conjuntos
PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for	Método de ordenación basado en preferencias del decisor entre alternativas.	- Funciones de preferencia por criterio - Genera rankings - Usa valores	- Gestión de residuos - Planificación territorial	- Interfaz gráfica intuitiva - Rápido de aplicar	- No permite relaciones entre criterios

Enrichment Evaluation)		ordinales o cardinales			
MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique)	Técnica basada en juicios cualitativos para establecer escala cardinal.	- No requiere valores numéricos iniciales - Usa comparaciones cualitativas verbales	- Evaluación de impactos - Selección de políticas	- Fácil para usuarios no técnicos - Transparente y participativo	- Menos preciso en comparaciones muy técnicas

El AHP es particularmente útil en la gestión del agua porque permite integrar criterios sociales, económicos, técnicos y ambientales a través de una estructura clara y participativa (Saaty, 1980).Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en el mapeo y priorización de actores clave, evaluación de escenarios de uso del agua, selección de sitios para infraestructura hídrica, entre otros (Vargas-Hernández,et al., 2006).

Gracias a su capacidad de generar un índice ponderado para cada alternativa, el AHP facilita el diálogo entre múltiples actores, promoviendo la legitimidad y la transparencia en la toma de decisiones en entornos complejos como las cuencas hidrográficas.

2.6 Proceso analítico jerárquico

El AHP es una metodología desarrollada por Thomas L. Saaty en 1980, diseñada para abordar problemas complejos de toma de decisiones mediante la descomposición jerárquica de los elementos involucrados (Saaty, 1980). Este enfoque permite evaluar criterios y alternativas con base en comparaciones por pares, asignando prioridades relativas que facilitan la selección de la mejor opción disponible.

El AHP se sustenta en dos tipos de comparación cognitiva: la absoluta, donde se asignan valores fijos a cada elemento, y la relativa, que implica la comparación directa entre pares de criterios o alternativas. Estas comparaciones se representan mediante una escala de 1 a 9, donde cada valor indica el grado de preferencia de un elemento sobre otro (Saaty, 2008).

Esta metodología ha ganado amplio reconocimiento en la planificación ambiental, la gestión estratégica y la resolución de conflictos, especialmente en el ámbito de la GIRH. Su utilidad ha sido demostrada en diversos contextos; por ejemplo, en la cuenca del río Pranburi, en Tailandia, fue empleado para priorizar la participación de partes interesadas, facilitando una toma de decisiones más equitativa e inclusiva (Peterson et al., 2005).

El AHP facilita la toma de decisiones al establecer una estructura jerárquica compuesta por tres niveles principales: el objetivo general, los criterios de decisión y las alternativas de solución. A continuación, se realiza una serie de comparaciones por pares entre los elementos de cada nivel, permitiendo determinar su importancia relativa. Posteriormente, los pesos obtenidos se agregan para calcular la prioridad global de cada alternativa. Este proceso sigue cuatro etapas esenciales:

Tabla 10. Etapas del AHP.

Etapas del AHP	Descripción
1. Definición del problema	Se establece el objetivo de la decisión y se identifican los actores o factores involucrados.
2. Estructuración jerárquica	Se organizan los elementos del problema en niveles jerárquicos: objetivo, criterios, subcriterios (si los hay) y alternativas.

3. Comparación por pares	Se aplican juicios expertos para valorar la importancia relativa entre criterios y entre alternativas con respecto a cada criterio.
4. Síntesis de prioridades	Se calculan los valores ponderados para cada elemento y se determina la alternativa más adecuada según el objetivo planteado.

Por su capacidad para descomponer problemas complejos en componentes manejables y comparables, el AHP se posiciona como una herramienta útil para priorizar actores, evaluar alternativas y tomar decisiones en entornos donde confluyen múltiples intereses y criterios, como en el caso de la implementación de fondos de agua en subcuencas hidrográficas.

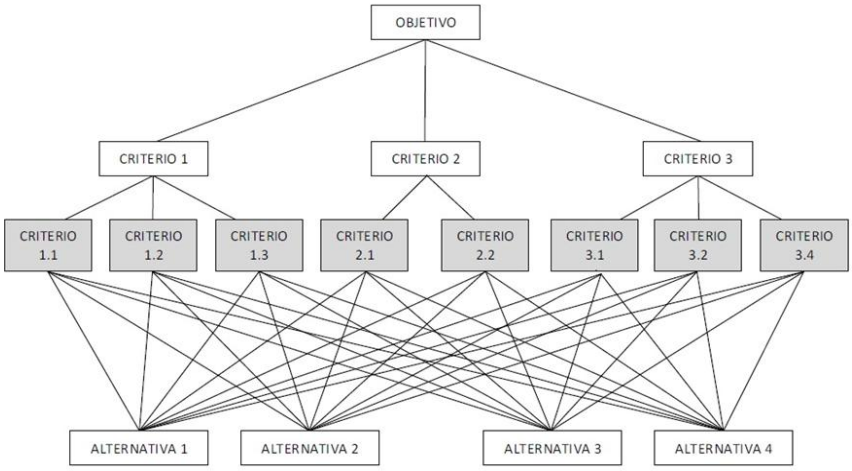


Figura 10. Esquema de criterios y alternativas.

Fuente: (J. Thungngern, 2017).

Para elaborar la matriz de juicios comparativos, es necesario aplicar tres ecuaciones fundamentales que permiten cuantificar las preferencias relativas entre los elementos evaluados. Estas fórmulas constituyen la

base matemática del proceso de análisis y aseguran la coherencia y solidez de los resultados obtenidos.

$$W_n = \left(\frac{GM}{\sum_{n=1}^{Nf} GM_n} \right)$$

Donde GM_n ,representa la media geométrica de la n-ésima que se presenta en la matriz y se calcula así:

$$GM = \sqrt[N_f]{A_{1n} A_{2n\ldots} A_{Nf}}$$

Donde ANF representa el nivel relativo en la escala comparativa de los factores evaluados por pares. Una vez que se han determinado los niveles de prioridad o pesos relativos, es fundamental comprobar la fiabilidad del juicio emitido por los participantes en la matriz de comparación. Para ello, se emplea el Coeficiente de Consistencia (CR), que permite verificar el grado de coherencia interna de las valoraciones realizadas.

El CR evalúa si los pesos asignados a los criterios mantienen una lógica transitable (por ejemplo, si A es más importante que B, y B es más importante que C, entonces A debería ser más importante que C). La fórmula para calcular el CR es la siguiente:

En la Tabla 10 se muestra la escala de Saaty (1980), la cual emplea en el método para realizar comparaciones por pares entre elementos. Esta escala permite asignar valores numéricos que expresan la importancia relativa de un elemento respecto a otro, en relación con un objetivo

específico. Los valores van del 1 al 9, donde 1 representa una igual importancia entre los elementos comparados, y 9 indica que un elemento es extremadamente más importante que el otro. Esta herramienta es clave para transformar juicios cualitativos en datos cuantificables dentro del proceso de toma de decisiones.

Tabla 11. Etapas del AHP.

Valor	Definición	Descripción
7	Mucho más importante	El análisis y la experiencia muestran que un criterio es predominante para el objetivo
5	Más importante	El análisis y la experiencia muestran que un criterio es claramente más importante que el otro
3	Poco más importante	El análisis y la experiencia muestran que un criterio es un poco más importante que el otro
1	Equivalentes	Ambos criterios contribuyen por igual a la meta
1/7	Fuertemente poco importante	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar
1/5	Muy poco importante	
1/3	Moderadamente poco importante	

Fuente: (Saaty, 2008).

2.7 Agrupamiento de actores con base técnica, considerando escalas espaciales (cuenca, subcuenca, microcuenca, lote)

En cuencas hidrográficas complejas de topografía muy irregular, es normal encontrar una variedad de comunidades con culturas e interés muy diferentes. Para conglomerar comunidades que tengan ciertos rasgos afines tanto sociales como culturales, se pueden agrupar en espacios territoriales. Estos espacios, en el contexto de unidad hidrográfica, van desde la cuenca hidrográfica como unidad hasta la escala de lote. Esta clasificación permite articular acciones desde el

nivel estratégico hasta el operativo, considerando las competencias técnicas, capacidades de gestión y responsabilidades de cada actor (López-Gunn & Ramón, 2020). En el marco de la GIRH, este enfoque facilita el diseño de políticas más inclusivas y adaptadas a cada contexto territorial, promoviendo la cooperación entre distintos niveles de gobernanza (Global Water Partnership [GWP], 2000).

El siguiente cuadro presenta un ejemplo de agrupamiento técnico de actores según la escala espacial en la que actúan, con el objetivo de evidenciar cómo su participación puede organizarse de manera funcional y jerárquica.

Tabla 12. Ejemplo de agrupamiento técnico de actores.

Escala Espacial	Tipo de Actores	Rol Técnico Principal	Ejemplos
Cuenca	Actores de planificación y políticas nacionales y regionales	Definen políticas, estrategias y marcos normativos para la gestión del agua	Ministerios (MAATE), Autoridades hídricas nacionales, organismos multilaterales
Subcuenca	Actores técnicos y operativos intermedios	Implementan programas de gestión, monitorean y coordinan acciones técnicas	GAD provinciales, consejos de cuenca, ONGs técnicas
Microcuenca	Actores locales con capacidad técnica o comunitaria	Ejecutan acciones de conservación, restauración y monitoreo local	GAD parroquiales, asociaciones de regantes, líderes comunitarios
Lote / Predio	Usuarios directos y productores individuales	Aplican buenas prácticas agrícolas, forestales y de uso del agua	Agricultores, ganaderos, propietarios forestales, juntas de agua potable

2.8 Elementos de cierre:

2.8.1 Reunamos lo anterior

Caso de Estudio: Subcuenca del río Casacay, provincia de El Oro, Ecuador.

En este capítulo aprendimos que la gestión integral de cuencas hidrográficas exige una visión holística, donde confluyen diversos intereses, enfoques y capacidades. El caso de la subcuenca del río Casacay, en la provincia de El Oro, Ecuador, ejemplifica los fortalezas y oportunidades de la gobernanza hídrica participativa, especialmente en contextos de presión creciente sobre los recursos hídricos debido a la expansión agrícola, la urbanización y los efectos del cambio climático. En este contexto, la identificación y priorización de actores clave resulta fundamental para diseñar estrategias que garanticen la participación de todos, o la mayoría de actores, ya que agricultores, comunidades locales, entidades gubernamentales, ONGs y sector privado, influyen directamente en la gestión y la toma de decisiones (Vega Espinoza et al., 2024).

Se logró comprender, además, que herramientas como el mapeo de actores, la matriz de poder-interés y el análisis multicriterio, en particular el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), son esenciales para ponderar sistemáticamente la información sobre los actores involucrados. Estas metodologías permiten jerarquizar la influencia, el compromiso y los recursos de cada actor, facilitando la priorización de su participación en iniciativas como los fondos de agua. La matriz de poder-interés, por ejemplo, ayuda a concebir los “ratio” de influencia y

compromiso, identificando tanto a los actores con mayor capacidad de movilización de recursos como a aquellos tradicionalmente marginados, cuya inclusión es crucial para la equidad y la sostenibilidad (Tapella, 2007; Gutiérrez et al., 2019).

En este capítulo se logró comprender que la gestión del agua requiere equilibrar aspectos técnicos con procesos de diagnóstico y gestión participativa. Para aquello, es necesario crear espacios de diálogo para garantizar la gobernanza y la inclusión de las voces de aquellos actores comúnmente no escuchado pero relevantes al momento de la ejecución de los proyectos de conservación o restauración. La aplicación de metodologías que permiten ponderar las razones por las cuales los actores de la subcuenca del río Casacay estarían interesadas en involucrarse en la participación de un posible fondo de agua permitió diseñar estrategias de gestión y ajustar las acciones a las dinámicas sociales, políticas y ambientales reales en el contexto local (Vega Espinoza et al., 2024).

2.9 Revisión del capítulo

2.9.1 Identificación de actores clave y su influencia en la cuenca

La gestión integral de cuencas requiere identificar a todos los individuos, grupos y organizaciones que tienen interés, responsabilidad o influencia sobre el uso y conservación del agua. Esta identificación es el primer paso para la asignación del interés, poder e influencia que tendrán dichos actores en la consecución de la gestión de la cuenca. Este paso, evita dejar por fuera del diseño de la planificación a interés y conflictos

particulares que podrían definir sustancialmente el manejo de los recursos naturales.

- ¿Por qué es importante identificar a todos los actores en la gestión de una cuenca? ¿Cómo puede la falta de identificación de actores afectar la gobernanza hídrica?

2.9.2 Tipos de actores en la gestión de cuencas

Los actores se agrupan según su naturaleza, escala de acción y función. Se distinguen actores directos (quienes se benefician directamente de los servicios ecosistémicos, como agricultores o ganaderos) e indirectos (quienes influyen a través de normativas, investigación o financiamiento, como ONGs o ministerios). Esta clasificación permite agrupar a los actores en aquellos que se benefician directa o indirectamente de los servicios ecosistémicos, unos dentro del área y otros por fuera de la misma, y los actores institucionales que rectoran y toman decisiones de política pública.

- ¿Qué diferencia hay entre actores directos e indirectos? ¿Por qué es útil clasificar a los actores según su función y escala?

2.9.3 ¿Qué es un actor clave?

Un actor clave es aquel que, por su nivel de influencia, capacidad de movilizar recursos o rol en la toma de decisiones, puede determinar el éxito o fracaso de la gestión de la cuenca. Puede tener poder formal (por ejemplo, un ministerio) o real (por ejemplo, una comunidad con legitimidad social y conocimiento local)

- ¿Qué características hacen que un actor sea considerado clave? ¿Por qué es importante diferenciar entre poder formal y real?

2.9.4 Importancia de identificar actores clave

Reconocer a los actores clave es fundamental para anticipar conflictos, diseñar procesos de diálogo y negociación, y fortalecer la gobernanza colaborativa. Esto promueve la inclusión, reduce el riesgo de exclusión y fomenta la corresponsabilidad y sostenibilidad de las acciones en la cuenca.

- ¿Cómo ayuda la identificación de actores clave a prevenir conflictos en la cuenca? ¿Qué beneficios trae la inclusión de todos los actores relevantes?

2.9.5 Análisis multicriterio para la priorización de actores en la participación en un fondo de agua

El análisis multicriterio (AMC) es una metodología que permite evaluar y jerarquizar alternativas considerando diversos criterios sociales, económicos, ambientales y técnicos. En la gestión de cuencas, el AMC facilita la priorización de actores para su participación en fondos de agua, promoviendo decisiones más robustas y consensuadas.

- ¿Por qué es necesario utilizar el AMC en la priorización de actores? ¿Qué criterios suelen considerarse en el AMC para la gestión de cuencas?

2.9.6 Matriz de poder e interés

La matriz de poder-interés es una herramienta que clasifica a los actores según su nivel de influencia y grado de interés en la gestión del agua. Permite visualizar relaciones, anticipar resistencias, promover alianzas estratégicas y garantizar una participación equilibrada y efectiva en la gobernanza hídrica.

- ¿Cómo se utiliza la matriz de poder-interés en la gestión de cuencas? ¿Qué ventajas ofrece para anticipar resistencias y promover alianzas?

2.9.7 Análisis multicriterio para la priorización de actores en la participación de un fondo de agua

El AMC permite integrar múltiples perspectivas y valores en la toma de decisiones, facilitando la construcción de consensos y la legitimidad de las soluciones seleccionadas. Es especialmente útil para priorizar la participación de actores en fondos de agua, considerando su influencia, compromiso, legitimidad y recursos disponibles.

- ¿Cómo contribuye el AMC a la construcción de consensos en la gestión de cuencas? ¿Por qué es importante ponderar distintos criterios en la priorización de actores?

2.9.8 Tipos de métodos multicriterio

Existen diferentes métodos multicriterio, siendo el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) uno de los más utilizados por su capacidad de integrar criterios sociales, económicos, técnicos y ambientales de manera

participativa y transparente. Estos métodos ayudan a comparar y priorizar alternativas en contextos complejos y con múltiples actores.

- ¿Qué ventajas tiene el AHP frente a otros métodos multicriterio? ¿En qué situaciones es más útil aplicar métodos multicriterio en la gestión de cuencas?

2.9.9 Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El AHP descompone problemas complejos en una jerarquía de criterios y alternativas, facilitando comparaciones por pares y asignando prioridades relativas. Permite integrar datos cuantitativos y cualitativos, involucrando a múltiples actores en la valoración y reforzando la transparencia y legitimidad de los resultados.

- ¿Cómo facilita el AHP la toma de decisiones participativas? ¿Por qué es importante la transparencia en la priorización de actores?

2.9.10 Preguntas para el pensamiento crítico

1 ¿Qué ventajas y limitaciones presentan herramientas como el mapeo de actores y la matriz de poder-interés para abordar los conflictos y alianzas en la gestión de cuencas?

- *Reflexiona sobre el uso del análisis multicriterio (AMC) y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP): ¿cómo contribuyeron a una toma de decisiones más transparente y consensuada en la priorización de actores en Casacay? ¿Qué desafíos surgieron al aplicar estos métodos?*

2 ¿Por qué es fundamental incluir a actores tradicionalmente marginados (como comunidades rurales, mujeres o pueblos indígenas) en los procesos de gobernanza hídrica? ¿Qué riesgos existen si no se garantiza su participación efectiva?

- *Considerando el caso de Casacay, ¿cómo se puede fortalecer la equidad y la corresponsabilidad en la gestión del recurso hídrico?*

3 ¿De qué manera la actualización periódica de la información sobre actores clave contribuye a la adaptabilidad y sostenibilidad de la gestión de la cuenca?

- *Si fueras responsable de implementar un fondo de agua en otra subcuenca, ¿cómo adaptarías las metodologías y herramientas vistas en este capítulo para responder a un contexto social, político y ambiental diferente? ¿Qué criterios priorizarías para seleccionar a los actores clave y por qué?*

4 ¿Crees que la gestión de la subcuenca del río Casacay podría haber sido diferente si se hubieran utilizado únicamente criterios técnicos y no participativos? ¿Por qué?

- *¿Cómo evaluarías el equilibrio alcanzado entre intereses económicos, sociales y ambientales en la toma de decisiones del caso de estudio?*

CAPÍTULO III

3 PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA COMO ENFOQUE DINÁMICO PARA LA CONSERVACIÓN Y GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

3.1 Elemento de apertura

3.1.1 Caso de estudio: Planificación estratégica para la gestión de la subcuenca del río Casacay

La subcuenca del río Casacay, ubicada en la provincia de El Oro, Ecuador, enfrenta desafíos relacionados con la seguridad hídrica y la gestión sostenible de sus recursos. El artículo de Vargas Collaguazo & Espinoza Correa (2023), explora cómo la planificación estratégica puede convertirse en una herramienta efectiva para estructurar la gestión integral de esta cuenca, estableciendo objetivos claramente definidos a mediano y largo plazo, con el objetivo de implementar una metodología de planificación estratégica que integre los objetivos de actores involucrados (gobierno, comunidad, sector productivo) a un horizonte de 10 a 20 años, con el fin de identificar problemáticas clave, priorizar intervenciones, evaluar opciones de gestión y analizar costos y beneficios potenciales. Para este estudio se revisó y analizó a los actores relevantes de la subcuenca, se aplicaron técnicas estratégicas para identificar deficiencias y vulnerabilidades de la gestión hídrica, se zonificó la subcuenca para determinar áreas críticas y se definieron los objetivos a mediano y a largo plazo en conjunto de las estrategias que priorizan las acciones, costos, beneficios y factibilidad técnica. Los resultados del caso evidencian que la planificación estratégica no solo

mejora la eficiencia en la gestión de cuencas hidrográficas, sino que también fortalece la gobernanza y la coordinación entre actores clave, estableciendo un modelo replicable para otras zonas con características similares.

3.2 Recursos pedagógicos

3.2.1 Preguntas de reflexión

a. ¿Por qué es importante la planificación estratégica para la gestión sostenible de la subcuenca del río Casacay?

La planificación estratégica busca una intervención inteligente de superficies tan grandes como las cuencas hidrográficas. Permite definir prioridades estructurales, es decir amenazas que afectan en gran medida tanto a la conservación de los servicios ecosistémicos como a las poblaciones. Con objetivos claros a mediano y largo plazo, facilita la identificación de problemáticas, la priorización de intervenciones y la evaluación de opciones de gestión. Según Vargas Collaguazo y Espinoza Correa (2023), este enfoque objetivo garantiza que los programas y proyectos planteados tengan un impacto positivo en la seguridad hídrica y la sostenibilidad de la subcuenca. Al priorizar una amenaza a ser resuelta, si esto sucede, tanto las instituciones como las comunidades confían en el proceso y se genera una confianza para afrontar problemáticas más complejas.

b. ¿Qué es la zonificación y por qué es relevante en la gestión de cuencas hidrográficas?

La zonificación es la georreferenciación de las estrategias mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG). Sobre la base del diagnóstico biofísico y social, se establecen medidas acordes a cada área de intervención, lo que resulta en acciones de intervención que estarán sujetas a programas. Vargas Collaguazo y Espinoza Correa (2023) proponen que es fundamental que se identifiquen áreas críticas y definir estrategias de intervención, así como la administración eficiente de datos espaciales y descriptivos mediante un plan de acción a corto plazo.

c. ¿Qué son las zonas de amortiguamiento y cuál es su función en la gestión de cuencas?

Las zonas de amortiguamiento son franjas de vegetación diseñadas para regular procesos ecológicos, como la protección del suelo, la mejora de la calidad del agua y del aire, y la provisión de hábitats. Vargas Collaguazo y Espinoza Correa (2023) explican que la implementación de zonas de amortiguamiento es una estrategia clave para restaurar y conservar bosques, proteger recursos hídricos y mejorar la resiliencia del sistema ante amenazas ambientales.

3.3 Zonificación en cuencas hidrográficas:

3.3.1 Importancia de la zonificación en la gestión de cuencas

Una herramienta poderosa para la gestión de cuencas hidrográficas es el análisis territorial mediante el uso de sistemas de información

geográfica. Este análisis territorial permite realizar un levantamiento preciso mediante teledetección de los usos de suelo actuales sobre el área en estudio. Este levantamiento de uso de suelo se convertirá en la línea de base de la situación actual y servirá para plantear la situación deseada.

Según FAO (2007) las principales ventajas de usar SIG para la planificación y estudio de una cuenca hidrográfica se pueden resumir de la siguiente manera:

- Permite la medición de mapas, superposición de mapas, transformación, diseño gráfico y administración de base de datos;
- Los datos especiales y descriptivos almacenados se pueden recuperar rápidamente;
- Se pueden realizar pruebas analíticas rápidas y repetidas de modelos conceptuales sobre geografía, es decir, para la capacidad del suelo y los sistemas de aptitud del suelo;
- Las comparaciones de información espacial a lo largo del tiempo también pueden realizarse de manera eficiente, es decir, monitoreando los cambios en el uso del suelo;
- Ciertos análisis que no se pueden realizar de manera rentable mediante métodos manuales pueden realizarse mediante SIG.

Existen 4 enfoques conceptuales para la gestión del agua que se han retroalimentado con el tiempo y experiencia (CEPAL , 2013):

- El enfoque del “River Basin Development” está orientado a estimular la economía desde el gobierno central en comunidades que se encuentren en áreas de importancia hídrica;

- El enfoque “Watershed Management” pretende manipular o manejar la cuenca, a tal punto, de “regular” la descarga del agua desde la cuenca alta hasta su zona de desembocadura mediante el uso de la reforestación;
- El enfoque “Natural Resources Development” evoluciona desde el concepto de aprovechamiento de los servicios ecosistémicos, a la conservación de los recursos naturales y restauración de ecosistemas degradados, para pasar a mejorar la forma de producir la tierra, y;
- El enfoque “Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas”, representa el concepto superior que busca una planificación y desarrollo integrado capaz de equilibrar necesidades ambientales, culturales y económicas.

3.4 Zonificación de la cuenca hidrográfica

3.4.1 Basada en criterios de cobertura del suelo y uso actual.

a. Capacidad de uso de suelo

Se entiende a “capacidad de uso de suelo” como la determinación en términos físicos, del soporte que tiene una unidad de terreno para ser utilizada para determinados usos o coberturas y/o tratamientos (Geopedología y Amenazas Geológicas, 2011).Es decir, se refiere al conjunto de características edáficas que indican el potencial natural productivo de los suelos y, por tanto, a que deberían ser dedicados (CEPAL , 2013).

b. Aptitud de la tierra

La aptitud del suelo es representada por las "clases de capacidad de uso de suelo" que la definen como un sistema originado por el Servicio de Conservación de Suelos en Estados Unidos (USDA - Soil Conservation Service), durante la década del 50, siglo XX (CEPAL, 2013). Es decir, se refiere a la capacidad de la tierra para su uso y aprovechamiento desde el punto de vista de producción agropecuaria o forestal, de forma natural (Geopedología y Amenazas Geológicas, 2011).

c. Capacidad vs. Aptitud

La capacidad está relacionada con las clases generales de uso de la tierra; mientras que, la aptitud de la tierra a sistemas específicos de su uso (Geopedología y Amenazas Geológicas, 2011).

Tabla 13. Clases de capacidad de uso.

Clase y Uso	**Profundidad y Textura**	**Pedregosidad y Fertilidad**	**Salinidad, Toxicidad y Drenaje**	**Zona de Humedad**
I – Sin limitaciones a ligeras para uso agrícola (arable)	>100 cm. Franco, franco arcillo-arenoso, franco arenoso, franco limoso	<10%.	Salinidad <2 dS/m.	Húmeda
		Alta	Toxicidad nula.	
			Drenaje bueno	
II – Sin limitaciones a ligeras (arable)	>50 cm. Diversas texturas francas, arcillosas, limosas, limo	<25%.	Salinidad <4 dS/m.	Húmeda, seca y muy húmeda
		Alta y Mediana		
			Toxicidad nula o ligera.	

			Drenaje bueno o moderado	
III – Con limitaciones ligeras a moderadas (arable)	>20 cm. Amplia variedad de texturas incluyendo arenas	<25%.	Salinidad <8 dS/m.	Húmeda, seca, muy húmeda y muy seca
		Alta, mediana y baja	Toxicidad nula a media.	
			Drenaje bueno a excesivo	
IV – Con limitaciones moderadas (arable)	>20 cm. Cualquier textura	<25%.	Salinidad: cualquiera	Cualquiera
		Alta, mediana y baja	Toxicidad: cualquiera	
			Drenaje: cualquiera	
V – Riesgo de erosión, uso limitado	Cualquiera	<50%.	Salinidad: cualquiera	Húmeda, seca, muy húmeda y muy seca
		Cualquiera	Toxicidad: cualquiera	
			Drenaje: cualquiera	
VI – Uso forestal o conservación (no arable)	>50 cm. Cualquiera	<25%.	Salinidad: cualquiera	Húmeda, seca, muy húmeda y muy seca
		Cualquiera	Toxicidad: cualquiera	
			Drenaje: cualquiera	
VII – Conservación (no arable)	>20 cm. Cualquiera	<50%.	Salinidad: cualquiera	Cualquiera
		Cualquiera	Toxicidad: cualquiera	
			Drenaje: cualquiera	
VIII – Protección (no arable)	Cualquiera	Cualquiera	Salinidad: cualquiera	Cualquiera
			Toxicidad: cualquiera	
			Drenaje: cualquiera	

Adaptado de: Geopedología y Amenazas Geológicas, 2011.

3.5 Evaluación de la capacidad de uso del suelo para la planificación

3.5.1 Tierras para agricultura y otros usos - arables

a) Clase I

Uso: Actividades agrícolas, pecuarias y/o forestales adaptadas

Limitaciones: Nulas o muy pocas, sin evidencia de erosión, suelos profundos y fáciles de trabajar, sin periodos de inundaciones. Tierras regables.

b) Clase II

Uso: Actividades agrícolas, pecuarias y/o forestales adaptadas.

Limitaciones: Leves; moderadamente profundas y profundas, requieren prácticas de manejo rigurosas, sin periodos de inundación. Tierras regables.

c) Clase III

Uso: Cultivos anuales.

Limitaciones: Ligeras limitaciones, pueden presentar evidencia de erosión (ligera a moderada), pueden o no presentar periodos de inundación. Tierras regables con ligeras limitaciones.

d) Clase IV

Uso: Permiten laboreo ocasional, cultivos intensivos.

Limitaciones: Moderadas, pueden o no presentar erosión (ligera a moderada), pueden presentar o no períodos de inundación (ocasionales). Tierras regables con moderadas limitaciones

3.5.2 Tierras para uso limitado o no adecuadas para cultivos (conservación)

e) Clase V

- **Uso:** Labores con maquinaria, cultivos anuales, permanentes y semipermanentes.
- **Limitaciones**: Fuertes a muy fuertes, pedregosidad, pueden presentar o no períodos de inundación (cortos, medianos y largos).

f) Clase VI

- **Uso:** Uso de maquinaria restringida, apta para pasto, forestal y ocasionalmente cultivos permanentes.
- **Limitaciones:** Poco pedregosos, pueden o no presentar periodos de inundación (cortos). Severas limitaciones para el riego.

g) Clase VII

- **Uso:** Forestal, pastoreo y con fines de conservación.
- **Limitaciones:** Pedregosidad moderada, pueden presentar o no períodos de inundación (ocasionales) y se ubican en zonas hiper húmedas a muy secas.

h) Clase VIII

- **Uso:** Vegetación arbustiva y/o forestal con fines de protección para evitar la erosión.
- **Limitaciones:** Severas limitaciones, sin piedras que impiden cualquier actividad agrícola.

3.5.3 Capacidad de uso de suelo en Ecuador

De acuerdo con CEPAL (2023), la pendiente del terreno es la única de las características necesarias para determinar la capacidad de uso derivable de información fácilmente disponible a escala nacional. De esta forma, se puede establecer la capacidad de uso del suelo de un determinado lugar analizando las geoformas (archivos "shape") disponibles de las fuentes oficiales del Ministerio de Agricultura y Ganadería.

3.5.4 Zonas de amortiguamiento

De acuerdo con Bustamante (2003) la conservación de los recursos naturales es uno de los instrumentos centrales para el desarrollo de sistemas de Áreas Protegidas (AP). La implementación de zonas de amortiguamiento con especies que juegan roles fundamentales en estrategias de conservación permite la restauración y conservación de bosques maduros.

Bentrup (2008) define a las zonas de amortiguamiento para la conservación como aquellas franjas de vegetación integradas para regular procesos ecológicos que resultan en la provisión de bienes y

servicios. Entre los beneficios que brindan están la protección del suelo, mejorar la calidad del agua y del aire, mejorar hábitats y embellecer los paisajes.



Figura 11. Zonas de amortiguamiento en un paisaje agrícola.

Fuente: Bentrup (2008).

La forma, el tamaño y la estructura de la vegetación que conforma a la zona de amortiguamiento tiene la capacidad de funcionar en una ubicación dada, esto facilita a los planificadores para manipular estas variables según los requerimientos y objetivos deseados (Bentrup, 2008).El proceso estándar de planificación incluye:

1. Identificación de oportunidades y problemas;
2. Determinación de objetivos;
3. Inventario de recursos;
4. Análisis de los recursos;

5. Formulación de alternativas;

6. Evaluación de las alternativas, y la toma de decisiones.

7. Implementación del plan; y, finalmente,

8. Evaluación del plan

Bentrup (2008) presenta un plano con zonas de amortiguamiento que demuestra cómo la ubicación de estas sobre una cuenca hidrográfica desempeña un papel clave para cumplir con las funciones y objetivos establecidos. Entre estas secciones se tienen:

a) Zona de amortiguamiento para filtrar la escorrentía agrícola y reducir los costos en el tratamiento de agua potable;

b) Zona de amortiguamiento en área urbanizada;

c) Zona de amortiguamiento entre campo agrícola y área residencial;

d) Zona de amortiguamiento con vistas estéticas.

Tips para diseñar una zona de amortiguamiento según Bentrup (2008):

- Siempre considerar el contexto del paisaje
- Diseñar cada zona de amortiguamiento para varios objetivos
- Ser consciente de los efectos imprevistos de la implementación de zonas de amortiguamiento

- Identificar los beneficios, problemas y limitaciones de las zonas de amortiguamiento

- Siempre usar un proceso de planificación

Funciones de las zonas de amortiguamiento

- Mejoran las condiciones de los recursos naturales

- A pesar de tener un objetivo direccionado a la recuperación de una función o servicio ecosistémico, la mayoría de las zonas de amortiguamiento desempeñan más de una función prevista e imprevista, así como deseables o no deseables.

De acuerdo con Bentrup (2008) las funciones de las zonas de amortiguamientos están relacionadas a diferentes enfoques y objetivos de su creación, tal como se visualiza en la siguiente tabla.

Tabla 14. Enfoque y funciones de las zonas de amortiguamiento.

Enfoque	**Funciones de una zona de amortiguamiento**
Calidad del agua	
Reducir la erosión, sedimentos, nutrientes y/u otros contaminantes potenciales	Reducir la escorrentía y mejorar la infiltración
Biodiversidad	
Mejorar el hábitat (terrestre o acuático)	Aumentar la distribución espacial del hábitat Proteger hábitats sensibles

Fuente: (Bentrup, 2008).

¿Cómo se utilizan los lineamientos para el diseño de las zonas de amortiguamiento?

1. Se debe identificar los problemas de los recursos que demandan mayor atención o prioridad

2. Seleccionar las funciones deseables de las zonas de amortiguamiento para reducir, mitigar y/o eliminar el problema identificado inicialmente

3. Verificar con los lineamientos de Bentrup cada función deseada de las zonas de amortiguamiento

4. Preparar un diseño preliminar con las especificaciones técnicas y viables de la zona de amortiguamiento

5. Refinar el plan mediante otros recursos, según se requiera.

3.6 Elementos de cierre:

3.6.1 Reunamos lo anterior

Caso de estudio: Planificación estratégica para la gestión de la subcuenca del río Casacay

El enfoque de la planificación estratégica aplicada a la subcuenca del río Casacay nos enseñó que a través de esta se logró establecer una amenaza y una prioridad de intervención. El análisis geoespacial, el diagnostico participativo y la evaluación de la problemática de erosión resultaron claves para identificar áreas críticas y priorizar intervenciones. Además, el análisis costo-beneficio demostró que las inversiones en restauración ecológica son rentables y recuperables en plazos razonables, generando beneficios económicos para las comunidades de la subcuenca. La

experiencia también resalta que la planificación estratégica exitosa involucra a gobiernos locales, comunidades y actores productivos en la definición de objetivos. Finalmente, el caso de Casacay evidencia que la combinación de análisis técnico, restauración ecológica y participación social es replicable en otras cuencas, y que la planificación estratégica es clave para garantizar la permanencia de los esfuerzos de conservación y restauración del capital natural (Vargas Collaguazo & Espinoza Correa, 2023).

3.7 Revisión del capítulo

3.7.1 Zonificación y análisis territorial

El análisis territorial mediante sistemas de información geográfica (SIG) permite levantar una línea base sobre de la cobertura y usos de suelo. Los SIG son una herramienta fundamental para la planificación y el monitoreo eficiente de las cuencas en zonas en donde los recursos son limitados.

- ¿Qué beneficios aporta el uso de SIG en la gestión de cuencas hidrográficas? ¿Por qué es relevante monitorear los cambios en el uso del suelo?

3.7.2 Enfoques conceptuales para la gestión del agua

Se presentan cuatro enfoques históricos y conceptuales para la gestión del agua: desarrollo de cuencas, manejo de cuencas, desarrollo de recursos naturales y gestión integrada de cuencas hidrográficas. El

último enfoque busca compensar necesidades ambientales, culturales y económicas.

- ¿Cómo ha evolucionado el enfoque de gestión de cuencas a lo largo del tiempo? ¿Por qué la gestión integrada es considerada el enfoque más completo?

3.7.3 Capacidad y aptitud de uso del suelo

La capacidad de uso del suelo se refiere al potencial físico de un terreno para determinados usos, mientras que la aptitud indica la idoneidad para sistemas específicos de producción. Estas evaluaciones permiten diferenciar áreas aptas para agricultura, conservación o restauración.

- ¿Por qué es fundamental evaluar la capacidad y aptitud del suelo antes de planificar intervenciones? ¿En qué se diferencian los conceptos de capacidad y aptitud del suelo?

3.7.4 Clases de capacidad de uso del suelo

Se describen las distintas clases de capacidad de uso del suelo, desde tierras óptimas para agricultura hasta aquellas solo aptas para conservación. Cada clase tiene usos recomendados y limitaciones específicas, lo que orienta la toma de decisiones para un manejo sostenible.

- ¿Cómo influyen las limitaciones del suelo en la selección de actividades productivas? ¿Por qué es importante clasificar los suelos según su capacidad de uso?

3.7.5 Evaluación de la capacidad de uso del suelo para la planificación

La evaluación de la capacidad de uso del suelo permite identificar las mejores opciones de manejo y uso, considerando limitaciones como erosión, profundidad, pedregosidad o inundaciones. Esta información es clave para orientar la planificación y evitar la degradación.

- ¿Qué riesgos se corren al no considerar las limitaciones del suelo en la planificación? ¿Cómo puede la evaluación de capacidad de uso del suelo contribuir a la sostenibilidad?

3.7.6 Zonas de amortiguamiento

Las zonas de amortiguamiento son franjas de vegetación diseñadas para regular procesos ecológicos, proteger el suelo, mejorar la calidad del agua y restaurar hábitats. Su diseño debe considerar el contexto del paisaje y los objetivos múltiples de conservación y producción.

- ¿Por qué son necesarias las zonas de amortiguamiento en la gestión de cuencas? ¿Qué criterios deben considerarse al diseñar una zona de amortiguamiento?

3.7.7 Proceso de planificación de zonas de amortiguamiento

El diseño de las zonas de amortiguamiento incluye la identificación del problema a resolver, determinación de objetivos, análisis de recursos, formulación y evaluación de alternativas e implementación. Este enfoque sistemático asegura la efectividad de las intervenciones.

- ¿Por qué es importante seguir un proceso estructurado en la planificación de zonas de amortiguamiento? ¿Cómo contribuye la evaluación continua al éxito de las intervenciones?

3.7.8 Funciones y beneficios de las zonas de amortiguamiento

Las zonas de amortiguamiento cumplen múltiples funciones: filtrar escorrentía agrícola, proteger áreas urbanas, separar usos del suelo y mejorar el paisaje. Su implementación genera beneficios ambientales, sociales y económicos, y es clave para la resiliencia de los sistemas hídricos.

- ¿Qué beneficios aporta la multifuncionalidad de las zonas de amortiguamiento? ¿Cómo pueden estas zonas contribuir a la resiliencia y sostenibilidad de las cuencas?

3.7.9 Preguntas para el pensamiento crítico

1 ¿De qué manera el uso de SIG puede transformar la toma de decisiones en la gestión de cuencas hidrográficas? ¿Qué limitaciones podrían surgir al depender exclusivamente de herramientas tecnológicas para el monitoreo del territorio?

- *Analiza un caso donde los cambios en el uso del suelo hayan generado impactos negativos en una cuenca. ¿Qué medidas preventivas podrían haberse implementado utilizando SIG?*

2 ¿Qué consecuencias puede tener la falta de evaluación de la capacidad y aptitud del suelo antes de planificar intervenciones productivas o de conservación?

- *Explica, con ejemplos, cómo la diferencia entre capacidad y aptitud del suelo puede influir en la selección de actividades productivas sostenibles.*

3 ¿Qué estrategias recomendarías para superar estas limitaciones sin comprometer la sostenibilidad?

- *Analiza cómo las limitaciones del suelo pueden condicionar el desarrollo económico y social de una región*

4 ¿Cuáles son los principales criterios que deben considerarse al diseñar una zona de amortiguamiento en el contexto de un área protegida? ¿Cómo se integran los intereses de conservación y desarrollo local?

- *Reflexiona sobre el papel de la participación comunitaria en la gestión y éxito de las zonas de amortiguamiento. ¿Qué mecanismos podrían fortalecer esta participación?*

5 ¿Por qué es fundamental seguir un proceso estructurado y participativo en la planificación de zonas de amortiguamiento? ¿Qué riesgos existen si se omite alguna de las etapas?

- *¿Cómo puede la evaluación continua mejorar la efectividad de las intervenciones en zonas de amortiguamiento?*
- *Analiza la multifuncionalidad de las zonas de amortiguamiento en el caso de estudio presentado. ¿Qué beneficios ambientales, sociales y económicos se evidencian?*

CAPÍTULO IV

4 CALIDAD DEL AGUA EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS

4.1 Elemento de apertura

4.1.1 Caso de estudio: Evaluación de la calidad del agua en la microcuenca del río Tutanangoza, Ecuador

En la gestión integral de los recursos hídricos la evaluación de la calidad del agua de los drenajes de la cuenca es la columna vertebral del diagnóstico biofísico. La calidad del agua no es un componente aislado sino el resultado de la interacción de los componentes físicos y sociales. En lotes en donde se desarrollan actividades productivas agropecuarias y existe un deterioro de los servicios ecosistémicos, la respuesta es una pérdida de la calidad del agua. Las descargas de aguas residuales sin tratamiento previo aguas arriba repercuten en las posibilidades de uso para fines de consumo.

La palabra calidad podría funcionar de manera muy subjetiva para un tema tan serio como el agua. Sin embargo, el umbral de la calidad se acota cuando se define el uso que se le dará al recurso. Sobre la base del uso planteado, se determina la calidad que debería tener el líquido.

En este capítulo analizaremos el caso de estudio en la microcuenca del Río Tutanangoza, ubicada entre los cantones de Sucúa y Morona, en la provincia de Morona Santiago, Ecuador. Esta microcuenca enfrenta un deterioro de la calidad del agua producto de la presencia de contaminantes tanto naturales como antropogénicos, provenientes de

actividades como la ganadería, la descarga de efluentes residuales, la acumulación de residuos sólidos y la extracción de materiales pétreos. Esto motivó un estudio detallado para determinar la calidad del agua y proponer medidas de mitigación (Cárdenas Novillo, 2020). El estudio comenzó con una caracterización geoespacial de la microcuenca, analizando aspectos como la cobertura vegetal y el uso del suelo, seguido de una visita técnica de campo que recorrió 13 km accesibles de la cuenca, identificando cuatro puntos estratégicos de monitoreo. Durante tres campañas de muestreo en febrero, marzo y junio de 2020, se recolectaron datos mensualmente, analizando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, aplicando el Índice de Calidad del Agua NSF (ICA-NSF) y midiendo el caudal mediante el método del flotador (Cárdenas Novillo, 2020). Los resultados mostraron que la calidad del agua oscila entre rangos de "buena" y "regular", con valores del ICA-NSF entre 60 y 75, aunque se detectaron concentraciones de coliformes fecales que superan los límites máximos permisibles de la normativa ecuatoriana, con valores superiores a 1000 NMP/100 ml, atribuidos principalmente a la actividad ganadera (Cárdenas Novillo, 2020). Sobre la base de esto, se propusieron medidas para la mejora, mantenimiento y recuperación de la calidad del agua, incluyendo estrategias de gestión hídrica que mitiguen las fuentes de contaminación y promuevan prácticas sostenibles en las actividades económicas locales. Este caso de estudio confirma la necesidad de realizar monitoreos periódicos y no tomar a los muestreos puntuales como la realidad del sistema. Muchas veces, un solo muestreo ilustra la calidad del agua del momento en el que fue tomada dicha muestra y no la dinámica y concentración de la contaminación. Estas dinámicas son comunes en

zonas fuertemente antropizadas ya que las descargas pueden ser en diferentes horas del día, muchas veces en la noche y no todos los días de la semana. Estos muestreos sumados al cálculo de índices de calidad son claves para tomar decisiones respecto a la mitigación de fuentes de contaminación, desafíos que enfrentan muchas cuencas en América Latina, donde la presión antropogénica y la necesidad de desarrollo sostenible deben equilibrarse (Cárdenas Novillo, 2020).

4.2 Recursos pedagógicos

4.2.1 Preguntas de reflexión

a. ¿Cuál es el propósito principal del monitoreo de la calidad del agua en cuencas hidrográficas?

El propósito principal del monitoreo de la calidad del agua es identificar cualquier cambio en la concentración de contaminantes y amenazas potenciales para el uso del recurso hídrico. Este monitoreo implica observar, medir y evaluar variables físicas, químicas y biológicas del agua. En el caso de la microcuenca del Río Tutanangoza, se realizaron campañas de muestreo en puntos estratégicos durante febrero, marzo y junio de 2020, analizando parámetros como coliformes fecales y aplicando el Índice de Calidad del Agua NSF (ICA-NSF) (Cárdenas Novillo, 2020).

b. ¿Qué hace que el ICA-NSF sea una herramienta efectiva para evaluar la calidad del agua?

El ICA-NSF es efectivo debido a su naturaleza multi parámetro, que permite combinar múltiples indicadores físicos, químicos y biológicos, como oxígeno disuelto, coliformes fecales y pH, en un valor representativo de 0 a 100, donde valores más altos indican mejor calidad, facilitando una evaluación integral y la toma de decisiones en la gestión hídrica. En el estudio del Río Tutanangoza, este índice determinó que la calidad del agua era "buena" y "regular", con valores entre 60 y 75, revelando altas concentraciones de coliformes (Cárdenas Novillo, 2020). Este índice es central en el capítulo ya que convierte concentraciones de parámetros en un valor adimensional que determina la calidad de forma puntual. Este valor es una herramienta que permite “traducir” para los tomadores de decisión la calidad del agua de la cuenca analizada.

c. ¿Qué es la zonificación funcional de una cuenca hidrográfica y por qué es importante?

La zonificación funcional de una cuenca hidrográfica es el proceso de dividir una cuenca en zonas con roles específicos, como captación en la zona alta, transporte en la zona media y descarga en la zona baja, para facilitar la planificación y gestión de los recursos naturales considerando las interrelaciones entre las áreas y sus características biofísicas y socioeconómicas. En la microcuenca del Río Tutanangoza, el enfoque de monitoreo en diferentes puntos estratégicos a lo largo de 13 km sugiere una consideración implícita de las variaciones funcionales de la

cuenca, adaptando las estrategias de muestreo a las características de cada segmento (Cárdenas Novillo, 2020).

4.3 Importancia de los monitoreos para la calidad del agua superficial y subterránea

El agua constituye un elemento fundamental para el planeta, siendo el soporte indispensable de la vida y un recurso estratégico para mantener los servicios ecosistémicos (Ong Ning Ting, 2024). De manera general, el agua se clasifica en agua superficial y agua subterránea (Valdivielso et al., 2021) ambas naturalmente interconectadas a través del ciclo hidrológico, pero presentan diferencias significativas en su dinámica y comportamiento.

Las aguas subterráneas, por ejemplo, poseen tiempos de residencia mucho más extensos que las aguas superficiales, pero con una variabilidad que puede ir desde decenas hasta miles de años. Este hecho demuestra, en parte, al mayor volumen almacenado, en los acuíferos y la lentitud con la que el agua circula a través del seno de las rocas. Esta circulación pausada confiere a las aguas subterráneas una notable regularidad en su disponibilidad, a diferencia de las aguas superficiales, cuya dinámica es mucho más irregular, al depender de la distribución temporal y espacial de las precipitaciones, influenciadas a su vez por patrones climáticos frecuentemente variables (Cruz San Julián, 2018).

En conjunto, tanto las aguas superficiales como las subterráneas forman los principales reservorios naturales de agua dulce en el planeta. Su rol es crucial para el mantenimiento del equilibrio hidrológico, el sustento de la biodiversidad, la regulación del clima local y la provisión de

conectividad entre el suelo, la atmósfera y los sistemas biológicos (Cruz San Julián, 2018).En las últimas décadas, la disponibilidad y calidad del recurso hídrico se ha tornado gravemente frágil, en gran mayoría debido al crecimiento demográfico a escala global. Según a la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2023), actualmente habitan el planeta cerca de 8.000 millones de personas, de las cuales aproximadamente el 26% (2.000 millones) carecen de agua potable, y un 46% (3.600 millones) cuentan con servicios adecuados de saneamiento, demostrando las fallas estructurales en la gestión del recurso. Esta situación empeora con la sobreexplotación masiva del agua en sus diferentes reservorios. Un ejemplo paradigmático es el caso de Pakistán, donde la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD, 2025),reportó que, en 2021, el país asiático extrajo el 162% de sus recursos totales de agua dulce renovable, comprometiendo seriamente la disponibilidad para su población y deteriorando significativamente la calidad del agua.

Por su parte, el Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad (2023) advierte que, aunque el agua cubre del 70% de la superficie terrestre, solo el 2.5% corresponde a agua dulce, y de esta fracción, el 1% es disponible y aprovechable. De esta limitada cantidad, el 69% se destina al sector agropecuario, el 19% a la industria y el 12% restante a las actividades domésticas, lo que demuestra una distribución intensiva y desequilibrio del recurso.

Organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidades (ONU) y sus agencias autónomas entre ellas la Organización

Mundial de la Salud (OMS), la UNESCO y la FAO, resaltan que el acceso al agua limpia y segura es esencial para múltiples usos, entre los que destacan el consumo humano, las actividades domésticas e industrial, y la protección de la salud pública (UNESCO, 2024).

La presencia de agua contaminada y las deficiencias en los sistemas de saneamiento están directamente asociados a la propagación de enfermedades de transmisión como la cólera, la diarrea, la hepatitis, las infecciones de la piel, la fiebre tifoidea, entre otras. (Organización Mundial de la Salud, 2023a). De acuerdo a estimaciones de la OMS (2023a), aproximadamente un millón de personas mueren anualmente a causa de enfermedades diarreicas vinculadas con la insalubridad del agua y la falta de acceso a servicios de saneamiento adecuados.

La calidad del agua no solo condiciona la disponibilidad del recurso, sino que demuestra una variable crítica para la salud pública. La población está expuesta continuamente a riesgos infecciosos derivados de servicios de agua insuficientes o inadecuados, que, en muchos casos, podría prevenirse a través de una gestión basada en prevención, eficiencia y sostenibilidad del recurso. En este sentido, implementar un sistema de monitoreo de la calidad del agua no es únicamente recomendado, sino esencial, y en muchos países, jurídicamente obligatorio. Se trata del mecanismo clave para detectar, anticipar y controlar la presencia de contaminantes antes de que afecten a la población (Zainurin et al., 2022).

Si no existe un programa sistemático de monitoreo, es prácticamente imposible conocer con seguridad si existe o no un problema de calidad

del agua. Como resultado, toda norma, acuerdo o acción con relación al recurso se arriesga a estar mal enfocada o no llegar a tiempo. Debe quedar claro que el monitoreo de la calidad del agua no debe entenderse como una fase secundaria, sino como el punto inicial fundamental para la adecuada gestión del recurso y la protección de la salud humana (Bernex et al., 2021).

El monitoreo de la calidad del agua comprende una serie de procesos continuos y sistemáticos diseñados para observar, medir, muestrear y evaluar variables físicas, químicas y biológicas, a partir de métodos técnicos normalizados. Su propósito inicial es rastrear, comprender y abordar cualquier cambio o amenaza potencial para la calidad del recurso hídrico (Instituto del Agua, 2024). Esta actividad puede llevarse a cabo mediante métodos directos de observación en puntos previamente establecidos, tales como estaciones fijas o redes físicas definidas dentro de un programa de monitoreo. Un ejemplo destacable es el caso de Colombia, donde se han desarrollado redes nacionales que permiten obtener información periódica sobre el estado del recurso hídrico.

En la práctica, los programas de monitoreo aplican técnicas ampliamente reconocidas, como los análisis microbiológicos y fisicoquímicos del agua (Ideam, 2021). El análisis microbiológico permite detectar la presencia de organismos patógenos en el agua que pueden causar enfermedades en los seres humanos. Según la OMS (2023b), más de 251 millones de personas requirieron tratamiento preventivo para la esquistosomiasis, una enfermedad provocada por la exposición a agua contaminada con gusanos parasitarios. El análisis fisicoquímico permite evaluar parámetros como la temperatura, el

potencial hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto (OD) y la presencia de metales pesados (Instituto del Agua, 2024).

No obstante, en las últimas décadas ha surgido una herramienta altamente eficaz para el monitoreo continuo y a gran escala del recurso hídrico: la teledetección. Esta tecnología permite recolectar información sobre cuerpos de agua a partir de estaciones remotas o sensores satelitales, facilitando el análisis espacial y temporal de las variables relacionadas con la calidad del agua.

4.4 Índice de calidad del agua

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2021). El agua es un recurso esencial para la vida en el planeta; sin él, la existencia misma sería imposible. Sin embargo, en la actualidad, este recurso crucial está siendo gravemente afectado por las diferentes actividades humanas, lo que ha generado una crisis tanto en la cantidad como en la calidad del agua disponible (Sierra Ramírez, 2011).En este contexto, el estudio de Rojas et al. (2010) subraya la necesidad urgente de gestionar eficientemente el recurso hídrico, así como la importancia de llevar a cabo un monitoreo periódico y sistemático de su calidad.

Cuando hablamos de calidad, es crucial que dicha medición no solo se argumente en observaciones puntuales, sino que incluya un conjunto de parámetros que permitan cuantificar el grado de variación respecto a los valores naturales de este recurso, y clasificarlo según los usos previstos (Sierra Ramírez, 2011).En otras palabras, estamos hablando de una evaluación objetiva de la calidad del agua, y para ello, los Índices de

Calidad del Agua (ICA) se han consolidado como herramientas imprescindibles en la gestión hídrica.

El motivo por el cual los ICA son tan necesarios radica en su capacidad para simplificar y estandarizar la evaluación de la calidad del agua, permitiendo que esta información sea fácilmente accesible, entendible y útil para la toma de decisiones a escala local, regional o global (Torres et al., 2010). Los ICA son, en términos generales, expresiones integradas que combinan factores morfológicos, geográficos y climáticos con las características fisicoquímicas y biológicas del agua, sin perder de vista la estética de la zona y su entorno (Sierra Ramírez, 2011).

En este contexto, algunos autores sostienen que los ICA tienen un propósito más específico, al indicar el grado de contaminación del agua en función de la periodicidad del muestreo. Estos índices se expresan como un porcentaje de agua pura, de modo que un valor cercano o igual a 0%, demostrará el recurso gravemente contaminado, mientras que un valor cercano o igual a 100% reflejará a agua en excelentes condiciones de calidad (Rojas et al., 2010).

Según otras definiciones, los ICA corresponden a cálculos matemáticos que agrupan todas las mediciones relevantes de la calidad del agua. Este conjunto de datos permite generar una descripción general coherente de la condición del cuerpo de agua. Ofreciendo una visión integral de su estado global (Quiroz Fernández, Kulich Izquierdo, & Gutiérrez, 2017)

Como se ha mencionado, el ICA es ampliamente utilizado en la evaluación de la calidad del agua debido a su capacidad para ofrecer un

análisis integral del estado de los cuerpos hídricos. Este índice no solo facilita la evaluación, sino que también juega un papel crucial en la toma de decisiones relacionadas con su manejo, protección y control (Torres et al., 2010). No obstante, a medida que los problemas de calidad del agua se agravan, se hace necesario desarrollar y aplicar índices más específicos que se adapten en diferentes contextos y tipos de cuerpos hídricos. En las últimas décadas, se han desarrollado aproximadamente 30 tipos de diferentes ICA, cada uno acondicionado a diferentes necesidades y condiciones locales (Fernández et al., 2017).

Entre los más relevantes se encuentra el ICA-NSF, propuesto por la National Sanitation Foundation (NSF) y desarrollado por (Brown et al., 1972) que ha sido ampliamente utilizado para la evaluación de ríos y ha sido adaptado para diversos estudios internacionales. Este índice se caracteriza por su enfoque integral, que considera múltiples parámetros de calidad del agua y es altamente reconocido en el campo científico y ambiental (Quiroz Fernández et al., 2017).

Un ejemplo adicional es el caso de Colombia, donde se propuso el uso del índice ICACOSU (Índice de Calidad del Agua para Corrientes Superficiales), diseñado específicamente para evaluar las condiciones de los cuerpos de agua superficiales en este país. Este índice ha sido acoplado a las características ecológicas y climáticas de región, permitiendo un monitoreo más preciso y relevante para la gestión de los recursos hídricos en el contexto colombiano (Sierra Ramírez, 2011).

4.5 Tipos de Índices de calidad del agua

Sabemos que existen ICA adaptados a diferentes propósitos y características de los cuerpos hídricos evaluados. Sin embargo, ¿Cuáles son los más relevantes y por qué?, para responder a esta interrogante, comencemos con el análisis del conocido Índice de Calidad del Agua de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSFWQI).

Calidad del Agua de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSFWQI).

4.6 Índice de calidad del agua de la NSF (NSFWQI)

El NSFWQI, también conocido como ICA-NSF, fue propuesto en 1970 por la Fundación Nacional de Saneamiento de los Estados Unidos de América (NSF), con el apoyo de la técnica de investigación Delphi aplicada por la Rand Corporation (Cárdenas Patiño & Crespo Cuzco, 2024). Esta técnica que utiliza la consulta a expertos permitió obtener una ponderación consensuada sobre los pesos relativos de los parámetros que definen la "calidad" del agua. Para la creación del NSFWQI, participaron 142 expertos de diversas disciplinas, lo que garantizó objetividad del diseño del índice (Ramírez, 2021).

Una de las características innovadoras del ICA-NSF para su época fue que abarca una combinación de varios indicadores físicos, químicos y biológicos para proporcionar una visión holística de la calidad del agua. Este índice se desarrolló de acuerdo con tres estudios previos, los cuales fueron fundamentaron los parámetros y las metodologías utilizadas en el cálculo (Ramírez, 2021).

En el primer estudio, se analizaron 35 variables de contaminación. Los expertos aportaron con sus respectivos criterios sobre cada variable y clasificándola en una de tres categorías: no incluida, indecisa o incluida. Para ciertas variables que fueron incluidas, los expertos debían asignar una calificación del 1 al 5, donde 1 representaba la mayor importancia (Ramírez, 2021).

El segundo estudio se orienta a realizar una evaluación comparativa de las respuestas recolectadas de todos los expertos. Además, se desarrollaron ajustes a las respuestas cuando surgieron discrepancias. En este análisis, se trabajó con nueve parámetros clave, los cuales fueron cuantificados con mediciones precisas para facilitar el cálculo del índice (Ramírez, 2021). Entre las variables de mayor relevancia en este estudio se encuentran: oxígeno disuelto (OD), coliformes fecales, pH, DBO5, nitratos, fosfatos, desviación de la temperatura, turbidez y sólidos totales (Cárdenas Patiño & Crespo Cuzco, 2024).

Finalmente, el tercer estudio consistió en que los participantes fueran cuestionados sobre el progreso de una curva de valoración para cada una de las variables analizadas. El objetivo era que cada experto ilustrara una curva de valoración, demostrando la variación de la calidad del agua en función de los niveles de contaminación de las distintas variables. Los niveles de Calidad del Agua se asignaron en un rango de 0 a 100, ubicándose en las ordenadas (eje Y), mientras que los diferentes niveles de las variables fueron representados en las abscisas (eje X). Estas curvas, llamadas como Relaciones Funcionales o Curvas de Función, permitieron visualizar como cada variable incide en la calidad global del agua (Ramírez, 2021).

El cálculo de un índice de calidad del agua mediante el uso de curvas de calificación definidas y pesos asociados se realiza a través de un proceso aditivo. Este enfoque, conocido como índice aditivo, combina múltiples parámetros de calidad del agua en un único valor representativo. Se asigna un peso específico a cada parámetro según su importancia relativa en la evaluación general de la calidad del agua (Chakraborty & Bhattacharya, 2013).

Ecuación 1. Fórmula para el cálculo WQI y I.

$$WQ1 = \sum_{i=1}^{n} \quad w_i Q_i$$

$$WQ1 = \sum_{i=1}^{n} \quad I_i W_i$$

Donde;

$$\sum_{i=1}^{n} \quad w_i = 1$$

$$I_i = Subindice\ de\ cada\ parametro.$$

$$W_i = Factor\ de\ ponderacion.$$

$$Q_i = Calificacion\ del\ valor\ del\ parametro.$$

$$i\ y\ n = Factor\ de\ ponderacion.$$

El valor de se estima utilizando funciones de calidad, las cuales se expresan mediante ecuaciones o curvas para cada variable, El objetivo de estas funciones es convertir los valores de las variables a una escala adimensional, lo que resulta clave debido a que las variables pueden estas expresadas en distintas unidades (mgL-1, porcentaje, unidades, etc.), facilitando la agregación de los valores (Quiroz Fernández et al., 2017).

Las Curvas de Función se utilizan para expresar una escala de calificación para cada indicador, estableciendo una correlación entre los diferentes parámetros y su influencia en el grado de contaminación (Quiroz Fernández et al., 2017). Estas curvas son representadas mediante gráficos, ilustrando la variabilidad de la calidad del agua, con un rango de valores para cada parámetro seleccionado. Los niveles de Calidad del Agua se distribuyen en un rango de 0 a 100, ubicándose en el eje de las ordenadas (Y), mientras que los diferentes de las variables se expresan en las abscisas (X) (Rojas et al., 2010).

Los resultados son interpretados a través de la siguiente escala de clasificación:

Tabla 15. Calidad del agua asociada al valor del ICA-NSF.

Calidad del Agua	Valor del ICA-NSF
Excelente	91-100
Buena	71-90
Media	51-70
Mala	26-50
Muy Mala	0-25

Nota. Fuente: (Quiroz Fernández, Kulich Izquierdo, & Gutiérrez, 2017).

Tabla 16. Factores de ponderación asignados a cada parámetro según la ICA-NSF.

Parámetro	**Factor W_i**
Coliformes Fecales	0,16
Potencial de Hidrogeno	0,11
Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO5)	0,11
Nitratos (NO_3^{-1})	0,10
Fosfatos (PO_4^{3-})	0,10
Cambio de la Temperatura	0,10
Turbidez	0,08
Solidos Disueltos (SD)	0,07
% Saturación de Oxigeno	0,17

Nota. Fuente: (Jaramillo, Alberto, Otálvaro, & Victoria, 2006).

De acuerdo con Jiménez (2006), la obtención directa de los factores de escala a partir de los diagramas resulta compleja. Por este motivo, el autor desarrolló ajustes polinómicos para las curvas de estandarización correspondientes a cada parámetro. En la Tabla 17 se presentan dichos ajustes, los cuales fueron realizados por Jiménez y se muestran superpuestos sobre los diagramas originales del ICA-NSF, tal como se observa en las figuras siguientes.

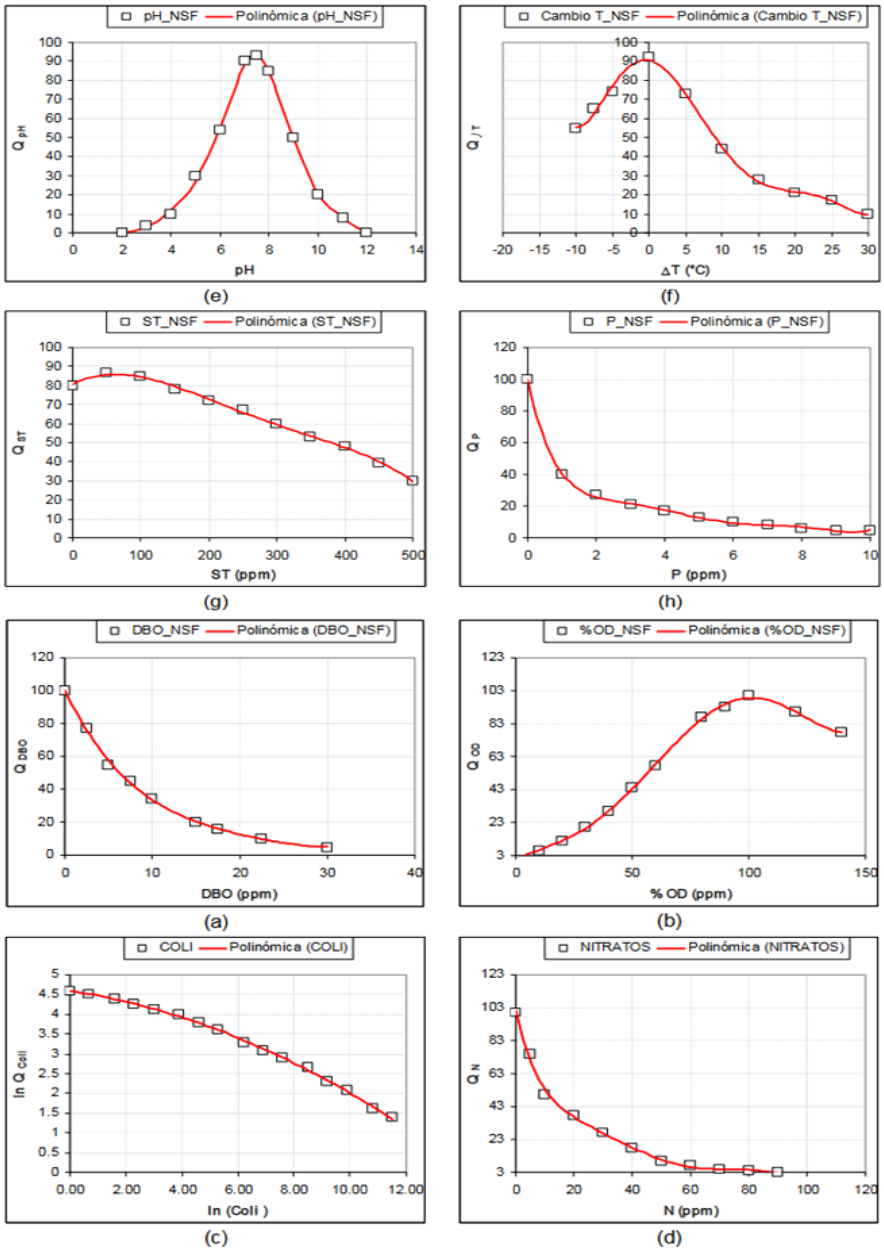


Figura 12. Diagramas originales del ICA-NSF. Factores de escala, para los parámetros involucrados en el (a) demanda bioquímica de oxígeno; (b) porcentaje de saturación de oxígeno; (c) coliformes fecales; (d) nitratos; (e) potencial de hidrógeno; (f) cambio de t

Fuente: (Jiménez, 2006)

Tabla 17. Ajuste de curvas para la determinación de factores de escala Q_i.

Parámetro	Ajuste
Saturación de oxígeno	$\mathbf{Q_{OD}\%}$=3.1615E−08(OD%)^5−1.0304E−05(OD%)^4+1.0076E−03(OD%)^3 −2.7883E−02(OD%)^2+8.4068E−01(OD%)−1.6120E−01. $\mathbf{R^2}$=0.9995 **donde:** $\mathbf{Q_{OD}\%}$**:** Factor de escala Oxígeno disuelto **OD%:** Oxígeno disuelto expresado como porcentaje de saturación
DBO	$\mathbf{Q_{DBO}}$=1.8677E−04(DBO)^5−1.6615E−02(DBO)^3+5.9636E−01(DBO)^2−1 .1152E+01(DBO)+1.0019E+02 $\mathbf{R^2}$ = 0.9889 **donde:** $\mathbf{Q_{DBO}}$**:** Factor de escala demanda bioquímica de oxígeno **DBO:** Demanda bioquímica de oxígeno en mg/l
Coliformes fecales	$\ln(Q_{Coli})$=−0.0152(lnC)^2−0.1063(lnC)+4.5922 $\mathbf{R^2}$=0.999 **donde:** $\mathbf{Q_{Coli}}$**:** Factor de escala coliformes fecales **C:** Coliformes fecales como NMP
Cambio de temperatura	$\mathbf{Q_{\Delta T}}$=1.9619E−06ΔT^6−1.3964E−04ΔT^5+2.5908E−03ΔT^4+1.5398E−02Δ T^3−6.7952E−01ΔT ^{2}+6.7204E−01ΔT+9.0392E+01 $\mathbf{R^2}$ = 0.9972 **Donde:** $\mathbf{Q_{\Delta T}}$**:** Factor de escala Cambio de Temperatura – ΔT: Cambio de temperatura en °C
Solidos totales	$\mathbf{Q_{ST}}$ =−4.4289E−09ST^4+4.650E−06ST^3−1.9591E−03ST^2+1.8973E−01ST+8. 0608E+01 $\mathbf{R^2}$ **= 0.9977** **donde:** Q_{ST}: Factor de escala Sólidos Totales – ST: Sólidos totales en mg/l
Fosfatos	$\mathbf{Q_P}$=4.67320E−03P^5−1.61670E−01P^3+2.20595P^4−1.50504E+01P+5.388 93E+01P^2−9.98933E+01P+9.98311E+01 $\mathbf{R^2}$ = 0.9994 **donde:** Q_P: Factor de escala Fosfatos – P: Fosfatos en mg/l
Turbiedad	$\mathbf{Q_T}$ =1.8939E−06T^4−4.9942E−04T^3+4.9181E−02T^2−2.6284T+9.8098E+01 R^2 = 0.9990 **donde:** QT: Factor de escala Turbiedad – T: Turbiedad en mg/l

Nitratos	$\mathbf{Q_{Nitr}}$=3.6503E−09N^5−1.2183E−06N^4+1.6238E−04N^3−1.0693E−02N^2+3.7304E−01N−7.5210N+1.0095E+02 **R^2** = 0.9972 **donde:** **Q_{Nitr}:** Factor de escala Nitratos **N:** Concentración de Nitratos en mg/l
pH	**Para** pH ≤ 7.5 **Q_{pH}**=−0.1789(pH)5+3.7932$(pH)^4$−30.517$(pH)^3$+119.75$(pH)^2$−224.58(pH)+159.46 **R^2** = 0.9981 **Para** pH > 7.5 **Q_{pH}**=−1.1142E − 01$(pH)^4$+44.50952$(pH)^3$−656.60000$(pH)^2$+4215.34762(pH)−9840.14286 **R^2** = 1.0000 **donde:** **Q_{pH}:** Factor de escala pH - pH: Nivel de pH

Nota. Fuente: (Jiménez, 2006).

El cálculo de los parámetros con los ajustes polinómicos logarítmicos permite eliminar la subjetividad del proceso tradicional de los dibujos en hojas milimétricas pues el resultado no es una línea proyectada en el eje de calidad sino la aplicación de la ecuación. Para ilustrar este proceso, usaremos la variable de coliformes fecales como ejemplo. El ajuste polinómico logarítmico (ecuación) calcula las mediciones de los coliformes fecales (expresadas en NMP) en una escala adimensional que representa la calidad. La fórmula para calcular el factor de calidad de coliformes se expresa mediante una ecuación logarítmica ajustada a los valores de concentración de coliformes fecales (C en NMP). La ecuación es la siguiente:

$$In(Qcoli) = -0.0152(InC)^2 - 0.1063(InC) + 4.5922$$

Donde:

- Qcoli Factor de calidad de los coliformes fecales, que es un valor adimensional.
- C Concentración de coliformes fecales en el agua, valorada como NMP (número más probable).
- In() Logaritmo natural de los valores de concentración (C).

La razón para utilizar un ajuste polinómico logarítmico es que la concentración de coliformes puede variar considerablemente, y para poder comparar valores con otros parámetros de la calidad del agua, es necesario convertir los datos a una escala común. Supongamos que tenemos una muestra de agua del río Guayas que tiene una concentración de coliformes fecales de 1000 NMP/100 ml. Para calcular el valor de la calidad se usa la siguiente ecuación:

S1. Concentración de coliformes fecales:

$$C = 1000\ NMP\ en\ 100\ ml\ de\ agua$$

2. Cálculo del logaritmo natural de C:

$$In(1000)N \approx 6.9078$$

3. Sustitución en la ecuación:

$$In(Q_{coli}) = -0.0152(6.9078)^2 - 0.1063(6.9078) + 4.5922$$

$$In(Q_{coli}) = -0.0152(47.687) - 0.1063(6.9078) + 4.5922$$

$$In(Q_{coli}) = -0.7237 - 0.7348 + 4.5922$$

$$In(Q_{coli}) = 3.134$$

4. Deshacer el logaritmo natural (aplicando la función inversa del logaritmo natural, es decir, calcular la exp del resultado):

$$Q_{coli} = exp\ exp\ (3.134)\ \approx 22{,}98$$

Finalmente, el valor de Qcoli = 22.98 es un número adimensional que representa la calidad del agua en términos de coliformes fecales. Este valor si es comprable con otros parámetros de la calidad del agua, ya que está en una escala común con el resto de los valores.

4.7 Índice de Calidad del Agua de Columbia Británica (BCWQI)

En 1995, el Ministerio de Medio Ambiente de Canadá desarrolló el Índice de Calidad del Agua de Columbia Británica (BCWQI), con el objetivo de mejorar la evaluación de la calidad del agua en esta región. Este índice presenta similitudes con el conocido Índice de Calidad del Consejo Canadiense de ministros de Medio Ambiente (CCMEWQI, siglas en inglés), que también mide los parámetros de calidad del agua, determinando su nivel de inconformidad a través de la comparación con un límite predefinido (Tirkey, Bhattacharya, & Chakraborty, 2015).

El BCWQI permite clasificar la calidad del agua según todos los parámetros de medición existentes. Para calcular el valor final del índice, se utiliza la siguiente ecuación.

Ecuación 2. Cálculo final del BCWQI.

$$BCWQI = 100 - \left(\sqrt{\frac{F1^1 + F2^2 + \frac{F3}{3^2}}{1.453}} \right)$$

En la ***Ecuación 2***, 1.453 es un factor de calibración empleado para garantizar la precisión del índice, el cual se mide en una escala de 0 a 100. La exactitud del BCWQI depende de la cantidad y frecuencia de los muestreos repetidos, así como del número de estaciones de monitoreo. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes de este índice es que, debido a su uso del porcentaje máximo de desviación, la tendencia de calidad del agua tiende a desviarse del límite estándar. Esta limitación impide calcular con precisión el número de extracciones que superan el límite máximo, lo cual constituye una de las desventajas del BCWQI (Tirkey, et al.,2015).

4.8 Índice de Calidad de Agua de Oregón (OWQI)

A finales de la década de 1970, el Departamento de Calidad Ambiental de Oregón (ODEG) desarrolló el Índice de Calidad del Agua de Oregón, una herramienta altamente utilizada en el sector público, al igual que otros índices mencionados anteriormente. Sin embargo, el OWQI original fue descontinuado en 1983 debido a la gran cantidad de recursos requeridos para calcular y notificar los resultados, lo que complicaba su aplicación a gran escala (Tirkey, et al.,2015).

Con los avances tecnológicos en informática y visualización de datos, así como una mejor comprensión de calidad del agua, el OWQI fue actualizado en 1995, Esta versión mejorada refinó el subíndice original,

incorporando nuevos subíndices para temperatura y fósforo total, y optimizó el proceso de cálculo de agregación de los datos. El índice actualizado se calcula integrando los valores ocho variables clave relacionados con la calidad del agua (Tirkey, et al.,2015).

Aunque el OWQI fue utilizado inicialmente para evaluar la calidad ambiental del agua en los arroyos de Oregón, pero su aplicación en otras regiones geográficas o cuerpos de agua puede generar resultados menos precisos (Tirkey, et al.,2015).

El modelo original del OWQI se basó en el NSFWQI, adoptado el método Delphi para la selección de las variables a evaluar. Esta técnica permite estructurar información compleja a partir del consenso de un grupo de expertos, garantizando una coherencia basada en el mejor conocimiento disponible (Tirkey, et al.,2015).

Tanto el OWQI como el NSFWQI utilizan conversiones logarítmicas para transformar los resultados de las variables del agua en valores de subíndices. Este enfoque es eficiente porque permite que una pequeña modificación en los niveles más bajos de deterioro tenga un impacto mayor que una variación similar en niveles de desarrollo más altos (Tirkey, et al.,2015).

1. La función de media aritmética ponderando que se utilizó en el OWQI original (Tirkey, et al.,2015).

Ecuación 3. Fórmula de OWQI original.

$$WQI = SI_i W_i$$

2. La función de media geométrica ponderada que se utilizó en el NSFWQI (McClelland, 1974).

Ecuación 4. Fórmula de NSFWQI

$$Water\ Quality\ Index = \prod_{i=1}^{n} SI^{wi}$$

Donde;

$$SI_i = Sub\ indice\ de\ cada\ parametro$$

$$W_i = Factor\ de\ ponderacion$$

$$n = Numero\ de\ Subindice$$

La fórmula de la media aritmética ponderada puede mejorarse al combinarla con la fórmula de la media aritmética cuadrada no ponderada, lo que permite integrar los resultados de los subíndices. La principal ventaja de este índice es que otorga mayor peso a la variable más deteriorada, lo que garantiza que esta variable tenga la mayor incidencia en el índice final. Este enfoque permite una evaluación más precisa, ya que refleja de manera más fiel la condición general del agua, teniendo en cuenta la significancia relativa de cada variable en distintos tiempos y lugares. La fórmula viene dada por (Tirkey, et al.,2015).

Ecuación 5. Fórmula de WQI Final.

$$WQI = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{SI_i^2}}}$$

4.9 Elementos de cierre:

4.9.1 Reunamos lo anterior

Caso de Estudio: Evaluación de la Calidad del Agua en la Microcuenca del Río Tutanangoza, Ecuador.

En este capítulo aprendimos que la evaluación de la calidad del agua en cuencas hidrográficas, como la realizada en la microcuenca del Río Tutanangoza en Ecuador, es fundamental para garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades que dependen de estos recursos. El caso mostró que el deterioro constante de la calidad del agua, causado por contaminantes de origen natural y humano principalmente por la ganadería, descargas residuales y acumulación de residuos sólidos, el texto resalta estudios detallados que permitan cuantificar el estado del recurso y diseñar medidas de mitigación. Mediante las campañas de muestreo, el monitoreo sistemático y el cálculo del Índice de Calidad del Agua NSF (ICA-NSF), se pudo cuantificó la calidad del agua entre “buena” y “regular”, pero también se pudo identificar problemas graves como la presencia de coliformes fecales por encima de los límites normativos. Este caso nos enseñó que el monitoreo continuo es la base para detectar amenazas a la calidad del agua, que el uso de índices integrales como el ICA-NSF facilita la interpretación y la toma de decisiones.

El caso del Tutanangoza representa muy bien los desafíos de las cuencas de la región, mostrando cómo la presión antropogénica y la necesidad de desarrollo sostenible deben equilibrarse. La experiencia local sirve como ejemplo para otras cuencas de América Latina y el mundo, resaltando la necesidad de monitoreos periódicos con el fin de establecer políticas públicas y ejecutar controles por parte de las autoridades.

4.10 Revisión del capítulo

4.10.1 Importancia de los monitoreos para la calidad del agua superficial y subterránea

El agua es fundamental para la vida y servicios ecosistémicos. Las aguas subterráneas tienen tiempos de residencia más largos que las superficiales, pero ambas forman los principales reservorios de agua dulce. La crisis actual se debe al crecimiento demográfico, donde 2.000 millones carecen de agua potable y 3.600 millones de saneamiento adecuado. La calidad del agua es crítica para la salud pública, con aproximadamente un millón de muertes anuales por enfermedades diarreicas.

- ¿Por qué las diferencias en tiempos de residencia entre aguas superficiales y subterráneas son relevantes para el monitoreo? ¿Cómo se relaciona el crecimiento demográfico con la degradación de la calidad del agua a escala global? ¿Por qué el monitoreo debe ser "jurídicamente obligatorio" y no solo recomendado? ¿Qué significa que el monitoreo sea el "punto inicial fundamental" y no una "fase secundaria" en la gestión hídrica?

4.10.2 Índice de calidad del agua

Los Índices de Calidad del Agua (ICA) son herramientas imprescindibles que simplifican y estandarizan la evaluación del agua. Permiten cuantificar el grado de variación respecto a valores naturales y clasificar según usos previstos. Su necesidad radica en hacer la información accesible, entendible y útil para toma de decisiones a diferentes escalas. Se han desarrollado aproximadamente 30 tipos diferentes de ICA adaptados a diversas necesidades y condiciones locales.

- ¿Por qué es necesario "simplificar" la evaluación de calidad del agua sin perder precisión científica? ¿Qué ventajas ofrece la "estandarización" para la comparación entre diferentes áreas geográficas y períodos? ¿Por qué existen tantos tipos diferentes de ICA en lugar de un índice universal? ¿Cómo se balancea la necesidad de adaptación local con la comparabilidad global?

4.10.3 Índice de calidad del agua de la NSF (NSFWQI).

El NSFWQI fue desarrollado en 1970 por la NSF usando la técnica Delphi con 142 expertos. Su naturaleza multiparámetro integra indicadores físicos, químicos y biológicos. Se desarrolló en tres estudios: análisis de 35 variables, evaluación comparativa de 9 parámetros clave, y desarrollo de curvas de valoración. El cálculo utiliza un enfoque aditivo con pesos específicos y funciones de calidad que convierten valores a escala adimensional.

- ¿Por qué se utilizó la técnica Delphi con expertos multidisciplinarios para desarrollar este índice? ¿Qué significa que un índice sea "multiparámetro" y por qué esto es ventajoso? ¿Por qué es necesario convertir variables con diferentes unidades a una escala adimensional? ¿Cómo garantizan las curvas de valoración que el índice refleje adecuadamente el impacto de cada parámetro?

4.10.4 Índice de calidad del agua de Columbia Británica (BCWQI)

Desarrollado en 1995 por el Ministerio de Medio Ambiente de Canadá. Similar al CCMEWQI, mide parámetros determinando inconformidad mediante comparación con límites predefinidos. Su principal inconveniente es que la tendencia tiende a desviarse del límite estándar, impidiendo calcular con precisión extracciones que superan el límite máximo.

- ¿Por qué se desarrolló un índice regional específico para Columbia Británica en lugar de adoptar uno existente? ¿Qué implicaciones tiene que una índice tienda a "desviarse del límite estándar”? ¿Cómo afecta la imprecisión en el cálculo de superaciones de límites a la gestión hídrica?

4.10.5 Índice de calidad de agua de Oregón (OWQI)

Desarrollado en 1970, descontinuado en 1983 por requerir muchos recursos, actualizado en 1995 con avances tecnológicos. Se basa en el NSFWQI usando método Delphi para selección de variables. Utiliza conversiones logarítmicas y combina media aritmética ponderada con

media aritmética cuadrada no ponderada, otorgando mayor peso a la variable más deteriorada.

- ¿Por qué un índice puede ser "descontinuado" por razones de recursos y luego "resucitado" con avances tecnológicos? ¿Qué ventajas ofrece otorgar mayor peso a la variable más deteriorada en lugar de un promedio simple? ¿Por qué las conversiones logarítmicas son más efectivas para reflejar deterioros en diferentes niveles? ¿Cómo influye la evolución tecnológica en la viabilidad y precisión de los índices de calidad del agua?

4.10.6 Preguntas para el pensamiento crítico

1 ¿Por qué considera que el monitoreo de la calidad del agua debe ser sistemático y no esporádico?

- *Analice las consecuencias que tendría para la gestión de la microcuenca del Río Tutanangoza si las campañas de muestreo se hubieran realizado de manera irregular o sin planificación. Considere cómo la falta de datos continuos podría afectar la identificación de tendencias, la detección de eventos críticos y la toma de decisiones oportunas.*

2 En el caso del Río Tutanangoza, el ICA-NSF clasificó la calidad del agua como "buena" a "regular" (60-75), pero se detectaron coliformes fecales superiores a 1000 NMP/100 ml. ¿Qué limitaciones evidencia esto en el uso de índices integrales para la toma de decisiones?

- *¿Cómo reconciliaría una clasificación "buena" con niveles peligrosos de contaminación microbiológica? Proponga estrategias para comunicar estos resultados a la comunidad y autoridades, evitando interpretaciones erróneas.*

3 Considerando que la microcuenca del Río Tutanangoza tiene zonas de captación, transporte y descarga, ¿cómo diseñaría usted una estrategia de monitoreo diferenciada para cada zona funcional?

- *¿Qué parámetros priorizaría en cada segmento y por qué? Elabore una propuesta que justifique la selección de variables clave en función de los procesos predominantes en cada zona.*

4 ¿Cree que sería necesario desarrollar un índice de calidad específico para las cuencas amazónicas ecuatorianas en lugar de usar el ICA-NSF?

- *Argumente su posición considerando las características ecológicas, climáticas y socioeconómicas específicas de la región de Morona Santiago. Analice los pros y contras de crear un índice local frente a adaptar uno existente.*

5 La microcuenca del Tutanangoza enfrenta contaminación por ganadería, efluentes residuales, residuos sólidos y extracción de materiales pétreos. ¿Cómo evaluaría la contribución relativa de cada fuente a la degradación total?

- *¿Qué metodologías complementarias al ICA-NSF recomendaría para lograr una evaluación más precisa? Diseñe una estrategia*

que combine análisis de carga contaminante y modelación de fuentes puntuales y difusas.

6 Compare las ventajas y desventajas del ICA-NSF, BCWQI y OWQI para evaluar la calidad del agua en cuencas con características similares al Río Tutanangoza.

- *¿Cuál considera más apropiado y por qué? Justifique su elección con base en criterios técnicos y de aplicabilidad local.*

7 Los resultados del estudio en la microcuenca del Tutanangoza muestran problemáticas "representativas de los desafíos que enfrentan muchas cuencas en América Latina". ¿Hasta qué punto es válida esta extrapolación?

- *¿Qué factores limitarían la aplicabilidad de estos hallazgos a otras cuencas? Identifique variables contextuales que podrían modificar la interpretación y utilidad de los resultados.*

8 ¿Cómo integraría usted el uso de teledetección y sensores remotos con el monitoreo tradicional en puntos fijos para mejorar la evaluación de la calidad del agua en la microcuenca del Tutanangoza?

- *¿Cómo integraría usted el uso de teledetección y sensores remotos con el monitoreo tradicional en puntos fijos para mejorar la evaluación de la calidad del agua en la microcuenca del Tutanangoza?*

9 Considerando que existen aproximadamente 30 tipos diferentes de ICA desarrollados mundialmente, ¿cómo diseñaría un sistema de

gestión adaptativa que permita ajustar los métodos de evaluación según las condiciones cambiantes de la cuenca?

- *Proponga un protocolo que incluya revisión periódica de indicadores, actualización de metodologías y participación de actores locales en la toma de decisiones.*

10 El desarrollo del ICA-NSF involucró a 142 expertos de diversas disciplinas. ¿Qué tipos de expertos incluiría usted en un panel para desarrollar estrategias de gestión específicas para la microcuenca del Tutanangoza?

- *¿Cómo equilibraría el conocimiento científico con el conocimiento local/tradicional? Formule una estrategia de gestión que integre ambos tipos de saberes para la protección y restauración de la cuenca.*

CAPÍTULO V

5 ÍNDICES DE VEGETACIÓN Y SU APORTE EN EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LAS CUENCAS

5.1 Elemento de apertura

5.1.1 Caso de estudio: Análisis del estado de la vegetación de una microcuenca Amazónica mediante el NDVI. Caso de estudio microcuenca del rio Sandalias

Las cuencas desempeñan el papel de regulación del clima global y sostienen la biodiversidad. La vegetación de las cuencas es importante para mantener el ciclo del agua de manera íntegra. Con el análisis del índice de vegetación obtenemos información valiosa sobre la salud de los ecosistemas en general y los cambios que ocurren (Sucoshañay Villalba et al., 2024).

Sucoshañay Villalba et al., (2023) realizaron el estudio de NDVI en el rio Sandalias que tiene una superficie de 3674,1 hectáreas, para ello utilizan imágenes satelitales de alta resolución, con un porcentaje de nube de 10 %, la imagen procesada corresponde a septiembre del 2023. Para caracterizar el estado de la vegetación de establecieron cinco categorías: suelo desnudo o agua, vegetación muy seca, vegetación escasa, vegetación moderada y vegetación densa y saludable, para cada uno de estas clasificaciones se estableció un valor de NDVI entre -0,2 y 0.5. Se obtuvo como resultados que mayor parte del área posee vegetación escasa ocupando una superficie de 2235,6 hectáreas, luego está la categoría de vegetación moderada que ocupa una superficie de

1177,1 hectáreas, la superficie de vegetación muy seca ocupa una superficie de 190,8 hectáreas y la cobertura de suelo desnudo o agua tiene 70,5 hectáreas siendo la cobertura que ocupa menor superficie. Con estos resultados indican que el área de la microcuenca podría estar experimentando degradación o perturbación, pues no presenta vegetación densa y saludable.

La aplicación de índices de vegetación con el NDVI son una herramienta útil que nos permite conocer el estado de la vegetación, esta información sirve como base para el ordenamiento territorial de las cuencas pudiendo determinar áreas degradadas y que requieren enfoques de conservación y restauración.

5.2 Recursos pedagógicos

5.2.1 Preguntas de reflexión

a. ¿Cuál es el propósito de estudiar los índices de vegetación en las cuencas hidrográficas*?*

Los índices de vegetación proporcionan información acerca de la densidad y salud de la vegetación, esto nos permite monitorear sequías y estimar el estrés hídrico en las plantas. Además de comprender los procesos biofísicos que ocurren en las cuencas como la pérdida de vegetación y la relación con la erosión del suelo y como interactúa el clima y la vegetación. En particular el índice de vegetación NDVI indica la biomasa vegetal. Los índices de vegetación nos permiten monitorear el estado de la vegetación sin necesidad de realizar levantamientos en campo (Cravajal, Paredes, & Palacios , 2024).

b. *¿De qué manera los índices de vegetación contribuyen en el proceso de zonificación de las cuencas hidrográficas?*

Los índices de vegetación nos permiten identificar de manera cuantitativa el estado de la vegetación y cuáles son las zonas que presentan degradación o han perdido cobertura vegetal. Se realiza mediante un análisis de condiciones biofísicas de la vegetación y explica la variación de cobertura si existe reforestación y deforestación. De esta manera los indices de vegetación no solo nos indican el estado de la vegetación, sino que también aportan con criterios para delimitar áreas donde se debe priorizar la intervención para su cuidado (López-Pérez, Fernández-Reynoso, & Martínez-Menes, 2015).

c. ¿Qué es la zonificación y cómo se aplica en la gestión de cuencas hidrográficas?

La zonificación consiste en el análisis y delimitación de áreas dentro de una cuenca en función de sus características físicas, biológicas y sociales, utilizando herramientas como los SIG para levantar información precisa sobre los usos actuales del suelo. Esta información se convierte en la base para identificar áreas prioritarias, comparar la situación actual con la deseada y diseñar estrategias de manejo adaptadas a cada zona.

d. ¿Cuáles son los enfoques conceptuales que orientan la zonificación y gestión de cuencas hidrográficas?

Existen cuatro enfoques principales:

- River Basin Development: Estimula el desarrollo económico en áreas hídricas clave.
- Watershed Management: Regula la descarga de agua y promueve la reforestación.
- Natural Resources Development: Evoluciona hacia la conservación y restauración de recursos naturales.
- Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas: Busca un equilibrio entre necesidades ambientales, culturales y económicas.

5.3 ¿Qué es el NDVI?

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), es definido como un índice de teledetección que cuantifica la cobertura y vigor de la vegetación al explotar la diferencia entre la absorción de luz roja por la clorofila y la alta reflectancia en el infrarrojo cercano. Es ampliamente utilizado para evaluar respuestas ecológicas al cambio ambiental, como cambios en la fenología vegetal y patrones de migración animal (Pettorelli, 2005).Se calcula de la siguiente forma:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Este índice se basa en las propiedades ópticas de la vegetación, determinadas por cómo las plantas interactúan con la luz solar. La clorofila absorbe la luz roja para la fotosíntesis, resultando en baja reflectancia en la banda roja, mientras que las estructuras celulares de las hojas reflejan intensamente el infrarrojo cercano, generando alta reflectancia en NIR (Boiarskii, 2019). Sensores remotos, como los de

los satélites satelitales Sentinel-2, Landsat 8/9, MODIS o incluso drones, capturan estas reflectancias en bandas espectrales específicas.

Esta información es procesada mediante softwares como Google Earth Engine, o programas de información geográficas como QGIS, permitiendo el análisis tanto temporal como espacial. Los resultados de NDVI oscilan entre el -1 y 1, donde los valores más cercanos al 1 indican vegetación sana y densa y los valores cercanos al menos 1 indican tierra desnuda, cuerpos de agua, zonas nevadas o rocosas (Carbajal & Onofre, 2020).

Tabla 18. Rangos de clasificación para NDVI.

Clase	Valores de NDVI	Cobertura de la tierra	Descripción
1	< -0.1	Clases no vegetales	Ríos, quebradas, lagunas y nubes
2	-0.1 - 0.15	Tierra desnuda	Tierras degradadas, asentamientos, infraestructura vial, suelos sin cobertura vegetal
3	0.15 - 0.25	Vegetación dispersa	Matorral xerófilo, tierras cultivadas, pastizales, herbazales, arbustos dispersos, cultivos irrigados, tierras aradas por cultivar
4	0.25 - 0.40	Vegetación abierta	Cultivo arbóreo, vegetación leñosa, plantación arbustiva, plantación de escasos crecimiento, bosque xerófilo
5	> 0.40	Vegetación Cerrada	Plantas densas en crecimiento, bosque húmedo siempre verde, algunas especies deciduas y semi-decidua

Fuente: (Cartaya, Zurita Alfaro, Rodríguez Ríos, & Montalvo Párraga, 2015).

En cuanto a su uso, el NDVI es una herramienta versátil con aplicaciones en múltiples disciplinas ya que permite estimar parámetros biofísicos, como el Índice de Área Foliar (LAI), biomasa, productividad primaria neta (NPP) y cobertura vegetal (Zhang, 2018). Algunas de estas

disciplinas son la agricultura de precisión, ecología y conservación, cambio climático, entre muchos otros. En consecuencia, el NDVI se erige como una herramienta esencial para respaldar la toma de decisiones en diversos sectores, al ofrecer una visión precisa de la salud y dinámica de la vegetación.

5.4 ¿Qué es el EVI?

El Enhanced Vegetation Index (EVI) es un índice de vegetación optimizado diseñado para mejorar la sensibilidad en regiones con alta biomasa, minimizar los efectos atmosféricos, y reducir la influencia del suelo (Huete et al., 2002) Introducido para el sensor MODIS, el EVI se presenta como una mejora del NDVI, destacando su capacidad para evitar la saturación en ecosistemas densos y corregir efectos atmosféricos mediante la banda azul (García et al., 2011). Este índice se calcula a partir de la siguiente formula:

$$EVI = G \times \left[\frac{(NIR - Red)}{(NIR + C1 \times Red - C2 \times Blue + L)} \right]$$

El EVI fue diseñado como una mejora del NDVI, y autores detallan diferencias clave. La corrección atmosférica implementando la banda azul y los coeficientes C1/C2 reducen la dispersión atmosférica, logrando un 12% más de precisión que el NDVI en condiciones nubladas (Kalacska, 2007).El factor L del EVI minimiza la reflectancia del suelo en áreas de baja cobertura vegetal, como desiertos, donde el NDVI es más sensible, haciendo que el EVI sea menos sensible a variaciones en el tipo de suelo (Vicente et al., 2008). Otra diferencia es la sensibilidad en la vegetación densa. Huete et al. (2002), muestra que

el NDVI se satura en valores mayores de 0.7, en bosques densos, mientras que el EVI mantiene una sensibilidad de hasta 0.9, captando variaciones de biomasa, cruciales para los ecosistemas tropicales.

5.5 ¿Qué es el LAI?

El Leaf Area Index (LAI), es definido como la superficie foliar total por unidad de área del suelo, un indicador clave de la biomasa foliar y la estructura del dosel, que influye en procesos como la fotosíntesis y la evapotranspiración (Fang, Baret, Plummer, & Schaepman-Strub, 2019). Este también es una medida fisiología importante que determina la intercepción de luz por el cultivo y su consiguiente tasa de crecimiento (Benjamin, 2017).

El área foliar es un factor determinante en la intercepción de radiación, fotosíntesis, biomasa, acumulación, transpiración y transferencia de energía por las cubiertas de los cultivos. Este se ve altamente influenciado por la temperatura (Benjamin, 2017). El desarrollo del área foliar es muy sensible a la temperatura. Estudios habla sobre que la temperatura óptima para el crecimiento de las hojas es de unos 30 °C (Bhattacharya, 2019).

Uno de los usos más relevantes del LAI se encuentra en la agricultura de precisión, donde se emplea para estimar rendimientos, detectar situaciones de estrés en los cultivos y optimizar tanto el riego como la fertilización. Por ejemplo, Tang et al., (2022) utilizaron valores de LAI derivados de índices espectrales para estimar la biomasa del trigo en China. Gracias a esta metodología, lograron mejorar las predicciones de rendimiento en un 10% y optimizar el uso del agua, reduciendo su

consumo en un 25%. Estos resultados evidencian el potencial del LAI como herramienta clave para una gestión agrícola más eficiente, sostenible y adaptada a los desafíos del cambio climático.

Otro uso se da en la gestión forestal, en donde se emplea para monitorear la salud forestal, crecimiento y recuperación tras perturbaciones como incendios y plagas. El LAI es muy sensible a la pérdida de follaje tras incendios, superando en algunos casos a índices como NDVI para cuantificar la severidad de la quema (Yoo et al., 2024). Gracias a esta capacidad de detección precisa, los gestores pueden diseñar estrategias de restauración más efectivas, ajustar intervenciones silvícolas y optimizar recursos. En definitiva, el LAI se posiciona como una herramienta indispensable para conservar y recuperar nuestros ecosistemas forestales con la máxima eficiencia.

5.6 ¿Cómo obtener el NDVI, EVI, LAI?

5.6.1 A partir de productos de MODIS

El primero se centra en la utilización de Google Earth Engine, este ofrece acceso integrado a productos de vegetación derivados de MODIS, incluyendo el NDVI y EVI de la colección MOD13A1 y el LAI de MCD15A3H (Didan, 2021). En el Code Editor de GEE, los usuarios pueden importar estas colecciones, filtrarlas por región y fecha, y seleccionar o mapear directamente las bandas de NDVI, EVI y LAI sin necesidad de cálculos adicionales, todo esto a partir de códigos de programación. Además, los investigadores pueden visualizar tendencias temporales, exportar rásteres procesados y construir paneles interactivos, consolidando a GEE como una plataforma esencial para la evaluación

global de la vegetación. A continuación, se presenta un conjunto de pasos para poder generar un código para visualizar y descarga el NDVI de una zona en específico:

Paso 1: Definir el área de estudio (polígono)

Primero, se dibuja un polígono manualmente usando la herramienta de geometría del panel izquierdo de Google Earth Engine (ícono del lápiz). Este polígono representa el área que quieres analizar.



Figura 13. Icono cuadrado.

Fuente: Los autores. Extraído de (Google Earth Engine).

El código asume que esta geometría se llama geometry, por lo que se guarda en una variable llamada aoi. Si usas otro nombre, debes cambiar geometry por el nombre correcto en el código.

```
1  // === 1. Dibuja un polígono manualmente y asegúrate que se llame 'geometry' ===
2  var aoi = geometry;
```

Paso 2: Establecer el rango de fechas de análisis

Se definen dos variables: fechaInicio y fechaFin, que indican el período de tiempo que quieres analizar. En el ejemplo, se utilizan fechas entre el 1 de junio y el 31 de agosto de 2021, pero puedes modificarlas a cualquier rango válido en formato YYYY-MM-DD.

```
// === 2. Define el rango de fechas ===
var fechaInicio = '2021-06-01';
var fechaFin = '2021-08-31';
```

Paso 3: Cargar la colección filtrar por fecha y área

Dependiendo del índice que queramos analizar escogeremos el producto de MODIS. Para este caso cargaremos la colección de imágenes MODIS/061/MOD13A1, que contiene datos de NDVI y EVI además de otros índices, en una resolución temporal cada 16 días con resolución de 500 metros. Luego, se filtra esta colección por el área de estudio (filterBounds(aoi)) y por el rango de fechas definido (filterDate(fechaInicio, fechaFin)). Finalmente, se selecciona solo la banda 'NDVI'.

```
// === 3. Cargar MOD13A1 y filtrar por fechas y área ===
var mod13 = ee.ImageCollection('MODIS/061/MOD13A1')
                .filterBounds(aoi)
                .filterDate(fechaInicio, fechaFin)
                .select('NDVI');
```

Paso 4: Escoger la primera imagen y escalarla

La función .first() toma la primera imagen de la colección filtrada. Esa imagen se almacena en la variable primera. Luego, se aplica un factor de escala de 0.0001 usando .multiply(0.0001), porque los valores originales de MODIS vienen multiplicados por 10,000. Este factor de escala se la puede ver en las propiedades del producto, en la pestaña de

bandas. Esto transforma los valores al rango real de NDVI, que va de -1 a 1.

```
// === 4. Seleccionar la primera imagen, escalar, reproyectar y recortar ===
var primera = mod13.first();

// Aplica el factor de escala y reproyecta a EPSG:4326 (lat/lon)
var ndviEscalado = primera
                   .multiply(0.0001)
                   .reproject({
                     crs: 'EPSG:4326',
                     scale: 500
                   })
                   .clip(aoi);
```

Paso 5: Visualizar en el mapa

Se centra el mapa en el área de estudio con Map.centerObject(aoi, 9), donde el número 9 representa el nivel de zoom. Después, se añade la imagen de NDVI procesada al mapa con una paleta de colores que va del blanco (valores bajos) al verde (valores altos), y un rango visual de -0.2 a 1, que cubre el espectro real de NDVI en vegetación natural o cultivos.

```
// === 5. Visualizar NDVI en el mapa ===
Map.centerObject(aoi, 9);
Map.addLayer(ndviEscalado,
             {min: -0.2, max: 1, palette: ['white', 'green']},
             'NDVI escalado');
```

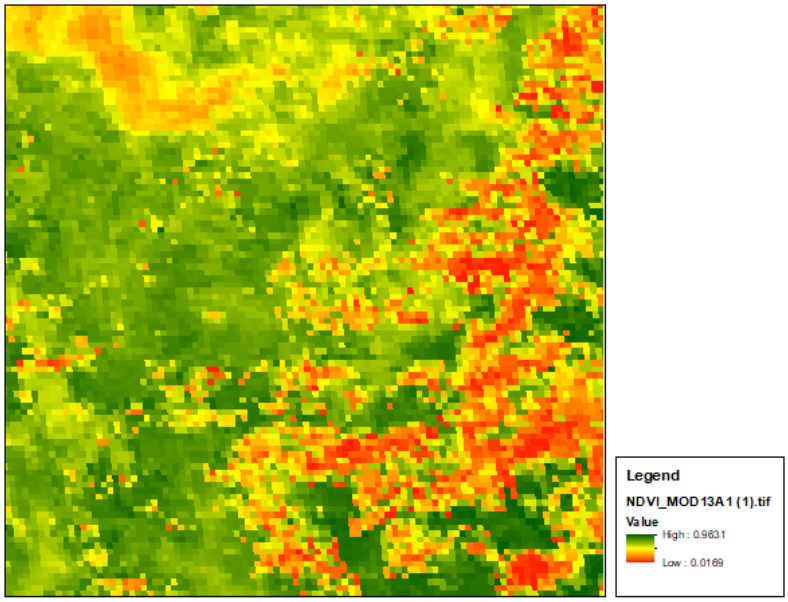
Paso 6: Exportar la imagen a Google Drive

Finalmente, el código configura una exportación a Google Drive con Export.image.toDrive(). Se le asigna un nombre a la tarea (descripción), una carpeta donde se guardará el archivo (folder), y un nombre para el archivo (fileNamePrefix). También se define la resolución (500 metros), el formato del archivo (GeoTIFF), y el área a exportar (region: aoi). Para

completar la exportación, debes ir a la pestaña "Tasks" en GEE y hacer clic en "Run".



El resultado se podrá proyectar en cualquier SIG, ya sea de pago o de uso abierto como por ejemplo QGIS.



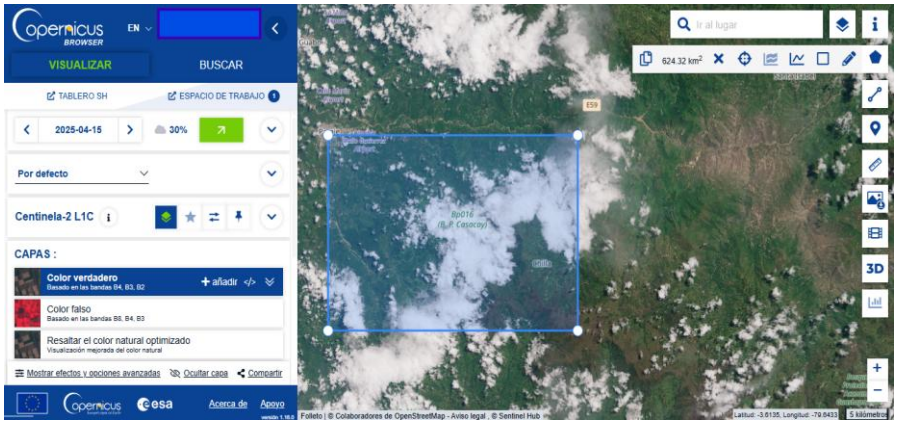
Cabe aclarar que este código sirve para poder descargar cualquier producto de MODIS en formato GeoTIFF Solo se debe cambiar el producto, escoger la banda y aplicar el factor de escala correspondiente.

5.6.2 A partir de imágenes satelitales y SIG

La segunda manera de poder obtener índices de vegetación involucra imágenes satelitales y SIG de uso abierto como QGIS. Para calcularlo en QGIS necesitarás descargar una imagen multiespectral (por ejemplo, Sentinel-2 o Landsat 8), cargar las bandas correspondientes en el software, emplear la calculadora ráster para generar el índice, y finalmente estilizar el resultado para interpretar correctamente los valores obtenidos. A continuación, se explicará de manera detallada cada uno de los pasos para este proceso:

Paso 1: Descargar imágenes satelitales

Para comenzar, descarga una escena Sentinel-2 Level-2A desde el Copernicus Open Access Hub u otro portal similar. En el caso de Sentinel-2, las bandas necesarias son B04 (Rojo, 665 nm) y B08 (NIR, 842 nm), ambas disponibles a 10 m de resolución espacial tras la descarga y desempaquetado de los datos. Si prefieres Landsat 8/9, utiliza las bandas B4 (Rojo) y B5 (NIR) desde USGS Earth Explorer.



Paso 2: Proyectar las imágenes satelitales

Una vez obtenidos los archivos, abre QGIS y, mediante Capa > Añadir capa > Añadir capa ráster, importa las bandas roja y NIR en tu proyecto. En el panel "Capas" aparecerán ambas como capas independientes; asegúrate de reconocer claramente sus nombres para la etapa de cálculo.

Paso 3: Herramienta Ráster.

Con las bandas cargadas, abre la Caja de herramientas (Procesos > Caja de herramientas) y selecciona Calculadora ráster. Allí se debe escribir una de las siguientes expresiones dependiendo del índice y satélite que busquemos:

Tabla 19. Expresiones en Landsat 8 & Sentinel-2.

Landsat 8	**Sentinel-2**
$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$	$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$
$EVI = 2.5 * (\frac{B5 - B4}{B5 + 6(B4) - 7.5(B2) + 1})$	$EVI = 2.5 * (\frac{B8 - B4}{B8 + 6(B4) - 7.5(B2) + 1})$

Paso 4: Poner color

Al generarse la capa, accede a sus Propiedades > Estilo y cambia el renderizado a Pseudocolor. Configura una rampa de colores donde los valores cercanos a –1 (agua, nubosidad) aparezcan en tonos cálidos (rojo/naranja) y los cercanos a +1 (vegetación densa y sana) en verdes intensos. Ajusta manualmente el rango de valores entre –1 y +1 para mejorar la visualización.

Con estos pasos habrás generado y visualizado tu mapa en QGIS, listo para análisis posteriores de cambio de vegetación, seguimiento agrícola o estudios de conservación.

5.7 Variables climáticas

La temperatura es un factor fundamental en los procesos fisiológicos de las plantas. Afecta la velocidad de las reacciones enzimáticas, la fotosíntesis, la respiración y la transpiración (Jones, 2013).Los rangos óptimos de temperatura varían según la especie, pero generalmente controlan fases de desarrollo como la germinación de las semillas, el crecimiento vegetativo, la floración y la maduración del fruto. Cuando las temperaturas superan o descienden por debajo de los umbrales óptimos, las plantas experimentan estrés, lo que puede reducir la eficiencia fotosintética y alterar las vías metabólicas (Lambers, Chapin, & Pons, 2008). Por ejemplo, las bajas temperaturas pueden inhibir la división celular, mientras que el estrés térmico puede desnaturalizar las proteínas y afectar el fotosistema II. Además, la temperatura influye en la fenología (la cronología de los eventos del ciclo de vida), modificando los períodos de crecimiento y potencialmente causando desajustes con los polinizadores o las temporadas de crecimiento (Taiz & Zeiger, 2010).

5.7.1 Precipitación

La disponibilidad de agua a través de la precipitación regula el estado hídrico de las plantas, crucial para mantener la presión de turgencia, el transporte de nutrientes y las reacciones bioquímicas (Kramer, 1995).La precipitación inadecuada provoca estrés hídrico, lo que provoca el cierre estomático para reducir la pérdida de agua, pero a la vez limita la

absorción de CO_2, lo que disminuye la fotosíntesis y el crecimiento (Lambers et al., 2008). Por el contrario, la precipitación excesiva puede causar anegamiento, lo que genera condiciones hipóxicas del suelo que perjudican la respiración radicular y la absorción de nutrientes. El momento, la intensidad y la frecuencia de las precipitaciones afectan la dinámica de la humedad del suelo, el crecimiento radicular y la actividad microbiana, todos vitales para la salud de las plantas. Además, la precipitación influye en la disponibilidad de nutrientes disueltos y la lixiviación de elementos esenciales (Taiz & Zeiger, 2010).

5.7.2 Radiación solar

La radiación solar es la fuente de energía para la fotosíntesis, donde la energía lumínica se convierte en energía química almacenada en carbohidratos (Taiz & Zeiger, 2010) .La cantidad y la calidad de la luz influyen en las tasas fotosintéticas, la síntesis de clorofila y las respuestas fotomorfogénicas, como la expansión foliar y la elongación del tallo. La radiación insuficiente limita la fotosíntesis, reduciendo la acumulación de biomasa y el rendimiento, mientras que el exceso de luz puede causar fotoinhibición y estrés oxidativo (Lambers et al., 2008). Las plantas también se adaptan morfológicamente a la disponibilidad de luz, ajustando el ángulo, el grosor y la composición pigmentaria de las hojas para optimizar su captación. La radiación solar varía con la latitud, la estación y la estructura del dosel, lo que determina la distribución y la productividad de las plantas.

5.7.3 Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es el proceso combinado de evaporación del suelo y otras superficies, y transpiración a través de las hojas de las plantas. Representa el flujo total de vapor de agua del ecosistema terrestre a la atmósfera y es un componente crítico del ciclo del agua, que influye en el equilibrio hídrico y el crecimiento de las plantas (Allen, 1998)

La evaporación es el proceso mediante el cual el agua, presente en la superficie del suelo, los cuerpos de agua o el follaje húmedo, se convierte de líquido a vapor y se libera a la atmósfera. La tasa de evaporación depende de varios factores, como la temperatura, la radiación solar, la humedad, la velocidad del viento y la disponibilidad de humedad en el suelo (Brutsaert, 1991).Las temperaturas más altas y la radiación solar aumentan la energía disponible para la evaporación, mientras que la baja humedad y los vientos fuertes aumentan el gradiente de vapor, acelerando la pérdida de agua (Jensen et al., 2016).La evaporación excesiva puede reducir la humedad del suelo, limitando la disponibilidad de agua para la absorción de las plantas, especialmente durante los períodos secos.

La transpiración es el proceso mediante el cual las plantas pierden vapor de agua a través de las estomas (poros microscópicos) de sus hojas durante el intercambio gaseoso. Está estrechamente ligada a la fotosíntesis, ya que las estomas deben abrirse para permitir la entrada de CO_2, lo que resulta en la pérdida de vapor de agua (Taiz & Zeiger, 2010) .La transpiración ayuda a mantener la temperatura de la planta

mediante el enfriamiento por evaporación y facilita el movimiento de nutrientes y agua desde las raíces hasta las hojas. Factores ambientales como la temperatura, la humedad, la humedad del suelo, el viento y la radiación solar influyen directamente en las tasas de transpiración (Jones, 2013).En condiciones de estrés hídrico, las plantas regulan la apertura de las estomas para reducir la transpiración, equilibrando así la conservación del agua y la absorción de carbono (Kramer, 1995).

5.8 ¿Cómo influyen variables climáticas sobre los índices de vegetación?

Es difícil explicar la relación que existe entre las variables climáticas y su influencia sobre la vegetación. Esto se debe a que no todos los ecosistemas presentan las mismas características. Existen variaciones significativas en cada uno de ellos, determinadas por factores como la ubicación altitudinal, la pendiente, las condiciones climáticas locales y, por supuesto, la fenología de las especies presentes en el área de estudio. Por esta razón, es fundamental adoptar un enfoque ecosistémico al realizar investigaciones, considerando las particularidades de cada sitio. Este enfoque permite interpretar de manera más precisa cómo interactúan las variables climáticas con la vegetación y evita generalizaciones que podrían conducir a conclusiones erróneas. Además, tener en cuenta estas diferencias ayuda a diseñar estrategias de manejo y conservación más efectivas y adaptadas a las condiciones específicas de cada ecosistema.

5.9 Elementos de cierre:

5.9.1 Reunamos lo anterior

Caso de Estudio: Análisis del estado de la vegetación de una microcuenca Amazónica mediante el NDVI. Caso de estudio Microcuenca del Rio Sandalias.

En este capítulo aprendimos que los índices de vegetación como el NDVI, EVI y LAI son herramientas fundamentales para comprender el funcionamiento de los ecosistemas a partir de datos de teledetección, permitiendo estimar variables biofísicas y analizar la respuesta de la vegetación a factores climáticos como la temperatura, la precipitación y la radiación solar Estos índices, desarrollados gracias a los avances en sensores remotos y plataformas como Google Earth Engine, han revolucionado el monitoreo ambiental al facilitar el análisis temporal y espacial de la vegetación a escala global, incluso en regiones con recursos limitados.

El NDVI, por ejemplo, cuantifica la cobertura y vigor de la vegetación explotando la diferencia entre la absorción de luz roja por la clorofila y la alta reflectancia en el infrarrojo cercano, permitiendo identificar zonas con vegetación sana, áreas degradadas o cuerpos de agua. El EVI, por su parte, mejora la sensibilidad en regiones con alta biomasa y corrige efectos atmosféricos y de suelo, mientras que el LAI mide la superficie foliar total, siendo clave para estimar la biomasa y la productividad primaria neta.

Estos índices no solo son útiles en la agricultura de precisión, la gestión forestal y los estudios de cambio climático, sino que también apoyan la toma de decisiones en conservación, restauración ecológica y manejo sostenible de los recursos naturales. Su obtención puede realizarse tanto a partir de productos satelitales procesados en plataformas como Google Earth Engine, como mediante el análisis de imágenes multiespectrales en software SIG de uso abierto como QGIS, lo que democratiza el acceso a información ambiental relevante.

Relacionando este aprendizaje con el caso de estudio cobre el análisis del estado de vegetación de la microcuenca del Rio Sandalias se evidencia la evaluación del estado de vegetación mediante el NDVI para el cual se utilizaron imágenes satelitales que fueron procesadas y analizadas mediante bandas específicas. Con esto pudieron identificar mediante valores de 1- a 1 el estado de vegetación teniendo como resultado que la mayor parte del territorio analizado presenta vegetación escasa y el 30 % del territorio presenta vegetación moderada. Con esto se identifica que el área presenta degradación y requiere intervención con medidas para recuperar el ecosistema.

Apoyo a la gestión y toma de decisiones: Evaluar los índices de vegetación permiten obtener información de la salud de la vegetación, esto ayuda a la zonificación mediante la identificación de áreas degradación o áreas que presentan perdida de vegetación para implementar actividades de restauración y conservación.

5.10 Revisión del capítulo

5.10.1 ¿Qué es el NDVI?

El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es un índice de teledetección que cuantifica la cobertura y vigor de la vegetación, aprovechando la diferencia entre la absorción de luz roja y la reflectancia en el infrarrojo cercano. Es ampliamente utilizado para monitorear la salud vegetal y estimar variables biofísicas.

- ¿Qué mide el NDVI y cómo se interpreta su rango de valores? ¿Por qué es importante el NDVI en estudios ambientales? ¿Qué ventajas ofrece el NDVI frente a otros métodos de monitoreo de vegetación?

5.10.2 ¿Qué es el EVI?

El EVI (Enhanced Vegetation Index) es un índice diseñado para mejorar la sensibilidad en áreas de alta biomasa y corregir efectos atmosféricos y del suelo. Es especialmente útil en ecosistemas densos donde el NDVI puede saturarse.

- ¿En qué se diferencia el EVI del NDVI?. ¿Por qué es relevante corregir los efectos atmosféricos y del suelo en la teledetección?.¿En qué situaciones es preferible utilizar el EVI sobre el NDVI?

5.10.3 ¿Qué es el LAI?

El LAI (Leaf Area Index) mide la superficie foliar total por unidad de área de suelo, siendo un indicador clave de la biomasa foliar y la estructura del dosel. Es fundamental para entender procesos como la fotosíntesis, la evapotranspiración y la productividad primaria.

- ¿Por qué es importante medir el área foliar en los ecosistemas?. ¿Cómo influye el LAI en la gestión agrícola y forestal?.¿Qué relación tiene el LAI con el rendimiento de los cultivos?

5.10.4 ¿Cómo obtener el NDVI, EVI y LAI?

Se describen dos métodos principales para obtener estos índices: a partir de productos satelitales procesados en plataformas como Google Earth Engine y mediante el uso de imágenes multiespectrales en software SIG como QGIS. Se detallan los pasos para descargar, procesar y visualizar los índices.

- ¿Qué ventajas tiene el uso de plataformas como Google Earth Engine para el análisis de índices de vegetación?. ¿Cuáles son los pasos esenciales para calcular un índice de vegetación en QGIS?.¿Por qué es relevante democratizar el acceso a herramientas de teledetección?

5.10.5 Variables climáticas y su influencia

Se explica cómo la temperatura, la precipitación, la radiación solar y la evapotranspiración afectan los procesos fisiológicos de las plantas y, por ende, los valores de los índices de vegetación. Se destaca la necesidad

de un enfoque ecosistémico para interpretar correctamente la influencia de las variables climáticas.

- ¿Cómo afectan la temperatura y la precipitación a la salud de la vegetación?. ¿Por qué la radiación solar es crucial para la fotosíntesis y el crecimiento vegetal?.¿Qué rol juega la evapotranspiración en el ciclo del agua y la productividad vegetal?

5.10.6 Preguntas para el pensamiento crítico

1 ¿Por qué es fundamental la caracterización morfométrica y la jerarquización de la red de drenaje para la gestión de cuencas hidrográficas, especialmente en regiones expuestas a eventos hidrometeorológicos extremos?

- *Reflexiona sobre cómo el análisis de la forma, tamaño y estructura de la cuenca ayuda a predecir riesgos y planificar acciones de manejo sostenible. Considera la importancia de identificar las áreas más vulnerables a inundaciones o erosión mediante el estudio de la red de drenaje y su jerarquización. ¿De qué manera la información morfométrica puede contribuir a la toma de decisiones para la prevención y mitigación de desastres naturales?*

2 ¿Cómo influyen las características físicas de la cuenca (como el factor de forma, la densidad de drenaje y las pendientes) en la dinámica hídrica y la susceptibilidad a la erosión o inundaciones?

- *Analiza cómo el factor de forma y la pendiente determinan la velocidad y cantidad de escurrimiento superficial. Reflexiona sobre el ejemplo de la cuenca del río Ayuquila y cómo sus valores específicos condicionan el comportamiento del agua y los sedimentos. ¿Por qué es relevante conocer estas características para diseñar medidas de manejo y conservación?*

3 ¿Qué ventajas ofrece la zonificación funcional (alta, media y baja) de una cuenca para la conservación ambiental y el desarrollo regional?

- *Analiza cómo la segmentación en zonas permite priorizar acciones de conservación, manejo agrícola y control de inundaciones. Considera la utilidad de la zonificación para identificar áreas críticas y orientar la gestión sostenible de los recursos naturales. ¿Cómo puede la zonificación contribuir a la integración de objetivos ambientales, sociales y económicos en la planificación regional?*

4 ¿Cómo contribuye la caracterización morfométrica al diagnóstico y manejo de riesgos ambientales en una cuenca?

- *Analiza cómo los parámetros morfométricos permiten identificar áreas con mayor susceptibilidad a inundaciones, erosión o sequías. Reflexiona sobre la utilidad de comparar diferentes cuencas a partir de índices morfométricos para priorizar intervenciones. ¿Por qué la caracterización morfométrica es especialmente relevante en regiones con información primaria limitada?*

5 ¿Por qué es importante la jerarquización de la red de drenaje en el análisis hidrológico y la planificación territorial?

- *Explica cómo la jerarquización ayuda a comprender la estructura y funcionamiento de la red de drenaje superficial. Considera la relación entre el orden de los cauces y la magnitud de los eventos hidrometeorológicos extremos. ¿Cómo puede la jerarquización facilitar la delimitación de subcuencas y la gestión integrada del recurso hídrico?*

6 ¿De qué manera la zonificación funcional (alta, media, baja) permite abordar problemáticas socioambientales específicas dentro de una cuenca?

- *Analiza cómo la segmentación en zonas facilita la identificación de áreas críticas para la conservación, la producción agrícola o la gestión de riesgos. Reflexiona sobre la importancia de trabajar a escalas locales y de integrar la información físico-geográfica para una planificación más precisa. ¿Qué ventajas aporta la zonificación para la participación de actores locales y la toma de decisiones informadas?*

7 ¿Cómo influyen las características físicas de la cuenca en los procesos de erosión hídrica y sedimentación?

- *Explica la relación entre la pendiente, la cobertura vegetal y la intensidad de la erosión hídrica. Considera cómo la modificación del uso del suelo puede incrementar la vulnerabilidad a la erosión y la pérdida de suelo fértil. ¿Por qué es fundamental monitorear*

la erosión hídrica para la sostenibilidad de los sistemas productivos y la calidad del agua en la cuenca?

8 ¿Qué papel juegan las herramientas de teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) en la gestión y monitoreo de cuencas?

- *Analiza las ventajas de utilizar imágenes satelitales y SIG para calcular índices morfométricos y monitorear cambios en el territorio. Reflexiona sobre cómo estas tecnologías pueden democratizar el acceso a información ambiental y mejorar la gestión participativa. ¿En qué casos la integración de datos espaciales y temporales es clave para anticipar y mitigar riesgos ambientales?*

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R. G. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements.* Roma : Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Amatulli, G., Garcia Marquez, J., Sethi, T., Kiesel, J., Grigoropoulou, A., Üblacker, M., . . . Domisch, S. (2022). Hydrography90m: A new high-resolution global hydrographic dataset. *Earth System Science Data, 14*(10), 4525–4545. doi:10.5194/essd-14-4525-2022

Andino, R., & López, V. (2017). Teledetección y SIG, Herramientas de gestión en la adaptación al cambio climático, cuenca alta del río Goascorán, Honduras. *Ciencias Espaciales, 10*(1), 117-197.

Barry, R. G. (2010). Atmosphere, Weather and Climate (9th ed.). *Routledge*. doi:978-0-415-46570-0

Belton, V. &. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach.* Springer. doi:9780792375050

Ben-Daoud, M., El Mahrad, B., Moroșanu, G. A., Elhassnaoui, I., Moumen, A., El Mezouary, L., . . . Eljaafari, S. (2023). Stakeholders' Interaction in Water Management System: Insights from a MACTOR Analysis in the R'Dom Sub-basin, Morocco. *Environmental Management, 71*(6), 1129-1144. doi:10.1007/s00267-022-01773-x

Benjamin, L. R. (2017). Growth Analysis, Crops. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*, 23-28. doi:10.1016/B978-0-12-394807-6.00225-2

Bentrup, G. (2008). *Zonas de amortiguamiento para conservación: lineamientos para diseño de zonas de amortiguamiento, corredores y vías verdes.* Asheville, NC: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio Forestal, Estación de Investigación Sur.

Bernex, N., Roldan, G., Vaux, H. J., Izurieta, R., Örmeci, B., Torregrosa, M. L., . . . Katherine. (2021). *CALIDAD DEL AGUA: SALUD DE LOS ECOSISTEMAS Y SALUD HUMANA.* Lima, Perú: Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC). Retrieved from https://www.interacademies.org/sites/default/files/2021-09/Libro_Calidad_del_Agua-1.pdf

Bhattacharya, A. (2019). Effect of High-Temperature Stress on Crop Productivity. In *Effect of High Temperature on Crop Productivity and Metabolism of Macro Molecules* (pp. 1-114). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-817562-0.00001-X

Biswas, A. K. (1970). *History of hydrology.* Amsterdam, London: North-Holland Publishing Company.

Boiarskii, B. (2019). Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. *Journal of*

Mechanics of Continua and Mathematical Sciences, 1(4), 20-29. doi:10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003

Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & O'Connor, M. F. (1972). A Water Quality Index—Crashing the Psychological Barrier. Springer US. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2856-8_15

Brutsaert, W. (1991). *Evaporation into the atmosphere: Theory, history and applications (Repr).* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Cap-Net. (2008). *Herramientas de capacitación para la gestión integrada de recursos hídricos. Programa de capacitación de redes.* doi:https://gsagua.com/wp-content/uploads/2010/10/2008-girh-para-organizaciones-de-cuencas-fluviales.pdf

Carbajal, H., & Onofre, F. (2020). Determinación con imágenes satelitales del índice de vegetación de diferencia normalizada del valle de Pampas-Tayacaja. *Revista Polo del Conocimiento*, 235-246. doi:https://doi.org/10.23857/pc.v5i1.1893

Cárdenas Novillo, P. A. (2020). Evaluación de la calidad del agua en la microcuenca hidrográfica del Río Tutanangoza mediante análisis fisicoquímicos, microbiológicos y la aplicación del ICA-NSF. Retrieved from https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19608

Cárdenas Patiño, C. M., & Crespo Cuzco, B. A. (2024). *Estimación de la calidad del agua mediante técnicas de modelización con árboles de regresión y el Índice de la Fundación Nacional de Saneamiento para la cuenca hidrográfica del Río Yanuncay.* Retrieved from Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, Carrera de Ingeniería Ambiental: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27246

Cartaya, S., Zurita Alfaro, S., Rodríguez Ríos, E., & Montalvo Párraga, V. (2015). Comparación de técnicas para determinar cobertura vegetal y usos de la tierra en áreas de interés ecológico, Manabí, Ecuador. *UD y la Geomática, 0*(9), 9-17. doi:https://doi.org/10.14483/23448407.7883

CEPAL . (2013). *Guía, análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial.* Santiago de Chile, Chile: Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE).

CEPAL. (2013). *Guía, análisis y zonificación de cuencas hidrográfica para el ordenamiento territorial.* Santiago de Chile: Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE).

Chakraborty, S., & Bhattacharya, T. (2013). Water quality indices—important tools for water quality assessment: A review. *International Journal of Advances in Chemistry (IJAC), 1*(1), 19-28. Retrieved from

https://www.scribd.com/document/438559367/Water-Quality-Indices-Important-Tools

Chen, X., Zhang, X., Wang, H., & Liu, X. (2021). Quantifying the effects of watershed subdivision scale and spatial distribution on hydrological simulation. *Journal of Water and Climate Change, 12*(8), 3518-3530. doi:10.2166/wcc.2021.184

Chimdesa Abdeta, G., Tesemma, A. B., Tura, A. L., & Atlabachew, G. H. (2020). Morphometric analysis for prioritizing sub-watersheds and management planning and practices in Gidabo Basin, Southern Rift Valley of Ethiopia. *Applied Water Science, 10*. doi:https://doi.org/10.1007/s13201-020-01239-7

Collaguazo, F. J., & Correa, J. A. (2023). Planificación estratégica para la gestión de la subcuenca del río Casacay. *Revista Ciencia y Construcción, 4*(1), 48-55. Retrieved from https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/159

CONAGUA. (2015). *Guía para la identificación de actores clave.* https://www.buyteknet.info/fileshare/data/ana_pla_sis_amb/GUIACONAGUA.

Cotler Avalos, H., Mondragón Bonilla, R., Díaz Ponce, A., & Garrido Pérez, A. (2007). *INEGI-INE-CONAGUA.* Retrieved from Delimitación de cuencas hidrográficas de México, a escala 1:250,000: https://core.ac.uk/download/pdf/48030589.pdf

Cravajal, L., Paredes, E., & Palacios , T. (2024). Análisis de los indices de vegetacion y variabilidad climática en la cuenca alta del Río Guayllabamba para el periodo 1999-2023. *Revista Ciencia UNEMI, 17*(46), 80-87. doi:https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol17iss46.2024pp80-87p

Cruz San Julián, J. J. (2018). *Hidrogeología básica e hidráulica subterránea.* Instituto Geológico y Minero de España. Retrieved from https://editorial.ugr.es/media/ugr/files/sample-130969.pdf

Dar, R. A., Sankar, K., & Dar, M. A. (2013). Morphometric Analysis to Infer Hydrological Behaviour of Lidder Watershed, Western Himalaya, India. *The Scientific World Journal, 2013*. doi:https://doi.org/10.1155/2013/178021

Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon.* Paris: Victor Dalmont.

De Jager, A. L., & Vogt, J. V. (2010). Development and demonstration of a structured hydrological feature coding system for Europe. *Hydrological Sciences Journal, 55*(5), 661-675. doi:10.1080/02626667.2010.490786

De Marchi, B., Funtowicz, S. L., & Munda, G. (2000). Combining participative and institutional approaches with multicriteria evaluation: An empirical study for water issues in Troina, Sicily. *Ecological Economics., 34*(2), 267-282. doi:https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00172-8

Deming, D. (2005). Born to trouble: Bernard Palissy and the hydrologic cycle. *Groundwater, 43*(6), 969-972. doi:https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00116.x

Deming, D. (2014). Pierre Perrault, the hydrologic cycle and the scientific revolution. *Groundwater, 52*(1), 156-162. doi:https://doi.org/10.1111/gwat.12068

Deming, D. (2017). Edme Mariotte and the beginning of quantitative hydrogeology. *Groundwater, 55*, 1-7.

den Haan, R. J., Driessen, P. P., & Runhaar, H. A. (2019). The merits of consensus-based decision-making: A case study of Dutch water management. *Environmental Policy and Governance, 29*(4), 247-258. doi: https://doi.org/10.1002/eet.1845

Didan, K. (2021). *MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m SIN Grid V061 [Dataset]*. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. doi:https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A1.061

Dodgson, J., Spackman, M., Pearman, A., & Phillips, L. (2009). *Multi-criteria analysis: a manual.* Londres, Reino Unido.: Department for Communities and Local Government. doi:9781409810230

Dooge, J. C. (1974). The development of hydrological concepts in Britain and Ireland between 1674 and 1874. *Hydrological Sciences Bulletin*, 279-302. doi: https://doi.org/10.1080/02626667409493917

Dooge, J. C. (1974). The development of hydrological concepts in Britain and Ireland between 1674 and 1874. *Hydrological Sciences Bulletin, 19*(3), 279–302. doi:https://doi.org/10.1080/02626667409493917

Downs, P. W. (1991). How integrated is river basin management? *15*(3), 299–309. doi:https://doi.org/10.1007/BF02393876

Edwards, P. J., Williard, K. W., & Schoonover, J. E. (2015). Fundamentals of watershed hydrology. *Journal of Contemporary Water Research & Education, 156*(1), 1-13. doi:https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2015.03185.x

Fang, H., Baret, F., Plummer, S., & Schaepman-Strub, G. (2019). An Overview of Global Leaf Area Index (LAI): Methods, Products, Validation, and Applications. *Reviews of Geophysics, 57*(3), 739-799. doi:10.1029/2018RG000608

FAO. (2000). Manual de manejo de microcuencas hidrográficas. Retrieved from https://www.fao.org/3/x5372s/x5372s00.htm

FAO. (2007). *La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas.* Roma, Italia, Roma, Italia: FAO.

FAO. (2007). *La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas.* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Farrukh, A., Meraj, G., & A.S., R. (2013). Morphometric analysis to infer hydrological behaviour of Lidder watershed, Western

Himalaya, India. *Journal of Geography, 2013*. doi:10.1155/2013/178021

Fürst, J., & Hörhan, T. (2009). Coding of watershed and river hierarchy to support GIS-based hydrological analyses at different scales. *Computers & Geosciences, 35*(3), 688–696. doi:10.1016/j.cageo.2008.04.007

García, T. J., & Mas, J.-F. (2011). Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 63*(1), 83-94. doi:https://doi.org/10.18268/BSGM2011v63n1a7

Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas.* La Plata, Buenos Aires, Argentina: Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. doi:978-950-34-0963-3

Geopedología y Amenazas Geológicas. (2011). *Geopedología y amenazas geológicas: memoria técnica, Cantón Guayaquil.* Quito: Instituto Geográfico Militar.

Global Water Partnership (GWP);Technical Advisory Committee (TAC). (2000). *Integrated Water Resources Management.* Estocolmo, Suecia: Global Water Partnership. Retrieved from https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/

background-papers/04-integrated-water-resources-management-2000-english.pdf

Green, W. H. (1911). Studies on soil physics: The flow of air and water through soils. *The Journal of Agricultural Science*, *4*(1), 1-24.

Guevara Gutiérrez, R., Olquín López, J., Mancilla Villa, Ó., & Barreto García, Ó. (2019). *"Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Ayuquila, Jalisco-México"* (Vol. 24). GeoFocus. doi: 10.21138/GF.622

Gutiérrez, A. P., López-Gunn, E., & Martínez Santos, P. (2019). Stakeholder participation in water governance: A comparative analysis. *Water Policy*, *21*(2), 203-219.

GWP. (2009). *Manual para la gestión integrada de los recursos hídricos.* GWP Sudamérica. Retrieved from https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/sobre-girh/manual-para-la-girh-2009.pdf

H. Huang, K. M. (2021). The Multi-Actor Multi-Criteria Analysis (MAMCA) for Mass-Participation Decision Making. In *Lecture Notes in Business Information Processing* (pp. 3-17). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. doi:10.1007/978-3-030-73976-8_1

Halley, E. (1687). *An estimate of the quantity of vapour raised out of the sea by the warmth of the sun* (Vol. 16). London: Philosophical Transactions of the Royal Society of London.

Halley, E. (1691). An account of the circulation of the watry vapours of the sea, and of the cause of springs. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 17,* 468-473.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment, 83*(1-2), 195–213. doi:https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2

Ideam, I. (2021). *Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua.* Fundación Natura. Retrieved from https://natura.org.co/wp-content/uploads/2022/06/Protocolo-de-Monitoreo-y-Seguimiento-del-Agua.pdf

Instituto del Agua. (2024). Retrieved from Monitoreo de Calidad del Agua: Guía Completa Para Asegurar un Recurso Vital: https://institutodelagua.es/calidad-del-agua/monitoreo-de-calidad-de-aguacalidad-del-agua/

J. Thungngern, T. S. (2017). Analytic hierarchy process for stakeholder participation in integrated water resources management. *Engineering Journal, 21*(7), 87-103. doi:10.4186/ej.2017.21.7.87

Jaramillo, J., Alberto, M., Otálvaro, V., & Victoria, M. (2006). Análisis comparativo de indicadores de la calidad de agua superficial. (S. M. Universidad Nacional de Colombia, Ed.) *Avances en Recursos Hidráulicos*(14), 53-69. Retrieved from https://www.academia.edu/84328590/An%C3%A1lisis_Comparativo_De_Indicadores_De_La_Calidad_De_Agua_Superficial

Jensen, M. E., Allen, R. G., & American Society of Civil Engineers, &. E. (2016). *Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements (Second edition)*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

Jiménez, M. (2006). Análisis Comparativo De Indicadores De La Calidad De Agua Superficial. *Avances En Recursos Hidráulicos*. Retrieved from https://www.academia.edu/84328590/An%C3%A1lisis_Comparativo_De_Indicadores_De_La_Calidad_De_Agua_Superficial

Jones, H. G. (2013). *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology (3.a ed.)*. Cambridge University Press. doi: https://doi.org/10.1017/CBO9780511845727

Kalacska, M. B.-A.-E. (2007). Hyperspectral discrimination of tropical dry forest lianas and trees: Comparative data reduction approaches at the leaf and canopy levels. *Remote Sensing of Environment*, *109*(4), 406-415. doi:https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.012

Karaoui, I., Arioua, A. B., A., E. D., Ouhammich, K. A., El Amrani Idrissi, A., & Hssaissoune, M. (2020). New simplification into NSF-WQI index to assess El Abid River water quality – Morocco. *Desalination and Water Treatment, 204*, 59-68. doi:https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26277

Karaoui, I., Arioua, A., Boudhar, A., Elhamdouni, D., Ait Ouhamchich, K., El Amrani Idrissi, A., & Hssaisoune, M. (2020). New simplification into NSF-WQI index to assess El Abid River water quality – Morocco. *Desalination and Water Treatment, 204*, 59–68. doi:https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26277

Kramer, P. J. (1995). *Water Relations of Plants and Soils (1st ed.).* Elsevier Science & Technology.

Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D.-I., & Becker, A. (1998). Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling, 106*(1-2), 261-289. doi:https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)00204-4

Kumar, A., Bhardwaj, A., Kumar, P., & Padaliya, H. (2017). Delineation of micro-watershed using geo-spatial techniques. *Suresh Gyan Vihar University International Journal of Environment, Science and Technology, 3*(2), 14-34.

Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology*. New York: Springer New York. doi:https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3

Liza Chamorro, A. C. (2018). *"Caracterización morfométrica de la cuenca del arroyo Yacaré"*. Retrieved from Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Pilar: https://www.ina.gov.ar/ifrh-2018/pdf/IFRH_2018_paper_8.pdf

López-Gunn, E., & Ramón, L. (2020). Gobernanza del agua y participación de actores: retos para la gestión integrada en América Latina. *Revista Iberoamericana de Estudios de Desarrollo*, 6-21. doi:https://doi.org/10.26754/ojs_ried/ijds.559

López-Pérez, A., Fernández-Reynoso, D., & Martínez-Menes, M. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y ciencias del agua*, *6*(1), 121-137. Retrieved from https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000100007

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 703–726. doi:https://doi.org/10.1080/13658810600661508

McClelland, N. I. (1974). *Water Quality Index Application in the Kansas River Basin.* U.S. Environmental Protection Agency-Region VII. Retrieved from https://books.google.com.ec/books/about/Water_Quality_Index_Application_in_the_K.html?id=YG0G1lU6Z4YC&redir_esc=y

McKague, K., & Eng, P. (2023). *Universal Soil Loss Equation (USLE).* Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Canada: Ontario. doi:ISSN 1198-712X

Minh Tuan Bui, J. L. (2021). Quantifying the effects of watershed subdivision scale and spatial density of weather inputs on hydrological simulations in a Norwegian Arctic watershed. *Journal of Water and Climate Change, 12*(8), 3518-3535. doi:https://doi.org/10.2166/wcc.2021.173

Morad, M., & Pérez, A. T. (2001). Sistemas de información geográfica y modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación. *31*, 23-46.

Nabi, G., Hussain, F., Wu, R.-S., Nangia, V., Bibi, R., & Majid, A. (2017). Micro watershed management for erosion control using soil and water conservation structure and SWAT modeling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. doi:https://doi.org/10.5194/hess-2017-532

Nathalie, P., Jon, O. V., Atle, M., Jean-Michel, G., J, C., & Tucker, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution, 20*(9), 503-510. doi:10.1016/j.tree.2005.05.011

Ni, W. Z. (2014). The Penetration Depth Derived from the Synthesis of ALOS/PALSAR InSAR Data and ASTER GDEM for the

Mapping of Forest Biomass. *Remote Sensing, 6*(8), 7303-7319. doi:https://doi.org/10.3390/rs6087303

OMS. (2023b). *Esquistosomiasis.* Retrieved from https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/schistosomiasi

Ong Ning Ting, J. y. (2024). Review on water quality monitoring technologies. *18*(3), 1416-1423. doi:https://doi.org/10.11591/ijeecs.v18.i3.pp1416-1423

Organización Mundial de la Salud. (2023a). (O. M. Salud, Ed.) Retrieved from https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water

Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London A, 193*, 120-145. doi:10.1098/rspa.1948.0037

Perrault, P. (1674). *De l'origine des fontaines.* París: chez Pierre Le Petit.

Peterson, G. D., Cumming, G. S., & Carpenter, S. R. (2005). Scenario planning: a tool for conservation in an uncertain world. *Conservation Biology*, 358–366. doi:https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2003.01491.x

Pettorelli, N. V.-M. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution, 20*(9), 503-510. doi:10.1016/j.tree.2005.05.011

Pielke, R. A. (1990). Influence of landscape structure on local and regional climate. *Landscape Ecology, 4*(2-3), 133-155. doi:10.1007/BF00132856

Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad . (2023). *Actividades humanas, el principal factor que altera la calidad del agua.* Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad, UNAM. Retrieved from https://www.puec.unam.mx/index.php/component/content/article/2494-actividades-humanas-el-principal-factor-que-altera-la-calidad-del-agua.html

Quiroz Fernández, L. S., Kulich Izquierdo, E., & Gutiérrez, C. M. (2017). Aplicación del índice de calidad de agua en el río Portoviejo, Ecuador. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 38*(3), 41-51. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382017000300004

Rahaman, S. A., Kumar, S., & Bera, S. (2015). Prioritization of Sub Watershed Based on Morphometric Analysis Using Remote Sensing and GIS Techniques in Kosi River Basin, India. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 18*(2), 289–299. doi:https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.06.007

Rai, P. K., Singh, P., Mishra, V. N., Singh, A., Sajan, B., & Shahi, A. P. (2019). Geospatial approach for quantitative drainage morphometric analysis of Varuna River Basin, India. *Journal of*

Landscape Ecology, 12(2), 1-14. doi:https://doi.org/10.2478/jlecol-2019-0007

Ramírez, U. (2021). *Índices de Calidad (ICAs) y de Contaminación (ICOs) del Agua de Importancia Mundial.* Universidad de Pamplona. Retrieved from https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_10/recursos/general/pag_contenido/libros/06082010/icatest_capitulo3.pdf

Rippl, W. (1883). The capacity of storage-reservoirs for water-supply. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 71*, 270-278.

Rojas, L. V., A.Macías, N., & Fonseca, D. (2010). El Índice de Calidad de Agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos. *Medio Ambiente y Desarrollo, 10*(18). Retrieved from https://cmad.ama.cu/index.php/cmad/article/view/141

Rosbjerg, D., & Rodda, J. (2019). IAHS: a brief history of hydrology. *History of Geo- and Space Sciences, 10*(1), 109-123. doi:https://doi.org/10.5194/hgss-10-109-2019

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation.* Nueva York, EE.UU.: McGraw-Hill.

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences, 1*(1), 83-98.

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences, 1*(1), 83-98. doi:https://doi.org/10.1504/IJSSci.2008.01759

Schoonover, J. E., & Crim, J. F. (2015). An introduction to soil concepts and the role of soils in watershed management. *Journal of Contemporary Water Research & Education, 154*(1), 3-20. doi:10.1111/j.1936-704X.2015.03186.x

Sierra Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del Agua:Evaluacion y diagnostico.* Medellín, Colombia: Ediciones de la U / Universidad de Medellín.

Stein, J. L. (2018). An Enhanced Pfafstetter Catchment Reference System. *Water Resources Research*. doi:10.1029/2018wr023218

Stein, J. L. (2018). An Enhanced Pfafstetter Catchment Reference System. *Water Resources Research, 54*(12), 9951–9963. doi:10.1029/2018WR023218

Sucoshañay Villalba, D., Mejía Pazmiño, L., Del Corral Villarroel, V., Montero Garófalo, M., Yedra Machado, D., & Paredes Ulloa, C. (2024). Análisis del Estado de la Vegetación de una Microcuenca Amazónica Medianteel NDVI. Caso de Estudio Microcuenca del Río Sandalias. *Ciencia Latina, 8*(4), 11003-11015. doi:https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.13236

T. F. Fabrice, K.-W. A. (2020). Spatial Analysis of the Mode of Management and Conflicts of Use of Water Resources in the Watershed of the Lobo River in Nibehibe (Central-Western Côte d'Ivoire). *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 25-38. doi:10.9734/jgeesi/2020/v24i730241

Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant physiology (5th ed.).* Sinauer Associates.

Tang, Z., Guo, J., Xiang, Y., Lu, X., Wang, Q., Wang, H., . . . Zhang, F. (2022). Estimation of Leaf Area Index and Above-Ground Biomass of Winter Wheat Based on Optimal Spectral Index. *Agronomy, 12*. doi:10.3390/agronomy12071729

Tapella, E. (2007). *Mapping stakeholders for natural resource management: Tools and approaches.* International Development Research Centre.

Tirkey, P., Bhattacharya, T., & Chakraborty, S. (2015). Water Quality Indices – Important Tools for Water Quality Assessment: A Review. *International Journal of Advances in Chemistry (IJAC), 1*(1), 15-28. Retrieved from https://airccse.com/ijac/papers/1115ijac02.pdf

Torres, P., H, C., Patiño, C. P., Escobar, J. C., & Pérez, A. (2010). Aplicación de índices de calidad de agua -ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano. *Ingeniería e Investigación,*

30(3), 86-95. Retrieved from https://www.redalyc.org/pdf/643/64316140007.pdf

Tripathi, M. P., Raghuwanshi, N. S., & Rao, G. P. (2006). Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrological Processes, 20*(5), 1137-1156. doi:10.1002/hyp.5927

Turner, M. G., Gardner, R. H., & O'Neill, R. V. (2001). Landscape ecology in theory and practice: Pattern and process. doi:10.1007/978-1-4939-2794-4

UNCTAD. (2025). *Un activo líquido: Replantearse el uso del agua en las grandes fábricas mundiales (p. spa)*. Retrieved from UNCTAD: https://unctad.org/es/news/un-activo-liquido-replantearse-el-uso-del-agua-en-las-grandes-fabricas-mundiales

UNESCO. (2021). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua.* París, Francia: UNESCO. Retrieved from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378890

UNESCO. (2023). *Riesgo inminente de una crisis mundial del agua (UNESCO/ONU-Agua)*. Retrieved from Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura: https://www.unesco.org/es/articles/riesgo-inminente-de-una-crisis-mundial-del-agua-unesco/onu-agua

UNESCO. (2024). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz.* UNESCO. Retrieved from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000391195

Valdivielso, S., Vázquez-Suñé, E., & Custodio Gimena, E. (2021). Isotopía ambiental de las precipitaciones y de las aguas superficiales y subterráneas en los Andes Centrales: Revisión. *Boletín Geológico y Minero, 132*(1-2), 263-288. doi:https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.1-2.015

Vargas Collaguazo, F. J., & Espinoza Correa, J. A. (2023). Planificación estratégica para la gestión de la subcuenca del río Casacay. *Revista Ciencia y Construcción, 4*(1), 48-55. Retrieved from https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/159

Vargas-Hernández, J. G., Mora-Valentín, E. M., & González-Moreno, Á. (n.d.). Multicriteria decision-making in environmental sustainability: A review. *Sustainability, 11*(21). doi:https://doi.org/10.3390/su11216025

Vega Espinoza, E. S., Sánchez Valladolid, N. F., & Vargas Collaguazo, L. A. (2024). *Análisis multicriterio aplicado al mapeo de actores: un enfoque en la gestión integral de los recursos hídricos para la subcuenca del río Casacay [Tesis de grado, Universidad Técnica de Machala]*. Retrieved from Repositorio Institucional UTMACH: http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/23929

Verdin, K., & Verdin, J. (. (1999). A topological system for delineation and codification of the Earth's river basins. *Journal of Hydrology*, *218*(1-2), 1-12. doi:10.1016/s0022-1694(99)000116

Ward, A. D., & Trimble, S. W. (2004). Environmental Hydrology. 475. doi:1566706165

Wischmeier, W. H., & Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning.* U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No.537.

Xiong, S. M.-P. (2017). The Application of ALOS/PALSAR InSAR to Measure Subsurface Penetration Depths in Deserts. *Remote Sensing*, *9*(6). doi:https://doi.org/10.3390/rs9060638

Yoo, C., Chang, K.-H., Lee, M., Song, S., Na, W., & Ma, J.-H. (2024). Analysis of changes before and after forest fires with LAI, NDVI and ET time series: Focusing on major forest fires in Korea. *Ecological Engineering*, *209*. doi:10.1016/j.ecoleng.2024.107412

Zainurin, S. N., Wan Ismail, W. Z., Mahamud, S. N., Ismail, I., Jamaludin, J., Ariffin, K. N., & Wan Ahmad Kamil, W. M. (2022). Advancements in Monitoring Water Quality Based on Various Sensing Methods: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(21), 14080. doi:https://doi.org/10.3390/ijerph192114080

Zambelli, P. G. (2013). An Object Oriented Python Application Programming Interface (API) for Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Geographic Information System (GIS). *ISPRS International Journal of Geo-Information, 2*(1), 201-219. doi:https://doi.org/10.3390/ijgi2010201

Zhang, M. Z.-p. (2018). Net primary production estimation by using fusion remote sensing data with high spatial and temporal resolution. *National Remote Sensing Bulletin, 22*(1), 143-152. doi:https://doi.org/10.11834/jrs.20186499

Gestión integrada de cuencas hidrográficas: fundamentos, análisis geoespacial, gobernanza y toma de decisiones, se publicó en el mes de noviembre de 2026.

ISBN: 978-9907-802-14-6

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

BIOGRAFÍA DEL AUTOR

Luis Ángel Vargas Collaguazo:

Durante mis años universitarios, me convertí en un asiduo explorador de este asombroso país. Recorrí su perfil costero, y atravesé la columna vertebral de los Andes. La mamá Tungurahua y el Taita Chimborazo fueron testigos silenciosos de innumerables expediciones junto a mis amigos más cercanos. También me adentré en la indómita Amazonía, un relicto casi sagrado donde la vida late en cada sombra y donde la conservación no es solo un esfuerzo, sino un acto de devoción.

Uno de los últimos viajes de aquella época de descubrimientos me llevó a Alausí. Alquilamos una casa de campo y emprendí el camino hacia las lagunas de Ozogoche. Allí fui testigo de un ritual que parece esculpido en la memoria de los Andes: el sacrificio de los cuviviés, aves que llegan exhaustas desde tierras lejanas para entregar su último aliento a las aguas frías. Un misterio de la naturaleza, tan bello como enigmático, una escena que, aún hoy, resuena en mi recuerdo como un eco de lo sublime.

Al regresar a Guayaquil, donde residía por aquellos años, emprendí un viaje que, sin saberlo, marcaría mi destino. Desde Guaranda, descendí por las estribaciones occidentales de los Andes, atravesando un paisaje esculpido por fuerzas antiguas e implacables. Millones de años atrás, las erupciones volcánicas habían modelado la geografía, delineando los cauces por donde hoy fluye el agua, tejiendo la historia de la vida misma.

A mitad del trayecto, un letrero captó mi atención: "El agua es tu familia". Sus palabras resonaron en mí con una profundidad inesperada. Observé cómo, en las alturas, el agua brotaba desde los nevados en la cuenca alta, recorriendo su

camino hacia la cuenca media, reuniéndose en ríos que parecían articular no sólo la biodiversidad, sino que también a la gente. Más abajo, al acercarme a tierras costeras, el agua se convertía en un tejido de vida, irrigando a los cultivos frutales tropicales.

Entonces lo vi con claridad: ante mis ojos se formaba el río Babahoyo, el segundo afluente más importante de la cuenca del río Guayas, llevando consigo la memoria de montañas, lluvias y de suelos fértiles. En ese instante, comprendí que el agua no era solo un recurso, sino un lazo invisible que une todo lo que somos.

Ese día supe, con absoluta certeza, a qué quería dedicarme el resto de mi vida, al agua.

GESTIÓN INTEGRADA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS: FUNDAMENTOS, ANÁLISIS GEOESPACIAL, GOBERNANZA Y TOMA DE DECISIONES

Estimado lector, el agua y las cuencas hidrográficas son vitales para conectar ecosistemas, paisajes y comunidades. Sin embargo, enfrentan graves tensiones por el cambio climático, la degradación ambiental y la presión productiva.

Este libro aborda el manejo integral de cuencas como una filosofía de trabajo centrada en la interdependencia entre los procesos naturales y la acción humana. Ofrece bases teóricas, herramientas metodológicas y casos prácticos sobre gobernanza, planificación participativa, gestión del riesgo y restauración ecológica.

Diseñado para estudiantes, profesionales y tomadores de decisiones, la obra facilita un aprendizaje progresivo que va de la teoría a la práctica. Su propósito es fortalecer capacidades, impulsar un pensamiento crítico e inspirar a los lectores a ser agentes de cambio para garantizar la calidad del agua, la resiliencia ecológica y el bienestar social.

GRUPO BLR

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

ISBN: 978-9907-802-14-6

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA
1969