



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTAR UN
SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA BASADO
EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA
COMUNIDAD PONCE QUILOTOA, PROVINCIA DE COTOPAXI”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de
Ingenieros Ambientales.

Autores:

Alvarado Peralta Jeremmy Paul
De La Cruz Minda Kenneth Sebastian

Tutor:

Fonseca Largo Kalina Marcela

LATACUNGA – ECUADOR
MARZO 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Alvarado Peralta Jeremmy Paul, con cédula de ciudadanía No. 1722316997 y De La Cruz Minda Kenneth Sebastian, con cédula de ciudadanía No. 1752988277, declaramos ser autores del presente Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD PONCE QUILOTOA, PROVINCIA DE COTOPAXI”**, siendo la Licenciada Ph.D. Kalina Marcela Fonseca Largo, Tutora del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 4 de febrero del 2026

Jeremmy Paul Alvarado Peralta
C.C: 1722316997
ESTUDIANTE

Kenneth Sebastian De La Cruz Minda
C.C: 1752988277
ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **ALVARADO PERALTA JEREMMY PAUL**, identificado con cédula de ciudadanía **1722316997** de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. – **EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD PONCE QUILOTOA, PROVINCIA DE COTOPAXI**”, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Abril 2022- Agosto 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutora: Lic. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.

Tema: “**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD PONCE QUILOTOA, PROVINCIA DE COTOPAXI**”

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que LA CESIONARIA no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **EL CEDENTE** podrá utilizarla.


CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, 4 de febrero del 2026.


Alvarado Peralta Jeremmy Paul
EL CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CESIONARIA

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **DE LA CRUZ MINDA KENNETH SEBASTIAN**, identificado con cédula de ciudadanía **1724936024** de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. – **EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD PONCE QUILOTOA, PROVINCIA DE COTOPAXI.”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Abril 2022 – Agosto 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutora: Lic. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.

Tema: **“EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD PONCE QUILOTOA, PROVINCIA DE COTOPAXI.”**

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- f) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- g) La publicación del trabajo de grado.
- h) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- i) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- j) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que LA CESIONARIA no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **EL CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, 4 de febrero del 2026.



Kenneth Sebastian De La Cruz Minda
EL CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CESIONARIA

AVAL DE LA TUTORA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutora del Proyecto de Investigación sobre el título:

“EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD PONCE QUILOTOA, PROVINCIA DE COTOPAXI”, de Alvarado Peralta Jeremmy Paul y De La Cruz Minda Kenneth Sebastian, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 4 de febrero del 2026


Lic. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.
C.C: 1723534457
DOCENTE TUTORA

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, los postulantes: Alvarado Peralta Jeremmy Paul y De La Cruz Minda Kenneth Sebastian, con el título del Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD PONCE QUILOTOA, PROVINCIA DE COTOPAXI”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 4 de febrero del 2026



Lic. Patricio Manuel Clavijo Cevallos, Ph.D.
C.C: 0501444582
LECTOR 1 (PRESIDENTE)



Lic. Jaime Rene Lema Pillalaza, Mg.
C.C: 1713759932
LECTOR 2 (MIEMBRO)



Ing. Vincent Benjamín Velastegui Tapia, Mg
C.C: 0502547649
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar a mí mismo, por la constancia, el sacrificio y la resiliencia durante este proceso. Culminando esta etapa ha requerido disciplina, aprendizaje y crecimiento personal que hoy valoro profundamente.

Agradezco a mi madre por haberme dado la vida y a mi padre por haber sido quien me crió y me guió por el camino de la educación con firmeza, ejemplo y dedicación. Su esfuerzo, sus consejos y su confianza en mí han sido el motor principal para alcanzar esta meta.

A Sofí, quién fue mi acompañante durante este camino, por el apoyo en los momentos compartidos que formaron parte de esta etapa de mi vida. Cada experiencia contribuyó a mi desarrollo personal y académico.

A Brisa, Milo y Mai, mis mascotas por su compañía silenciosa, por ser refugio en los momentos de estrés y por recordarme, incluso en los días más difíciles, la importancia de la calma y la lealtad.

Jeremy Paul Alvarado Peralta

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a mis padres, por ser el motor de mi vida y mi mayor inspiración. Gracias por su paciencia durante este proceso, por motivarme en los momentos difíciles y por enseñarme que con disciplina y constancia todo es posible.

Expreso mi más sincero agradecimiento a todos los docentes que formaron parte de mi proceso académico, por compartir sus conocimientos y contribuir a mi formación profesional.

A mi tutora de tesis, por su orientación, paciencia y acompañamiento constante durante el desarrollo de esta investigación, brindándome las herramientas necesarias para culminarla con éxito.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, aportaron a la culminación de este trabajo, motivándome a seguir creciendo personal y profesionalmente.

Kenneth Sebastian De La Cruz Minda

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi familia, por ser el pilar fundamental de mi vida y el soporte constante durante cada etapa de mi formación.

A mis padres por su amor incondicional, sacrificio y ejemplo de perseverancia. Gracias por enseñarme que el esfuerzo y la disciplina son base de todo logro.

A mis amigos, quienes hicieron de este proceso una experiencia más llevadera, brindándome apoyo, ánimo y compañía en los momentos de mayor exigencia.

Y a mis docentes, por su guía, exigencia académica y compromiso con mi formación profesional. Cada enseñanza recibida ha sido parte esencial para culminar este trabajo.

Jeremmy Paul Alvarado Peralta

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación, con todo mi amor y gratitud, a mis queridos padres.

A ustedes, que han sido mi ejemplo de esfuerzo, humildad y perseverancia. Gracias por cada sacrificio realizado para que pudiera estudiar, por cada consejo oportuno, por su apoyo incondicional y por nunca dejar de creer en mí.

Este logro no es solo mío, es de ustedes también, porque detrás de cada página escrita están sus enseñanzas, su trabajo diario y su amor infinito. Todo lo que soy y lo que he logrado se lo debo a ustedes.

Con profundo orgullo y cariño, les dedico este sueño cumplido.

Kenneth Sebastian De La Cruz Minda

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: “EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA BASADO EN CIENCIA CIUDADANA Y CIENCIA ABIERTA PARA LA COMUNIDAD PONCE QUILOTOA, PROVINCIA DE COTOPAXI”

Autores:

Alvarado Peralta Jeremmy Paul
De La Cruz Minda Kenneth Sebastián

RESUMEN

Los páramos ecuatorianos actúan como reguladores hídricos y abastecen de agua, principalmente para consumo humano. No obstante, muchas comunidades locales consumen este recurso sin tratamiento previo, lo que las expone a riesgos de contaminación. Además, la falta de un monitoreo continuo limita la toma de decisiones y la adecuada gestión del recurso hídrico. La presente investigación evaluó la viabilidad de implementar un sistema participativo de monitoreo de la calidad del agua mediante un enfoque mixto cuali-cuantitativo en la comunidad Ponce Quilotoa. A través de una revisión bibliográfica y la realización de talleres participativos con 50 miembros de la comunidad, se identificaron 36 conceptos que inciden en el acceso a agua segura, organizados en las dimensiones política, económica, social, tecnológica, ecológica y legal (PESTEL). A partir de estos conceptos, se elaboraron mapas cognitivos sociales con el fin de identificar los problemas de mayor relevancia y analizar escenarios con y sin la implementación de estrategias de intervención. Los resultados evidencian a la dimensión ecológica (27,78 %) como el factor más determinante para garantizar el acceso a agua segura. Asimismo, la gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos emergió como el concepto de mayor centralidad ($ci = 54,42$). Por otra parte, el análisis de escenarios mostró que, en ausencia de políticas correctivas, aproximadamente el 95 % de las variables del sistema se ven afectadas negativamente. En contraste, la simulación del escenario óptimo, basado en la implementación de un sistema comunitario de monitoreo, evidenció mejoras significativas en conceptos clave como la gobernanza hídrica y la participación comunitaria, además de una reducción en problemas críticos como la migración forzada. Finalmente, se confirma la viabilidad del sistema comunitario de monitoreo y se implementó un prototipo de hardware libre, acompañado de lineamientos para la elaboración de un manual adaptado al contexto local.

Palabras clave: mapas cognitivos difusos, modelación sistémica, páramo andino, participación comunitaria, PESTEL.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES

THEME: “ASSESSMENT OF THE FEASIBILITY OF IMPLEMENTING A WATER QUALITY MONITORING SYSTEM BASED ON CITIZEN SCIENCE AND OPEN SCIENCE FOR THE PONCE QUILOTOA COMMUNITY, COTOPAXI PROVINCE”

Authors:

Alvarado Peralta Jeremmy Paul
De La Cruz Minda Kenneth Sebastián

ABSTRACT

Ecuadorian páramo ecosystems function as hydrological regulators and supply water primarily for human consumption. However, many local communities consume this resource without prior treatment, exposing them to contamination risks. Furthermore, the lack of continuous monitoring limits informed decision-making and proper water resource management. This study assessed the feasibility of implementing a participatory water quality monitoring system through a mixed qualitative–quantitative approach in the Ponce Quilotoa community. Through a literature review and participatory workshops involving 50 community members, 36 concepts influencing access to safe water were identified and organized within the political, economic, social, technological, ecological, and legal dimensions (PESTEL framework). Social cognitive maps were developed to identify key problems and analyze scenarios with and without intervention strategies. Results indicate that the ecological dimension (27.78%) is perceived as the most determining factor in ensuring access to safe water. Inefficient and fragmented water resource management emerged as the concept with the highest centrality index ($ci = 54.42$). Scenario analysis showed that, in the absence of corrective policies, approximately 95% of system variables are negatively affected. In contrast, simulation of the optimal scenario—based on the implementation of a community monitoring system—demonstrated significant improvements in water governance and community participation, along with a reduction in forced migration. The feasibility of the community-based monitoring system was confirmed, and an open-source hardware prototype was implemented with guidelines for a manual adapted to the local context.

Keywords: fuzzy cognitive maps, systems modeling, Andean páramo, community participation, PESTEL

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	iii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	v
AVAL DE LA TUTORA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	vii
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	viii
<i>AGRADECIMIENTO</i>	ix
<i>AGRADECIMIENTO</i>	x
<i>DEDICATORIA</i>	xi
<i>DEDICATORIA</i>	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2 INTRODUCCIÓN	2
3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	3
4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	5
5 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	5
6 OBJETIVOS DEL PROYECTO	6
6.1 Objetivo General	6
6.2 Objetivos Específicos	7
7 ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.....	7
8 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA	8
8.1 Calidad del agua en los páramos de la sierra centro del Ecuador	8
8.1.1 Parámetros para la evaluación de la calidad del agua en páramos.....	8
8.1.2 Características hidrológicas y ecológicas de los páramos de la sierra centro de Ecuador	8
8.1.3 Servicios ecosistémicos.....	9
8.1.4 Principales amenazas a la calidad del agua.....	9
8.2 Monitoreo comunitario del recurso hídrico.....	9

8.2.1	Concepto y evolución del monitoreo ambiental participativo	9
8.2.2	Participación comunitaria en la gestión del agua	10
8.2.3	Enfoque de género y rol de las mujeres en la gestión del agua.....	10
8.2.4	Experiencias exitosas de monitoreo comunitario en el ecosistema páramo 10	
8.3	Ciencia abierta.....	10
8.3.1	Principios de la ciencia abierta y acceso a datos ambientales.....	11
8.3.2	Redes colaborativas y plataformas de ciencia abierta en agua.....	11
8.4	Herramientas tecnológicas para el monitoreo de la calidad del agua.	11
8.4.1	Técnicas y métodos de monitoreo de bajo costo	11
8.4.2	Sensores abiertos y hardware libre para medición de parámetros hídricos 11	
8.4.3	Aplicaciones móviles y sistemas de visualización de datos.....	12
8.4.4	Internet de las cosas (IoT) y su aplicación en comunidades rurales	12
8.4.5	Retos técnicos y logísticos en el monitoreo en zonas remotas.....	12
8.5	Ciencia ciudadana aplicada al monitoreo del agua	13
8.5.1	Ciencia ciudadana como herramienta para la gestión del recurso hídrico	13
8.5.2	Integración del conocimiento local y saberes tradicionales	13
8.5.3	Validación, ética y calidad de los datos generados por la ciudadanía.....	13
8.6	Gobernanza del agua bajo el marco PESTEL	14
8.6.1	Modelos de gobernanza del agua en los páramos	14
8.6.2	Marco legal e institucional de la gestión comunitaria del agua	14
8.6.3	Incorporación del monitoreo comunitario en la toma de decisiones.....	15
8.6.4	Colaboración entre actores locales, académicos e institucionales	15
8.6.5	Aportes al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6, 13 y 15)	15
9	HIPOTESIS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	16
9.1	Hipótesis.....	16

9.1.1	Hipótesis alternativa (H_a).....	16
9.1.2	Hipótesis nula (H_0).....	16
10	ÁREA DE ESTUDIO.....	16
10.1	-Diseño metodológico	17
10.2	Enfoque cualitativo	17
10.3	Enfoque cuantitativo	17
10.4	Variables de estudio.....	18
10.5	Métodos.....	18
10.5.1	Mapas cognitivos difusos	18
10.6	Técnicas.....	18
10.6.1	Bola de nieve	18
10.7	Fases de investigación.....	20
10.7.1	Revisión bibliográfica y determinación de los conceptos.....	20
10.7.2	Taller participativo con la comunidad.....	20
10.7.3	Transformación conceptos complejos a simples.....	21
10.7.4	Elaboración de mapa difuso	21
10.7.5	Evaluación de los mapas cognitivos difusos	21
10.7.6	Teoría de grafos	22
10.7.7	Inferencia Difusa	23
10.7.8	Diseño de los lineamientos del manual de usuario del sistema de monitoreo, orientados a facilitar su correcta utilización, mantenimiento y apropiación por parte de las comunidades usuarias.	24
10.8	Diseño estadístico.....	26
10.8.1	Estadística descriptiva de los índices de la teoría de grafos.....	27
10.8.2	Justificación del tamaño muestral	27
11	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	28
11.1	Identificación de los principales conceptos PESTEL que inciden en la disponibilidad de agua segura, a partir de la revisión bibliográfica.....	28

11.2	Resultados de la transformación de conceptos complejos a simples	29
11.3	Conceptos de la comunidad.....	30
11.4	Identificación de los principales conceptos PESTEL que afectan la disponibilidad de agua segura en la comunidad de Ponce Quilotoa	30
11.5	Diseño de un sistema de monitoreo participativo utilizando tecnologías de código abierto, adaptadas al contexto PESTEL de la comunidad.....	31
11.5.1	Teoría de grafos	31
11.5.2	Análisis del mapa cognitivo difuso	36
11.6	Inferencia Difusa	37
11.6.1	Análisis de escenarios: escenario de peor caso (worst-case scenario). ..	37
11.6.2	Análisis del mejor escenario: Implementación de un sistema de monitoreo de calidad de agua participativo con la comunidad.....	40
11.6.3	Análisis del mejor escenario: Mantenimiento de las bombas de agua. ..	43
11.7	Lineamientos para la elaboración de un manual de usuario del sistema de monitoreo de la calidad del agua.....	45
11.8	Guía para la ejecución del taller	47
11.9	Respuesta a la pregunta de investigación.....	47
11.10	Comprobación de hipótesis	48
12	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
12.1	Conclusiones	48
12.2	Recomendaciones.....	49
13	BIBLIOGRAFÍAS	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de los beneficiarios del proyecto	5
Tabla 2. Sistema de tareas para cada objetivo.	7
Tabla 3 . Conceptos PESTEL obtenidos de revisión bibliográfica.....	28
Tabla 4. Conceptos identificados.....	32
Tabla 5. Análisis del mapa cognitivo social a partir de la teoría de grafos	35
Tabla 6. Escenario del peor caso	38
Tabla 7. Escenario del mejor caso: Implementación de un sistema de monitoreo	41
Tabla 8. Escenario del mejor caso: Mantenimiento de las bombas de agua.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la comunidad Ponce Quilotoa.....	17
Figura 2. Metodología.....	19
Figura 3. Árbol de decisiones.....	26
Figura 4. Conceptos simples	30
Figura 5. Gráfico de pastel sobre el porcentaje de conceptos PESTEL.....	31
Figura 6. Mapa cognitivo difuso del sistema según el grado de salida.....	35
Figura 7. Mapa cognitivo difuso	37

1 INFORMACIÓN GENERAL

Título

Implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia ciudadana y ciencia abierta para la comunidad Ponce Quilotoa, Provincia de Cotopaxi.

Lugar de ejecución.

Comunidad Ponce Quilotoa, Zumbahua, Cotopaxi.

Institución, unidad académica y carrera que auspicia

Universidad técnica de Cotopaxi, Facultad de ciencias agropecuarias y de recursos naturales, Ingeniería ambiental

Nombres de equipo de investigadores

Tutor: Dra. Kalina Marcela Fonseca Largo, Ph.D.

Lector 1 (presidente): Lic. Patricio Clavijo Cevallos, Ph.D.

Lector 2: Lic. Jaime Rene Lema Pillalaza, Mg.

Lector 3: Ing. Vincent Benjamín Velastegui Tapia, Mg.

Autores: Jeremmy Paul Alvarado Peralta y Kenneth Sebastian De La Cruz Minda

Área de Conocimiento.

Protección del medio ambiente

Línea de investigación:

Análisis, conservación y aprovechamiento de la biodiversidad local.

Línea de Vinculación:

Gestión de recursos naturales, biodiversidad, biotecnología y genética, para el desarrollo humano y social.

2 INTRODUCCIÓN

El agua constituye un recurso fundamental para la vida y el desarrollo de las comunidades. Sin embargo, los ecosistemas que proveen este recurso enfrentan presiones sin precedentes debido a modelos de desarrollo que no consideran adecuadamente sus impactos ambientales (Delgado-Serrano et al., 2017). En Ecuador, los páramos de la sierra centro desempeñan un papel crítico como reguladores hídricos naturales, funcionando como una "esponja gigante" que regula el flujo de agua hacia las cuencas bajas y provee recursos hídricos de elevada calidad para consumo humano y actividades productivas.

A pesar de su importancia, estos ecosistemas enfrentan amenazas crecientes por actividades como el sobrepastoreo, plantaciones forestales de especies exóticas, minería y quema de vegetación, comprometiendo la capacidad del páramo para regular los flujos de agua y mantener su calidad. Esta situación es particularmente crítica en comunidades locales como Ponce Quilotoa, donde la población consume agua de fuentes subterráneas sin tratamiento previo, enfrentando contaminación por arsénico, cromo y alta carga microbiológica (Andino, 2021; Fonseca et al., 2024).

La ausencia de políticas públicas orientadas a la evaluación continua de la calidad del agua en estas comunidades limita la toma de decisiones y la gestión comunitaria del recurso (Fonseca et al., 2024). En este contexto, el monitoreo comunitario emerge como una estrategia clave que permite involucrar a personas ajenas a las organizaciones académicas tradicionales en la recopilación e interpretación de información científica, produciendo datos en escalas espaciales y temporales que los sistemas oficiales no podrían alcanzar.

El uso de tecnologías de bajo costo basadas en hardware libre ha democratizado el acceso al monitoreo de la calidad del agua. Sistemas que integran microcontroladores como el ESP32 y sensores de bajo costo permiten una supervisión continua y en tiempo real de parámetros fisicoquímicos críticos, con costos de implementación accesibles incluso para regiones donde los equipos comerciales son inaccesibles.

La presente investigación implementa un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia abierta y participación comunitaria en Ponce Quilotoa, integrando tecnología de código abierto, conocimiento científico y ciencia ciudadana. Este enfoque no solo busca proveer datos técnicos, sino también empoderar a la comunidad mediante el fortalecimiento de

capacidades locales y la construcción de conocimiento colectivo. A través de metodologías participativas como los Mapas Cognitivos Difusos (FCM) y el análisis PESTEL, se comprende de manera integral la gestión comunitaria del recurso hídrico, implementando un sistema accesible que genera información útil para fortalecer la toma de decisiones y contribuir a la prevención de la contaminación del agua.

3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La presente investigación aborda la necesidad crítica de generar información permanente sobre la calidad del agua en comunidades locales, utilizando como ejemplo la comunidad de Ponce Quilotoa, ubicada en el páramo de Cotopaxi. Estos ecosistemas altoandinos cumplen funciones hidrológicas esenciales como la regulación del agua, el mantenimiento de caudales y la provisión de recursos hídricos de alta calidad para consumo humano y actividades productivas, pero han sido progresivamente afectados por el cambio de uso del suelo, la introducción de especies forestales exóticas y prácticas agrícolas inadecuadas.

A pesar de la evidencia documentada sobre la presencia de contaminantes como arsénico y cromo en concentraciones superiores a los límites permitidos, junto con una elevada carga microbiológica en las fuentes de agua de la comunidad (Andino, 2021), no existen políticas públicas específicas orientadas a la evaluación continua de la calidad del agua en estos territorios. Esta ausencia de sistemas de monitoreo impide la toma de decisiones informadas y la gestión comunitaria efectiva del recurso hídrico, perpetuando una situación de vulnerabilidad que se manifiesta en problemas concretos de salud pública, especialmente en la alta frecuencia de enfermedades gastrointestinales en la parroquia de Zumbahua. Por lo tanto, resulta imperativo desarrollar mecanismos de vigilancia que permitan a la comunidad comprender el estado de su recurso más vital y actuar en consecuencia.

Desde el enfoque científico, este estudio aporta a un campo emergente que integra la ciencia ciudadana, la ciencia abierta y las tecnologías de bajo costo para el monitoreo ambiental participativo. Aunque existen experiencias de monitoreo comunitario del agua en diferentes contextos, pocas investigaciones han aplicado metodologías como los Mapas Cognitivos Difusos (FCM) combinados con análisis PESTEL para comprender integralmente los conceptos que afectan la calidad del agua en ecosistemas de páramo desde una perspectiva comunitaria.

Los resultados obtenidos permitieron establecer una línea base de información sobre parámetros fisicoquímicos críticos del agua (pH, turbidez, conductividad eléctrica, temperatura, caudal, oxígeno disuelto) que actualmente no existe para esta comunidad. Esta información constituye una herramienta fundamental para el diseño de estrategias de protección de fuentes hídricas, la implementación de sistemas de tratamiento apropiados y la definición de políticas locales de gestión del agua. Además, el fortalecimiento de capacidades locales mediante la elaboración de lineamientos para un manual que garantiza la sostenibilidad del sistema y empodera a la población para ejercer vigilancia activa sobre su recurso hídrico.

En sintonía con los principios de gobernanza comunitaria del agua reconocidos en la Constitución del Ecuador y el Código Orgánico Ambiental (COA), que establecen que la gestión del recurso debe ser exclusivamente pública o comunitaria (Martínez-Moscoso & Abril Ortiz, 2020; Pérez García, 2024), esta investigación fortalece la capacidad de las organizaciones locales para ejercer su derecho a participar activamente en la toma de decisiones sobre sus recursos naturales. El sistema implementado puede integrarse en los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) del GAD Parroquial de Zumbahua, proporcionando evidencia técnica para la priorización de inversiones en infraestructura de agua segura.

Además, esta investigación está directamente conectada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente con el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), al promover el acceso universal a agua segura y la gestión sostenible del recurso; con el ODS 13 (Acción por el clima), al fortalecer la resiliencia de las comunidades frente a la variabilidad climática y eventos extremos que afectan la disponibilidad hídrica; y con el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), al generar información que fundamenta la protección del ecosistema de páramo como zona crítica de recarga hídrica (Pérez García, 2024). La metodología participativa aplicada también contribuye al ODS 5 (Igualdad de género) al promover la inclusión equitativa de mujeres en roles de liderazgo técnico y toma de decisiones sobre la gestión del agua.

En síntesis, el presente estudio no solo contribuye con la generación de información técnico-científica sobre la calidad del agua en un ecosistema vulnerable, sino que también democratiza el acceso al conocimiento mediante tecnologías de código abierto y fortalece la gobernanza local del recurso hídrico. Por lo tanto, su importancia trasciende el ámbito académico y se proyecta como un modelo replicable para otras comunidades andinas que enfrentan desafíos similares, integrando los principios de desarrollo sostenible, justicia ambiental y participación ciudadana en la gestión de los recursos naturales.

4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Los beneficiarios del presente proyecto se clasifican en directos e indirectos. Los beneficiarios directos corresponden a la población que reside en la zona de intervención del estudio, mientras de los beneficiarios indirectos comprenden a los habitantes de la parroquia donde se encuentra localizado el ecosistema afectado

Tabla 1. *Distribución de los beneficiarios del proyecto*

BENEFICIARIOS DIRECTOS	
Comunidad	Cantidad
Ponce Quilotoa	637
BENEFICIARIOS INDIRECTOS	
Parroquia	Cantidad
Zumbahua	6,526

Nota: La tabla presenta los beneficiarios directos ubicados en la comunidad de Ponce Quilotoa y los beneficiarios indirectos correspondientes a la parroquia Zumbahua. Fuente: (GADPR Zumbahua, 2025).

5 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Los cambios ambientales que se observan en la actualidad a nivel global están fuertemente influenciados por modelos de desarrollo económico que no consideran adecuadamente los impactos ambientales que generan. Esta situación está provocando presiones sin precedentes sobre los sistemas socio-ecológicos, afectándolos en distintas escalas espaciales (Delgado-Serrano et al., 2017).

Estas dinámicas se evidencian de forma crítica en el aumento de las sequias y la escasez de agua, fenómenos que se ven intensificados por la interacción entre la variabilidad climática y las actividades humanas, como el cambio de uso del suelo, los procesos de urbanización y los patrones insostenibles de extracción de recursos.

La intensidad de estas presiones resulta particularmente marcada en sistemas hidrológicos estratégicos como la cordillera de los Andes, la cual cumple la función de una “torre de agua” clave al suministrar de agua dulce a millones de usuarios, al tiempo que experimenta transformaciones en la cobertura vegetal y procesos de expansión demográfica.

En América Latina, el desarrollo económico y social ha ocurrido con frecuencia a costa del deterioro del medio ambiente. Este proceso ha intensificado las presiones ambientales asociadas a la urbanización acelerada y a las persistentes desigualdades sociales (Delgado-Serrano et al., 2017). En este contexto, los Andes enfrentan una situación particularmente

crítica en términos de seguridad hídrica, ya que el acelerado retroceso de los glaciares pone en riesgo el suministro de agua dulce para millones de habitantes.

De igual manera, la gestión del agua enfrenta limitaciones adicionales, entre ellas la falta de información hidrológica suficiente y la tendencia de los marcos institucionales a responder de forma reactiva ante la crisis, en lugar de adoptar enfoques preventivos. Esta situación resulta especialmente problemática en un contexto marcado por una creciente variabilidad climática.

En el contexto local, en la comunidad de Ponce Quilotoa, en la provincia de Cotopaxi, la principal preocupación gira en torno a la calidad del agua que la población obtiene de fuentes subterráneas y consume de forma directa sin ningún tipo de tratamiento previo.

Según los análisis realizados por Andino (2021), se evidencia la presencia de contaminantes preocupantes, como arsénico y cromo en concentraciones superiores a los límites permitidos, junto con una carga microbiológica elevada.

Esta combinación de conceptos se refleja en problemas concretos de salud, especialmente en una alta frecuencia de enfermedades gastrointestinales en la parroquia de Zumbahua, lo que vincula de forma directa la calidad del agua con el bienestar de la población local (Andino, 2021). Sin embargo, a pesar de esta problemática, no existen políticas públicas específicas orientadas a la evaluación de la calidad del agua en estas comunidades. Esta ausencia de información limita la toma de decisiones y la gestión comunitaria del recurso.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo implementar un sistema de monitoreo de la calidad del agua, basado en ciencia abierta y con la participación de la comunidad de Ponce Quilotoa, para generar información básica y permanente sobre la calidad del agua de la comunidad. Esta investigación constituye una estrategia clave para la gestión del recurso hídrico al involucrar a comunidades locales en la generación de datos, especialmente en territorios donde la información hidrológica es limitada.

6 OBJETIVOS DEL PROYECTO

6.1 Objetivo General

Implementar un sistema de monitoreo de la calidad del agua, basado en ciencia abierta y con la participación de la comunidad de Ponce Quilotoa, para generar información básica y permanente sobre la calidad del agua de la comunidad.

6.2 Objetivos Específicos

Identificar los principales conceptos que afectan la calidad del agua en la comunidad de Ponce Quilotoa desde un perspectiva política, económica, social, tecnológica, ecológica y legal (PESTEL).

Diseñar un sistema de monitoreo participativo utilizando tecnologías de código abierto, adaptadas al contexto PESTEL de la comunidad.

Elaborar los lineamientos para un manual de usuario del sistema de monitoreo, orientados a facilitar su correcta utilización, mantenimiento y apropiación por parte de la comunidad Ponce Quilotoa.

7 ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Tabla 2. Sistema de tareas para cada objetivo.

OBJETIVOS	METODOLOGÍA	ACTIVIDADES	RESULTADO
Identificar los principales conceptos que afectan la calidad del agua en la comunidad de Ponce Quilotoa desde un perspectiva política, económica, social, tecnológica, ambiental y legal (PESTEL).	Revisión bibliográfica y participativa comunitaria	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión de fuentes científicas, técnicas y normativas sobre calidad del agua en páramos. - Taller participativo con la comunidad de Ponce Quilotoa para identificar conceptos locales PESTEL. - Sistematización y validación de conceptos identificados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Listado de conceptos PESTEL que afectan la calidad del agua local. - Matriz de conceptos validada por la comunidad.
Diseñar un sistema de monitoreo participativo utilizando tecnologías de código abierto, adaptadas al contexto PESTEL de la comunidad.	Modelado participativo mediante mapas cognitivos difusos	<ul style="list-style-type: none"> - Construcción de mapas cognitivos difusos con la comunidad. - Digitalización del mapa cognitivo difuso utilizando la herramienta Mental Modeler. - Evaluar escenarios con la implementación de un sistema de monitoreo de calidad de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mapa cognitivo difuso del sistema hídrico local.

OBJETIVOS	METODOLOGÍA	ACTIVIDADES	RESULTADO
Elaborar los lineamientos para un manual de usuario del sistema de monitoreo, orientados a facilitar su correcta utilización, mantenimiento y apropiación por parte de las comunidades usuarias.	Diseño documental de lineamientos técnicos y pedagógicos	- Revisión de manuales de usuario de sistemas similares de monitoreo de agua. - Redacción de lineamientos en lenguaje accesible adaptado al contexto comunitario.	- Apartado con los lineamientos para el manual de usuario del sistema de monitoreo.

Nota: Resultados esperados para cada objetivo en base a la metodología y actividades planteadas.

8 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

8.1 Calidad del agua en los páramos de la sierra centro del Ecuador

La calidad del agua se define como el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que determinan su aptitud para distintos usos y su capacidad para sostener los ecosistemas acuáticos (Armijos-Arcos et al., 2025). En los ecosistemas altoandinos, particularmente en los páramos, la calidad del agua adquiere una importancia estratégica debido a que estas áreas funcionan como zonas naturales de captación y regulación hídrica a escala regional. Estudios hidrológicos han demostrado que los suelos orgánicos del páramo presentan una elevada capacidad de retención de agua, lo que permite la provisión sostenida de caudales y una menor variabilidad hidrológica anual (Mosquera et al., 2022).

8.1.1 *Parámetros para la evaluación de la calidad del agua en páramos*

En la actualidad, para determinar qué tan saludable está el agua en los ecosistemas de páramo, se utilizan conjuntamente indicadores físicos, químicos y biológicos que muestran el estado general de este tipo de ambiente. Las investigaciones recientes destacan que la conductividad eléctrica, el pH y la turbidez son indicadores físicos críticos, ya que sus variaciones están directamente ligadas a la erosión del suelo y a la pérdida de la capacidad de infiltración hídrica provocada por el cambio de uso de suelo (Daconte et al., 2024).

8.1.2 *Características hidrológicas y ecológicas de los páramos de la sierra centro de Ecuador*

Los páramos de la sierra centro de Ecuador se localizan en las zonas altas de la cordillera de los Andes, en un rango altitudinal que oscila entre los 3000 y 5000 m.s.n.m. (Fonseca et al., 2024). Este ecosistema se define técnicamente como una tundra montañosa tropical que posee una excepcional capacidad de retención hídrica, funcionando como una "esponja gigante" que regula el flujo de agua hacia las cuencas bajas (Fonseca et al., 2024). Estas características

bióticas y abióticas permiten que el páramo actúe como un regulador natural de caudales, mitigando los efectos de inundaciones y sequías en las zonas de transición altoandina (Muñoz & Pérez, 2018)

8.1.3 Servicios ecosistémicos

Los ecosistemas de páramo constituyen proveedores fundamentales de servicios ecosistémicos de importancia crítica para el sostenimiento de la vida humana y el desarrollo de actividades económicas en las comunidades andinas (Fonseca et al., 2024). En el ámbito de los servicios de aprovisionamiento, resulta particularmente notable la provisión de recursos hídricos de elevada calidad destinados tanto al consumo humano como a sistemas de irrigación agrícola, suministrando agua a importantes núcleos urbanos, entre los cuales destacan las ciudades de Quito y Latacunga (Nahuelhual & Laterra, 2025).

8.1.4 Principales amenazas a la calidad del agua

La calidad del recurso hídrico en los páramos ecuatorianos se encuentra bajo una presión creciente debido a la explotación intensiva y la conversión de la cobertura vegetal nativa (Fonseca et al., 2024). Las principales amenazas antrópicas incluyen el sobrepastoreo de camélidos (alpacas), la introducción de plantaciones forestales de especies exóticas como el pino, la minería de piedra y grava, y la quema de vegetación para el establecimiento de cultivos transitorios (Fonseca et al., 2024).

8.2 Monitoreo comunitario del recurso hídrico

El monitoreo de recursos hídricos a nivel comunitario depende principalmente de involucrar a personas ajenas a las organizaciones académicas y de investigación tradicionales para recopilar y, en ocasiones, interpretar información científica (Blanco-Ramírez et al., 2025). Esta metodología es especialmente beneficiosa para producir datos en escalas espaciales y temporales que los sistemas de monitoreo oficiales no podrían alcanzar de manera independiente, permitiendo así la consideración simultánea de aspectos tanto técnicos como sociales (Dominguez Zúñiga, 2025).

8.2.1 Concepto y evolución del monitoreo ambiental participativo

El concepto de monitoreo participativo ha evolucionado desde modelos contributivos, donde el público se limita a la recolección de datos siguiendo protocolos científicos, hacia esquemas en los que la ciudadanía se involucra en todas las etapas de la investigación, incluida la formulación de las preguntas de estudio (Neves et al., 2025).

La rápida difusión de tecnologías digitales, como los teléfonos inteligentes y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha facilitado este escalamiento, reduciendo las

barreras de participación y permitiendo una vigilancia ambiental a largo plazo que conecta el aprendizaje académico con las experiencias cotidianas de las comunidades (Blanco-Ramírez et al., 2025).

8.2.2 Participación comunitaria en la gestión del agua

La participación comunitaria constituye el eje central para garantizar un acceso equitativo y sostenible al agua, entendiéndola no solo como un insumo técnico, sino como un bien público y social (Dominguez Zúñiga, 2025). Este modelo de gobernanza social permite a las comunidades rurales operar y mantener sistemas de abastecimiento de forma independiente en áreas donde la infraestructura estatal es limitada, tratando temas que rebasan el suministro técnico, como la cohesión social y la protección de fuentes (Günther, 2014).

8.2.3 Enfoque de género y rol de las mujeres en la gestión del agua

Desde la perspectiva de la ecología política feminista, las mujeres son reconocidas como administradoras ambientales críticas y transmisoras de saberes ecológicos prácticos esenciales para la conservación (Nisaa et al., 2025). El reconocimiento de su agencia y su inclusión equitativa en la gobernanza hídrica no solo es un requisito de justicia social, sino que fortalece la resiliencia de las comunidades y mejora la sostenibilidad de los proyectos ambientales (Castañeda Salgado & Del Jurado Mendoza, 2014).

8.2.4 Experiencias exitosas de monitoreo comunitario en el ecosistema páramo

Las experiencias de monitoreo comunitario en ecosistemas de montaña y zonas de recarga hídrica, como los páramos, han resultado exitosas al integrar el conocimiento local como estrategia de defensa territorial y ambiental (Ulloa et al., 2020).

En estas áreas críticas, las comunidades indígenas y campesinas han establecido sistemas de vigilancia autónomos que protegen las fuentes de agua frente a la presión de industrias extractivas y la degradación del suelo (Báez & Sacher, 2014). Mediante la revalorización de prácticas ancestrales y la colaboración con herramientas técnicas, se han consolidado procesos de restauración ecológica que aseguran la provisión hídrica para el consumo humano (Báez & Sacher, 2014).

8.3 Ciencia abierta

La ciencia abierta se conceptualiza como un marco general que abarca varios movimientos y metodologías destinados a democratizar el conocimiento y mejorar la accesibilidad y la naturaleza participativa de los procesos científicos (Das, 2020).

De acuerdo con el marco regulatorio establecido por la UNESCO, este ecosistema debe sustentarse en los principios del beneficio colectivo, la equidad, la justicia, la calidad y la

integridad, y al mismo tiempo fomentar la inclusión de diversas epistemologías y actores sociales (Das, 2020)

8.3.1 Principios de la ciencia abierta y acceso a datos ambientales

En el ámbito ambiental, el acceso abierto a la información permite obtener datos con una resolución espacial y temporal que supera las capacidades de los métodos institucionales tradicionales. No obstante, la apertura de datos ambientales en el Sur Global conlleva desafíos éticos significativos, especialmente en regiones con conflictos socioambientales donde la soberanía de los datos y la privacidad son esenciales para proteger a las comunidades (Blanco-Ramírez et al., 2025).

8.3.2 Redes colaborativas y plataformas de ciencia abierta en agua

Las redes colaborativas han impulsado el desarrollo de plataformas de ciencia ciudadana contributiva, como es el caso del proyecto CrowdWater, que facilita la recolección de datos hidrológicos mediante el uso de dispositivos móviles sin necesidad de equipamiento físico costoso (Blanco-Ramírez et al., 2025). El éxito de estas iniciativas radica en construir relaciones de confianza y asegurar que el conocimiento genere beneficios directos para la toma de decisiones local y la defensa del territorio (Gunther, 2014).

8.4 Herramientas tecnológicas para el monitoreo de la calidad del agua.

8.4.1 Técnicas y métodos de monitoreo de bajo costo

El monitoreo tradicional de la calidad del agua depende de la recolección manual de muestras y su posterior análisis en laboratorios, un proceso que puede demorar entre 24 y 48 horas, lo que resulta impracticable para una respuesta inmediata ante eventos de contaminación. Como alternativa, se han desarrollado sistemas inteligentes de bajo costo que utilizan componentes electrónicos y sensores de grado aficionado, cuyo costo total de implementación puede ser inferior a los 80 dólares estadounidenses (Sharma et al., 2025; Rahman et al., 2025). Estos métodos permiten una supervisión continua y en tiempo real de parámetros fisicoquímicos críticos, democratizando el acceso a datos hídricos en regiones en desarrollo o en pequeñas explotaciones acuícolas donde los equipos comerciales de alto costo son inaccesibles (Sharma et al., 2025; Vamsi Thalatam et al., 2023).

8.4.2 Sensores abiertos y hardware libre para medición de parámetros hídricos

El uso de hardware de código abierto es el pilar de las estaciones de monitoreo modernas, destacando microcontroladores como el ESP32 por su procesador de doble núcleo, bajo consumo energético y conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada (Sharma et al., 2025; Prompt et al., 2023). Estos sistemas integran una red de sensores para medir variables

esenciales: sondas de pH basadas en electrodos de vidrio, sensores de sólidos disueltos totales (TDS) que operan por conductividad eléctrica, y sensores de turbidez que utilizan la dispersión de luz infrarroja para detectar partículas suspendidas (Sharma et al., 2025; Vamsi Thalatam et al., 2023). Para la temperatura, se emplean comúnmente sondas digitales DS18B20 o termopares con módulos MAX6675, los cuales garantizan una alta resolución con un acondicionamiento de señal mínimo (Promput et al., 2023; Sharma et al., 2025).

8.4.3 Aplicaciones móviles y sistemas de visualización de datos

La transformación de datos crudos en información comprensible se logra mediante plataformas en la nube y aplicaciones móviles que ofrecen visualización en tiempo real. Herramientas como Google Firebase permiten la sincronización de datos y su almacenamiento en estructuras NoSQL, facilitando el acceso remoto (Sharma et al., 2025). Por su parte, sistemas como ThingSpeak y Node-RED permiten configurar tableros de control con gráficos de series temporales, indicadores de estado y mapas de geolocalización basados en librerías como Worldmap (Promput et al., 2023; Vamsi Thalatam et al., 2023). Estas interfaces móviles no solo muestran las mediciones, sino que también gestionan alertas automáticas cuando los parámetros hídricos exceden los umbrales de seguridad predefinidos (Sharma et al., 2025; Rahman et al., 2025).

8.4.4 Internet de las cosas (IoT) y su aplicación en comunidades rurales

La implementación de tecnologías IoT ha revolucionado la gestión hídrica en zonas aisladas mediante protocolos de comunicación de largo alcance y bajo consumo, como LoRa (Promput et al., 2023). Esta tecnología es capaz de transmitir datos a distancias que superan los 2 km, incluso en entornos con obstáculos físicos, lo que la hace ideal para la agricultura y acuicultura en comunidades rurales (Promput et al., 2023). Al integrar redes de sensores inalámbricos, los pequeños productores pueden monitorear de forma autónoma la salud de sus ecosistemas acuáticos, optimizando el crecimiento de las especies y asegurando la potabilidad del suministro sin depender de infraestructuras de comunicación convencionales (Rahman et al., 2025; Promput et al., 2023).

8.4.5 Retos técnicos y logísticos en el monitoreo en zonas remotas

El despliegue de tecnología en entornos hostiles enfrenta desafíos significativos, tales como el biofouling (incrustaciones biológicas) y la deriva de los sensores, fenómenos que comprometen la precisión de las lecturas y exigen protocolos de recalibración frecuentes (Sharma et al., 2025; Rahman et al., 2025). Asimismo, la estabilidad de la conexión inalámbrica es limitada en condiciones de submisión, donde la señal Wi-Fi puede perderse a profundidades

mayores a los 10 cm debido a la atenuación (Ayisat et al., 2025). Otros retos logísticos incluyen la gestión energética mediante el uso de modos de "sueño profundo" para maximizar la vida útil de las baterías y la necesidad de protecciones físicas robustas, como carcasas con clasificación IP67, para salvaguardar la electrónica frente a la humedad y el polvo (Sharma et al., 2025).

8.5 Ciencia ciudadana aplicada al monitoreo del agua

8.5.1 Ciencia ciudadana como herramienta para la gestión del recurso hídrico

La ciencia ciudadana se define como la práctica de incluir a miembros del público en la investigación científica para colaborar en la producción de conocimiento (Dimitriadis et al., 2025). Esta herramienta es fundamental para la gestión del recurso hídrico, ya que permite recolectar datos en regiones donde la información hidrológica es escasa, facilitando la toma de decisiones informadas por parte de gobiernos e instituciones (O’Ryan et al., 2025; Blanco-Ramírez et al., 2025). Al integrar a grupos no tradicionales, como estudiantes y comunidades locales, se logra una gobernanza ambiental policéntrica que cierra brechas espaciales y temporales en el monitoreo de la calidad del agua (O’Ryan et al., 2025). No obstante, para que estos programas impacten realmente en la gestión pública, es necesario que los problemas locales sean identificados por la propia comunidad, garantizando así la relevancia y legitimidad de los datos generados (Blanco-Ramírez et al., 2025; O’Ryan et al., 2025).

8.5.2 Integración del conocimiento local y saberes tradicionales

La integración de los Sistemas de Conocimiento Indígena (IKS) y los saberes tradicionales ofrece una comprensión profunda del entorno que enriquece los datos científicos mediante una visión holística del lugar (Sinclair, 2025; Baron-Aguilar et al., 2025). Estos conocimientos han permitido la restauración exitosa de ecosistemas, como se observa en la recuperación de poblaciones de salmón liderada por los Skolt Sámi o el uso de estructuras ancestrales como los johads en India para la recarga de acuíferos (Sinclair, 2025; Devi, 2026). Para una gestión equitativa, se recomienda adoptar el enfoque de "Visión con Dos Ojos", que combina las fortalezas de los saberes indígenas con el rigor de la ciencia occidental (Baron-Aguilar et al., 2025). De esta manera, la institucionalización de estos saberes no solo mejora la seguridad hídrica, sino que también revitaliza la identidad cultural y la ética de conservación en las comunidades (Devi, 2026).

8.5.3 Validación, ética y calidad de los datos generados por la ciudadanía

Uno de los principales retos de la ciencia ciudadana es asegurar que la calidad de los datos recolectados por voluntarios sea comparable con los estándares profesionales, ya que la

falta de capacitación puede derivar en errores de identificación de especies o amenazas (Dimitriadis et al., 2025; O’Ryan et al., 2025). Para mitigar esto, es indispensable implementar planes de garantía de calidad (QAPP) y protocolos de validación rigurosos (O’Ryan et al., 2025). El uso de inteligencia artificial para verificar y filtrar anomalías en las lecturas de sensores de bajo costo representa una tendencia clave para aumentar la fiabilidad de la información (Krčadinac et al., 2025). Desde la ética, el manejo de datos debe regirse por los principios CARE (Beneficio Colectivo, Autoridad de Control, Responsabilidad y Ética) para garantizar la soberanía de la información, especialmente en comunidades indígenas y zonas con conflictos socioambientales (Baron-Aguilar et al., 2025; O’Ryan et al., 2025; Blanco-Ramírez et al., 2025).

8.6 Gobernanza del agua bajo el marco PESTEL

El análisis PESTEL funciona como un radar estratégico, permite mapear el entorno macro a través de seis dimensiones clave política, económica, social, ecológica y legal. Aunque son fuerzas que la organización no puede controlar, entenderlas es vital para asegurar la viabilidad y anticipar cambios en la investigación (Çitilci & Akbalık, 2020). PESTEL se emplea tanto como herramienta descriptiva de escaneo ambiental como en metodologías cuantitativas y de modelado que buscan mayor objetividad y peso relativo de factores (Yüksel, 2021)

8.6.1 Modelos de gobernanza del agua en los páramos

En los ecosistemas de páramo ecuatorianos, la gobernanza se sustenta en modelos de gestión comunitaria que integran valores ancestrales de reciprocidad, cultura y territorio (Aldama et al., 2024). Un ejemplo destacado es el Comité Ñukanchik Urku, donde la figura de los urkukamas o guardianes de los cerros garantiza la vigilancia y protección de las fuentes hídricas bajo el principio del randi randi (dar y dar), lo que ha permitido la eliminación del pastoreo y la definición de límites para la frontera agrícola (Aldama et al., 2024; Pérez García, 2024). Estos modelos trascienden la visión puramente utilitaria del agua al incorporar dimensiones espirituales y de identidad cultural en la preservación de los procesos hidrológicos esenciales (Andrango, 2020; Aldama et al., 2024).

8.6.2 Marco legal e institucional de la gestión comunitaria del agua

El marco legal ecuatoriano, regido por la Constitución de 2008 y la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA), prohíbe explícitamente la privatización del recurso y establece que su gestión debe ser exclusivamente pública o comunitaria (Martínez-Moscoso & Abril Ortiz, 2020; Pérez García, 2024). Bajo este marco institucional, las Juntas Administradoras de Agua Potable y Saneamiento (JAAPS) operan

como organizaciones sin fines de lucro con autonomía administrativa y financiera para prestar el servicio en áreas rurales (Pérez García, 2024). No obstante, un reto persistente en la institucionalidad hídrica es la necesidad de incorporar un enfoque de género efectivo que elimine las barreras sociales que limitan el rol protagónico de las mujeres en la toma de decisiones estratégicas de estas organizaciones (Martínez-Moscoso & Abril Ortiz, 2020).

8.6.3 Incorporación del monitoreo comunitario en la toma de decisiones

La incorporación del monitoreo ambiental participativo (MAP) en la gobernanza hídrica facilita que las decisiones locales se basen en datos que poseen alta legitimidad y relevancia para el contexto territorial (Mulbry, 2016). Este proceso permite la co-producción de "objetos frontera", tales como informes de situación o mapas de riesgos, que sirven como puentes de comunicación entre expertos técnicos y tomadores de decisiones en los Gobiernos Autónomos Descentralizados (Mulbry, 2016). Al involucrar a la ciudadanía en la verificación y síntesis de información, se fortalece la transparencia y se empodera a las comunidades para influir en los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) (Mulbry, 2016; Pérez García, 2024).

8.6.4 Colaboración entre actores locales, académicos e institucionales

La gestión efectiva del agua requiere la consolidación de redes de colaboración multiescalares que integren el conocimiento local con el rigor científico y académico (O’Ryan et al., 2025). Estas alianzas promueven un capital social de puente (bridging social capital), permitiendo que las organizaciones comunitarias accedan a recursos técnicos y conocimientos disruptivos necesarios para enfrentar desafíos complejos como la variabilidad climática (O’Ryan et al., 2025). La interacción entre instituciones gubernamentales, universidades y sociedad civil no solo mejora la calidad de los diagnósticos hídricos, sino que también democratiza la ciencia al dar un lugar equitativo a los saberes tradicionales en los procesos de decisión (Baron-Aguilar et al., 2025; O’Ryan et al., 2025).

8.6.5 Aportes al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6, 13 y 15)

La implementación de modelos de gobernanza hídrica, como los Fondos de Agua, contribuye directamente al cumplimiento de la Agenda 2030, alineándose con las metas de los ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), 13 (Acción por el clima) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres) (Pérez García, 2024). Al asegurar la disponibilidad y gestión sostenible del agua, se avanza hacia el acceso universal y la protección de ecosistemas hídricos vulnerables (Ecuador 2030, 2018; Pérez García, 2024). En relación con el ODS 13, la restauración de páramos y cuencas fortalece la resiliencia climática frente a eventos extremos como sequías, mientras que el cumplimiento del ODS 15 se materializa mediante la protección de la biodiversidad y el

control de la degradación de tierras en zonas críticas de recarga hídrica (Pérez García, 2024; Aldama et al., 2024).

9 HIPÓTESIS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

9.1 Hipótesis

9.1.1 Hipótesis alternativa (H_a)

La implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia ciudadana y ciencia abierta es viable en la comunidad Ponce Quilotoa.

9.1.2 Hipótesis nula (H_0)

La implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia ciudadana y ciencia abierta no es viable en la comunidad Ponce Quilotoa.

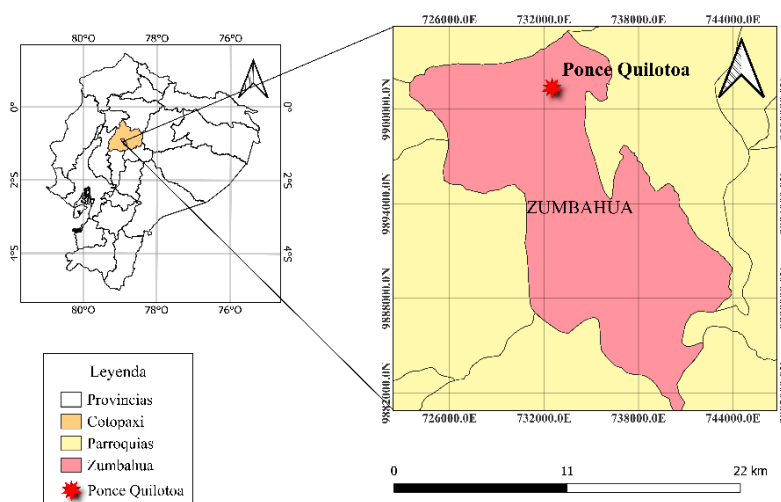
9.2 Pregunta de investigación

¿Cómo influye la implementación de un sistema de monitoreo comunitario de calidad del agua, sustentado en tecnologías de código abierto, sobre los factores PESTEL que determinan el acceso al agua segura en la comunidad Ponce Quilotoa?

10 ÁREA DE ESTUDIO

La parroquia de Zumbahua se localiza en el cantón Pujilí (Figura 1), dentro de la provincia de Cotopaxi, y presenta una altitud que varía entre los 2080 hasta 4480 msnm, mientras que Ponce Quilotoa se encuentra a 3800 msnm (Andino, 2021). El reconocimiento turístico de esta comunidad obedece a su localización cercana a la laguna de Quilotoa. El entorno geográfico presenta características propias del ecosistema de páramo, bioma que desempeña funciones hidrológicas esenciales en el suministro de agua para la región. Las coordenadas geográficas sobre ubicación de la comunidad de Ponce Quilotoa son: 733293,90; 9901615,90 WGS84 UTM 17S.

Figura 1. Ubicación de la comunidad Ponce Quilotoa



10.1 -Diseño metodológico

La presente investigación tuvo un enfoque mixto cuali-cuantitativo diseñado para integrar las dimensiones sociales y técnicas del monitoreo del agua (Kabus et al., 2025) en la comunidad de Ponce Quilotoa

El estudio se fundamenta en los principios de la ciencia ciudadana, permitiendo que los actores locales no solo actúan como recolectores de datos, sino como generadores de conocimiento sobre su propio recurso hídrico (Tulloch et al., 2013).

Para sistematizar esta información, se emplea la modelación mediante Mapas Cognitivos Difusos (FCM), una herramienta que permite traducir las percepciones cualitativas y el conocimiento local en un modelo matemático dinámico (Fonseca et al., 2022).

10.2 Enfoque cualitativo

El enfoque cualitativo de esta investigación se fundamenta en la comprensión de los fenómenos socioambientales desde la perspectiva de los actores clave en la comunidad de Ponce Quilotoa. Este método permitió capturar la subjetividad y el conocimiento empírico local para identificar los factores que inciden en la gestión del agua. A través de un análisis narrativo y documental bajo la estructura PESTEL, se recolectaron datos no numéricos que describen dimensiones políticas, económicas, sociales, tecnológicas, ecológicas y legales (Özesmi & Maurer, 2004).

10.3 Enfoque cuantitativo

El enfoque cuantitativo se aplicó mediante la formalización matemática del conocimiento a través de los Mapas Cognitivos Difusos (FCM) y la lógica difusa (Fonseca

et al., 2022). Este método permitió cuantificar las relaciones de causalidad, transformando percepciones en datos numéricos dentro de un intervalo de $[-1, 1]$, facilitando la traducción de percepciones cualitativas en un modelo matemático dinámico. El uso de este enfoque permitió realizar un análisis de centralidad mediante la teoría de grafos, calculando índices como el grado de salida (od) y de entrada (id) para identificar los nodos dominantes del sistema.

10.4 Variables de estudio

La determinación de las variables en este estudio responde a la necesidad de analizar de forma integral los factores que inciden en la gestión y calidad del agua en la comunidad de Ponce Quilotoa. Dado que los sistemas socio-ecológicos en los páramos andinos son complejos y multifacéticos, la investigación adopta un enfoque multidimensional para identificar las presiones ambientales y sociales que afectan el recurso hídrico.

- **Variable dependiente**
 - Implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en ciencia abierta y ciencia ciudadana.
 - Factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales (PESTEL) y comunitarios.
- **Variable independiente**
 - La comunidad Ponce Quilotoa.

10.5 Métodos

10.5.1 Mapas cognitivos difusos

Basado en estudios investigativos como (Fonseca et al., 2022) define a los mapas cognitivos difusos como una herramienta de modelación que permite analizar sistemas complejos mediante la representación de conceptos y las relaciones de influencia entre ellos. Este método también nos permite la modelación hipotética, mediante la inferencia difusa para analizar supuestos casos que podrían afectar al resto de factores analizados.

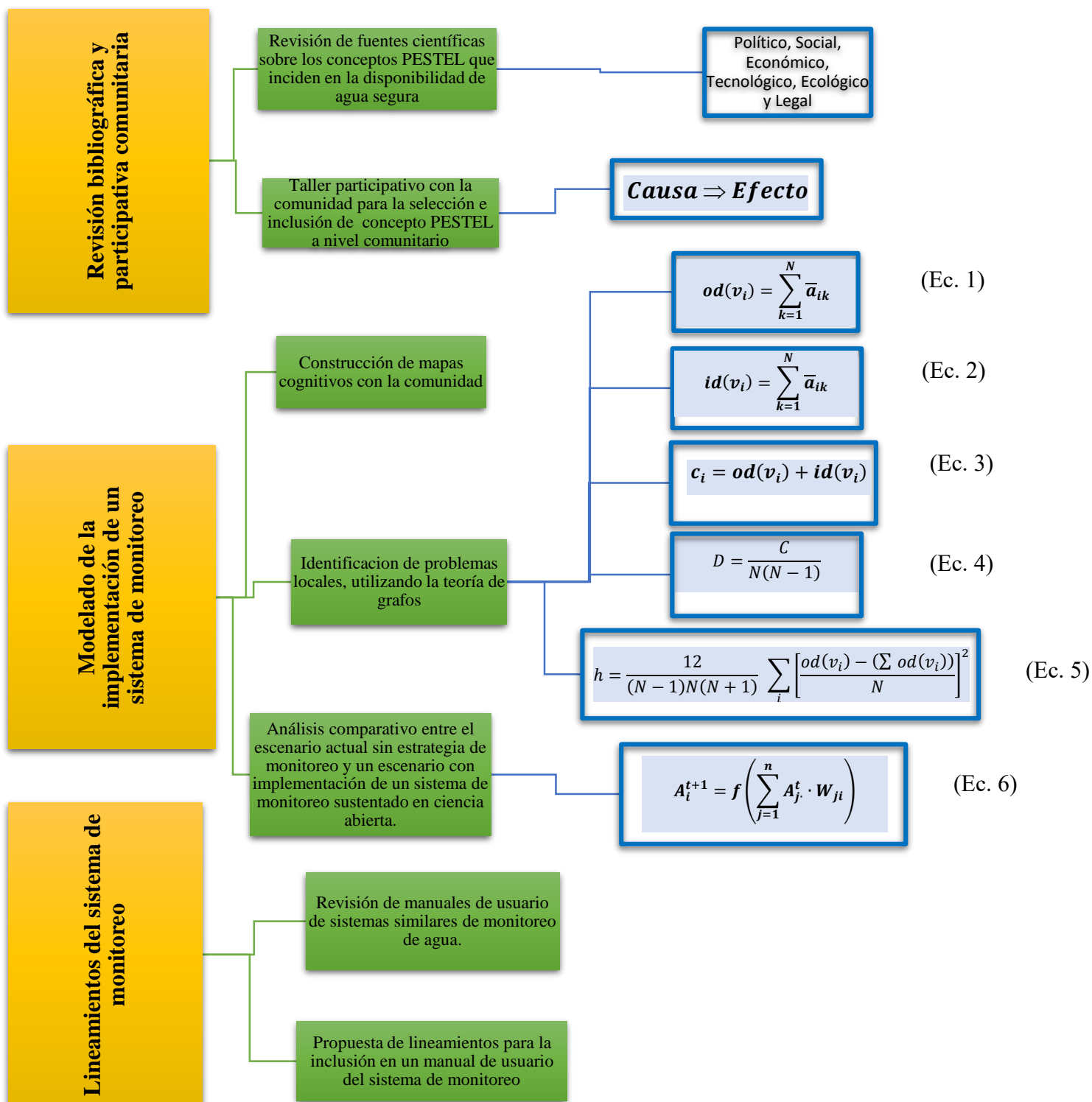
10.6 Técnicas

10.6.1 Bola de nieve

Este procedimiento es una técnica de muestreo que se basa en la referencia sucesiva de participantes para la selección de nuevos informantes, lo que facilita la identificación de sujetos con conocimiento o experiencia relevante, considerando el propósito de la investigación, se empleó la técnica de la bola de nieve.

La selección se basa en las relaciones sociales o redes de los participantes más que en un marco muestral preexistente. Identificar contextos de uso aclara la utilidad práctica de la técnica y las razones para elegirla frente a otros métodos (Kubiciel-Lodzińska, 2021).

Figura 2. Metodología



10.7 Fases de investigación

10.7.1 Revisión bibliográfica y determinación de los conceptos.

Se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura (Ghaboulian Zare et al., 2022), para identificar tanto conceptos receptores como generales asociados con los desafíos de calidad del agua a través de un marco PESTEL. Se realizaron búsquedas en múltiples bases de datos académicas, incluyendo Scopus, ScienceDirect y ResearchGate, utilizando combinaciones de palabras clave que abarcaban contaminación del agua, gestión y gobernanza del agua, Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con el agua, tecnologías de tratamiento de agua, economía del agua y grupos de interesados del agua (Fonseca et al., 2022). La revisión incluyó estudios que cumplieron criterios específicos: publicaciones en inglés para capturar investigaciones de relevancia internacional; estudios publicados entre 2000 y 2022, marcando el período cuando la gobernanza del agua surgió como un término que describe el espectro de marcos políticos, sociales, económicos y administrativos (Baumgartner & Pahl-Wostl, 2013); e investigaciones que examinan conexiones entre la calidad del agua y el marco PESTEL. La revisión de fuentes bibliográficas, con los criterios marcados produjeron 25 términos obtenidos de artículos científicos relevantes.

10.7.2 Taller participativo con la comunidad

Para incorporar la perspectiva de la comunidad de Ponce Quilotoa, se organizó un taller en diciembre de 2025, separando al total de los asistentes en 2 grupos, cada uno con 25 participantes. Este taller facilitó la discusión democrática y participativa de los conceptos. Inicialmente, cada concepto fue explicado y exhibido de manera prominente para referencia durante la construcción de FCM. Los participantes también contribuyeron con conceptos adicionales basados en sus experiencias vividas, codificados de forma que se distingan de los conceptos obtenidos bibliográficamente, estos fueron marcados con (C) para contribuciones comunitarias (Lopolito et al., 2020).

El taller se desarrolló mediante una guía metodológica participativa, para facilitar la construcción colectiva de conceptos y sus relaciones causales a partir de un consenso comunitario. Esto permitió integrar las percepciones de la comunidad y fortalecer una comprensión de la interacción es que conforman el sistema

La comunidad de Ponce Quilotoa está conformada principalmente por adultos mayores, con un nivel educativo promedio de educación primaria y con dominio limitado del idioma español, siendo el kichwa la lengua predominante (Andino, 2021). No existe experiencia previa en el uso de sistemas tecnológicos de monitoreo, lo que condiciona la forma en que los usuarios

interactúan con el prototipo (Lopolito et al., 2020). Estas características hacen necesario que el sistema sea operado de manera simple, sin requerimientos técnicos complejos.

10.7.3 Transformación conceptos complejos a simples.

Al obtener los 25 conceptos de la investigación bibliográfica, el siguiente paso a seguir es el de convertirlos a un lenguaje más adecuado para la comunidad de Ponce Quilotoa, este proceso facilita la comprensión por parte de la población ya que esta se encuentra conformada por personas que en su mayoría son de una edad ya avanzada. Para ello, los conceptos complejos fueron adaptados a expresiones cotidianas, sin alterar su significado esencial, permitiendo una interpretación adecuada durante el desarrollo de las actividades participativas. De esta manera, se promovió una comunicación efectiva y una participación de la comunidad en la identificación de las relaciones entre los conceptos estudiados.

10.7.4 Elaboración de mapa difuso

En el mismo taller donde se explicaron los conceptos y controladores a los miembros de la comunidad, se guió a los participantes a través del proceso de desarrollo de mapas cognitivos sociales. Los participantes recibieron instrucciones por parte del equipo investigador, el cual indicaba en un papelote los conceptos predeterminados (ordinarios y receptores) en orden aleatorio y se les pidió evaluar las relaciones de influencia causal entre conceptos. La evaluación utilizó flechas direccionales con la fuerza de influencia representada por stickers de colores neón (Verde, Anaranjado y Rojo) y calificada en una escala de 7 puntos desde -1 (fuertemente negativo) hasta +1 (fuertemente positivo) (Nyaki et al., 2014). Los mapas cognitivos resultantes se transformaron en matrices de adyacencia (Özesmi & Maurer, 2004) para análisis de teoría de grafos (Mourhir, 2021) utilizando el software MentalModeler (accesible en: <https://www.mentalmodeler.com>). Este software fue diseñado para examinar la estructura y función de los mapas conceptuales, utilizando análisis basados en teoría de grafos de las relaciones estructurales por pares entre los conceptos incluidos en un modelo. Estos modelos pueden utilizarse para examinar percepciones de un problema ambiental o social, o para modelar un sistema complejo donde la incertidumbre es alta y hay pocos datos empíricos disponibles (Fonseca et al., 2022).

10.7.5 Evaluación de los mapas cognitivos difusos

Los mapas cognitivos difusos (FCM) son herramientas de análisis semicuantitativas y dinámicas que utilizan una estructura de grafo para ilustrar las relaciones causales entre los conceptos que influyen en un sistema complejo (Chen & Chiu, 2021). Propuestos originalmente

por Kosko (1986), estos mapas consisten en una red de conceptos (nodos) interconectados por vínculos (aristas) que representan la dirección e intensidad de la influencia de un elemento sobre otro mediante pesos matemáticos, generalmente en un intervalo de -1 a 1 (Kosko, 1986; Solana-Gutiérrez et al., 2017). Esta metodología combina la lógica difusa con las redes neuronales para capturar el razonamiento causal y el conocimiento humano, permitiendo modelar la incertidumbre y la vaguedad inherentes a los sistemas sociales y ecológicos (Fonseca et al., 2021; Gray et al., 2015). Al funcionar como representaciones externas de modelos mentales, los FCM facilitan la toma de decisiones participativa al integrar percepciones subjetivas de expertos y miembros de la comunidad en un formato gráfico, estandarizado y transparente (Gray et al., 2015; Özesmi & Özesmi, 2004).

10.7.6 Teoría de grafos

Para analizar un mapa cognitivo el número de variables (N) y el número de conexiones (C) en el mapa pueden ser contados. Sin embargo, la teoría de grafos nos proporciona muchos más índices, además del número de variables (conceptos, enunciados) y conexiones (intersecciones, vínculos, aristas) (Özesmi & Özesmi, 2004).

En este contexto los índices de la teoría de grafos proporcionan una base matemática esencial para caracterizar la estructura de los mapas cognitivos a través de componentes clave como el grado de salida (grado de salida), que cuantifica la fuerza acumulada de las influencias que parten de un nodo. a_{ij} que salen de la variable, donde N es el número total de variables:

(Ec. 1)

$$od(v_i) = \sum_{k=1}^N \bar{a}_{ik}$$

El **indegree** (grado de entrada), que representa la suma de los pesos de las conexiones que este recibe (Chen & Chiu, 2021; Solana-Gutiérrez et al., 2017):

(Ec. 2)

$$id(v_i) = \sum_{k=1}^N \bar{a}_{ik}$$

La **centralidad** se define como la suma de estos dos valores (grado de salida y grado de entrada), reflejando la importancia o contribución total de un concepto específico dentro del flujo causal de todo el sistema (Kosko, 1986; Özesmi & Özesmi, 2004).

(Ec. 3)

$$c_i = od(v_i) + id(v_i)$$

Por otro lado, la **densidad** del mapa mide el nivel de conectividad global al dividir el número de conexiones reales entre el máximo de conexiones posibles entre los nodos (Nikas et al., 2019; Özesmi & Özesmi, 2004).

(Ec. 4)

$$D = \frac{C}{N(N-1)}$$

Otros componentes estructurales incluyen el **índice de jerarquía**, que determina si el sistema es democrático o está centralizado,

(Ec. 5)

$$h = \frac{12}{(N-1)N(N+1)} \sum_i \left[\frac{od(v_i) - (\sum od(v_i))}{N} \right]^2$$

10.7.7 Inferencia Difusa

Ya con los componentes estructurales de la teoría de grafos se procede a realizar una inferencia difusa, esta se define como un proceso de simulación dinámica que utiliza el razonamiento humano para predecir cómo se comportará un sistema complejo bajo distintas condiciones (Fonseca et al., 2021; Gray et al., 2015). A diferencia de los modelos estáticos, este mecanismo permite observar cómo las influencias causales se propagan a través de una red de conceptos interconectados, permitiendo procesar información que a menudo es vaga o incierta (Kosko, 1986; Özesmi & Özesmi, 2004). Al integrar percepciones subjetivas en un marco computacional, la inferencia actúa como un laboratorio virtual que facilita la exploración de cambios en el sistema sin necesidad de intervención física inmediata (Gray et al., 2015; Solana-Gutiérrez et al., 2017).

La base de la simulación reside en un cálculo iterativo y repetitivo, donde el valor de cada concepto se actualiza en función de la fuerza y dirección de las conexiones que recibe de otros nodos (Chen & Chiu, 2021; Kosko, 1986). Para asegurar que el sistema se mantenga estable, se aplica una función de umbral (frecuentemente la sigmoidea) que normaliza los valores en un intervalo de 0 a 1 (Ver Ecuación 6) (Fonseca et al., 2021; Solana-Gutiérrez et al., 2017). Este proceso se repite hasta que el modelo alcanza un punto de equilibrio denominado estado estacionario, el cual representa el funcionamiento natural del sistema y sirve como la referencia necesaria para evaluar cualquier perturbación futura (Gray et al., 2015; Özesmi & Özesmi, 2004).

(Ec. 6)

$$A_i^{t+1} = f \left(\sum_{j=1}^n A_j^t \cdot W_{ji} \right)$$

El análisis de escenarios utiliza este estado de equilibrio para realizar experimentos de tipo "qué pasaría si" mediante una técnica llamada clamping (sujeción), que consiste en fijar artificialmente un concepto en su valor máximo (Gray et al., 2015; Kosko, 1986). Un componente crítico es el escenario del peor caso, en el cual se selecciona el problema con mayor centralidad (el factor que más controla la dinámica del mapa) y se le asigna un valor de + 1 para observar su impacto negativo en toda la red (Fonseca et al., 2021; Solana-Gutiérrez et al., 2017). Asimismo, se pueden evaluar escenarios de solución activando los impulsores de políticas (drivers), que son variables diseñadas para enviar estímulos correctivos y mitigar los efectos de una crisis (Gray et al., 2014; Solana-Gutiérrez et al., 2017).

(Ec. 7)

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}}$$

10.7.8 *Diseño de los lineamientos del manual de usuario del sistema de monitoreo, orientados a facilitar su correcta utilización, mantenimiento y apropiación por parte de las comunidades usuarias.*

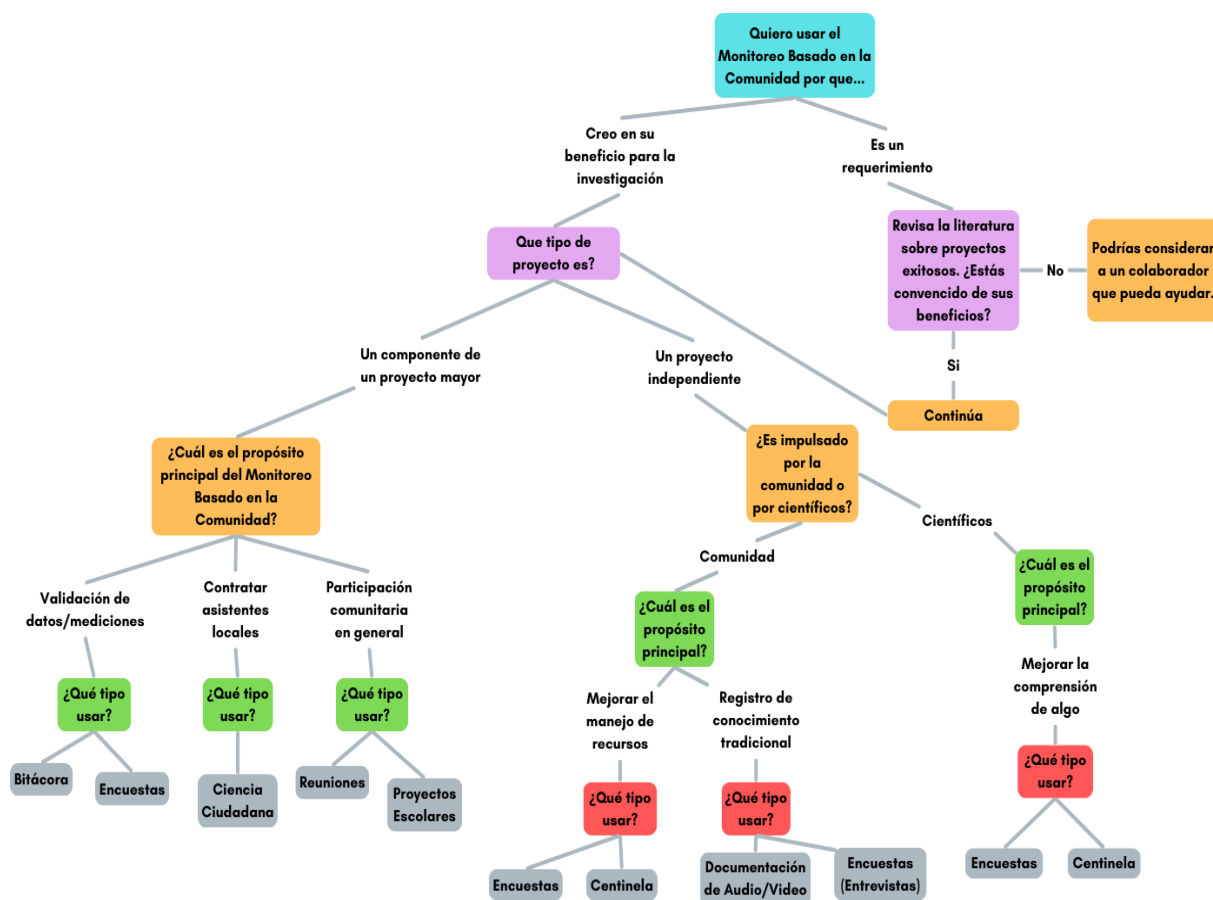
Para el diseño de los lineamientos del manual se adopta un enfoque pedagógico funcional, orientado a facilitar la comprensión y el uso del sistema por parte de usuarios con

bajo nivel de escolaridad y sin experiencia tecnológica previa (Cassidy et al., 2020). El manual prioriza instrucciones breves, lenguaje sencillo, secuencias paso a paso y apoyo visual, con el objetivo de reducir errores operativos y promover la autonomía comunitaria en el manejo del sistema.

Este enfoque permite que el manual no se centre en explicaciones técnicas complejas, sino en acciones concretas relacionadas con la instalación, el uso diario y el mantenimiento básico del prototipo (Dominguez Zúñiga, 2025). De esta forma, el documento se convierte en una herramienta práctica de apoyo a la gestión comunitaria del recurso hídrico y a la sostenibilidad del sistema de monitoreo.

Con el objetivo de profundizar en los principios del seguimiento con participación ciudadana, se implementó un recurso gráfico de apoyo. El diagrama de flujo (Figura 3) ilustra el proceso para identificar las metodologías y categorías de monitoreo social que mejor se ajustan a los requerimientos particulares de una iniciativa (Danielsen et al., 2011). Este esquema está diseñado para funcionar como una guía adaptable, resultando de gran utilidad para quienes se inician en el tema y requieren claridad ante la complejidad de factores que intervienen en el monitoreo comunitario (Danielsen et al., 2011).

Figura 3. Árbol de decisiones.



Mediante el uso del árbol de decisiones se logra identificar la metodología a seguir para la elaboración de un manual de usuario para la comunidad, entre las metodologías más relevantes se encuentran: La metodología Centinela cuyo punto fuerte se encuentra en que los datos recopilados pueden dar lugar a registros espaciales y temporales bastante precisos de múltiples indicadores, la metodología de Encuestas y Entrevistas cuyo punto fuerte reside en que este es el único tipo de monitoreo basado en la comunidad que permite a los investigadores recrear datos de periodos pasados cuando no se recolectó información y existen vacíos de conocimiento, finalmente el tipo de monitoreo más relevante, y el que se usó para este estudio es el de la metodología de Ciencia Ciudadana ya que su punto fuerte es el de crear oportunidades para involucrar a miembros de la comunidad, especialmente a jóvenes, en la ciencia, logrando que crezca el interés en la investigación y en campos relacionados a la ciencia (Danielsen et al., 2011).

10.8 Diseño estadístico

El diseño estadístico de la presente investigación se estructuró en dos componentes complementarios que acompañan la metodología de mapas cognitivos difusos (FCM): el

análisis de los índices de la teoría de grafos y la justificación del tamaño muestral. Estos componentes no pretenden reemplazar la metodología del análisis para la elaboración de los FMC antes propuesta, tiene como objeto complementar a la misma y añadirle un valor y rigor estadístico.

10.8.1 Estadística descriptiva de los índices de la teoría de grafos

Para caracterizar la estructura del mapa cognitivo difuso y fundamentar la identificación de los conceptos estratégicos, se calcularon medidas de tendencia central y dispersión sobre los tres índices de la teoría de grafos: centralidad (ci), grado de salida (od) y grado de entrada (id), considerando los 38 conceptos del sistema ($N = 38$).

Los estadísticos calculados fueron la media aritmética (\bar{x} ; $ci=29.91$, $od=12.43$, $id=14.18$), la desviación estándar (σ ; $ci=9.87$, $od=6.21$, $id=6.84$) y el rango (valor mínimo; $ci=13$, $od=0$, $id=0$, y valor máximo; $ci=54.42$, $od=25.39$, $id=30.02$) para cada índice. Una desviación estándar elevada en el índice de centralidad indica un sistema jerárquico con nodos dominantes claramente diferenciados, mientras que un valor bajo reflejaría una distribución más equitativa de la influencia entre los conceptos (Özesmi & Maurer, 2004).

10.8.2 Justificación del tamaño muestral

El número de participantes del taller ($n = 50$) fue definido con base en dos criterios complementarios: la saturación de perspectivas locales propia de la investigación participativa, y la representatividad poblacional mínima recomendada para comunidades rurales. Este enfoque estuvo inspirado en la investigación de (Wutich et al., 2024).

En estudios de mapeo cognitivo participativo, el criterio principal para definir el tamaño muestral no es la representación estadística probabilística, sino la saturación de perspectivas, es decir, el punto en el que nuevos participantes no incorporan conceptos o relaciones causales adicionales al modelo (Lopolito et al., 2020). La literatura especializada en FCM comunitarios señala que grupos de entre 15 y 30 participantes por sesión son suficientes para alcanzar dicha saturación en contextos locales homogéneos (Gray et al., 2015).

En términos de representatividad poblacional, los 50 participantes corresponden al 7.85% de los 637 beneficiarios directos del proyecto, porcentaje que supera el umbral mínimo del 5% recomendado para muestras en comunidades rurales de hasta 1000 habitantes (Kirchherr & Charles, 2018). La selección de participantes se realizó mediante muestreo bola de nieve, adecuado para identificar informantes clave con conocimiento directo sobre la gestión hídrica local (Sebele-Mpofu, 2020).

11 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

11.1 Identificación de los principales conceptos PESTEL que inciden en la disponibilidad de agua segura, a partir de la revisión bibliográfica.

Como resultado de la revisión bibliográfica se identificó diversos conceptos relevantes ligados a los componentes PESTEL (Tabla 3), estos conceptos facilitan la comprensión de elementos externos que influyen en la gestión de los recursos hídricos y la calidad del agua. Posteriormente los conceptos fueron clasificados según cada dimensión correspondiente.

Tabla 3. Conceptos PESTEL obtenidos de revisión bibliográfica

POLÍTICO		
Conceptos	ID	Fuente
Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos.	P1	(Hernández Pasichana et al., 2018)
Acceso a la información hídrica.	P2	(Paris & Marano, 2017)
Información veraz de la calidad del agua.	P3	(French, 2016)
Priorización estatal del abastecimiento seguro.	P4	(Padilla et al., 2013)
ECONÓMICO		
Conceptos	ID	Fuente
Inversión en infraestructura de potabilización.	Ec1	(Sánchez Llanos et al., 2025)
Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento.	Ec2	(Arellano et al., 2018)
Sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento.	Ec3	(Heredia et al., 2020)
Valoración económica de los servicios ambientales.	Ec4	(Becerra-Perenguez et al., 2023)
Costos de tecnologías de medición.	Ec5	(Wilches-Visbal et al., 2022)
SOCIAL		
Conceptos	ID	Fuente
Percepción del riesgo por contaminación del agua.	S1	(Caputo et al., 2022)
Alfabetización hídrica.	S2	(McCarroll & Hamann, 2020)
Participación comunitaria en la vigilancia ambiental.	S3	(Reyes-García et al., 2022)

Acceso equitativo al agua segura.	S4	(Payes & Melany, 2016)
TECNOLÓGICO		
Conceptos	ID	Fuente
Tecnologías para la detección de contaminantes.	T1	(Huntley et al., 2002)
Tecnologías para la detección de contaminantes emergentes.	T2	(Huntley et al., 2002)
Eficiencia de plantas de tratamiento.	T3	(Cassidy et al., 2020)
Confiabilidad de los sensores.	T4	(Jesus et al., 2014)
ECOLÓGICO		
Conceptos	ID	Fuente
Valoración ecológica de los servicios ambientales.	E11	(Shang et al., 2022)
Disponibilidad hídrica en fuentes naturales.	E12	(Melaku Melese, 2016)
Vulnerabilidad a eventos climáticos extremos.	E13	(Almudi & Sinclair, 2022)
Presencia de contaminantes antropogénicos.	E14	(Râpă et al., 2023)
Presencia de contaminantes naturales.	E15	(Espósito et al., 2011)
LEGAL		
Conceptos	ID	Fuente
Cumplimiento normativo de la calidad del agua.	L1	(Ćosić-Flajsig & Karleuša, 2014)
Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua.	L2	(Byleveld et al., 2008)
Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad.	L3	(Granada & Muñoz, 2015)

Nota: Se identifica las fuentes de donde se obtuvo cada concepto.

11.2 Resultados de la transformación de conceptos complejos a simples

Los resultados del trabajo participativo realizado en la comunidad de Ponce Quilotoa permitieron identificar los principales conceptos asociados al agua segura, los cuales fueron organizados en seis dimensiones: político (P), económico (Ec), social (S), tecnológico (T), ecológica (Ecol) y legal (L) (ver Figura 4). Esta organización evidencia que los conceptos clave fueron comprendidos con facilidad por los miembros de la comunidad, lo que facilitó su participación en el proceso. Esto coincide con lo señalado por Pahl-Wostl et al., (2012), quienes destacan que la gestión sostenible del agua requiere un enfoque multidimensional acompañado de conceptos claros y comprensibles para los actores locales.

Figura 4. Conceptos simples

Agua segura para la comunidad:					
P	Ec	S	T	Ecol	L
P1. Pensar a futuro	Ec1. Gastar en mejorar	S1. Creer en el agua	T1. Herramientas para ver contaminación	El 1. Valor económico de la naturaleza	L1. Reglas claras
P2. Registro del agua	Ec2. Costo del agua limpia	S2. Conocer el agua	T2. Herramientas para ver contaminación oculta	El 2. Agua total	L2. La ley vigila agua segura
P3. Saber la verdad	Ec3. Que el agua nunca falte	S3. Cuidado del agua	T3. Agua que funciona	El 3. Riesgos del clima	L3. Daño causado, daño pagado
P4. Prioridad, agua limpia	Ec4. Valor económico de la naturaleza	S4. Agua para todos	T4. Confianza en la <u>maquina</u>	El 4. Nuestra contaminación	
	Ec5. Vigilar el agua			El 5. Contaminación natural	

11.3 Conceptos de la comunidad

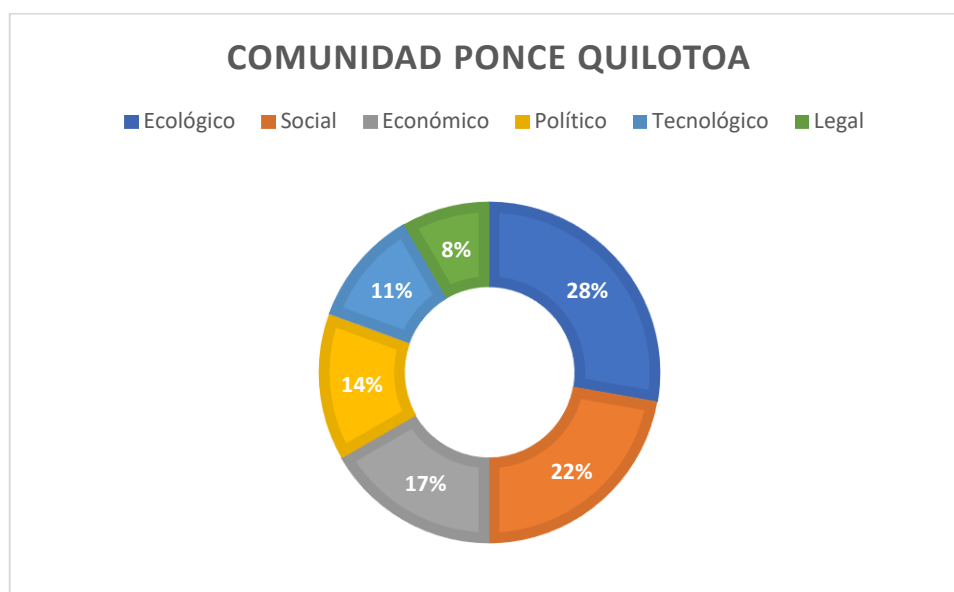
A través de un taller participativo realizado con miembros de la comunidad se identificaron conceptos mediante la elaboración manual de un mapa cognitivo difuso, con el uso de materiales didácticos como papelotes y stickers de colores que nos ayudaron a evidenciar las experiencias vividas por los habitantes en relación con la gestión y disponibilidad de los recursos hídricos. Este proceso permitió capturar la realidad local de quienes experimentan las consecuencias de la crisis del agua en su territorio.

11.4 Identificación de los principales conceptos PESTEL que afectan la disponibilidad de agua segura en la comunidad de Ponce Quilotoa

Mediante la elaboración de talleres y charlas hacia la comunidad de Ponce Quilotoa, se explicó la definición de los conceptos PESTEL ya establecidos bibliográficamente, esto para lograr que la comunidad pueda incorporar, mediante su propia experiencia, los conceptos que ellos consideren como afectación a la disponibilidad de agua segura en su comunidad.

Los conceptos fueron clasificados según las dimensiones del análisis PESTEL y codificados con la letra (C) para identificar su procedencia comunitaria (ver Tabla 4). La comunidad aportó 11 conceptos adicionales, alcanzando un total 36 conceptos relacionados con los conceptos políticos 13.89 %, económico 16.67%, social 22.22%, tecnológico 11.11%, ecológico 27.78% y legal 8.33% (ver Figura 6).

Figura 5. Gráfico de pastel sobre el porcentaje de conceptos PESTEL



11.5 Diseño de un sistema de monitoreo participativo utilizando tecnologías de código abierto, adaptadas al contexto PESTEL de la comunidad.

Dentro de las etapas de la implementación de un sistema participativo de monitoreo de la calidad del agua, se utilizaron mapas cognitivos difusos como herramienta de análisis y apoyo a la toma de decisiones, ya que los resultados obtenidos constituyen un insumo fundamental para la definición, diseño y viabilidad del sistema de monitoreo. El análisis mediante FCM permitió identificar relaciones clave y posibles efectos de la implementación, información sin la cual no sería posible estructurar adecuadamente el sistema en el contexto PESTEL de la comunidad.

11.5.1 Teoría de grafos

. En esta etapa se aplicaron principios de la teoría de grafos con el fin de analizar la estructura del sistema y las relaciones de influencia entre los conceptos PESTEL que influyen en la calidad del agua.

Partiendo de este análisis se calcularon los índices de centralidad, incluidos los índices de grado de entrada y de salida, los que permiten identificar los conceptos con mayor influencia dentro del sistema. Estos resultados proporcionan una base para la priorizar las variables estratégicas, lo que permite estructurar el diseño de un sistema de monitoreo que aborde los requerimientos específicos de la comunidad.

Tabla 4. Conceptos identificados

POLITICO						
Componente	Grado de entrada	Grado de salida	Centralidad	Tipo		
P1. Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos	29.03	25.39	54.42	Ordinario		
P2. Acceso a información hídrica	20.02	22.03	42.05	Ordinario		
P3. Información veraz de la calidad del agua	11.34	22.70	34.04	Ordinario		
P4. Priorización estatal del abastecimiento seguro	12.03	21.38	33.41	Ordinario		
PC1. Ausencia política	10.36	9.68	20.04	Ordinario		
SOCIAL						
S1. Percepción del riesgo por contaminación del agua	17.37	16.69	34.06	Ordinario		
S2. Alfabetización hídrica	10.34	14.32	24.66	Ordinario		
S3. Participación comunitaria en la vigilancia ambiental	12.01	18.34	30.35	Ordinario		
S4. Acceso equitativo al agua segura	12.36	23.03	35.39	Ordinario		
SC1. Impacto a la preparación de alimentos	17.04	15.02	32.06	Ordinario		
SC 2. Madrugar a coger agua	9.69	7.66	17.35	Ordinario		
SC3. Hombres y niños caminan lejos por agua	17.05	9.33	26.38	Ordinario		
SC 4. Migración	2.66	15.35	18.00	Ordinario		
ECONOMICO						
Ec1. Inversión en infraestructura de potabilización	11.36	23.68	35.04	Ordinario		

Ec2. Costos de operación y mantenimiento de plantas de tratamiento	8.35	20.36	28.71	Ordinario
Ec3. Sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento	13.02	20.72	33.74	Ordinario
Ec4. Valoración económica de los servicios ambientales	7.00	13.68	20.68	Ordinario
Ec5. Costos de tecnologías de medición	9.68	14.02	23.70	Ordinario
EcC 1. Perdida de Cultivos	4.66	8.34	13	Ordinario
ECOLOGICO				
EI1. Valoración ecológica de los servicios ambientales	9.01	14.01	23.02	Ordinario
EI2. Disponibilidad hídrica en fuentes naturales	14.68	9.34	24.02	Ordinario
EI3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremos	28.38	0	28.38	Receptores
EI4. Presencia de contaminantes antropogénicos	30.02	8.01	38.03	Ordinario
EI5. Presencia de contaminantes naturales	24.02	0	24.02	Receptores
EIC1. Dependencia del agua lluvia	19.34	10.02	29.36	Ordinario
EIC2. Escasez de agua para los animales	16.34	7.66	24.00	Ordinario
EIC3. Dependencia del agua de pozo	21.02	13.69	34.71	Ordinario
EIC4. Agua sucia	24.69	12.35	37.04	Ordinario
EIC5. Erosión del suelo	19.37	0	19.37	Receptores
TECNOLOGICO				
T1. Tecnologías para detección de contaminantes	12.01	14.04	26.05	Ordinario
T2. Tecnologías para detección de contaminantes emergentes	11.02	11.70	22.72	Ordinario

T3. Eficiencia de plantas de tratamiento	8.01	16.69	24.70	Ordinario
T4. Confiabilidad de los sensores	11.35	10.33	21.68	Ordinario
LEGAL				
L1. Cumplimiento normativo de calidad de agua	19.68	25.34	45.02	Ordinario
L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua	12.34	22.03	34.37	Ordinario
L3. Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad	24.34	17.67	42.01	Ordinario
D1. Implementación de un sistema de monitoreo de la calidad del agua	0	16.03	16.03	Impulsor de política
D2. Mantenimiento de las bombas de agua	0	10.36	10.36	Impulsor de política

Nota: Se resaltan en negrita el concepto con mayor centralidad, así como los mayores valores de grado de entrada y grado de salida.

Los resultados muestran a P1 “Gestión Deficiente y Fragmentada de los recursos hídricos” como el concepto más influyente dentro del sistema, con una centralidad de ($ci = 54.42$). Este hallazgo confirma que la gestión del recurso hídrico ocupa una posición estructural clave donde el cual condiciona el comportamiento de otras variables del sistema. Según Borgatti et al. (2022), los nodos con alta centralidad concentran una mayor capacidad de influencia, ya que su ubicación dentro de la red les permite incidir de manera significativa en la dinámica global del sistema.

Cabe destacar que P1 “Gestión Deficiente y Fragmentada de los recursos hídricos” además de presentar la mayor centralidad del sistema registra también el mayor grado de salida ($od = 25.39$). Este resultado confirma que las deficiencias en la gestión de los recursos hídricos generan efectos directos sobre múltiples componentes del sistema. Según Bendahman & Lotfi, (2024), los nodos con alto grado de salida ocupan posiciones estratégicas en redes dirigidas, ya que concentran la capacidad de propagar influencias y generar cambios en la estructura y el comportamiento del sistema. En este sentido, el elevado grado de salida de P1 consolida su importancia como un concepto determinante en la configuración del sistema.

Número de conceptos receptores	3
Número de conceptos ordinarios	33
Número de conceptos impulsores (drivers)	2
Densidad (D)	0.53
Promedio de conexiones por concepto	19.71

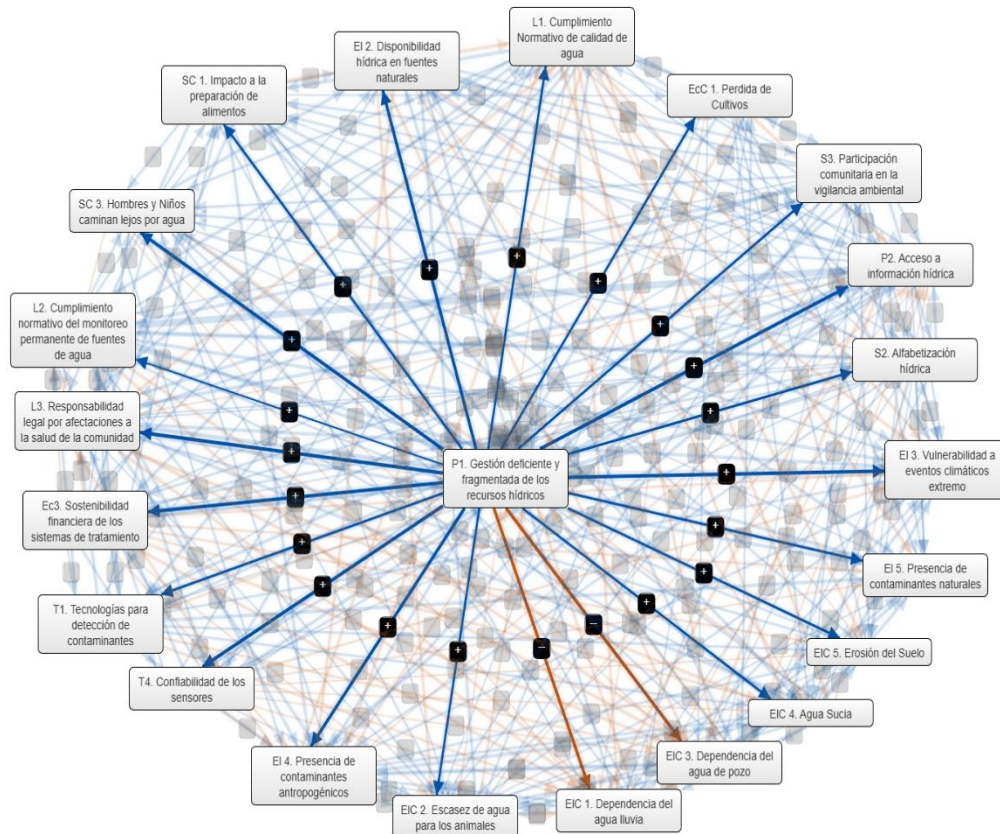
11.5.2 Análisis del mapa cognitivo difuso

El cálculo del índice de jerarquía según (Özesmi y Özesmi, 2004) reveló que el mapa presenta una estructura moderadamente jerárquica, evidenciada por la marcada diferencia entre la centralidad del concepto dominante y el promedio del sistema. Esta configuración indica que la Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos actúa como nodo central que coordina y conecta las demás dimensiones del sistema (ver Figura 8). La naturaleza jerárquica del mapa sugiere que las intervenciones enfocadas en este concepto tienden a generar efectos cascada significativos, esto también implica una vulnerabilidad estructural donde el debilitamiento de la gestión integral desarticula múltiples componentes simultáneamente.

La Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos emerge como el concepto de mayor centralidad, confirmando que actúa como núcleo articulador del sistema socio-ecológico de Ponce Quilotoa. Esta posición dominante significa que este concepto no solo envía influencias hacia múltiples factores, sino que también recibe retroalimentación de diversos elementos del sistema, funcionando como un canal bidireccional crítico.

Desde la perspectiva de la implementación, la centralidad obtenida del concepto: La Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos, establece que la sostenibilidad del sistema de monitoreo depende de su integración en estructuras de gobernanza local como las Juntas Administradoras de Agua Potable y su reconocimiento en instrumentos de planificación territorial. Esta identificación es relevante para el enfoque del sistema de monitoreo, ya que denota la falta de independencia de las comunidades locales.

Figura 7. Mapa cognitivo difuso



11.6 Inferencia Difusa

11.6.1 Análisis de escenarios: escenario de peor caso (worst-case scenario).

En esta sección se puede evidenciar el escenario de peor caso el cual se lo obtuvo mediante la matriz de FCMapper, en este escenario se presenta una situación crítica por la intensificación del concepto P1. Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos, considerado como el nodo motor del sistema. Desde esta condición se evalúa los cambios que sucedieron en el resto de los conceptos presentes en el sistema identificando tanto como incrementos como disminuciones en su comportamiento, estos están resumidos en la tabla 6.

Resultados similares han sido reportados por Jetter & Kok (2014), quienes observaron que la activación de variables impulsoras en mapas cognitivos difusos produce respuestas sistémicas amplificadas, especialmente en contextos de gestión de recursos. De igual forma, Karatzinis & Boutalis (2025), documentaron que escenarios extremos asociados a fallas de gestión tienden a provocar incrementos y disminuciones simultáneas en múltiples variables, reflejando estados críticos del sistema.

Tabla 6. Escenario del peor caso

		% de conceptos cambiados	
Escenario 1		94,59 %	
Cambios Positivos	Fuerza (positiva)	Cambios negativos	Fuerza (Negativa)
		P2. Acceso a información hídrica	
PC1. Ausencia política	4		
Ec2. Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento	4	P3. Información veraz de la calidad del agua	-4
Ec5. Costos de tecnologías de medición	4	P4. Priorización estatal del abastecimiento seguro	-4
EcC 1. Perdida de Cultivos	4	Ec1. Inversión en infraestructura de potabilización	-4
SC 1. Impacto a la preparación de alimentos	4	Ec3. Sostenibilidad financiera de los sistemas de tratamiento	-4
SC 2. Madrugar a coger agua	4	Ec4. Valoración económica de los servicios ambientales	-4
SC 3. Hombres y Niños caminan lejos por agua	4	S1. Percepción del riesgo por contaminación del agua	-4
SC 4. Migración	4	S2. Alfabetización hídrica	-4
El 3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremo	4	S3. Participación comunitaria en la vigilancia ambiental	-4
El 5. Presencia de contaminantes naturales	4	S4. Acceso equitativo al agua segura	-4
EIC 1. Dependencia del agua de lluvia	4	T1. Tecnologías para detección de contaminantes	-4
EIC 2. Escasez de agua para los animales	4	T2. Tecnologías para detección de contaminantes emergentes	-4
EIC 3. Dependencia del agua de pozo	4	T3. Eficiencia de plantas de tratamiento	-4
EIC 4. Agua Sucia	4	T4. Confiabilidad de los sensores	-4
EIC 5. Erosión del Suelo	4	El 1. Valoración ecológica de los servicios ambientales	-4
		El 2. Disponibilidad hídrica en fuentes naturales	-4
		L1. Cumplimiento Normativo de calidad de agua	-4

L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua	-4
L3. Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad	-4

Los resultados del escenario del peor caso se evidencian que la intensificación del concepto P1. Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos genera el aumento de (PC1. Ausencia política) y también aumenta los costos coligados al sistema, siendo estos (Ec2. Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento) como también los gastos vinculados con (Ec5. Costos de tecnologías de medición) junto con impactos en las actividades productivas de la comunidad (EcC 1. Perdida de Cultivos). En la dimensión social, por su parte, se intensifican los efectos asociados al acceso al agua que se evidencia en SC1 (Impacto a la preparación de alimentos), SC 2 (Madrugar a coger agua) SC 3 (Hombres y Niños caminan lejos por agua) SC 4 (Migración). De igual manera se registran incrementos en factores climáticos como (El 3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremo) y ambientales (El 5. Presencia de contaminantes naturales). Asimismo, se observan cambios, generando condiciones críticas como (EIC1) la dependencia del agua lluvia, (EIC2) la escasez de agua para animales, (EIC3) la dependencia del agua de pozo, (EIC4) la disponibilidad de agua sucia y (EIC5) la erosión del suelo.

Por el contrario, se evidencia disminuciones variables vinculadas a capacidades de gestión, soporte y sostenibilidad del sistema, en donde se ve afectado (P2) Acceso a la información hídrica. De igual manera, se evidencian disminuciones en la inversión en procesos de potabilización (Ec1), en la sostenibilidad financiera del sistema (Ec3) y en la valoración económica y ecológica de los servicios ambientales (Ec4). A ello se suma la reducción de factores sociales facilitadores como la percepción del riesgo por contaminación del agua (S1), la alfabetización hídrica (S2), la participación comunitaria en la vigilancia ambiental (S3) y el acceso equitativo al agua segura (S4), junto con una disminución en el desempeño de las tecnologías de monitoreo (T1) en el cumplimiento de las regulaciones referidas a la calidad del agua, (L1) Cumplimiento Normativo de calidad de agua, (L2) Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua y (L3) Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad (ver Tabla 6).

11.6.2 Análisis del mejor escenario: Implementación de un sistema de monitoreo de calidad de agua participativo con la comunidad.

En primera instancia, el prototipo para el sistema de monitoreo de la calidad del agua es un sistema tecnológico integrado diseñado para la monitorización automatizada de la calidad del agua mediante el uso de hardware de código abierto. Su estructura principal se basa en un microcontrolador ESP32, el cual procesa señales captadas por una red de sensores especializados en la medición de parámetros fisicoquímicos como el pH, la conductividad eléctrica, la turbidez, la temperatura y el caudal. Los datos recolectados son gestionados a través de un ecosistema digital que permite la visualización en tiempo real mediante una pantalla LCD física, una plataforma IoT (Blynk) y el almacenamiento seguro de la información tanto en la nube como en dispositivos físicos (tarjetas Micro SD) para su posterior análisis técnico.

Durante el desarrollo del proyecto, se llevó a cabo una fecha de socialización en la comunidad de Ponce Quilotoa con el propósito de presentar formalmente el prototipo ante los actores locales. En este espacio, se expusieron las capacidades técnicas del dispositivo para el monitoreo de parámetros hídricos, permitiendo que la comunidad conociera de primera mano el funcionamiento de los sensores y la interfaz de visualización de datos.

Posteriormente, al evaluar los datos obtenidos supimos que los resultados de la inferencia difusa revelan que la implementación de un sistema de monitoreo hídrico ejerce una influencia transformadora casi absoluta sobre el modelo, alcanzando un nivel de afectación del 95% sobre el total de las variables. Este elevado alcance sugiere que la presencia de datos técnicos no opera de forma aislada, sino que funciona como un eje central que altera la configuración de todas las dimensiones del sistema, desde la infraestructura hasta la convivencia social, en comparación, (Sharma et al., 2025) desarrollaron un sistema inteligente de bajo costo utilizando el microcontrolador ESP32 y aprendizaje automático en el dispositivo (TinyML) para monitorear en tiempo real parámetros como el pH, sólidos disueltos totales (TDS), temperatura y turbidez; Este estudio concluyó que la implementación de su sistema inteligente de bajo costo fue exitosa, logrando un equilibrio óptimo entre rendimiento, conectividad y asequibilidad. Además, se identifica que diversas variables estratégicas, tales como la eficiencia de las plantas de tratamiento y el cumplimiento de las normas de calidad, experimentan un desplazamiento hacia valores positivos (ver Anexo VI). En estos puntos, la interacción alcanza niveles de estabilidad donde la fuerza ejercida se percibe como leve debido a que el sistema ha logrado integrar plenamente los nuevos estándares técnicos, eliminando las

fricciones operativas que existían anteriormente. Asimismo, este equilibrio permite que factores como la alfabetización hídrica y la transparencia informativa se consoliden como pilares del entorno, fundamentando la toma de decisiones en certezas técnicas y no en suposiciones.

Por otro lado, el análisis de las fuerzas negativas arroja resultados sumamente favorables para la estabilidad de la comunidad afectada. Se evidencia una reducción drástica en indicadores de vulnerabilidad crítica, tales como la migración forzada, la necesidad de madrugar para recolectar agua y las largas caminatas en busca del recurso (ver tabla 7). En este sentido, la consolidación de una red de suministro monitoreada desplaza la dependencia hacia fuentes de agua alternativas e inseguras, logrando que la reducción de estos problemas sociales sea una consecuencia directa de la confiabilidad técnica del sistema. Es necesario destacar cómo este escenario logra resolver la paradoja de la gestión deficiente y fragmentada que solía dominar el servicio hídrico, así como describe (Martínez-Moscoso & Abril Ortiz, 2020) en su estudio donde menciona que: La experiencia muestra que existe una falsa creencia de que las comunidades son un todo integrado. No obstante, las mismas se caracterizan por presentar en su interior arraigadas jerarquías e inequidades, por lo que, si no se consideran estas realidades, los procesos de participación llegarían incluso a reforzar los patrones de inequidad. A pesar de que este factor representaba un obstáculo mayor, su ubicación en el espectro negativo de los resultados confirma que el desorden administrativo es neutralizado por la rigurosidad que impone el flujo de datos en tiempo real. En conclusión, la implementación tecnológica no solo añade herramientas de medición, sino que reestructura la gobernanza del agua al sustituir la desorganización por un esquema de trabajo coordinado, coherente y basado en evidencia verificable.

Tabla 7. *Escenario del mejor caso: Implementación de un sistema de monitoreo*

	% de conceptos cambiado	
Escenario 2 (D1)	95%	
Cambios positivos	Fuerza (pos)	Cambios Negativos Fuerza (neg)

P2. Acceso a información hídrica	4	Ec2. Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos	4
Ec2. Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos	4	P2. Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento	4
Ec4. Valoración económica de los servicios ambientales	4	EcC 1. Perdida de Cultivos	4
P3. Información veraz de la calidad del agua	4	S1. Percepción del riesgo por contaminación del agua	4
S2. Alfabetización hídrica	4	EIC 5. Erosión del Suelo	4
S3. Participación comunitaria en la vigilancia ambiental	4	SC 2. Madrugar a coger agua	4
El 1. Valoración ecológica de los servicios ambientales	4	SC 3. Hombres y Niños caminan lejos por agua	4
El 2. Disponibilidad hídrica en fuentes naturales	4	SC 4. Migración	4
SC 1. Impacto a la preparación de alimentos	4	L3. Responsabilidad legal por afectaciones a la salud de la comunidad	4
El 3. Vulnerabilidad a eventos climáticos extremo	4	EIC 1. Dependencia del agua de lluvia	3
El 4. Presencia de contaminantes antropogénicos	4	EIC 3. Dependencia del agua de pozo	2
El 5. Presencia de contaminantes naturales	4		
T1. Tecnologías para detección de contaminantes	4		
T2. Tecnologías para detección de contaminantes emergentes	4		

L1. Cumplimiento Normativo de calidad de agua	4
L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua	4
T3. Eficiencia de plantas de tratamiento	4
S4. Acceso equitativo al agua segura	4
T4. Confiabilidad de los sensores	4

11.6.3 Análisis del mejor escenario: Mantenimiento de las bombas de agua.

La simulación del escenario de mantenimiento de las bombas de agua muestra que trece conceptos experimentan efectos positivos mientras que nueve registran efectos negativos. Los conceptos con mayor impacto positivo son S3 (Participación comunitaria en la vigilancia ambiental), T4 (Confiabilidad de los sensores), T3 (Eficiencia de plantas de tratamiento) y L2 (Cumplimiento normativo del monitoreo permanente). Estos resultados indican que el mantenimiento adecuado de las bombas mejora la confianza de la comunidad en las soluciones técnicas y fortalece su capacidad de participación en actividades de vigilancia ambiental.

Los conceptos con mayor impacto negativo incluyen P1 (Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos), Ec2n (Costos de operación y mantenimiento), P3 (Información veraz de la calidad del agua) y EIC3 (Dependencia del agua de pozo). El efecto negativo sobre P1 indica que el mantenimiento de bombas, siendo una solución puntual, no aborda los componentes más amplios de la gestión integral. El impacto negativo en Ec2n refleja los costos directos que implica mantener la infraestructura operativa. Las reducciones en EIC1, EIC2 y EIC3 representan cambios positivos, ya que la comunidad reduce su dependencia de fuentes alternativas cuando el sistema de bombeo opera confiablemente (ver tabla 8 y Anexo VII).

Tabla 8. Escenario del mejor caso: Mantenimiento de las bombas de agua

		% de conceptos cambiado	
Escenario 3 (D2)		95%	
Cambios positivos	Fuerza (pos)	Cambios Negativos	Fuerza (neg)
P2. Acceso a información hídrica	3	P1. Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos	4
Ec2. Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos	2	Ec2. Costos de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento	4
El 1. Valoración ecológica de los servicios ambientales	2	P3. Información veraz de la calidad del agua	4
L2. Cumplimiento normativo del monitoreo permanente de fuentes de agua	4	EcC 1. Pérdida de Cultivos	3
T1. Tecnologías para detección de contaminantes	2	S1. Percepción del riesgo por contaminación del agua	2
T2. Tecnologías para detección de contaminantes emergentes	2	SC 2. Madrugar a coger agua	2
T3. Eficiencia de plantas de tratamiento	2	EIC 2. Escasez de agua para los animales	4
T4. Confiabilidad de los sensores	2	EIC 1. Dependencia del agua de lluvia	4
S3. Participación comunitaria en la vigilancia ambiental	4	EIC 3. Dependencia del agua de pozo	4

11.7 Lineamientos para la elaboración de un manual de usuario del sistema de monitoreo de la calidad del agua.

1. Propósito del manual

El manual debe orientar a la comunidad en la instalación, uso y mantenimiento básico del sistema de monitoreo, garantizando su funcionamiento continuo, seguro y autónomo. El contenido debe enfocarse en tareas prácticas, sin incluir explicaciones técnicas complejas.

2. Perfil del usuario

El manual debe estar dirigido a adultos, niños y adultos mayores, con nivel educativo primario, dominio limitado del español y sin experiencia previa en tecnología. El lenguaje debe ser sencillo, directo y acompañado de apoyo visual.

3. Lenguaje y comunicación

El manual debe usar frases cortas, vocabulario cotidiano y evitar términos técnicos. Cada instrucción debe describir una sola acción. Se debe priorizar el uso de imágenes, diagramas y ejemplos visuales para reforzar la comprensión.

4. Organización del contenido

El manual de usuario debe estructurarse mediante una lógica secuencial y pedagógica que facilite la comprensión integral del sistema de monitoreo. Esta organización debe iniciar con una introducción clara que explique el propósito de la tecnología de ciencia abierta, seguida de guías específicas para la instalación física en el cuerpo hídrico, los procedimientos de operación diaria y los protocolos de mantenimiento preventivo mensual. También, es imperativo incluir secciones dedicadas exclusivamente a la seguridad del operador y a la organización comunitaria, asegurando que el contenido sea accesible tanto en términos técnicos como lingüísticos para los habitantes de Ponce Quilotoa.

5. Lineamientos para la instalación

La sección de instalación en el manual debe proporcionar directrices precisas sobre la selección del sitio idóneo en el río, priorizando zonas de flujo estable que no pongan en riesgo la integridad estructural del equipo. Se debe detallar el procedimiento técnico para fijar el sistema de forma segura, utilizando materiales resistentes a la corrosión y herramientas básicas de fácil acceso para la comunidad. Además, este apartado debe integrar advertencias críticas sobre la seguridad personal durante el montaje y el uso de imágenes paso a paso que actúen

como apoyo visual, reduciendo la dependencia del texto escrito y facilitando la transferencia tecnológica.

6. Lineamientos para el uso

Para garantizar la operatividad del sistema, el manual debe instruir de manera sencilla sobre el encendido y la verificación del estado funcional de los sensores. Es fundamental incluir una guía de interpretación de los valores técnicos recolectados, tales como el pH, la conductividad eléctrica, la turbidez, el caudal y la temperatura, relacionándolos con estados de calidad del agua comprensibles para el usuario. Se debe fomentar la cultura del dato mediante el registro manual en cuadernos de campo, recomendando una frecuencia de revisión diaria que se ajuste a las dinámicas y disponibilidad de los miembros de la comunidad encargados.

7. Lineamientos para el mantenimiento

El manual debe establecer un protocolo riguroso de mantenimiento mensual para prolongar la vida útil de los sensores y la unidad de procesamiento ESP32. Este apartado debe describir los procedimientos de limpieza específicos para cada componente, indicando qué materiales de limpieza son seguros y cuáles podrían dañar la sensibilidad de los equipos. Además, se deben listar las señales visuales y técnicas que indican un mal funcionamiento, estableciendo un flujo de comunicación claro para reportar fallas técnicas a los responsables comunitarios o a expertos externos de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

8. Lineamientos de seguridad

La integridad física de los comuneros es prioritaria, por lo que el manual debe incorporar advertencias explícitas sobre los riesgos inherentes al trabajo en las riberas del río, especialmente durante épocas de alta pluviosidad. Se debe recomendar obligatoriamente el uso de calzado con tracción adecuada y la ejecución de tareas en grupos de al menos dos personas para asistencia mutua. Finalmente, el documento debe prohibir la manipulación de los circuitos internos por personal no capacitado y dictar las acciones inmediatas a seguir en situaciones de emergencia, tales como daños estructurales, caídas accidentales o pérdida del equipo por crecidas del río.

9. Lineamientos para la organización comunitaria

Este apartado se enfoca en la sostenibilidad social del proyecto, proporcionando las bases para la conformación de un comité comunitario del agua. El manual debe definir roles claros y rotativos, como el responsable del cuidado físico del equipo, el encargado del registro de datos y el gestor de mantenimiento, evitando la sobrecarga de tareas en una sola persona. Esta estructura organizativa busca fortalecer la gobernanza local del recurso hídrico,

estableciendo además un calendario de reuniones periódicas donde la comunidad pueda revisar los resultados del monitoreo y tomar decisiones colectivas basadas en la información generada.

10. Lineamientos para la validación del manual

Para asegurar la efectividad del instrumento, el manual debe someterse a un proceso de validación en campo antes de su versión definitiva. Esto implica realizar pruebas de lectura y ejecución de tareas con miembros representativos de la comunidad de Ponce Quilotoa para identificar barreras de lenguaje o dificultades de comprensión técnica. Los ajustes derivados de esta etapa de prueba son esenciales para corregir ambigüedades, garantizando que el documento final sea una herramienta valiosa validada tanto por los líderes comunitarios como por los responsables técnicos del sistema.

11.8 Guía para la ejecución del taller

Se elaboraron los siguientes pasos para el desarrollo del taller participativo (ver Anexo VIII) donde se explicaron los conceptos simples que representan a cada uno de los conceptos PESTEL obtenidos con anterioridad mediante la revisión bibliográfica, permitiendo explicar de manera clara y simple a los participantes cada uno de los conceptos y puedan establecer las conexiones sea positiva o negativa según su percepción y experiencia, para continuar con su evaluación de fuerza, esto se decide en consenso rápido y sin debatir demasiado.

11.9 Respuesta a la pregunta de investigación

¿Cómo influye la implementación de un sistema de monitoreo comunitario de calidad del agua, sustentado en tecnologías de código abierto, sobre los factores PESTEL que determinan el acceso al agua segura en la comunidad Ponce Quilotoa?

La implementación de un sistema comunitario de monitoreo de agua basado en código abierto influye de manera que genera impactos multidimensionales que abordan las barreras históricas de acceso al agua potable en Ponce Quilotoa. Desde una perspectiva económica y tecnológica, el uso de arquitecturas de software de bajo costo reconfigura el paradigma de asignación de recursos, transformando la infraestructura técnica de una limitación financiera en un mecanismo de sostenibilidad. Esta democratización tecnológica permite una gestión autónoma a nivel comunitario, reduciendo los gastos operativos a largo plazo y eliminando la dependencia de financiamientos externos.

En las dimensiones políticas y sociales, el libre acceso a datos hidrológicos fortalece la gobernanza local al dotar a la Junta de Agua de legitimidad técnica para la toma de decisiones basadas en evidencia. Este cambio en la dinámica del poder permite que los actores comunitarios ejerzan una agencia informada sobre la protección de sus cuencas. En los ámbitos

ecológicos y legal, el sistema establece una capacidad de vigilancia continua que facilita la detección en tiempo real de contaminantes, como bacterias coliformes o impactos por actividades de pastoreo, asegurando el cumplimiento de las normativas de salud pública y los estándares de calidad del agua.

11.10 Comprobación de hipótesis

La validación de las hipótesis de investigación, sustentada en el modelado dinámico mediante Mapas Cognitivos Difusos (FCM) y procesos de inferencia difusa, permite aceptar la hipótesis alternativa (H_a) al confirmar que la implementación del sistema de monitoreo de calidad del agua es altamente viable en la comunidad de Ponce Quilotoa. El análisis de centralidad identificó que la variable "Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos" posee el mayor peso sistémico con un índice de 54.42, actuando como el nodo crítico que el sistema propuesto logra mitigar al integrar el saber local de 11 conceptos empíricos con 25 parámetros técnicos bibliográficos.

Los resultados de los escenarios hipotéticos demuestran que el uso de tecnologías de ciencia abierta y bajo costo genera una influencia transformadora positiva en el 95% de las variables del sistema socio-ecológico, reduciendo la incertidumbre en la toma de decisiones y fortaleciendo la gobernanza comunitaria mediante la generación de datos en tiempo real, lo que garantiza la sostenibilidad técnica y social del proyecto frente a la hipótesis nula (H_0).

12 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

12.1 Conclusiones

La investigación identificó exitosamente 36 conceptos clave que influyen en la calidad del agua, destacando que la dimensión ecológica es la más predominante con un 27.78%, seguida de la social con un 22.22%. Se determinó que la "Gestión deficiente y fragmentada de los recursos hídricos" posee la mayor centralidad ($ci = 54.42$), consolidándose como el núcleo articulador del sistema socio-ecológico local que condiciona el éxito de cualquier intervención técnica.

El diseño del sistema mediante Mapas Cognitivos Difusos (FCM) permitió integrar el conocimiento científico de 25 conceptos bibliográficos con 11 conceptos derivados del saber local, logrando un modelo que refleja fielmente la complejidad hídrica de la comunidad. El análisis de escenarios por inferencia difusa demostró que este enfoque participativo tiene una influencia transformadora del 95% sobre las variables del sistema, validando que el modelado

sistémico es una herramienta viable para mejorar la toma de decisiones y la sostenibilidad de la gestión del agua.

Se diseñaron lineamientos técnicos y pedagógicos para un manual de usuario adaptado a la realidad sociocultural de Ponce Quilotoa, donde prevalecen los adultos mayores. Estos lineamientos son fundamentales para democratizar el acceso al conocimiento y asegurar la transferencia tecnológica, permitiendo que la comunidad se apropie de las herramientas de ciencia abierta y actúe como guardiana permanente de sus fuentes hídricas de forma autónoma.

12.2 Recomendaciones

Se recomienda al GAD Parroquial de Zumbahua y a los líderes comunitarios de Ponce Quilotoa utilizar esta matriz de 36 conceptos PESTEL para priorizar políticas públicas que fortalezcan la gobernanza institucional, atacando la fragmentación administrativa identificada como el principal obstáculo para garantizar la calidad del agua en el territorio. Esta matriz no debe ser vista solo como un listado, sino como una hoja de ruta para la formulación de proyectos de inversión pública que prioricen la cohesión institucional sobre la gestión fragmentada.

Se recomienda a los futuros investigadores de la Universidad Técnica de Cotopaxi y de otras instituciones académicas a utilizar esta metodología de Mapas Cognitivos Difusos como base para nuevas líneas de investigación, aplicando el modelo a otras comunidades del páramo para validar si la dinámica de centralidad de variables se repite o varía según el contexto geográfico y cultural.

Se recomienda a los habitantes de Ponce Quilotoa adoptar y aplicar con rigurosidad los lineamientos establecidos en el manual de usuario una vez que este sea formalizado. Es fundamental que la comunidad asuma un compromiso activo en el seguimiento de los protocolos de uso diario y mantenimiento mensual, evitando la manipulación empírica del sistema que no esté contemplada en la guía técnica. Al hacer un buen uso de esta herramienta, los comuneros garantizan la vida útil de los sensores y, sobre todo, aseguran la generación de datos confiables que les permitan actuar con autonomía frente a posibles amenazas en la calidad de su fuente hídrica.

13 BIBLIOGRAFÍAS

Almudi, T., & Sinclair, A. J. (2022). Extreme hydroclimatic events in rural communities of the Brazilian Amazon: Local perceptions of change, impacts, and adaptation. *Regional Environmental Change*, 22(1), 27. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01857-0>

Andino, J. J. E. (2021). *DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA MEDIANTE UN ANÁLISIS HIDROQUÍMICO, EN LA COMUNIDAD PONCE QUILOTOA, PARROQUIA ZUMBAHUA, PROVINCIA DE COTOPAXI.*

Andrade, R. (2024). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del GAD Parroquial Rural de Belisario Quevedo 2023–2027.* Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial de Belisario Quevedo.

Arellano, A., Bayas, A., Meneses, A., & Castillo, T. (2018). Los consumos y las dotaciones de agua potable en poblaciones ecuatorianas con menos de 150 000 habitantes. *NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*, 1(1), 23-32. <https://doi.org/10.37135/unach.ns.001.01.03>

Armijos-Arcos, F., Salazar, C., Beltrán-Dávalos, A. A., Kurbatova, A. I., & Savenkova, E. V. (2025). Assessment of Water Quality and Ecological Integrity in an Ecuadorian Andean Watershed. *Sustainability*, 17(8), 3684. <https://doi.org/10.3390/su17083684>

Baumgartner, T., & Pahl-Wostl, C. (2013). UN–Water and its Role in Global Water Governance. *Ecology and Society*, 18(3), art3. <https://doi.org/10.5751/ES-05564-180303>

Becerra-Perenguez, D. Y., Acosta-Astaiza, C. P., & Leyton-Luna, J. (2023). Gestión del recurso hídrico en la ruralidad, mediante estrategias de fortalecimiento comunitario. *Entramado*, 20(1). <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.10054>

Bendahman, N., & Lotfi, D. (2024). Unveiling Influence in Networks: A Novel Centrality Metric and Comparative Analysis through Graph-Based Models. *Entropy*, 26(6), 486. <https://doi.org/10.3390/e26060486>

Borgatti, S. P., Mehra, A., Brass, D. J., & Labianca, G. (2022). Network Analysis in the Social Sciences. *Science*, 323(5916), 892-895. <https://doi.org/10.1126/science.1165821>

Byleveld, P. M., Cretikos, M. A., Leask, S. D., & Durrheim, D. N. (2008). Ensuring safe drinking water in regional NSW: The role of regulation. *New South Wales Public Health Bulletin*, 19(12), 203. <https://doi.org/10.1071/NB08031>

Caputo, A., Tomai, M., Lai, C., Desideri, A., Pomoni, E., Méndez, H. C., Castellanos, B. A., La Longa, F., Crescimbene, M., on behalf of the “Agua Futura” Consortium, & Langher, V. (2022). The Perception of Water Contamination and Risky Consumption in El Salvador from a Community Clinical Psychology Perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1109. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031109>

Cassidy, J., Silva, T., Semião, N., Ramalho, P., Santos, A., & Feliciano, J. (2020). Improving wastewater treatment plants operational efficiency and effectiveness through an

integrated performance assessment system. *H2Open Journal*, 3(1), 276-287. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2020.007>

Çitilci, T., & Akbalık, M. (2020). The Importance of PESTEL Analysis for Environmental Scanning Process: En H. Dinçer & S. Yüksel (Eds.), *Advances in Marketing, Customer Relationship Management, and E-Services* (pp. 336-357). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2559-3.ch016>

Ćosić-Flajsig, G., & Karleuša, B. (2014). *An Approach to Water Quality Management in Rural Areas*.

Daconte, A., Sierra, M., Noguera, J., & Rodriguez, N. (2024). Preliminary results of an IoT-based prototype monitoring system for physicochemical parameters and water level in an aquifer: Case of Santa Marta, Colombia. *Procedia Computer Science, 14th International Conference on Emerging Ubiquitous Systems and Pervasive Networks / 13th International Conference on Current and Future Trends of Information and Communication Technologies in Healthcare (EUSPN/ICTH 2023)*, 231, 478-483. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.237>

Delgado-Serrano, M. D. M., Mistry, J., Matzdorf, B., & Leclerc, G. (2017). Community-based management of environmental challenges in Latin America and the Caribbean. *Ecology and Society*, 22(1), art4. <https://doi.org/10.5751/ES-08924-220104>

Dominguez Zúñiga, W. M. (2025). Impacto social de la eficiencia hidráulica en sistemas de riego: El caso de la red de canales del sistema San Jacinto. *e-Revista Multidisciplinaria del Saber*, 1-13. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v3i.278>

Dong, R. (2024). A Study on the Application of Social Network Analysis Based Approach in the Optimization of Cultural Communication Paths and Efficiency. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1), 20242196. <https://doi.org/10.2478/amns-2024-2196>

Espósito, M. E., Paoloni, J. D., Sequeira, M. E., Amiotti, N. M., & Blanco, M. D. C. (2011). Natural Contaminants in Drinking Waters (Arsenic, Boron, Fluorine and Vanadium) in the Southern Pampean Plain, Argentina. *Journal of Environmental Protection*, 02(01), 97-108. <https://doi.org/10.4236/jep.2011.21011>

Fonseca, K., Acero Triana, J. S., Ramírez, M., Martínez, W., Ilbay, M., Espitia-Sarmiento, E., & Breuer, L. (2024). Assessing the potential of nature-based solutions as sustainable land and water management strategies in the high tropical Andean páramo ecosystem. *Journal of Environmental Management*, 372, 123350. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123350>

Fonseca, K., Espitia, E., Breuer, L., & Correa, A. (2022). Using fuzzy cognitive maps to promote nature-based solutions for water quality improvement in developing-country communities. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134246>

French, A. (2016). ¿Una nueva cultura de agua?: Inercia institucional y la gestión tecnocrática de los recursos hídricos en el Perú. *Anthropologica*, 34(37), 61-86. <https://doi.org/10.18800/anthropologica.201602.003>

Ghaboulia Zare, S., Alipour, M., Hafezi, M., Stewart, R. A., & Rahman, A. (2022). Examining wind energy deployment pathways in complex macro-economic and political settings using a fuzzy cognitive map-based method. *Energy*, 238, 121673. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121673>

Granada, S. S., & Muñoz, C. E. E. (2015). *Responsabilidad de los administradores de sociedades comerciales por daños causados al medioambiente*.

Heredia, G., Orellana, B., Saavedra, O., & Echeverría, I. (2020). EVALUACIÓN DEL COSTO ANUAL EQUIVALENTE DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LOS MUNICIPIOS DE CLIZA Y TOLATA. *INVESTIGACION & DESARROLLO*, 19(2), 75-82. <https://doi.org/10.23881/idupbo.019.2-5e>

Hernández Pasichana, S. M., Posada Arrubla, A., Hernández Pasichana, S. M., & Posada Arrubla, A. (2018). AVANCES DE LA INVESTIGACIÓN SOBRE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 553-563. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1079>

Huntley, S. L., Ritchie, L. J., Setford, S. J., & Saini, S. (2002). The Development of a Sub-Surface Monitoring System for Organic Contamination in Soils and Groundwater. *The Scientific World JOURNAL*, 2, 1101-1107. <https://doi.org/10.1100/tsw.2002.203>

Jesus, G. J. V., Oliveira, A., & Casimiro, A. (2014). *Ensuring reliable measurements in remote aquatic sensor networks*.

Jetter, A. J., & Kok, K. (2014). Fuzzy Cognitive Maps for futures studies—A methodological assessment of concepts and methods. *Futures*, 61, 45-57. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.05.002>

Kabus, J., Brzozowska, A., Piersiala, L., & Lenort, R. (2025). Innovative Approaches to Sustainable Tourism Assessment in Academic Cities of the Silesian Voivodeship. *Przedsiębiorczość - Edukacja*, 21(2). <https://doi.org/10.24917/20833296.212.9>

Karatzinis, G. D., & Boutalis, Y. S. (2025). A Review Study of Fuzzy Cognitive Maps in Engineering: Applications, Insights, and Future Directions. *Eng*, 6(2), 37. <https://doi.org/10.3390/eng6020037>

Kirchherr, J., & Charles, K. (2018). Enhancing the sample diversity of snowball samples: Recommendations from a research project on anti-dam movements in Southeast Asia. *PLOS ONE*, 13(8), e0201710. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201710>

Kubiciel-Lodzińska, S. (2021). Snowball Sampling vs. Respondent Driven Sampling in Regional Research. Comparing the use of the Methods to Study Migrants Working in Elderly Care. *Studia Migracyjne – Przegląd Polonijny*, 47(1 (179)), 149-180. <https://doi.org/10.4467/25444972SMPP.21.007.13319>

Lopolito, A., Falcone, P. M., Morone, P., & Sica, E. (2020). A Combined method to model policy interventions for local communities based on people knowledge. *MethodsX*, 7, 100877. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100877>

Martínez-Moscoso, A., & Abril Ortiz, A. (2020). Las guardianas del agua y su participación en la gestión comunitaria de los recursos hídricos. Un análisis de la normativa ecuatoriana. *Foro: Revista de Derecho*, (34), 61-84. <https://doi.org/10.32719/26312484.2020.34.4>

McCarroll, M., & Hamann, H. (2020). What We Know about Water: A Water Literacy Review. *Water*, 12(10), 2803. <https://doi.org/10.3390/w12102803>

Melaku Melese, S. (2016). Effect of Climate Change on Water Resources. *Journal of Water Resources and Ocean Science*, 5(1), 14. <https://doi.org/10.11648/j.wros.20160501.12>

Mosquera, G. M., Marín, F., Stern, M., Bonnesoeur, V., Ochoa-Tocachi, B. F., Román-Dañobeytia, F., & Crespo, P. (2022). Progress in understanding the hydrology of high-elevation Andean grasslands under changing land use. *Science of The Total Environment*, 804, 150112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150112>

Mourhir, A. (2021). Scoping review of the potentials of fuzzy cognitive maps as a modeling approach for integrated environmental assessment and management. *Environmental Modelling & Software*, 135, 104891. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104891>

Nyaki, A., Gray, S., & Lepczyk, C. (2014). *Local-Scale Dynamics and Local Drivers of Bushmeat Trade*. <https://doi.org/10.1111/cobi.12316>

Özesmi, U., & Maurer, S. (2004). Ecological models based on people's knowledge: A multi-step fuzzy cognitive mapping approach. *Ecological Modelling*, 176, 43-64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.10.027>

Padilla, J. H. R., Rincon, M. A. P., Malheiros, T. F., Parra, C. A. M., Prota, M. G., & Dos Santos, R. (2013). Comparative analysis of integrated water resources management models and instruments in South America: Case studies in Brazil and Colombia. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 8(1), 73-97. <https://doi.org/10.4136/ambiente-agua.971>

Pahl-Wostl, C., Lebel, L., Knieper, C., & Nikitina, E. (2012). From applying panaceas to mastering complexity: Toward adaptive water governance in river basins. *Environmental Science & Policy*, 23, 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.07.014>

Paris, M., & Marano, R. P. (2017). Pautas para la gestión integrada de los recursos hídricos en los bajos submeridionales (Argentina). *Fave. Sección ciencias agrarias*, 16(1), 57-65.

Payes, V., & Melany, M. (2016). "A drop of life": Water governance and community managed water systems in El Salvador.

Râpă, M., Darie-Niță, R. N., Matei, E., Predescu, A.-M., Berbecaru, A.-C., & Predescu, C. (2023). Insights into Anthropogenic Micro- and Nanoplastic Accumulation in Drinking Water Sources and Their Potential Effects on Human Health. *Polymers*, 15(11), 2425. <https://doi.org/10.3390/polym15112425>

Reyes-García, V., Tofighi-Niaki, A., Austin, B. J., Benyei, P., Danielsen, F., Fernández-Llamazares, Á., Sharma, A., Soleymani-Fard, R., & Tengö, M. (2022). Data Sovereignty in Community-Based Environmental Monitoring: Toward Equitable Environmental Data Governance. *BioScience*, 72(8), 714-717. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac048>

Sebele-Mpofu, F. Y. (2020). Saturation controversy in qualitative research: Complexities and underlying assumptions. A literature review. *Cogent Social Sciences*, 6(1), 1838706. <https://doi.org/10.1080/23311886.2020.1838706>

Shang, Y., Wang, D., Liu, S., & Li, H. (2022). Spatial-Temporal Variation and Mechanisms Causing Spatial Differentiation of Ecosystem Services in Ecologically Fragile Regions Based on Value Evaluation: A Case Study of Western Jilin, China. *Land*, 11(5), 629. <https://doi.org/10.3390/land11050629>

Sharma, S., Mishra, D., Yadav, A., & Gami, B. (2025). *A Low-Cost Intelligent Water Quality Monitoring System with On-Device Machine Learning and Cloud Integration*.

Tulloch, A. I. T., Possingham, H. P., Joseph, L. N., Szabo, J., & Martin, T. G. (2013). Realising the full potential of citizen science monitoring programs. *Biological Conservation*, 165, 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.05.025>

Wilches-Visbal, J. H., Díaz-Albornoz, H. D., Castillo-Pedraza, M. C., Wilches-Visbal, J. H., Díaz-Albornoz, H. D., & Castillo-Pedraza, M. C. (2022). Asociación espacial e impacto de variables socioambientales en los casos de COVID-19 en Bogotá (Colombia). *Información tecnológica*, 33(2), 67-76. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000200067>

Wutich, A., Beresford, M., & Bernard, H. R. (2024). Sample Sizes for 10 Types of Qualitative Data Analysis: An Integrative Review, Empirical Guidance, and Next Steps. *International Journal of Qualitative Methods*, 23, 16094069241296206. <https://doi.org/10.1177/16094069241296206>

Yüksel, İ. (2021). Developing a Multi-Criteria Decision Making Model for PESTEL Analysis. *International Journal of Business and Management*, 7, 52-52. <https://doi.org/10.5539/ijbm.v7n24p52>

