



GESTIÓN COMUNITARIA Y SOSTENIBILIDAD EN SISTEMAS DE RIEGO ANDINOS MEDIANTE INDICADORES DE USO EFICIENTE DEL AGUA EN LA AGRICULTURA

COMMUNITY MANAGEMENT AND SUSTAINABILITY IN ANDEAN IRRIGATION
SYSTEMS THROUGH INDICATORS OF EFFICIENT WATER USE IN AGRICULTURE

Charles Cachipueno*¹ , Mercy Ilbay²  y Narcisa Requelme³ 

¹Universidad Politécnica Salesiana, Grupo de Investigación de Ciencias Ambientales, Campus el Girón, Av. 12 de Octubre 24-22. Quito, Ecuador. [<https://ror.org/00f11af73>]

²Grupo de Gestión de Recursos Hídricos, Universidad Técnica de Cotopaxi, Av. Simón Rodríguez s/n Barrio El Ejido Sector San Felipe, 050104, Latacunga, Ecuador. [<https://ror.org/004jbx603>]

³Universidad Politécnica Salesiana, Grupo de Investigación de la Leche, Campus el Girón, Av. 12 de Octubre 24-22. Quito, Ecuador. [<https://ror.org/00f11af73>]

*Autor para correspondencia: ccachipueno@ups.edu.ec

Manuscrito recibido el 22 de enero de 2025. Aceptado, tras revisión el 7 de julio de 2025. Publicado el 1 de septiembre de 2025.

Resumen

A nivel global, la creciente competencia por el agua y los efectos del cambio climático han acentuado la necesidad de evaluar la sostenibilidad de los sistemas de riego, especialmente en ecosistemas estratégicos como los páramos andinos. Sin embargo, existe un vacío en herramientas metodológicas que integren indicadores adaptados a contextos comunitarios y alineados con marcos globales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los Principios de Inversión Responsable en Agricultura (CSA-IRA). Esta investigación tiene como objetivo definir los indicadores para evaluar la sostenibilidad de sistemas de riego comunitarios en Ecuador. Se consideró la metodología MESMIS y la técnica Delphi mediante un enfoque participativo que incluyó líderes comunitarios, técnicos, académicos y estudiantes. Se definieron 31 indicadores, organizados en siete atributos y cinco dimensiones (ambiental, social, económica, política y tecnológica), articulados con nueve ODS y siete Principios CSA-IRA. Los resultados evidencian puntos críticos en la eficiencia hídrica, gobernanza, equidad y resiliencia de los sistemas. La propuesta permite una evaluación integral y contextualizada de los sistemas de riego, y ofrece una herramienta práctica para el diseño de políticas públicas. En conclusión, se contribuye a cerrar el vacío metodológico existente y se fortalece el rol de los sistemas de riego comunitarios como pilares para una agricultura sostenible y resiliente.

Palabras clave: MESMIS, páramos, riego sustentable, gestión comunitaria del agua, Indicadores de sostenibilidad.

Abstract

Globally, increasing competition for water and the effects of climate change have heightened the need to assess the sustainability of irrigation systems, particularly in strategic ecosystems such as the Andean páramos. However, there is a gap in methodological tools that integrate indicators adapted to community-based contexts and aligned with global frameworks such as the Sustainable Development Goals (SDGs) and the Principles for Responsible Investment in Agriculture and Food Systems (RAI Principles). This study aims to define indicators for evaluating the sustainability of community-managed irrigation systems in Ecuador. The MESMIS framework and the Delphi technique were applied using a participatory approach that involved community leaders, technicians, academics, and students. A total of 31 indicators were defined, organized into seven attributes and five dimensions (environmental, social, economic, political, and technological), and aligned with nine SDGs and seven RAI Principles. The results reveal critical issues related to water use efficiency, governance, equity, and system resilience. The proposed framework enables a comprehensive and context-specific evaluation of irrigation systems and provides a practical tool for public policy design. In conclusion, this research helps bridge the existing methodological gap and reinforces the role of community irrigation systems as key pillars for sustainable and resilient agriculture.

Keywords: MESMIS, páramos, sustainable irrigation, community water management, sustainability indicators.

Forma sugerida de citar: Cachipundo, C., Ilbay, M. y Requelme, N. (2025). Gestión comunitaria y sostenibilidad en sistemas de riego andinos mediante indicadores de uso eficiente del agua en la agricultura. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 42(2):41-60. <https://doi.org/10.17163/lgr.n42.2025.03>.

IDs Orcid:

Charles Cachipundo: <https://orcid.org/0000-0002-7700-7740>

Mercy Ilbay: <https://orcid.org/0000-0001-9503-2686>

Narcisa Requelme: <https://orcid.org/0000-0002-3877-199X>

1 Introducción

El paradigma de la sostenibilidad ha ampliado el marco de análisis de los sistemas naturales, integrando dimensiones económicas, ambientales y sociales aplicables a la producción agropecuaria (González et al., 2006; Guo and Yu, 2022). Sin embargo, Talukder et al. (2020) cuestionan si los sistemas agrícolas sostenibles pueden garantizar la seguridad alimentaria, particularmente en países de baja renta. Estos autores argumentan que alcanzar este objetivo requiere una “intensificación sostenible” del uso de recursos como el agua, mediante tecnologías avanzadas que minimicen o eliminen los impactos ambientales adversos como la captura de agua lluvia (Cachipundo et al., 2024). En este contexto, debe evaluarse el riego, pues está considerado como un sistema clave en la agricultura, desde la perspectiva de su sostenibilidad.

El riego desempeña un papel fundamental en la seguridad hídrica y alimentaria (Darzi-Naftchali et al., 2020) y si debe analizar su sostenibilidad bajo el impacto del cambio climático, considerando factores como la conservación de recursos naturales, la innovación tecnológica y la eficiencia en el uso del agua en la agricultura (Velasco-Muñoz et al., 2018; Darzi-Naftchali et al., 2020). Comúnmente, se considera al riego como un medio de producción que mejora la gestión del agua en la agricultura (Wang and Wu, 2018) y como un sistema socio-ecológico-técnico que integra aspectos físicos, organizativos, sociales y naturales (Newman et al., 2011). No obstante, su gestión enfrenta desafíos técnicos y financieros, especialmente en contextos donde la administración del riego se ha transferido de organismos gubernamentales a asociaciones de agricultores u otras entidades privadas (Nagrah et al., 2016; Shalsi et al., 2022). Este cambio ha generado desempeños desiguales y resultados limitados en la práctica (Araral, 2005).

Para las comunidades rurales, el riego no es solo un medio de producción agrícola (Brugnach et al., 2017), sino un sistema complejo en el que convergen la naturaleza, comunidad e infraestructura (Cachipundo Ulcuango et al., 2021). Su operación genera interrelaciones sociales, ambientales y económicas (Fernald et al., 2012), y estructuradas bajo organizaciones que gestionan y operan el riego según lineamientos legales de cada país (Herrán et al., 2017).

Ante la crisis climática y el crecimiento poblacional, surge la necesidad de incrementar la producción de alimentos en alineación con los Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS) y los Principios de Inversión Responsable en Agricultura (CSA-IRA) (Jägermeyr et al., 2017).

Considerando las dinámicas socioculturales, ambientales, políticas y tecnológicas de los sistemas de riego, resulta necesario identificar los mecanismos integradores que permitan analizar los puntos críticos en sus componentes para establecer estrategias sostenibles y eficientes en el uso del agua.

En los Andes, el agua para la agricultura proviene principalmente de fuentes superficiales y subterráneas alimentadas por glaciares, los cuales han disminuido un 25 % en los últimos 30 años debido al cambio climático (Gallegos et al., 2018) y de los humedales que se forman en el ecosistema del pajonal que captan el agua de la lluvia y nubosidades que posteriormente se infiltran. Sin embargo, los ecosistemas de páramo y bosques altoandinos están perdiendo su capacidad de retención de agua por causas antropogénicas y climáticas (Llambí et al., 2012). Ante esta realidad, las organizaciones de riego han implementado estrategias como el riego presurizado, lo que ha mejorado la resiliencia de agricultores y las comunidades (Cachipundo, 2022). Por lo tanto, la sostenibilidad de estos sistemas requiere una evaluación integral que considere las dimensiones sociales, ambientales, económicas, políticas y tecnológicas (Chile and Ortiz, 2021).

El estudio de los sistemas de riego se ha centrado en indicadores específicos como la eficiencia física del agua a nivel de la parcela, el rendimiento económico y los impactos ambientales (Cachipundo Ulcuango, 2021). Este enfoque fragmentado no aborda de forma integral la sostenibilidad del sistema ni la interrelación de sus dimensiones. Las metodologías como el MESMIS ofrecen herramientas basadas en pensamiento sistémico para evaluar la sostenibilidad de manera dinámica, versátil y adaptada a las realidades locales (Masera et al., 2000).

La evaluación de la sostenibilidad de un sistema natural implica identificar sus elementos físicos, sociales, ambientales, políticos y económicos, y analizar sus interacciones mediante los modelos sistémicos (Samian et al., 2015; Carmona et al., 2013). En

los Andes, la evaluación de los sistemas de riego se estructura en tres subsistemas: naturaleza, comunidad y uso del suelo (Cachipiendo Ulcuango, 2021). Cada subsistema requiere indicadores específicos como la disponibilidad y calidad del agua (Costa et al., 2022), la capacidad organizativa de las comunidades (Turner et al., 2016), la eficiencia económica del agua (Meng et al., 2022) y la tecnificación del riego (Laali et al., 2022). El uso de las metodologías como el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo Incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS), permiten integrar indicadores y evaluar simultáneamente las dimensiones de sostenibilidad, incluyendo la participación de las partes interesadas (Sarandón, 2010; Franco et al., 2012). Este enfoque ha demostrado ser efectivo en contextos andinos para evaluar los agroecosistemas o sistemas de producción pecuaria y agrícola (Vallejo et al., 2020; Tongo and Soplín, 2022).

A nivel global, la sostenibilidad debe estar alineada con los ODS, que ofrecen un marco de acción para abordar problemas globales comunes y desarrollar políticas adaptadas a los contextos locales (United Nations, 2015; Persson et al., 2016). Adicionalmente, los Principios CSA-IRA buscan garantizar inversiones responsables en agricultura y sistemas de riego, aunque su carácter no vinculante representa un desafío para los productores ante conflictos con inversionistas (Stephens, 2013).

En Ecuador, debido a la organización comunitaria que gestiona los sistemas de riego, surge la necesidad de contar con herramientas que permitan evaluar su sostenibilidad considerando las realidades locales, sin perder de vista los objetivos globales. Por ello, esta investigación tiene como objetivo definir los indicadores para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de riego en Ecuador dentro del marco metodológico MESMIS, considerando su relación con los ODS y los Principios CSA-IRA.

2 Materiales y Métodos

2.1 Área de Estudio

La investigación se realizó en Ecuador, ubicado en la costa noroeste de América del Sur que está atravesado por la línea equinoccial y con alturas que van de 0 a 6263 m.s.n.m. La mayor área bajo riego está principalmente en Guayas (260 000 ha), Chim-

borazo (124 000 ha) y Pichincha (107 000 ha); de esta superficie, el 22% corresponde a sistemas de riego públicos, 40% comunitarios y 38% privados (Gaybor, 2019). Existen 3 425 sistemas de riego comunitarios distribuidos mayoritariamente en los Andes ecuatorianos. Estos sistemas han sido construidos por los usuarios mediante trabajos comunitarios (mingas) en zonas montañosas de alta pendiente, y benefician a predios menores a 1 ha en promedio. Los regantes se dedican a la agricultura de subsistencia y viven en condiciones precarias que los obliga a trabajar fuera de la unidad productiva agropecuaria (UPA) (Gaybor, 2019).

Considerando los tipos de sistemas de riego intercomunitarios, comunitarios, colectivos y públicos (Cachipiendo Ulcuango et al., 2021), en el estudio se identificaron 3 sistemas de riego intercomunitarios en las provincias de Tungurahua, Pichincha y Cotopaxi; 12 comunitarios: 1 de Carchi, 2 de Imbabura, 3 de Pichincha, 2 de Cotopaxi, 2 de Tungurahua y 2 de Chimborazo; 4 sistemas de riego colectivos o asociados en Pichincha y 1 sistema público en Carchi.

2.2 Alcance de la investigación y definición de los indicadores

La investigación tuvo un alcance descriptivo y correlacional, y se desarrolló basándose en la metodología MESMIS, complementada con la técnica del Panel Delphi (consulta a expertos). Esta combinación metodológica permitió identificar y definir un conjunto de 31 indicadores destinados a evaluar la sostenibilidad de los sistemas de riego. El proceso se estructuró en cuatro etapas (Figura 1).

- (i) Definición del modelo de funcionamiento del sistema de riego. Esta etapa se desarrolló a través de seis grupos focales, en los que participaron 36 líderes comunitarios. Como instrumento de recolección de información se utilizó una guía estructurada con diez preguntas sobre la gestión y el manejo del sistema de riego.
- (ii) Identificación de criterios de diagnóstico y puntos críticos del sistema de riego, siguiendo los lineamientos de la metodología MESMIS (Masera et al., 2000; Astier et al., 2008). Se aplicaron entrevistas semiestructuradas y encuestas a un grupo de 18 informantes clave: 6

técnicos, 4 académicos y 8 estudiantes de posgrado, delimitando así los principales criterios de evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de riego.

- (iii) Definición de indicadores. En esta etapa se conformó un Panel Delphi con 12 expertos en gestión y manejo de sistemas de riego, provenientes de instituciones gubernamentales, universidades y el sector privado. El proceso incluyó dos rondas de consulta: la primera centrada en la validez conceptual y pertinencia de los indicadores propuestos, y la segunda orientada a determinar el grado de incidencia de cada indicador en la sostenibilidad

del sistema.

- (iv) Análisis de los indicadores en relación con los ODS y los Principios CSA-IRA. Se realizó un análisis semántico que permitió establecer la correspondencia y alineación de los indicadores con estos marcos internacionales de referencia. A partir de este análisis, se observa que los indicadores definidos para la evaluación de sistemas de riego comunitarios están alineados con 10 ODS y 7 Principios CSA-IRA (Tabla 1). Esto subraya el potencial de los sistemas de riego en pleno funcionamiento para contribuir al cumplimiento de los objetivos globales de desarrollo sostenible.

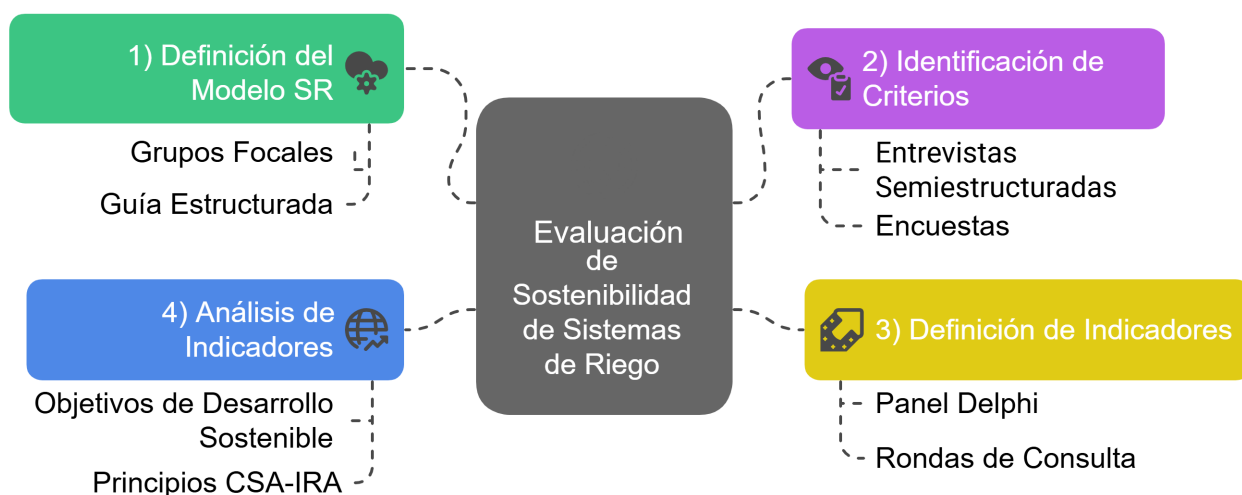


Figura 1. Etapas y técnicas para la construcción de indicadores para la evaluación de sistemas de riego.

3 Resultados

Los resultados de esta investigación reflejan un enfoque metodológico integral para evaluar la sostenibilidad de sistemas de riego comunitarios en el contexto andino ecuatoriano. A través del modelo MESMIS y la técnica Delphi, se estructuró un diagnóstico que permitió identificar los elementos clave del sistema de riego: naturaleza, comunidad e infraestructura, así como los principales puntos críticos que afectan su desempeño. Se definieron 31 indicadores alineados con siete atributos de sostenibilidad y cinco dimensiones (ambiental, social, económica, tecnológica y política), articulados con nueve ODS y siete Principios CSA-IRA. Los hallazgos evidencian

limitaciones estructurales, organizativas y técnicas que condicionan la eficiencia hídrica, la equidad en la distribución, la gobernanza y la resiliencia de estos sistemas, proporcionando una base sólida para el diseño de políticas públicas y estrategias de fortalecimiento comunitario.

3.1 Modelo de funcionamiento del sistema de riego

El modelo de funcionamiento de un sistema de riego gestionado comunitariamente se basa en tres elementos fundamentales: naturaleza, comunidad e infraestructura (Figura 2). El subsistema natura-

leza incluye las entradas de agua al sistema, que dependen de factores exógenos como temperatura, precipitación, viento y radiación. En el caso de la Sierra ecuatoriana, las fuentes principales de agua son las nieves perpetuas de los Andes y los páramos, cuyos ecosistemas de bosques altoandinos capturan el agua, liberándola en zonas bajas mediante manantiales o escorrentías (Llambí et al., 2012). Sin embargo, las actividades antropogénicas, como la expansión de la frontera agrícola, la quema de páramos y el pastoreo, disminuyen la capacidad de recarga de los acuíferos, constituyendo factores internos relevantes que afectan al sistema.

El subsistema comunidad abarca las acciones humanas que, a nivel individual, comunitario o colectivo, impactan la eficiencia física, económica, social y ambiental en el uso del agua agrícola. La gestión del agua en los sistemas de riego implica llevar a cabo procedimientos específicos para acceder, conducir, almacenar, distribuir y aplicar el agua de manera eficiente, minimizando desperdicios. Se identificaron cuatro factores principales en este subsistema: i) Conocimiento: Relacionado con el grado de comprensión de los usuarios, ya sea de forma individual o comunitaria, respecto al tiempo de riego óptimo según el tipo de cultivo; ii) Participación social: Incluye la implicación de los usuarios en

actividades comunitarias, procesos de toma de decisiones y programas de capacitación y formación; iii) Institucional: Referente a la capacidad de la organización para operar, mantener y administrar el sistema, se consideran también otros aspectos como la gestión de turnos de agua, alternabilidad en los liderazgos y tipo de organización; iv) Económico: Incluye la capacidad financiera de los usuarios y organizaciones para acceder al financiamiento, mantener y renovar el sistema, así como la existencia de políticas que respalden estas actividades.

El subsistema infraestructura comprende los componentes físicos que permiten la captación, conducción, almacenamiento, distribución y aplicación del agua al cultivo de manera eficiente. La innovación tecnológica es un aspecto clave, ya que los niveles tecnológicos varían en función del tipo y tamaño del sistema de riego. En los casos estudiados, los sistemas de riego predominantes son los de aspersión y goteo, que destacan por su nivel de presurización, automatización y métodos que minimizan las pérdidas de agua. La infraestructura eficiente no solo reduce el desperdicio de agua, sino también optimiza su aplicación, garantizando la sostenibilidad del sistema.

Tabla 1. ODS y principios IRA que se relacionan con los indicadores de sostenibilidad de los sistemas de riego en el Ecuador. Tomada de (Garcés and Padilla, 2020).

ODS		Principios CSA - IRA	
2	Hambre cero	1	Contribuir a la seguridad alimentaria y la nutrición
5	Igualdad de género	2	Contribuir al desarrollo económico sostenible e inclusivo y a la erradicación de la pobreza
6	Agua limpia y saneamiento		
8	Trabajo decente y crecimiento económico	3	Fomentar la igualdad de género y el empoderamiento de las mujeres
9	Industria, innovación e infraestructura	6	Conservar y ordenar de forma sostenible los recursos naturales, aumentar la resiliencia y reducir el riesgo de catástrofes
10	Reducción de las desigualdades		
11	Ciudades y comunidades sostenibles	7	Respetar el patrimonio cultural, los conocimientos tradicionales y respaldar la diversidad y la innovación
12	Producción y consumo responsable	8	Promover sistemas agrícolas y alimentarios inocuos y saludables
15	Vida de ecosistemas terrestres	9	Incorporar estructuras de gobernanza, procesos y mecanismos de reclamación inclusivos y transparentes
16	Paz, justicia e instituciones sólidas		

3.2 Criterios de diagnóstico y puntos críticos del sistema de riego

Se identificaron 13 criterios de diagnóstico que cubren los 7 atributos de sostenibilidad. Luego, se vincularon 21 puntos críticos, mismos que se relacionan con las dimensiones de la sostenibilidad y los elementos del sistema (Tabla 2).

Los puntos críticos identificados se organizaron según los atributos clave de sostenibilidad definidos en la metodología. Esta clasificación permite un análisis sistemático de las principales debilidades y oportunidades de mejora en los sistemas de riego comunitarios. A continuación, se presentan los hallazgos correspondientes a cada atributo de sostenibilidad.

Tabla 2. Puntos críticos identificados para la sostenibilidad de sistemas de riego comunitarios en los Andes ecuatorianos.

Atributos	Criterios de diagnóstico	Puntos críticos	Dimensiones de sostenibilidad	Elementos del sistema
1. Productividad	Eficiencia del sistema	Desperdicio de agua en los diferentes componentes de la infraestructura y en la aplicación en parcela.	Ambiental	Naturaleza
			Tecnológica	Infraestructura
	Rendimiento del uso del agua	Utilización del riego en los cultivos con baja rentabilidad, generando pocas oportunidades de empleo	Económica	Comunidad
			Social	
		Desconocimiento de la relación de los beneficios de la inversión con respecto al retorno económico de la producción.	Económica	Comunidad
		Alto monto de inversión por proyecto de riego	Económica	Comunidad
2. Estabilidad	Conservación, calidad y protección de los recursos	Disminución de la disponibilidad del agua por el deterioro de fuentes de agua debido a acciones antropomórficas.	Ambiental	Naturaleza
			Tecnológica	Infraestructura
		Contaminación de cuerpos de agua por actividad agrícola.	Ambiental	Naturaleza
		Predominio de monocultivos.	Ambiental	Naturaleza
3. Confiabilidad	Relación entre los ingresos del sistema y los costos	Recursos de autogestión insuficientes para realizar actividades de mantenimiento de reparación y/o reposición del sistema.	Económica	Infraestructura
			Social	Comunidad
4. Resiliencia	Mecanismos para evitar riesgos	Inexistencia de prácticas para evitar la evapotranspiración.	Ambiental	Naturaleza
		No se implementan acciones que fomenten la retención del agua en el suelo.	Ambiental	Naturaleza
	Tecnificación del riego	Existe 40% de sistemas que no presurizan el agua para regar.	Tecnológica	Infraestructura
5. Adaptabilidad	Procesos de aprendizaje y capacitación	Los usuarios del riego desconocen las alternativas eficientes del uso del agua.	Tecnológica	Comunidad
	Capacidad de cambio e innovación	Los usuarios del riego rechazan los cambios técnicos y sociales	Tecnológica	Comunidad

6. Equidad	Distribución equitativa del agua y género	La distribución del agua aún se realiza sin considerar el tipo de cultivo y la superficie	Político	Comunidad
		Los jóvenes y mujeres no participan en los niveles dirigenciales de la organización.	Político	Comunidad
	Distribución de costos y beneficios	Las tarifas se establecen por usuario sin considerar la rentabilidad de la actividad productiva y el consumo del agua.	Económico	Comunidad
7. Auto dependencia (autogestión)	Capacidad de la organización para la gestión y manejo del sistema	Existen conflictos entre los sistemas de riego y usuarios por el acceso y uso del agua.	Social	Comunidad
		La gobernanza del agua entre las organizaciones de los usuarios y el Estado es débil y causa conflictos.	Político	Comunidad
		El liderazgo en muchas ocasiones se lleva a cabo por personas que desconocen la dinámica de los sistemas de riego.	Social	Comunidad
	Nivel de participación en la gestión y manejo del sistema	Existe participación de los usuarios; sin embargo, se realiza considerando solo al usuario y no la superficie para el trabajo o los aportes.	Social	Comunidad
	Dependencia de insumos y factores externos	Administración de recursos económicos ineficiente, no se reinvierte en el sistema	Económica	Comunidad

3.3 Productividad

Los sistemas de riego garantizan la provisión oportuna y de calidad de agua para incrementar la productividad en las áreas regadas Morris (2019); Contero and Cachipueno (2021). La evaluación requiere considerar su eficiencia técnica, económica y social, identificando puntos críticos como el desperdicio de agua debido al deterioro de la infraestructura o el manejo inadecuado, los cuales pueden resolverse mediante acciones de mejora y capacitación de los regantes. Otro diagnóstico clave es el rendimiento del uso del agua, que incluye aspectos críticos como la baja rentabilidad de los cultivos, la relación beneficio-costos y la generación de empleo.

3.4 Estabilidad

Este atributo evalúa la conservación, calidad y protección de los recursos. En la dimensión ambien-

tal, los puntos críticos incluyen contaminación y escasez del agua, así como predominio de monocultivos. Un sistema de riego comunitario sostenible requiere una disponibilidad suficiente de agua en cantidad y calidad, asegurada mediante la protección de fuentes hídricas y promoción de sistemas de producción biodiversos. La sostenibilidad del suelo también es un factor relevante en este atributo.

3.5 Confiabilidad

La confiabilidad se aborda desde un único criterio de diagnóstico que son los ingresos al sistema y costos. Los puntos críticos incluyen costos de operación y mantenimiento, así como los ingresos generados por el sistema en la dimensión económica. En la dimensión social, se identifican normativas insuficientes o ineficaces para la gestión y manejo del sistema de riego.

3.6 Resiliencia

Este atributo evalúa la capacidad del sistema de riego para aplicar medidas que reduzcan los riesgos y fortalezcan su resistencia frente al cambio climático en contextos agrícolas (Ward, 2022). En la dimensión ambiental, se identificaron dos puntos críticos: la falta de prácticas para reducir la evapotranspiración y la ausencia de acciones que favorezcan la retención de agua en el suelo. En la dimensión tecnológica se detectó un punto crítico relacionado con el bajo nivel de tecnificación del riego.

3.7 Adaptabilidad

El sector agrícola enfrenta una competencia creciente por el agua debido a su condición de mayor consumidor del recurso y a los efectos del cambio climático. Este atributo evalúa la capacidad de adaptación mediante dos criterios: el fortalecimiento de procesos de aprendizaje y capacitación en uso eficiente del agua, y capacidad de cambio e innovación tecnológica en el riego (van Opstal et al., 2022).

3.8 Equidad

La equidad en la distribución de los recursos hídricos es crucial para evitar conflictos, y puede ser abordada mediante la doctrina de la "distribución equitativa" (Elmusa, 1994). Este atributo considera la distribución del agua según los requerimientos hídricos de los cultivos, el área bajo riego, y la participación de jóvenes y mujeres (dimensión social). Además, evalúa las tarifas establecidas con base en el presupuesto, la superficie y la rentabilidad del cultivo (dimensión económica).

3.9 Autosuficiencia y Autogestión

Los sistemas de riego comunitarios enfrentan limitaciones significativas en términos de autosuficiencia y autogestión (Cortez, 2000). Este atributo se analiza a través de criterios como el empoderamiento de los regantes para organizarse y manejar los recursos económicos (dimensión social-gobernanza), el nivel de participación en la gestión del sistema (dimensión social), y la dependencia de insumos y factores externos al sistema (dimensión económica).

3.10 Relación de indicadores de evaluación de sistemas de riego con los ODS y Principios CSA-IRA

Además del análisis interno de los sistemas de riego, resulta fundamental vincular los indicadores definidos con marcos de referencia globales que orientan la sostenibilidad. Esta integración permite evaluar no solo el desempeño local, sino también la contribución de estos sistemas al cumplimiento de los compromisos internacionales (Tabla 3). En cuanto a los atributos del MESMIS, a continuación se describen los indicadores que corresponden a cada uno de ellos.

Productividad: Se identificaron siete indicadores relacionados con el uso eficiente del agua y la productividad económica, abarcando las dimensiones social, ambiental, económica y tecnológica. Estos indicadores están vinculados a los ODS 8, 9 y 12, y a los Principios CSA-IRA 1, 2 y 6.

Estabilidad: Cuatro indicadores reflejan la importancia de la disponibilidad y calidad del agua, asociados a los ODS 2, 6, 11 y 15, y a los Principios CSA-IRA 1, 6 y 7.

Confiabilidad: Dos indicadores abarcan aspectos de las dimensiones económica y social, relacionados con los ODS 8, 10 y 16, y los Principios CSA-IRA 2 y 9.

Resiliencia: Tres indicadores miden la capacidad de resistencia ante cambios climáticos, vinculándose con los ODS 3 y 5, y los Principios CSA-IRA 1, 6 y 8.

Adaptabilidad: Dos indicadores evalúan la capacidad de innovación tecnológica y adaptación de los regantes, asociados a los ODS 12 y 11, y a los Principios CSA-IRA 3 y 7.

Equidad: Cinco indicadores abordan la participación de mujeres y jóvenes, la transición generacional y el acceso equitativo al agua, relacionados con los ODS 2, 5, 9, 10 y 16, y los Principios CSA-IRA 1, 3 y 7.

Autosuficiencia y Autogestión: Este atributo cuenta con nueve indicadores relacionados con la gobernanza y sostenibilidad económica, vinculados

a los ODS 10 y 16, y a los Principios CSA-IRA 2, 7 y 9.

Estos indicadores ofrecen una base integral para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de riego en función de sus contribuciones a los ODS y los Principios CSA-IRA, permitiendo diseñar estra-

tegias orientadas a su mejora continua. A continuación, se presenta la descripción detallada de los 31 indicadores definidos. Esta sección incluye la conceptualización, el método de cálculo y la unidad de medida, lo que permite su aplicación práctica en la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de riego comunitarios.

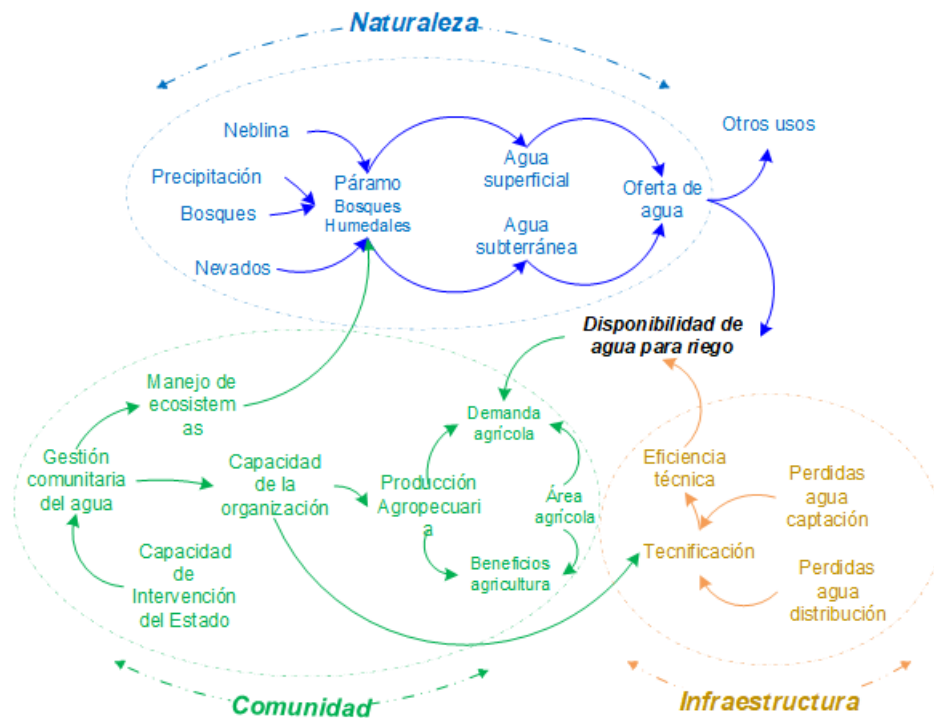


Figura 2. Modelo de funcionamiento del sistema de riego comunitario.

Eficiencia del sistema desde la captación hasta la parcela

Para calcular la eficiencia se considera la sumatoria de los caudales de las parcelas bajo riego dividido para el caudal de ingreso en la bocatoma y se expresa en porcentaje en la ecuación 1.

$$E(\%) = \frac{\sum Q_{\text{ingreso a las parcelas}}}{Q_{\text{captación}}} \times 100\% \quad (1)$$

Eficiencia de aplicación del agua en la parcela

Es la relación existente entre las necesidades hídricas del cultivo y el agua aplicada por el emisor (aspersor o goteo) en la UPA, expresada en porcentaje

en la ecuación 2. Siendo: EA = eficiencia de aplicación a nivel de UPA; NHc = necesidades hídricas del cultivo; Aasp = agua aplicada por el emisor en la UPA (Playan, 1994).

$$EA(\%) = \frac{NHc}{Aasp} \quad (2)$$

Relación retorno económico y volumen de agua utilizada

Es la relación entre la utilidad monetaria producida por el cultivo y el volumen de agua utilizada, se expresa en USD. m^{-3} de acuerdo con Ríos et al. (2016).

$$Y_1 = \frac{\text{Utilidad}(USD)}{V(m^3)} \quad (3)$$

Relación del volumen de agua usada con el número de empleos generados

Mide el número de empleos agrícolas producidos por hectómetro cúbico (1 millón de m^3) de agua empleada en el riego (Hussain et al., 2007).

$$Y_2 = \frac{\text{Empleos}(u)}{V(m^3)} \quad (4)$$

Relación beneficio costo

Para calcular esta relación se realiza la suma de los ingresos totales de la producción agrícola con riego para 10 años dividida para los costos totales de la inversión del sistema de riego y de la implementación del cultivo según la ecuación 5.

$$\frac{B}{C}(USD) = \frac{\text{Ingresos totales}}{\text{Costos totales}} \quad (5)$$

Monto de inversión por hectárea

Se expresa en dólares estadounidenses por hectárea (USD/ha), y permite comparar de manera estandarizada el nivel de inversión económica realizado en distintas áreas bajo riego, facilitando el análisis de eficiencia y equidad en la asignación de recursos.

Monto de inversión por usuario de riego

Este monto se determina considerando los costos totales de la inversión del sistema de riego en relación con el número de usuarios del sistema de riego según la ecuación 6. Siendo: MIUR = Monto en dólares de inversión por usuario de riego; NUSR = número de usuarios del sistema de riego.

$$MIUR = \frac{\text{Costos totales}}{NUSR} \quad (6)$$

Índice de escasez

Se determina mediante la relación entre la demanda de agua para el uso agrícola y de riego con la oferta de agua disponible en el punto de captación (bocatoma) según la ecuación 7. Siendo: D = demanda de

agua para riego (m^3); Oh = oferta hídrica en la bocatoma (m^3); Ic = Índice de escasez se expresa en % (Ríos et al., 2016).

$$Ic = \frac{D}{Oh} \times 100 \quad (7)$$

Prácticas de conservación de fuentes de agua

Las organizaciones de regantes realizan prácticas de conservación, mismas que se pueden cuantificar: forestación, cercado, manejo de la carga animal, no intervención de los sitios de las fuentes, y pueden ser expresadas en unidades y luego establecer una escala de valoración.

Índice de calidad del agua

Fundamentado en el modelo conceptual del índice de calidad del agua del Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCMEWQI); su cálculo se obtiene aplicando la ecuación 8. El alcance (F1) expresa el porcentaje de parámetros que no cumplen con los niveles deseables (límites máximos permitidos) respecto al total de parámetros. La frecuencia (F2) se obtiene por la relación entre el número de resultados que no cumplieron con los niveles deseables respecto al total de resultados. La amplitud (F3) es una medida de la desviación que existe en los datos, determinada por la magnitud.

$$CCMEWQI = 100 - \frac{\sqrt{F1^1 + F2^2 + F3^2}}{1,732} \quad (8)$$

Diversidad de cultivos en las UPA

Se adaptó el Índice de Shannon-Wiener para este cálculo, como se detalla a continuación de los excesos de cada dato fuera de rango al compararlo con su umbral (Chidiac et al., 2023). Donde P_i es la proporción de individuos de la i -ésimo cultivo y se calcula de la siguiente manera $P_i = n_i/N$, N es el número total de individuos; n_i es el número de plantas por cultivos, N el número de todas las plantas de todos los cultivos y S es el número de especies (Valdez et al., 2018).

$$DC = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (9)$$

Relación de costos de operación, mantenimiento y administración con los ingresos

Para calcular esta relación se realiza primero la suma de los costos totales anuales en operación, mantenimiento y administración dividida para los ingresos netos de la producción anual como se detalla en la ecuación 10.

$$\frac{C}{I} = \frac{\text{Costo de operación, mantenimiento y administración}}{\text{Ingresos de la producción anual}} \quad (10)$$

Existencia de normativas para la gestión y manejo del sistema

Este indicador evalúa la presencia y aplicación de normativas internas que regulan la operación, mantenimiento y administración del sistema de riego. Estas normativas son esenciales para una gobernanza eficaz, ya que establecen reglas claras que guían la toma de decisiones, promueven la participación y previenen conflictos (Perugachi and Cachipueno, 2000). La ausencia o debilidad de estas normas indica un bajo nivel de gobernanza y puede comprometer la sostenibilidad institucional del sistema. Se expresa en escala de 1 a 5 donde: 1 = inexistente, 2 = muy débil, 3 = parcialmente aplicada, 4 = aplicada con limitaciones, 5 = plenamente aplicada y funcional.

Generación de microclimas, mediante cortinas rompe vientos

Es la relación entre el número de fincas que implementan cortinas rompe vientos y el número de fincas totales; se expresa en porcentaje.

Incorporación de materia orgánica en el suelo

Es la relación entre el número de UPAs que incorporan la materia orgánica con respecto a las totales, y se expresa en porcentaje. También se puede complementar anotando la cantidad de MO y contenido de humedad en el suelo (Tácuna et al., 2015).

Nivel de tecnificación de los sistemas de riego

Dependerá de la infraestructura existente y su estado, así como también del método de riego utilizado, y se expresa en una escala de 1 a 5.

Nivel de conocimientos de la cantidad de agua a aplicar en la parcela

Es la relación entre los conocimientos del regante con conocimientos básicos de la aplicación del agua en la parcela. Se mide en base a la escala de valores: muy bueno, bueno, regular y malo (Hussain et al., 2007).

Nivel de aceptación de cambios tecnológicos y sociales

Se evalúa la apropiación de tecnología y prácticas agrícolas innovadoras en el agroecosistema; se propone como condición deseable siete o más prácticas innovadoras en los últimos cinco años y se expresa en porcentaje (Fonseca-Carreño et al., 2016).

Distribución del agua según las necesidades hídricas del cultivo y la superficie

Para esta distribución (caudal) se consideran las necesidades hídricas según el tipo de cultivo (q) multiplicado por el área de producción (A) según la ecuación 11.

$$Q = q(L/s/ha) \times A(ha) \quad (11)$$

Mujeres y hombres que participan en la directiva de la organización

La participación de los actores en los sistemas comunitarios es fundamental en especial la de las mujeres, y evidencia una gestión más equitativa que garantiza a la vez su derecho al agua. Se estima como el porcentaje de mujeres en la directiva de la organización con respecto al total de miembros (Chidiac et al., 2023).

Jóvenes que participan en la directiva de la organización

De igual forma, la participación de jóvenes en la directiva evidencia la sostenibilidad social en términos de transición entre los actores para asumir la gestión del agua. Se estima como el porcentaje de jóvenes en la directiva de la organización con respecto al total de miembros (Chidiac et al., 2023).

Régimen tarifario basado en el presupuesto anual

Este indicador informa la sostenibilidad económica, y dependiendo de los componentes que se consideran dentro del presupuesto se podrá realizar una

gestión y manejo eficiente del sistema de riego; se expresa en la existencia y grado de cumplimiento con una escala del 1 al 5.

Tarifificación en base a superficie y rentabilidad del cultivo

Este indicador evalúa si el sistema de riego aplica tarifas diferenciadas según la superficie cultivada y la rentabilidad de los cultivos irrigados. Una estructura tarifaria basada en estos criterios promueve la equidad y eficiencia económica en la gestión del recurso hídrico, al considerar la capacidad productiva de cada unidad agrícola. Unidad de medida escala cualitativa del 1 al 5.

Gestión de proyectos

La capacidad de la organización para generar y financiar proyectos es un indicador del nivel de planificación estratégica y operativa para mejorar el sistema. Se estima como alta: 5-4 proyectos; media 3-1 proyectos y baja 0 (Arnés et al., 2013).

Articulación de acciones con las instituciones públicas

Este indicador tiene que ver con la gobernanza de los sistemas y evidencia el nivel de coordinación de la organización con las instituciones públicas a fin de lograr el financiamiento para proyectos, asistencia técnica, crédito, capacitación y otras acciones como parte de la implementación de políticas y marcos legales nacionales o locales (Cobo et al., 2018). Se estima como nivel alto: 5-4 acciones; media 3-1 acciones y baja 0 o ninguna.

Articulación de acciones con instituciones de la sociedad civil

Al igual que la articulación con instituciones públicas, este indicador indica la gobernanza entre los actores de la sociedad civil, que pueden ser organizaciones de regantes vecinas y de la misma cuenca o subcuenca (Cobo et al., 2018). Se estima como nivel alto: 5-4 acciones; media 3-1 acciones y baja 0 o ninguna.

Nivel de democracia y alternancia de dirigentes

Este indicador se estimará en la medida de que se haya identificado en los puntos críticos de la organización. Es de carácter cualitativo. Se estima mediante escala categórica: alto cuando se cumple lo

que establece la normativa respecto a la elección y renovación de dirigencias y toma de decisiones; medio si se cumple parcialmente; y bajo cuando no se cumple (González et al., 2006).

Nivel de conocimientos en gestión y manejo del sistema por parte de los dirigentes

Este indicador mide el grado de conocimiento que poseen los dirigentes de los sistemas de riego sobre los aspectos técnicos, sociales, ambientales y de gobernanza relacionados con el uso y manejo del agua. Un nivel adecuado de conocimientos es fundamental para asegurar una gestión eficaz, fortalecer la sostenibilidad social y facilitar la implementación de normativas que prevengan conflictos dentro y fuera de la organización (González et al., 2006). Unidad de medida: escala cualitativa del 1 al 5, donde: 1 = conocimiento nulo, 2 = conocimiento básico, 3 = conocimiento medio, 4 = conocimiento alto, 5 = conocimiento integral y aplicado de forma efectiva.

Nivel de equidad en aportes de trabajo para el mantenimiento en función de la superficie

El manejo y gestión del sistema requieren la participación de todos los usuarios, sin embargo, un punto crítico es la inequidad en los trabajos de mantenimiento. La participación en los trabajos de acuerdo con la superficie que tiene cada usuario indica la equidad. Es un indicador cualitativo: alto= si, bajo= no.

Administración del sistema de riego

Este indicador informa las prácticas que son indispensables para el manejo económico eficiente del sistema. La sostenibilidad se verá reflejada por la existencia de tres instrumentos básicos: la planificación, el presupuesto y la contabilidad. Así, se estimará como alta cuando tienen los 3 instrumentos, media cuando tienen 2 y baja cuando tiene 1 o ninguno.

Reinversión en el sistema de riego

Para este indicador se considerará el Rendimiento de Reinversión (RR) según la ecuación 12.

$$RR = \frac{\text{Flujos de efectivo totales generados}}{\text{Flujos de efectivo totales reinvertidos}} - 1 \quad (12)$$

Tabla 3. Indicadores en relación con los ODS y Principios CSA-IRA.

AtributosN°	Indicadores de sostenibilidad				Relación ODS-CSA-IRA			
	Descripción	Unidad de Medida	Valor Mínimo	Valor Máximo	ODS	Metas	Principios CSA- IRA	
A1	1	Eficiencia del sistema desde la captación hasta la parcela	%	50	90	9	9.5 Aumentar la investigación científica y capacidad tecnológica.	6
	2	Eficiencia de aplicación del agua en la parcela	%	50	96	9	9.5 Aumentar la investigación científica y capacidad tecnológica	1
						12	12.2. Lograr el uso eficiente de los recursos naturales	6
	3	Relación retorno económico y volumen de agua utilizada	m3/\$	0,1	10	8	8.4. Mejorar la producción y consumo eficiente y respetuoso	2
	4	Relación de volumen de agua usada con el número de empleos generados	m3/jornales	0,1	10	8	8.5. Lograr el pleno empleo y trabajo decente.	2
	5	Relación beneficio-costos	unidad	0,1	1	8	8.2. Elevar la productividad a través de la diversificación, tecnología e innovación.	1
	6	Monto de inversión por hectárea	\$/ha	500	4000			2
	7	Monto de inversión por usuario de riego	\$/usuario	100	4000			
A2	8	Índice de escasez	%	40	90	9	9.5 Aumentar la investigación científica y la capacidad tecnológica.	6
						11	11.1. Apoyar a los vínculos zonas urbanas, periurbanas y rurales.	
	9	Prácticas de conservación de fuentes de agua	unidad	1	5	11	11.4 Proteger el patrimonio cultural y natural.	6
						15	15.1 Asegurar la conservación y uso sostenible de los ecosistemas.	
	10	Índice de calidad del agua	%	50	100	6	6.3 Mejorar la calidad de agua. Reducir la contaminación y aguas residuales.	6
	11	Diversidad de cultivos en las UPA	%	50	100	2	2.5 Mantener la diversidad genética de semillas.	17
						15	15.4 Asegurar la conservación de ecosistemas montañosos.	
A3	12	Relación de costos de operación, mantenimiento y administración con los ingresos	unidad	1	5	8	8.2 Elevar la productividad a través de la diversificación, tecnología e innovación.	2
						10	10.1. Promover el crecimiento de los ingresos del 40% en la población pobre.	
	13	Existencia de normativas para la gestión y manejo del sistema	unidad	1	5	16	16.b Fortalecer la participación de los países en desarrollo en OOI.	9
A4	14	Generación de microclimas, mediante cortinas rompe vientos.	%	50	100	2	2.4 Realizar prácticas agrícolas sostenibles y duraderas.	6
	15	Incorporación de materia orgánica en el suelo	%	50	100			1
							8	

	16	Nivel de tecnificación de los sistemas de riego	unidad	1	5	9	9.5. Aumentar la investigación científica, y la capacidad tecnológica.	1
								8
A5	17	Nivel de conocimientos de la cantidad de agua a aplicar en la parcela	unidad	1	5	12	12.2 Lograr el uso eficiente de los recursos naturales.	3
	18	Nivel de aceptación de los cambios tecnológicos y sociales	unidad	1	5	11	11.a Apoyar a los vínculos de las zonas urbanas, periurbanas y rurales.	7
A6	19	Distribución del agua según las necesidades hídricas del cultivo y superficie	unidad	1	5	2	2.4 Realizar prácticas agrícolas sostenibles y resilientes.	1
	20	Mujeres y hombres que participan en la directiva de la organización	unidad	1	5	5	5.5 Asegurar el acceso a la salud sexual y reproductiva y a los derechos reproductivos.	3
	21	Jóvenes que participan en la directiva de la organización	unidad	1	5	10	10.3 Garantizar la igualdad de oportunidades.	3
						16	16.b Promover y aplicar leyes y políticas (DDHH).	
	22	Régimen tarifario basado en el presupuesto anual	unidad	1	5	9	9.5 Aumentar la investigación científica y la capacidad tecnológica.	7
	23	Tarifificación en base a superficie y rentabilidad del cultivo	unidad	1	5			
A7	24	Capacidad de la organización en gestión de proyectos	unidad	1	5	10	10.3 Garantizar la igualdad de oportunidades	7
						16	16.b Promover y aplicar leyes y políticas (DDHH).	
	25	Articulación de acciones con las instituciones públicas	unidad	1	5	16	16.6 Crear instituciones eficaces y transparentes.	9
	26	Articulación de acciones con las instituciones de la sociedad civil	unidad	1	5		16.7 Fomentar la participación ciudadana.	
	27	Nivel de alternancia de los dirigentes	unidad	1	5			
	28	Nivel de conocimientos en gestión y manejo del sistema por parte de los dirigentes	unidad	1	5			
	29	Nivel de equidad en los aportes de trabajo para el mantenimiento en función de la superficie	unidad	1	5			
	30	Administración financiera del sistema de riego	unidad	1	5	16	16.5 Reducir la corrupción y soborno.	2
	31	Reinversión en el sistema de riego	unidad	1	5		16.6 Crear instituciones eficaces y transparentes.	

4 Discusión

El presente estudio logró definir 31 indicadores para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de riego

comunitarios en Ecuador, alineados con los ODS y los Principios CSA-IRA. Esta definición se realizó mediante una metodología participativa basada en el enfoque MESMIS y la técnica del Panel Delphi,

lo que permitió considerar las particularidades de los sistemas de riego en el contexto andino ecuatoriano. Se identificaron tres componentes esenciales: naturaleza, comunidad e infraestructura. Estos elementos, estrechamente interrelacionados, reflejan las dinámicas ecológicas, sociales y técnicas que configuran la gestión del riego en los territorios andinos (Cachipuendo Ulcuango, 2021; Mazabel and Caldera, 2018). La caracterización del modelo permitió entender cómo los factores endógenos (capacidad organizativa, gestión interna, tecnificación) y exógenos (variabilidad climática, presión sobre fuentes hídricas) afectan la sostenibilidad de los sistemas.

El análisis de 13 criterios de diagnóstico y 21 puntos críticos distribuidos en siete atributos (productividad, estabilidad, confiabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autogestión) evidenció las debilidades estructurales comunes. Por ejemplo, en el atributo productividad, se observaron deficiencias en la eficiencia del sistema y baja rentabilidad de los cultivos irrigados (Morris, 2019; Contero and Cachipuendo, 2021), lo que repercute en la viabilidad económica y el uso racional del recurso hídrico.

La estabilidad del sistema mostró riesgos importantes asociados a la degradación de las fuentes de agua y pérdida de biodiversidad, en línea con estudios previos que advierten sobre el deterioro de los ecosistemas de páramo (Llambí et al., 2012). Asimismo, la baja implementación de las prácticas conservacionistas refuerza la necesidad de enfoques que integren la gestión ambiental con la planificación productiva (Chile and Ortiz, 2021).

En cuanto a la confiabilidad, la limitada capacidad financiera para el mantenimiento y la operación del sistema y la escasa implementación de normativas internas son factores que debilitan su sostenibilidad económica e institucional (Perugachi and Cachipuendo, 2000). Este hallazgo coincide con los estudios que vinculan la gobernanza del agua con la presencia de normas claras y mecanismos de participación efectiva (Cobo et al., 2018).

El atributo resiliencia reveló escasos mecanismos para enfrentar el estrés climático, como la tecnificación del riego y prácticas para conservar la humedad en el suelo (Ward, 2022), lo cual compromete la capacidad adaptativa de los sistemas frente

a eventos extremos. En este punto, la innovación tecnológica aparece como una necesidad prioritaria.

Respecto a la adaptabilidad, se evidenció una limitada apropiación de los conocimientos y tecnologías por parte de los regantes, lo que restringe su capacidad de respuesta ante cambios socioambientales (van Opstal et al., 2022). Esta falta de apropiación también afecta el atributo de equidad, especialmente por baja la participación de jóvenes y mujeres en espacios de toma de decisión, lo que limita la transición generacional y la inclusión (Elmusa, 1994; Chidiac et al., 2023).

Por último, en la dimensión de autogestión se evidenció una débil articulación institucional y deficiencias en el liderazgo y administración financiera, lo que refleja una baja autosuficiencia organizativa. Esta situación compromete la gobernanza comunitaria y dificulta la sostenibilidad a largo plazo (Cortez, 2000; González et al., 2006).

La vinculación de los indicadores con 10 ODS y 7 Principios CSA-IRA (Garcés and Padilla, 2020; FAO, 2014) refuerza el aporte estratégico de estos sistemas de riego al desarrollo sostenible. La propuesta metodológica ofrece así una herramienta operativa para evaluar e intervenir los sistemas de riego comunitarios desde una perspectiva holística, dinámica y localizada (Pérez-Serrano et al., 2021).

No obstante, existen ciertas limitaciones: la validación de los indicadores se restringe al contexto andino ecuatoriano, la aplicación de la técnica del Panel Delphi conlleva sesgos subjetivos, y la vinculación con ODS y CSA-IRA es de carácter conceptual. Estas limitaciones abren la posibilidad a futuras investigaciones para que profundicen en la validación empírica y en la adaptación del modelo en otros contextos geográficos.

5 Conclusiones

Esta investigación desarrolló una propuesta metodológica integral para evaluar la sostenibilidad de sistemas de riego comunitarios en el contexto andino ecuatoriano, mediante la definición de 31 indicadores organizados en siete atributos clave: productividad, estabilidad, confiabilidad, resiliencia

cia, adaptabilidad, equidad y autogestión. Estos indicadores se agruparon en cinco dimensiones de análisis (ambiental, social, económica, tecnológica y política), y se estructuraron considerando tres componentes del sistema: naturaleza, comunidad e infraestructura.

Los hallazgos revelan múltiples puntos críticos que afectan la sostenibilidad de estos sistemas, como la ineficiencia en el uso del agua, débil gobernanza, baja participación de grupos clave, y capacidad limitada de adaptación frente al cambio climático. Mediante el enfoque participativo de MESMIS y la técnica del Panel Delphi, se logró una caracterización contextualizada de los sistemas, permitiendo su articulación con diez ODS y siete Principios CSA-IRA.

A nivel regional, los resultados brindan una herramienta práctica para los actores comunitarios, instituciones públicas y políticas, útil para el diseño, monitoreo y evaluación de estrategias de gestión hídrica en los territorios irrigados. A nivel global, la propuesta contribuye al reporte del cumplimiento de metas internacionales de sostenibilidad, consolidando a los sistemas de riego comunitarios como actores clave en la agricultura resiliente e inclusiva. No obstante, se recomienda validar empíricamente los indicadores en otros contextos y ampliar la participación de actores en su implementación, a fin de fortalecer su aplicabilidad y alcance. Así, este estudio constituye un avance en la construcción de marcos metodológicos integradores para una gestión sostenible del agua en la agricultura y evitar presiones en ecosistemas estratégicos como los páramos.

Contribuciones de los autores

C.C.: Conceptualización, tratamiento de datos, Discusión. M.I.: Conceptualización, tratamiento de datos, Discusión. N.R.: Conceptualización, tratamiento de datos, en la relación de los indicadores con los ODS y principios IRA.

Referencias

Araral, E. (2005). Bureaucratic incentives, path dependence, and foreign aid: An empirical institutional analysis of irrigation in the philippines. *Po-*

licy Sciences, 38(2-3):131–157. Online: <https://bit.ly/4muq7N7>.

Arnés, E., Antonio, J., del Val, E., and Astier, M. (2013). Sustainability and climate variability in low-input peasant maize systems in the central Mexican highlands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.

Astier, M., Maser, O., and Galván-Miyoshi, Y. (2008). *Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional*. SEAE / CIGA / ECOSUR / CIEco / UNAM / GIRA / Mundiprensa / Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable.

Brugnach, M., Craps, M., and Dewulf, A. (2017). Including indigenous peoples in climate change mitigation: addressing issues of scale, knowledge and power. *Climatic Change*.

Cachipuendo, C. (2022). The technification of irrigation as a strategy of community resilience. case study: Pisque river basin, Ecuador. In Rocha, A., López-López, P., and Salgado-Guerrero, J., editors, *Communication, Smart Technologies and Innovation for Society - Proceedings of CITIS 2021, Smart Innovation, Systems and Technologies*, pages 207–216. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.

Cachipuendo, C., Sandoval, C., and Sandoval, J. (2024). Sentinel-2a imaging in mapping greenhouse rose production and rainwater harvesting for agricultural irrigation use. *Environmental Research Communications*, 6(11):111005. Online: <https://bit.ly/4m55qYr>.

Cachipuendo Ulcuango, C. (2021). *La Gestión Comunitaria del Agua y la Sustentabilidad de los Sistemas de Riego: Una Práctica del Buen Vivir, En Agua para la gente*, pages 139–168. Cachipuendo, C. (Coordinador). Editorial Universitaria Abya-Yala.

Cachipuendo Ulcuango, C., Castillo Izurieta, P., Cucurella Landín, L., Sánchez Proaño, R., Negrete Rodríguez, J., Ortiz-Tirado, P., Paucar Tenemaza, A., Uribe Taborda, S., and Villacís López, M. (2021). *Agua para la gente: experiencias de gestión comunitaria del agua en el Ecuador*. Editorial Universitaria Abya-Yala.

Carmona, G., Varela-Ortega, C., and Bromley, J. (2013). Participatory modelling to support deci-

- sion making in water management under uncertainty: two comparative case studies in the guadiana river basin, spain. *Journal of environmental management*.
- Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., and El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (wqis): history, models, attempts and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*.
- Chile, B. and Ortiz, R. (2021). Dinámica de la distribución del agua en el sistema de riego Tumbaco en Ecuador. *Siembra*, 8(2):e3074. Online: <https://bit.ly/3Hbpol9>.
- Cobo, E., Yaguache, R., Piñeiros, M., Friant, M., and Montella, R. (2018). *Aguas Compartidas, enfoques y herramientas para una mejor gestión del agua*.
- Contero, R. and Cachipueno, C. (2021). Quality of water and milk in manual milking systems in the northern sierra of Ecuador. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Peru*, 32(4):1–10. Online: <https://bit.ly/4ld7hZN>.
- Cortez, A. (2000). La autogestión de usuarios hidroagrícolas del valle de Mexicali. efectos del proceso de transferencia. *Estudios Fronterizos*, 1(2):65–91. Online: <https://bit.ly/4mdxBEM>.
- Costa, M., Xavier, A., R., F., and C., A. (2022). A composite indicator to measure sustainable water use in portugal: A compromise programming approach. *Journal of Environmental Management*.
- Darzi-Naftchali, A., Bagherian-Jeladar, M., Mashhada-Kholerdi, F., and Abdi-Moftikolaei, M. (2020). Assessing socio-environmental sustainability at the level of irrigation and drainage network. *Science of the Total Environment*.
- Elmusa, S. (1994). Towards an equitable distribution of the common palim- israeli waters: An international water law framework. *Studies in Environmental Science*.
- FAO (2014). Principles for responsible investment in agriculture and food systems. Technical report, FAO & CFS.
- Fernald, A., Tidwell, V., Rivera, J., Rodriguez, S., Guldan, S., Steele, C., Ochoa, C., Hurd, B., Ortíz, M., Boykin, K., and Cibils, A. (2012). Modeling sustainability of water, environment, livelihood, and culture in traditional irrigation communities and their linked watersheds. *Sustainability*, 4(11):2998–3022. Online: <https://bit.ly/47hPehJ>.
- Fonseca-Carreño, J., Cleves-Leguízamo, J., and León-Sicard, T. (2016). Evaluación de la sustentabilidad de agroecosistemas familiares campesinos en la microcuenca del río cormechoque (boyacá). *Ciencia y agricultura*, 13(1):29. Online: <https://bit.ly/4lc1X97>.
- Franco, J., Gaspar, P., and Mesias, F. (2012). Economic analysis of scenarios for the sustainability of extensive livestock farming in spain under the cap. *Ecological Economics*.
- Gallegos, E., Brito, C., Serrano, D., and Galárraga, R. (2018). Análisis de la variación temporal y espacial de la cobertura glaciar del nevado cayambe, ecuador, mediante fotografías aéreas e imágenes landsat. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 22(1578–5157):97–113. Online: <https://bit.ly/4IZ02G8>.
- Garcés, J. and Padilla, L. (2020). Inversión responsable en la agricultura . diagnóstico en zona afectada por conflicto armado en colombia. *Revista Sinapsis*.
- Gaybor, A. (2019). Análisis exploratorio hacia la comprensión de evolución tecnológica del riego en el ecuador. *Revista Economía*, 70(112):33–51. Online: <https://bit.ly/4mAECzg>.
- González, C., Ríos, H., Brunnet, P., Zamorano, S., and Villa, C. (2006). ¿es posible evaluar la dimensión social de la sustentabilidad?: Aplicación de una metodología en dos comunidades campesinas del valle de toluca, méxico. *Convergencia: Revista de ciencias sociales*, 13(40):107–139. Online: <https://bit.ly/3Hafb8x>.
- Guo, Y. and Yu, G. (2022). Materials innovation for global water sustainability. *ACS Materials Letters*, 4(4):713–714. Online: <https://bit.ly/3Hm6qbm>.
- Herrán, J., Sastre, S., and Torres-Tukoumidis, . (2017). Radio mensaje para la gestión del sistema de riego en comunidades rurales indígenas de ecuador. *Equidad y Desarrollo*, 28(2014):43–60. Online: <https://bit.ly/4m4pEBs>.
- Hussain, I., Turrall, H., Molden, D., and Din Ahmad, M. (2007). Measuring and enhancing the value of

- agricultural water in irrigated river basins. *Irrigation Science*, 25(3):263–282. Online: <https://bit.ly/45lLI3p>.
- Jägermeyr, J., Pastor, A., Biemans, H., and Gerten, D. (2017). Reconciling irrigated food production with environmental flows for sustainable development goals implementation. *Nature Communications*, 8(15900):1–9. Online: <https://bit.ly/41ufXny>.
- Laali, A., Hosseini, S., and Faghihi, V. (2022). Optimizing sustainability of infrastructure projects through the integration of building information modeling and envision rating system at the design stage. *Sustainable Cities and Society*.
- Llambí, L., Soto, W., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., and Borja, P. (2012). *Ecología, Hidrología y Suelos de Páramos. Proyecto Páramo Andino*. Condensan. Online: <https://bit.ly/4m3BfRc>.
- Masera, O., Astier, M., and López-Riduara, S. (2000). *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS*. Mundi-Prensa.
- Mazabel, D. and Caldera, A. (2018). Self-sustaining, irrigated agriculture and sustainability. a study in southern guanajuato, mexico. *International Journal of Research in Sociology and Anthropology*, 4(1):24–35. Online: <https://bit.ly/41wYBXb>.
- Meng, Y., Wang, M., Xu, W., Guan, X., and Yan, D. (2022). Structure construction, evolution analysis and sustainability evaluation of water-ecological-economic system. *Sustainable Cities and Society*, 83:103966. Online: <https://bit.ly/4oh1sXg>.
- Morris, J. (2019). Developing and exploring indicators of water sustainable development. *Heliyon*, 5(5):e01778. Online: <https://bit.ly/4opszX9>.
- Nagrah, A., Chaudhry, A., and Giordano, M. (2016). Collective action in decentralized irrigation systems: Evidence from pakistan. *World Development*.
- Newman, R., Ashley, R., Molyneux-Hodgson, S., and Cashman, A. (2011). Managing water as a socio-technical system: the shift from ‘experts’ to ‘alliances’. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 164(1):95–102. Online: <https://bit.ly/4ovmZTa>.
- Persson, A., Weitz, N., and Nilsson, M. (2016). Follow-up and review of the sustainable development goals: Alignment vs. internalization. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, 25(1):59–68. Online: <https://bit.ly/4lZT1VD>.
- Perugachi, J. and Cachipueno, C. (2000). *La lucha por el agua. Gestión Comunitaria del Proyecto de Agua Potable Pesillo-Imbabura*. Editorial Abya-Yala. Online: <https://bit.ly/3J30xAx>.
- Playan, E. (1994). Geórgica. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, 3.
- Pérez-Serrano, D., Cabirol, N., Martínez-Cervantes, C., and Rojas-Oropeza, M. (2021). Mesquite management in the mezquital valley: A sustainability assessment based on the view point of the hñāhñú indigenous community. *Environmental and Sustainability Indicators*, 10:100113. Online: <https://bit.ly/47lkWL3>.
- Ríos, J., Torres, M., Ruiz, J., and Torres, M. (2016). Eficiencia y productividad del agua de riego en trigo (*Triticum vulgare*) de ensenada y valle de Mexicali, Baja California, México. *Acta Universitaria*, 26(1):20–29. Online: <https://bit.ly/4m2IXel>.
- Samian, M., Mahdei, K., Saadi, H., and Movahedi, R. (2015). Identifying factors affecting optimal management of agricultural water. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(1):11–18. Online: <https://bit.ly/41oE9YA>.
- Sarandón, S. (2010). *Agroecología. El Camino hacia una agricultura sustentable*, chapter El desarrollo y uso de indicadores para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas, page 393–414.
- Shalsi, S., Ordens, C., Curtis, A., and Simmons, C. (2022). Coming together: Insights from an Australian example of collective action to co-manage groundwater. *Journal of Hydrology*, 608:127658. Online: <https://bit.ly/45BHDcJ>.
- Stephens, P. (2013). The principles of responsible agricultural investment. *Globalizations*, 10(1):187–192. Online: <https://bit.ly/45FRE8L>.
- Talukder, B., Blay-Palmer, A., van Loon, G., and Hipel, K. (2020). Towards complexity of agricultural sustainability assessment: Main issues and concerns. *Environmental and Sustainability Indicators*, 6:100038. Online: <https://bit.ly/4lk1WAe>.

- Tácuna, R., Aguirre, L., and Flores, E. (2015). Influencia de la revegetación con especies nativas y la incorporación de materia orgánica en la recuperación de pastizales degradados. *Ecología Aplicada*, 14(1-2):191. Online:https://bit.ly/4lIVSHt.
- Tongo, E. and Soplín, H. (2022). Evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de producción pecuaria en la provincia de oxapampa / pasco / Perú. *Ecología Aplicada*, 21(1):67–75. Online:https://bit.ly/4lIWwVp.
- Turner, B., Tidwell, V., Fernald, A., Rivera, J., Rodriguez, S., Guldán, S., Ochoa, C., Hurd, B., Boykin, K., and Cibils, A. (2016). Modeling acequia irrigation systems using system dynamics: Model development, evaluation, and sensitivity analyses to investigate effects of socio-economic and biophysical feedbacks. *Sustainability*, 8(10):1019. Online:https://bit.ly/4fxWE2Q.
- United Nations (2015). Transformar nuestro mundo: la agenda 2030 para el desarrollo sostenible. techreport, New York. Asamblea General de las Naciones Unidas.
- Valdez, C., Guzmán, M., Valdés, A., Forougbakhch, R., Alvarado, M. A., and Rocha, A. (2018). Structure and diversity of pristine scrubland vegetation from tamaulipas, Mexico. *Revista De Biología Tropical*, 66(4):1674–1682. Online:https://bit.ly/45umqAp.
- Vallejo, F., Salazar, M., Nieto, L., and Giraldo, R. (2020). Sustainability of agroecosystems in a Rural Reserve Area of Pradera, Valle del Cauca, Colombia. *Environmental and Sustainability Indicators*, 7:100040. Online:https://bit.ly/4fxHASO.
- van Opstal, J., Neale, C., and Hipps, L. (2022). Evaluating the adaptability of an irrigation district to seasonal water availability using a decade of remotely sensed evapotranspiration estimates. *Agricultural Water Management*, 261:107383. Online:https://bit.ly/45t1aeg.
- Velasco-Muñoz, J., Aznar-Sánchez, J., Belmonte-Ureña, L., and Sánchez, R. (2018). Sustainable water use in agriculture: A review of worldwide research. *Sustainability*, 10(4):1–18. Online:https://bit.ly/3J60XGc.
- Wang, Y. and Wu, J. (2018). An empirical examination on the role of water user associations for irrigation management in rural China. *Water Resources Research*, 54(12):9791–9811. Online:https://bit.ly/4osrfCQ.
- Ward, F. (2022). Enhancing climate resilience of irrigated agriculture: A review. *Journal of Environmental Management*, 302(PA):114032. Online:https://bit.ly/46OCYW4.