

INTEGRACIÓN DE GEOMÁTICA PARTICIPATIVA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO COMUNITARIOS: CASO DE ESTUDIO CANAL DE RIEGO CAYAMBE-PEDRO MONCAYO (ECUADOR)

INTEGRATION OF PARTICIPATORY GEOMATICS FOR SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT IN COMMUNITY IRRIGATION SYSTEMS: CASE STUDY OF THE CAYAMBE-PEDRO MONCAYO IRRIGATION CANAL (ECUADOR)

Catalina Elizabeth Sandoval-Montenegro^{a,*}, Antonio Vázquez-Hoehne^a, Charles Jim Cachipundo-Ulcuango^b

^a Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, c/ Mercator 2, 28031 Madrid, España.
 c.sandoval@alumnos.upm.es;  antonio.vazquez.hoehne@upm.es

^b Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales, Universidad Politécnica Salesiana, Av. Natalia Jarrin y 9 de octubre, 170102 Cayambe, Ecuador.  ccachipundo@ups.edu.ec

How to cite: C.E. Sandoval-Montenegro, A. Vázquez-Hoehne y C.J. Cachipundo-Ulcuango. 2025. Integración de geomática participativa para la gestión sostenible del agua en sistemas de riego comunitarios: Caso de estudio canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo (Ecuador). En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19875>

Resumen:

El avance tecnológico en la geomática permite generar técnicas y herramientas que optimizan la planificación y mejoran la toma de decisiones en la gestión sostenible de sistemas de riego. Sin embargo, en sistemas de riego comunitarios en regiones con recursos hídricos limitados no se utilizan estas tecnologías, por lo que la distribución del agua se enfrenta a conflictos de equidad, eficiencia y sostenibilidad de los territorios. Estos problemas suelen estar relacionados con poca planificación técnica por la escasa información espacial actualizada e integración del conocimiento local para la toma de decisiones. Estas deficiencias impactan negativamente en la productividad agrícola y en la sostenibilidad de los elementos naturales de los territorios comunitarios. Así, el objetivo fue diseñar un modelo de distribución del agua sostenible basado en la geomática participativa comunitaria, que optimice la distribución del agua en sistemas de riego comunitarios, promoviendo la equidad y el uso eficiente de los sistemas de riego. El estudio de caso se realiza en el sistema de riego Cayambe-Pedro Moncayo Ecuador, considerando la integración de técnicas de SIG, teledetección y análisis espacial, con la participación activa de las comunidades beneficiarias. La metodología incluye la creación de un catastro dinámico de riego que combina datos geoespaciales con información recopilada mediante talleres comunitarios, la estimación de la demanda hídrica de los cultivos utilizando imágenes satelitales, y la geolocalización de los componentes del sistema de riego y la evaluación técnica mediante la medición participativa de caudales. Entre los resultados se establecen las necesidades hídricas según los sistemas de producción del territorio irrigado y mapas temáticos que facilitan poner en práctica el modelo de distribución del agua. Se concluye que la participación comunitaria fortalece la autodeterminación local, la cohesión social y el uso eficiente del agua en la agricultura aportando al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (acceso equitativo al agua, agricultura sostenible e inclusión social).

Palabras clave: Geomática participativa, Eficiencia técnica hídrica, Sistemas de riego comunitarios, Equidad en el riego, Territorios irrigados

Abstract:

Technological advancements in geomatics have enabled the development of techniques and tools that optimize planning and improve decision-making for the sustainable management of irrigation systems. However, in communal irrigation systems located in regions with limited water resources, these technologies are not often used. As a result, water distribution faces significant challenges related to equity, efficiency, and territorial sustainability. These issues are typically linked to a lack of technical planning, the absence of updated spatial information, and limited integration of local knowledge in the decision-making process. Such deficiencies negatively impact agricultural productivity and the sustainability of community-managed resources. Therefore, the objective of this research is to design a sustainable water distribution model based on community-based participatory geomatics, aimed at optimizing water allocation in communal irrigation systems, while promoting equity and the efficient use of irrigation infrastructure. The case study focuses on the Cayambe-Pedro Moncayo irrigation system in Ecuador and considers the integration of GIS techniques, remote sensing,

* Corresponding Author: Catalina Elizabeth Sandoval-Montenegro, c.sandoval@alumnos.upm.es

and spatial analysis with the active participation of the beneficiary communities. The methodology includes the creation of a dynamic irrigation cadastre that combines geospatial data with information collected through community workshops, the estimation of crop water demand using satellite imagery, the geolocation of irrigation system components, and the technical evaluation of the system through participatory flow measurements. The results include the identification of crop water requirements based on the productive systems within the irrigated territory, as well as thematic maps that support the implementation of the proposed water distribution model. It is concluded that community participation also strengthens local self-determination and social cohesion. This contributes to the achievement of the Sustainable Development Goals (equitable access to water, sustainable agriculture, and social inclusion).

Key words: Participatory geomatics, Technical water efficiency, Community irrigation systems, Irrigation equity, Irrigated territories

1. Introducción

La gestión sostenible del agua en la agricultura representa uno de los mayores desafíos en contextos rurales de América Latina, particularmente en los territorios andinos, donde confluyen condiciones de escasez hídrica, fragmentación territorial, y sistemas de producción basados en la organización comunitaria. En estas regiones, los sistemas de riego comunitarios son fundamentales para la seguridad alimentaria y el sostenimiento de los modos de vida indígenas y campesinos. Sin embargo, su eficiencia y equidad se ven limitadas por poca planificación técnica, carencia de datos geoespaciales actualizados y escasa incorporación del conocimiento local en la toma de decisiones (Boelens and Zwaantje 2014; Manida 2022).

Frente a estas limitaciones, la geomática participativa emerge como una alternativa metodológica que combina técnicas avanzadas de teledetección, sistemas de información geográfica (SIG) y modelado espacial, con procesos participativos que involucran activamente a las comunidades en la generación y uso de datos (Sishodia *et al.* 2020). Este enfoque permite identificar de forma más precisa las necesidades hídricas de los cultivos, mejorar la planificación del riego y fortalecer la gobernanza local del agua (Bwambale *et al.* 2022; Mathenge *et al.* 2022).

A pesar del avance tecnológico en geomática, su aplicación en sistemas comunitarios de riego sigue siendo escasa en países como Ecuador. La tecnificación del riego ha estado tradicionalmente enfocada en la infraestructura física, dejando de lado los aspectos de información espacial y planificación colaborativa que podrían potenciar la sostenibilidad y equidad del recurso (Cachipundo *et al.* 2017). Esta situación ha generado una brecha significativa entre las capacidades de gestión del agua en zonas rurales y las potencialidades ofrecidas por las tecnologías disponibles (Bwambale *et al.* 2022).

Este artículo presenta una experiencia metodológica aplicada en el sistema de riego Cayambe–Pedro Moncayo, ubicado en la Sierra Norte del Ecuador, donde se desarrolló y validó un modelo de distribución equitativa del agua basado en geomática participativa. A partir de la combinación de datos obtenidos a partir de datos satelitales (NDVI, Kc, ETc, Pe), cartografía SIG, evaluación técnica del sistema de riego y la participación activa de los actores presentes en el territorio (usuarios, academia, gobierno provincial), se construyó un modelo integral orientado a mejorar la eficiencia técnica, promover el acceso justo al recurso y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas comunitarios.

El objetivo de este trabajo es diseñar y validar un modelo de distribución equitativa del agua en un sistema comunitario de riego, que integre tecnologías geomáticas y participación comunitaria como eje central. Este modelo busca responder a la necesidad de una gestión técnica, social y ambientalmente sostenible del recurso hídrico en territorios donde el agua es un bien común. Los resultados alcanzados contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Cachipundo *et al.* 2025).

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El sistema de riego Cayambe–Pedro Moncayo se localiza en la Sierra Norte del Ecuador, abarcando dos cantones de la provincia de Pichincha: Cayambe y Pedro Moncayo. La zona de influencia comprende más de 24000 hectáreas distribuidas en ocho parroquias rurales (Olmedo, Ayora, Ciudad Cayambe, Tupayachi, Tabacundo, La Esperanza, Tocachi y Malchinguí), y beneficia directamente a más de 10000 familias, en su mayoría pertenecientes al pueblo indígena Kayambi. La altitud varía entre los 2400 y 3500 m con condiciones agroecológicas diversas que influyen en los sistemas de producción.

2.2. Metodología

La Figura 1, presenta el esquema metodológico utilizado en esta investigación, el cual integra herramientas geomáticas, trabajo de campo y análisis matemático para lograr un modelo de distribución equitativa del agua de riego, con el objetivo de optimizar su uso y mejorar la eficiencia hídrica.

La metodología se estructura en las siguientes etapas:

1. Catastro dinámico de riego: A través de talleres participativos y herramientas geomáticas (SIG, INTERLIS y PgModel), se desarrolla un modelo conceptual y físico del sistema de riego. El catastro dinámico permite actualizar de manera continua la información sobre la infraestructura de riego, las parcelas agrícolas, y las características de los usuarios, facilitando una visión integral del sistema.

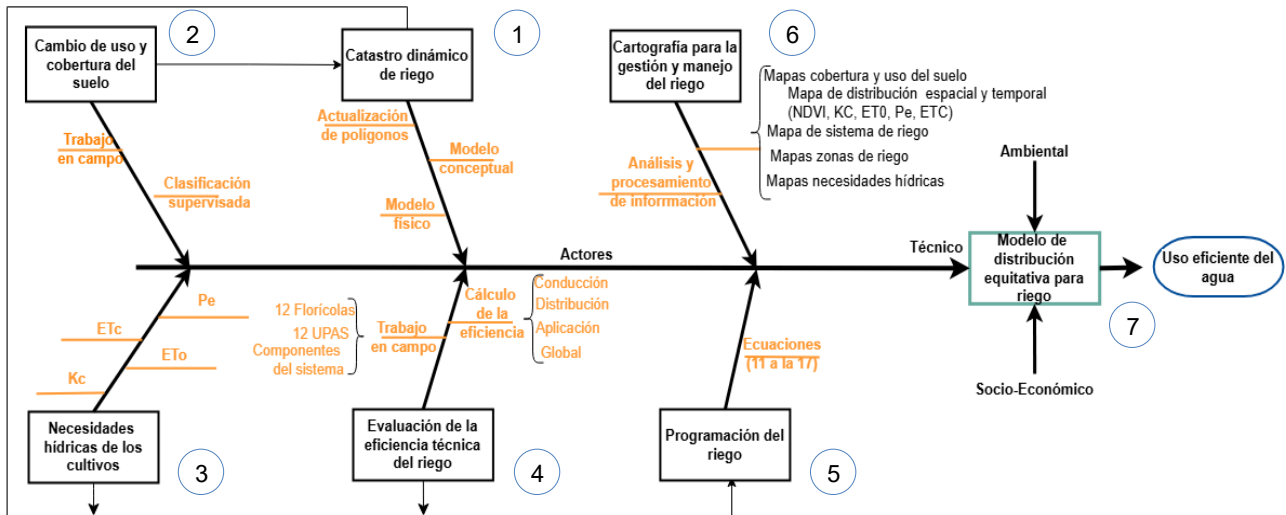


Figura 1: Esquema metodológico de la investigación.

2. Cambio de uso y cobertura del suelo: Incluye la recopilación de datos mediante trabajo de campo, GPS, ortofotos, inventarios, fotointerpretación y SIG. Se emplea la clasificación supervisada y la teledetección para identificar y actualizar los cambios en el uso y cobertura del suelo, generando mapas precisos que sirvan como insumo para las etapas posteriores. Los datos satelitales utilizados fueron de las misiones Landsat 5, 7 y 8 y Sentinel-2. Las imágenes son de los años 2000, 2001, 2011, 2012, 2019, 2020, 2022 y 2023, seleccionadas por su representatividad en la serie temporal de cambios de cobertura y en el comportamiento de los cultivos. La resolución espacial es de 30 m para Landsat y 10 y 20 m para Sentinel-2.
3. Determinación de las necesidades hídricas de los cultivos: Se calcularon los parámetros como el coeficiente de cultivo (K_c), a partir del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)). El NDVI se calcula a partir de los datos satelitales y mediante la Ec. (1):

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (1)$$

donde:

NIR = reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

R = reflectancia en la banda roja

El NDVI es la diferencia expresada numéricamente entre -1 y 1. De acuerdo a la relación lineal entre el NDVI y el coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) (Campos *et al.* 2010; Heclman *et al.* 1982), se obtienen el coeficiente de cultivo mediante la Ec. (2):

$$K_{cb} = 1.44 \cdot NDVI - 0.1 \quad (2)$$

El coeficiente de cultivo basal oscila entre 0,15 y 1,15. Esta ecuación ha sido utilizada en los cultivos herbáceos (maíz, sorgo, trigo) (Odi-Lara *et al.* 2016) y leñosos (viñedos, manzanas) (Allen *et al.* 2006).

Para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y la evapotranspiración del cultivo

(ET_c), se utilizaron los datos de satelitales de las plataformas Climate Engine y Earthdata y la Ec. (3):

$$ET_c = K_{cb} \cdot ET_0 \quad (3)$$

Estos cálculos son esenciales para determinar la cantidad de agua requerida por los cultivos (Nh) en tiempo casi real, sin tomar en cuenta el almacenamiento del agua en el suelo y el posible ascenso desde la capa freática. Se emplearon las Ecuaciones (4), (5) y (6) (Arteaga *et al.* 2011; Villazón-Gómez *et al.* 2021):

$$Pe = 0.6 \cdot Pp - 10; \quad Pp \leq 70mm \quad (4)$$

$$Pe = 0.8 \cdot Pp - 24; \quad Pp > 70mm \quad (5)$$

$$Nh = ET_c - Pe \quad (6)$$

donde:

Pe = precipitación efectiva

Pp = precipitación efectiva

4. Evaluación de la eficiencia técnica del riego: Mediante medición en campo y análisis geomático, se evalúan las eficiencias de conducción, distribución, aplicación y global del sistema de riego. Los datos obtenidos se integran en una base de datos georreferenciada para identificar puntos críticos en la infraestructura y planificar mejoras. Para el cálculo de las eficiencias, se emplearon las siguientes Ecuaciones (7), (8), (9), y (10) (Cachipiendo 2017; Playan-Jubillar 1994):

$$ECP = \frac{CSR D}{CC} \quad (7)$$

donde:

ECP = eficiencia de la conducción principal

$CSR D$ = caudal suministrado a las redes de distribución

CC = caudal captado

$$EDI = \frac{\sum(CEP)}{CIRD} \quad (8)$$

donde:

EDI = eficiencia de la conducción principal

CEP = caudal entregado a las parcelas

CIRD = caudal de ingreso a la red de distribución

$$EAP = \frac{N_h}{CAD} \quad (9)$$

donde:

EAP = eficiencia de aplicación

Nh = necesidades hídricas de los cultivos

CAD = caudal aplicada por el dispositivo

$$ESR = \frac{EAP}{100} \cdot \frac{EDI}{100} \cdot \frac{ECP}{100} \quad (10)$$

donde:

ESR = eficiencia del sistema de riego

EAP = eficiencia de aplicación a la parcela

EDI = eficiencia de distribución

ECP = eficiencia de la conducción principal

Para evaluar la eficiencia de los sistemas de riego en el área de estudio, se utilizó la clasificación presentada en la Tabla 1 (Ortiz *et al.* 2021). Esta tabla establece rangos de eficiencia en función de diferentes componentes del sistema de riego. Cada una de estas eficiencias se clasifica en cuatro niveles de desempeño:

- Muy buena: Valores superiores a los límites más altos establecidos para cada eficiencia.
- Buena: Valores intermedios altos, indicando un desempeño adecuado.
- Regular: Valores moderados, que requieren ajustes en el sistema.
- Pobre: Valores inferiores, que reflejan ineficiencia significativa y necesidad de mejora.

Tabla 1: Categorización eficiencias para un sistema de riego.

<i>EFC</i> (%)	<i>EDI</i> (%)	<i>EAP</i> (%)	<i>ESR</i> (%)	Clasificación
>88,8	>88,6	>66,1	>38,8	Muy buena
79,1-88,7	80,1-88,5	52,1-66,0	29,6-38,7	Buena
56,8-79,0	65,1-80,0	40,3-52,0	20,3-29,5	Regular
<56,7	<65,0	<40,2	<20,2	Pobre

5. Programación del riego: Determina cuánto, cuándo y cómo regar los cultivos para lograr la máxima eficiencia y productividad en el uso del agua. Para esta investigación los cultivos seleccionados fueron los de mayor predominancia en el territorio de estudio siendo el cultivo de rosas bajo invernadero, maíz y pastos. Con la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos mediante las herramientas y tecnologías geomáticas, se seleccionó el mes de mayor requerimiento hídrico.

A continuación, se describe los parámetros requeridos para la programación de riego.

Para calcular la humedad aprovechable, expresada en centímetros, se utilizó la Ec. (11). (Andrango *et al.* 2019; Fuentes and García 1999):

$$HA = \frac{CC - PMP}{100} \cdot Da \cdot P \quad (11)$$

donde:

HA = humedad aprovechable

CC = capacidad de campo

PMP = punto de marchitez permanente

Da = densidad aparente

P = profundidad de raíces del cultivo a regar

Estos datos se obtuvieron de los resultados de análisis de suelo que se hizo para el territorio de estudio con el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana.

Para calcular la lámina neta (*LN*), se determinó mediante la Ec. (12) (Andrango *et al.* 2019; Fuentes and García 1999). Este cálculo permitió establecer la cantidad de agua que debe aplicarse en cada ciclo de riego para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo, considerando la humedad disponible en el suelo y el umbral mínimo de humedad necesario para iniciar el riego.

$$LN = HA \cdot F \quad (12)$$

donde:

HA = humedad aprovechable

F = fracción de la humedad aprovechable o umbral de riego del 50%

Otro de los parámetros de la programación del riego es la frecuencia de riego en días (*FR*), que se calcula con la Ec. (13) (Andrango *et al.* 2019; Fuentes and García 1999), que permitió establecer el intervalo adecuado entre riegos para cubrir las necesidades hídricas del cultivo de manera eficiente.

$$FR = \frac{LN}{N_h} \quad (13)$$

Para calcular la dosis neta ajustada, se utilizó la Ec. (14) (Andrango *et al.* 2019; Fuentes and García 1999), que permite establecer la cantidad exacta de agua a aplicar en cada ciclo de riego, garantizando una distribución eficiente de los recursos hídricos.

$$Dn_{ajustada} = FR \cdot N_h \quad (14)$$

donde:

Dn ajustada = dosis neta ajustada en m³/ha

FR = frecuencia de riego en días

Nh = necesidades hídricas (m³/ha/día)

Otro parámetro a considerar en la programación del riego es el porcentaje de eficiencia de aplicación dependiendo del método de riego. En esta investigación los métodos identificados en el territorio de estudio de mayor uso es el método de aspersión y goteo. Para calcular la dosis total ajustada, expresada en m³/ha se empleó la Ec. (15). Este ajuste considera las pérdidas que

ocurren durante la distribución del agua, garantizando que la cantidad de agua aplicada sea la adecuada para optimizar el uso del recurso hídrico y cumplir con las necesidades del cultivo de manera eficiente.

$$Dt_{ajustada} = Dn_{ajustada} \cdot EAP \quad (15)$$

donde:

$Dt_{ajustada}$ = dosis total ajustada en m³/ha

$Dn_{ajustada}$ = dosis neta ajustada en m³/ha

Y para determinar el caudal continuo requerido para cada cultivo por unidad de superficie, en el intervalo de riego correspondiente al mes de mayor requerimiento hídrico, se utilizó la Ec. (16). Este cálculo permitió establecer el flujo de agua necesario para satisfacer las demandas hídricas del cultivo durante el período de mayor exigencia.

$$QR = \frac{Dt_{ajustada}}{FR} \quad (16)$$

donde:

QR = caudal requerido continuo unitario en l/s/ha

La distribución equitativa de recursos hídricos en sistemas de riego es un desafío crítico, especialmente en contextos de escasez de agua. Para esta investigación se emplea la Ec. (17), para programar el riego considerando el agua disponible para el sistema de riego, la superficie, el caudal requerido (de acuerdo a las necesidades hídricas), y la prioridad al sistema de producción presente en la parcela.

$$QA_i = \frac{S_i \cdot QR_i \cdot P_i}{\sum_{j=1}^n S_j \cdot QR_j \cdot P_j} \cdot QD \quad (17)$$

donde:

QA = caudal asignado a la parcela

S = área de la parcela en ha o m²

QR = caudal requerido del cultivo según las necesidades hídricas en l/s

P = prioridad que se le asigne a cada parcela dependiendo del sistema de producción (0 a 1)

n = número total de parcelas

QD = caudal total disponible para distribución en l/s

6. Cartografía para la gestión y manejo del riego: Generación de mapas temáticos, como los de cobertura del suelo, necesidades hídricas y distribución espacial y temporal del agua. Estos mapas son fundamentales para la toma de decisiones informadas y la planificación eficiente del riego.
7. Desarrollo del modelo de distribución equitativa para riego: El modelo integra aspectos técnicos, ambientales y socioeconómicos, utilizando tecnologías geomáticas avanzadas y un enfoque participativo. Busca garantizar un acceso equitativo

al agua y fomentar la sostenibilidad ambiental, social y económica en las comunidades beneficiarias.

3. Resultados

3.1. Catastro dinámico de riego y cambios en la cobertura y uso del suelo

El catastro permite registrar la infraestructura hidráulica, sistemas de producción agrícolas, usuarios, derechos (turnos) de riego y características productivas. Fue construido en PostgreSQL/PostGIS/pgModeler, y su modelo conceptual está estructurado por entidades como predios, usuarios, cultivos y redes de distribución. Esta herramienta facilita la actualización constante de datos y se convierte en un insumo fundamental para la programación del riego y la toma de decisiones. Los análisis multitemporales mostraron una transformación en la cobertura y uso del suelo durante el período 2000–2023 (Fig. 2). La expansión de cultivos permanentes como el pasto y las rosas, y la reducción de áreas forestales y de vegetación natural, fueron las principales tendencias observadas. El NDVI permitió caracterizar la dinámica de la vegetación, destacando un aumento en la productividad agrícola en zonas donde se intensificó el riego. Otro de los resultados fue el diseño y validación del catastro dinámico de riego, concebido como una base de datos geoespacial que integra información técnica, social y territorial.

3.2. Estimación de requerimientos hídricos de los cultivos

El NDVI (Fig. 3) fue procesado a partir de imágenes satelitales provenientes de las misiones Landsat y Sentinel-2, obteniendo curvas temporales que permitieron derivar el coeficiente de cultivo (Fig. 4) para pasto, maíz y rosas. A partir del Kc, se calculó la evapotranspiración del cultivo (Fig. 5) integrando datos de la evapotranspiración de referencia y precipitación efectiva (Fig. 6). Las necesidades hídricas de los cultivos (Fig. 7) fueron calculadas para el territorio en estudio, evidenciando diferencias según altitud, tipo de cultivo la cantidad de agua requerida para satisfacer la evapotranspiración del cultivo, considerando la precipitación efectiva.

3.3. Eficiencia técnica del sistema de riego

Se evaluaron las eficiencias de conducción, distribución y aplicación en distintas zonas del sistema. Los resultados evidencian una eficiencia media de conducción del 74% (Fig. 8), eficiencia de distribución del 65% (Fig. 9), eficiencia de aplicación del 55% para riego por aspersión, y del 68% para riego por goteo (Fig. 10). La Figura 11 muestra la eficiencia del sistema de riego en relación de los tres componentes: conducción, distribución y aplicación. Con los resultados de la evaluación de los 3 componentes, el sistema tiene una eficiencia del 38.26%, siendo una buena eficiencia.

Figure 10 displays eight maps of the Páramo de Sumapaz area, showing NDVI thematic legends for different dates and locations. The maps are arranged in a 4x2 grid. Each map includes a north arrow, a scale bar (0-5 km), and a legend titled 'Leyenda Temática NDVI'. The legends show color-coded ranges for NDVI values, with red indicating lower values and green indicating higher values. The locations are: a) Páramo (marzo, 2000), b) Maíz (marzo, 2000), c) Páramo (marzo, 2012), d) Maíz (marzo, 2012), e) Páramo (marzo, 2020), f) Maíz (marzo, 2020), g) Páramo (marzo, 2023), and h) Maíz (marzo, 2023).

a) Páramo (marzo, 2000)

- NDVI
- 0.013 - 0.302
- 0.302 - 0.474
- 0.474 - 0.568
- 0.568 - 0.827

b) Maíz (marzo, 2000)

- NDVI
- 0.084 - 0.152
- 0.152 - 0.192
- 0.192 - 0.374
- 0.374 - 0.610

c) Páramo (marzo, 2012)

- NDVI
- 0.000 - 0.195
- 0.195 - 0.297
- 0.297 - 0.410
- 0.410 - 0.705

d) Maíz (marzo, 2012)

- NDVI
- 0.022 - 0.155
- 0.155 - 0.210
- 0.210 - 0.398
- 0.398 - 0.590

e) Páramo (marzo, 2020)

- NDVI
- 0.011 - 0.320
- 0.320 - 0.401
- 0.401 - 0.509
- 0.509 - 0.845

f) Maíz (marzo, 2020)

- NDVI
- 0.043 - 0.195
- 0.195 - 0.274
- 0.274 - 0.577
- 0.577 - 0.787

g) Páramo (marzo, 2023)

- NDVI
- 0.001 - 0.229
- 0.229 - 0.310
- 0.310 - 0.426
- 0.426 - 0.683

h) Maíz (marzo, 2023)

- NDVI
- 0.001 - 0.229
- 0.229 - 0.310
- 0.310 - 0.426
- 0.426 - 0.683

a) Pasto (marzo, 2000)

Leyenda Temática Ks

- 0.009 - 0.009
- 0.009 - 0.034
- 0.034 - 0.060
- 0.060 - 0.096

b) Pasto (marzo, 2012)

Leyenda Temática Ks

- 0.100 - 0.177
- 0.177 - 0.304
- 0.304 - 0.490
- 0.490 - 0.958

c) Pasto (marzo, 2020)

Leyenda Temática Ks

- 0.086 - 0.206
- 0.206 - 0.390
- 0.390 - 0.930
- 0.930 - 1.037

d) Pasto (marzo, 2023)

Leyenda Temática Ks

- 0.000 - 0.383
- 0.383 - 0.390
- 0.390 - 0.722
- 0.722 - 1.181

e) Maiz (marzo, 2000)

Leyenda Temática Ks

- 0.004 - 0.102
- 0.102 - 0.162
- 0.162 - 0.310
- 0.310 - 0.317

f) Maiz (marzo, 2012)

Leyenda Temática Ks

- 0.100 - 0.123
- 0.123 - 0.213
- 0.213 - 0.323
- 0.323 - 0.497

g) Maiz (marzo, 2020)

Leyenda Temática Ks

- 0.105 - 0.133
- 0.133 - 0.232
- 0.232 - 0.352
- 0.352 - 0.946

h) Maiz (marzo, 2023)

Leyenda Temática Ks

- 0.140 - 0.199
- 0.199 - 0.324
- 0.324 - 0.640
- 0.640 - 1.121

114

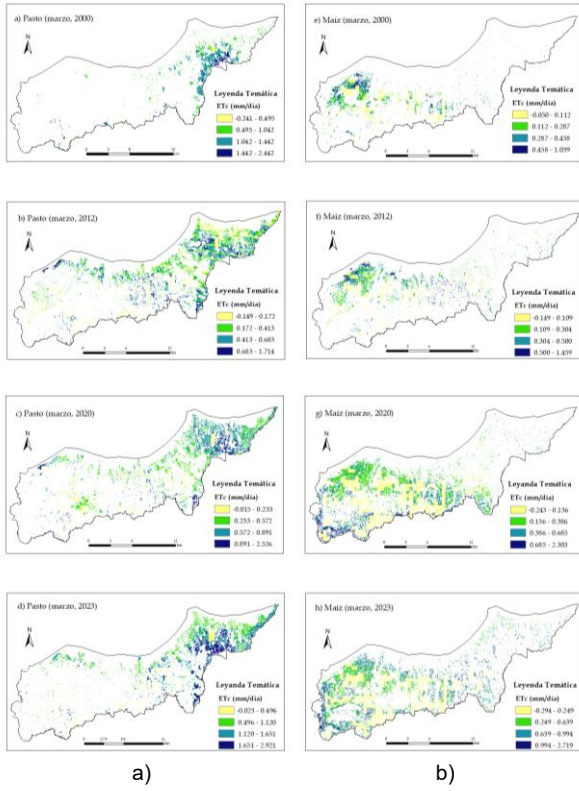


Figura 5: Distribución espacial y temporal de la evapotranspiración del cultivo de pasto y maíz en 20 años: a) Pasto - marzo 2000, 2012, 2020 y 2023; b) Maíz - marzo 2000, 2012, 2020 y 2023.

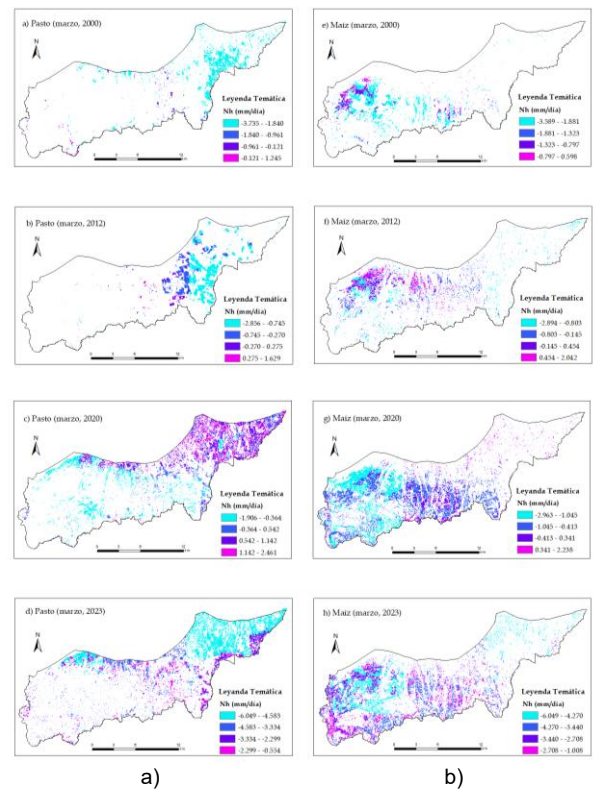


Figura 7: Distribución espacial y temporal de las necesidades hídricas del cultivo de pasto y maíz en 20 años: a) Pasto - marzo 2000, 2012, 2020 y 2023; b) Maíz - marzo 2000, 2012, 2020 y 2023.

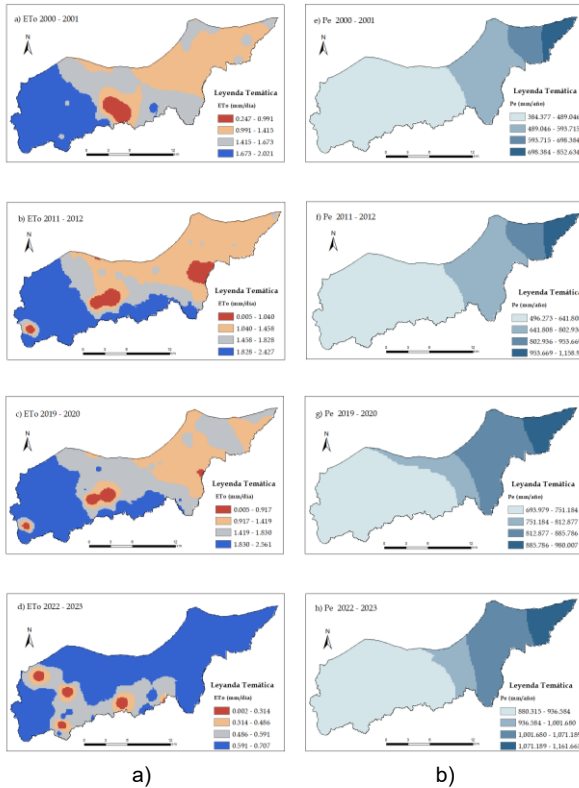


Figura 6: Distribución espacial y temporal de la precipitación efectiva y la evapotranspiración de referencia en 4 periodos: a) ETo del 2000-2001, 2011-2012, 2019-2020, 2022-2023; b) Pe del 2000-2001, 2011-2012, 2019-2020, 2022-2023.

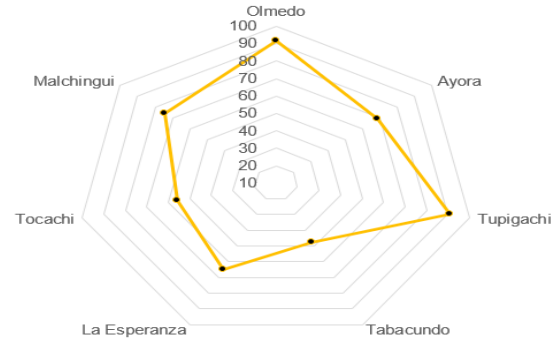


Figura 8: Comparación de la eficiencia de conducción (%) en diferentes tramos del sistema de riego Cayambe-Pedro Moncayo.

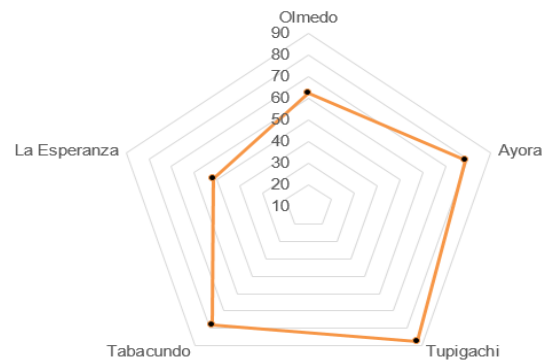


Figura 9: Comparación de la eficiencia de distribución (%) en diferentes tramos de las redes de distribución del sistema de riego Cayambe-Pedro Moncayo.

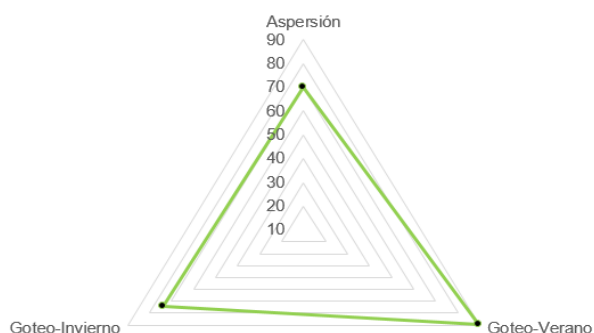


Figura 10: Comparación de la eficiencia de aplicación (%) por lo métodos de riego por aspersión y goteo.

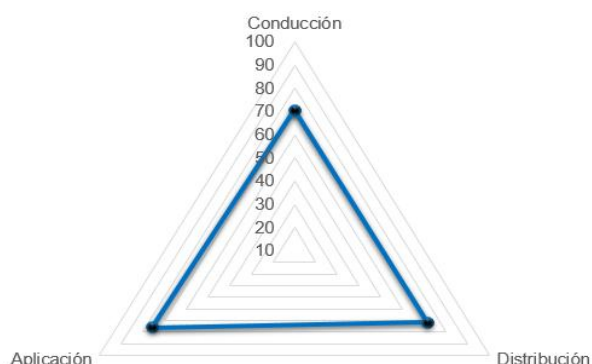


Figura 11: Eficiencia de los componentes del sistema de riego (%) Cayambe-Pedro Moncayo.

3.4. Programación del riego

La programación del riego se basó en la integración de las necesidades hídricas específicas de los cultivos principales (maíz, pastos y rosas) con el caudal aforado disponible en el sistema Cayambe–Pedro Moncayo. En la Tabla 2, se presenta la distribución del recurso hídrico de acuerdo con la superficie de cultivos por parroquia. La superficie total analizada fue de 10 860,54 ha, con un requerimiento hídrico total de 5 011,00 l/s. Los cultivos predominantes varían por parroquia, destacándose el maíz y los pastos como principales consumidores de agua (Tabla 3). Sin embargo, el caudal total disponible aforado en época seca asciende únicamente a 1727,27 l/s, representando apenas el 34,5% del caudal requerido. La distribución propuesta del caudal se realizó considerando la Ec. (17).

Tabla 2: Recurso hídrico por parroquia

Parroquia	Superficie (ha)	Caudal requerido (l/s)	Caudal asignado (l/s)
Olmedo	504,36	294,21	170,92
Ayora	1071,42	548,97	225,76
Tupigachi	2230,41	1074,99	438,24
Tabacundo	1302,26	624,73	94,45
La Esperanza	1430,57	625,86	181,84
Tocachi	1931,34	811,58	329,90
Malchingui	2390,16	1030,67	286,15
Total	10860,54	5011,00	1727,27

Tabla 3: Programación del riego por zona de estudio y cultivo.

Parroquia	Cultivo	Sup. (ha)	Caudal requerido (l/s)	Caudal asignado (l/s)
Olmedo	Maíz	44,53	25,07	21,14
	Pastos	440,27	259,03	137,89
	Rosas	19,56	10,11	11,89
Ayora	Maíz	113,80	47,29	148,11
	Pastos	836,73	439,21	54,80
	Rosas	120,90	62,47	22,85
Tupigachi	Maíz	328,36	142,68	398,55
	Pastos	801,26	363,54	33,47
	Rosas	1100,79	568,78	6,23
Tabacundo	Maíz	362,43	150,40	11,21
	Pastos	402,70	196,79	81,32
	Rosas	537,13	277,53	1,92
La Esperanza	Maíz	833,80	331,23	67,25
	Pastos	364,39	174,56	61,78
	Rosas	232,38	120,07	52,81
Tocachi	Maíz	1528,66	618,58	276,59
	Pastos	288,69	134,09	42,10
	Rosas	114,00	58,90	11,21
Malchingui	Maíz	2098,66	891,32	63,80
	Pastos	228,12	106,60	114,13
	Rosas	63,37	32,75	108,22

3.5. Modelo de distribución equitativa del agua

El modelo conceptual de distribución equitativa del agua fue construido mediante un proceso participativo que integró a usuarios, líderes comunitarios y técnicos especializados, incorporando perspectivas sociales, técnicas, económicas y ambientales. A través de reuniones y talleres de cartografía social, se promovió el diálogo y la representación colectiva de las dinámicas territoriales. Paralelamente, se utilizaron herramientas de geomática, como SIG y teledetección, para analizar las características espaciales y climáticas de la zona de estudio. El modelo resultante (Fig. 12) se estructura en torno a tres dimensiones interrelacionadas —ambiental, técnica y social— orientadas a garantizar una distribución justa del recurso hídrico y fomentar un uso eficiente y sostenible del agua en el territorio.

4. Discusiones

La implementación de un modelo de distribución equitativa del agua basado en tecnologías geomáticas y con la participación de los usuarios en los diferentes procesos de planificación del riego, mejora la eficiencia técnica del riego, promueve una asignación justa del recurso hídrico y contribuye a la sostenibilidad social, económica y ambiental de los territorios irrigados de las comunidades indígenas y campesinas.

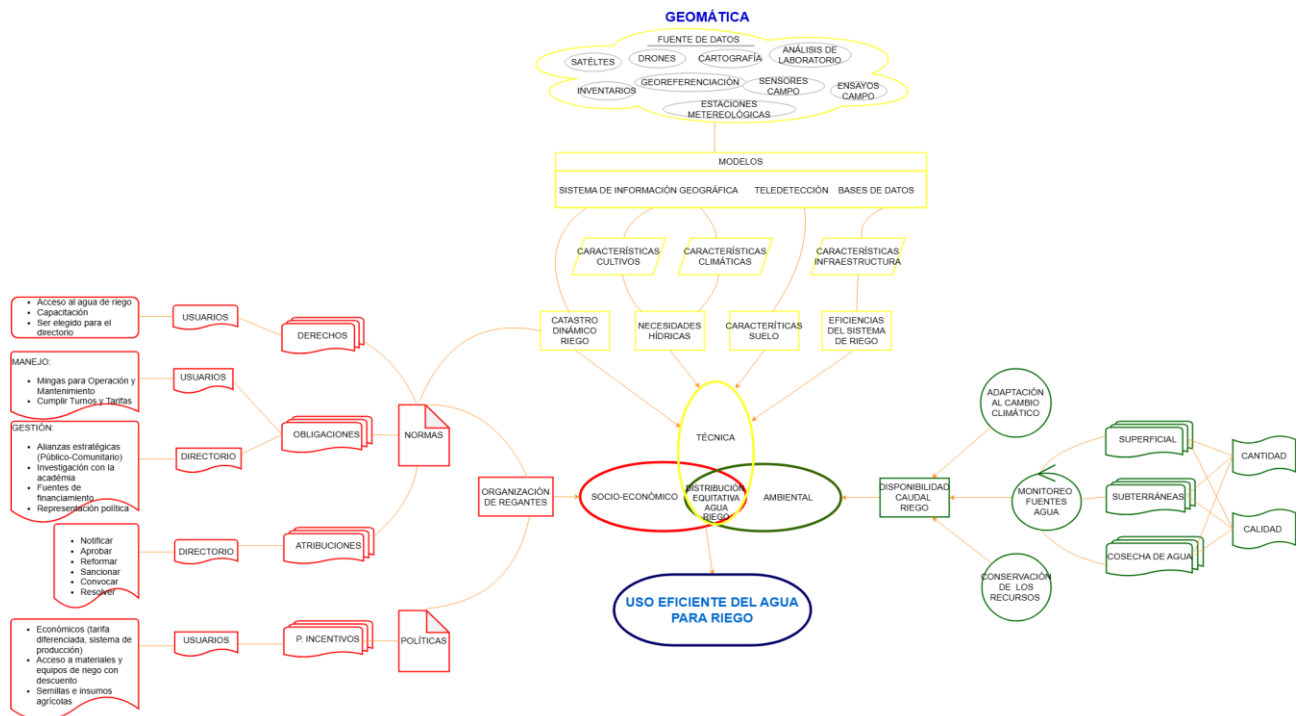


Figura 12: Modelo de distribución equitativa de agua.

Desde una perspectiva técnica, el desarrollo del catastro dinámico de riego permitió obtener registros actualizados y precisos en los sistemas comunitarios generados por los usuarios. Su implementación facilitó la toma de decisiones fundamentadas sobre programación y distribución del recurso, alineándose con las recomendaciones de (Ostrom and Gardner 1993) dando importancia a los sistemas de información confiables en la gestión colectiva del agua (Boelens *et al.* 2010).

La estimación de los requerimientos hídricos mediante el NDVI, junto con el cálculo de K_c , ET_c y P_e , demuestra la aplicabilidad de modelos de teledetección en territorios donde los datos meteorológicos convencionales son escasos. Esta técnica ha sido validada por estudios como (Calera *et al.* 2017), que permitió caracterizar con precisión la demanda de agua en distintos cultivos y zonas altitudinales, contribuyendo a una programación del riego más eficiente.

En cuanto a la eficiencia técnica, los resultados muestran que existen pérdidas significativas, especialmente en la etapa de aplicación, lo cual concuerda con otros estudios realizados en sistemas comunitarios de riego de América Latina (McCall 2003). Sin embargo, la incorporación de mapas temáticos y lineales de necesidades hídricas permitirán mejorar la planificación y distribución del agua, mostrando que el uso de SIG puede reducir la inequidad estructural en el acceso al recurso.

El modelo de distribución propuesto, al integrar criterios técnicos y sociales, contribuye a democratizar la gestión del agua. Su validación participativa incrementó la legitimidad del proceso, generando apropiación local del conocimiento. Esto refuerza la literatura sobre la coproducción de conocimiento como herramienta para la gobernanza inclusiva (Kim *et al.* 2015; Verchick and Hulen 2003).

Además, el enfoque metodológico participativo implementado en esta investigación demostró ser eficaz no solo para levantar información, sino para construir capacidades locales en el uso de herramientas geomáticas. Esta experiencia aporta evidencia de que es posible cerrar brechas tecnológicas mediante procesos de acompañamiento y fortalecimiento comunitario.

En un contexto más amplio, los resultados del estudio aportan al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 6 (agua limpia y saneamiento), ODS 2 (hambre cero) y ODS 10 (reducción de desigualdades), demostrando que la innovación tecnológica puede estar al servicio de la equidad cuando se articula con procesos organizativos comunitarios.

5. Conclusiones

La geomática participativa se convierte en una herramienta estratégica para mejorar la eficiencia y equidad en los sistemas de riego comunitarios rurales. La integración de tecnologías geoespaciales con metodologías participativas permitió desarrollar un modelo de distribución de agua que responde tanto a criterios técnicos como a valores de justicia y sostenibilidad territorial. Entre los principales logros destaca la creación del catastro dinámico de riego, un instrumento georreferenciado y actualizable que sistematiza la información técnica, social y productiva, facilitando la planificación del recurso hídrico y el diseño de estrategias de riego más eficientes.

En términos técnicos, el uso combinado de imágenes satelitales, SIG y programación de riego basada en NDVI y coeficientes de cultivo demostró que es posible optimizar la eficiencia de los sistemas de riego, incluso en contextos con limitaciones de infraestructura

meteorológica. Además, la evaluación participativa de la eficiencia del sistema permitió construir un modelo de gestión del agua más equitativo, transparente y adaptable a las necesidades locales.

A nivel social, el enfoque participativo fortaleció la gobernanza comunitaria, promovió la apropiación del conocimiento y legitimó colectivamente el modelo desarrollado. Se concluye que la geomática participativa

no solo mejora la operación técnica de los sistemas de riego, sino que también impulsa una gestión más inclusiva y resiliente del agua, contribuyendo al cumplimiento de los ODS. Este enfoque puede ser replicado en otras regiones rurales, adaptándolo a los contextos locales y promoviendo la colaboración entre comunidades, academia y gobiernos.

References

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., and SMITH, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Roma: FAO*, **298**(0).
- ANDRANGO, P., ORTÍZ, R., and CUASPA, Y., 2019. Distribución de caudales de riego para las comunidades de la UCICMA - Imbabura. *Siembra*, **6**, pp. 037–045. DOI: 10.29166/siembra.v6i2.1562
- ARTEAGA, R., ÁNGELES, V., and VÁZQUEZ, M., 2011. Programa Cropwat Para Planeación Y Manejo Del Recurso Hídrico. *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, **2**, pp. 179–195.
- BOELEN, R., GETCHES, D., and GUEVARA-GIL, A., 2010. Out of the Mainstream: Water Rights, Politics and Identity.
- BOELEN, R., and ZWAANTJE, M., 2014. Justicia Hídrica. Acumulación de agua, conflictos y acción social. *Inst. Estud. Peru*, **1**, pp. 13–27.
- BWAMBALE, E., NAANGMENYELE, Z., IRADUKUNDA, P., AGBOKA, K.M., HOUSSOU-DOSSOU, E.A., AKANSAKE, D.A., ... and CHIKABVUMBWA, S.R., 2022. Towards precision irrigation management: A review of GIS, remote sensing and emerging technologies. *Cogent Engineering*, **9**(1), 2100573. DOI: 10.1080/23311916.2022.2100573
- CACHIPUENDO, C., 2017. Modelo dinâmico para a gestão e manejo sustentável de sistemas de irrigação comunitários, no marco do Bom Viver: estudo do caso na bacia do Rio Pisque. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz."
- CACHIPUENDO, C., REQUELME, N., GUALAVISÍ, O., SANDOVAL, C., and SANDOVAL, J., 2017. Uso comunitario del agua y del suelo para la producción sustentable de pasturas. *La Granja*, **26**, pp. 142–154.
- CACHIPUENDO, C., REQUELME, N., SANDOVAL, C., and AFONSO, A., 2025. Sustainable Rural Development Based on CFS-RAI Principles in the Production of Healthy Food: The Case of the Kayambi People (Ecuador). *Sustain.*, **17**, pp. 1–21. DOI: 10.3390/su17072958
- CALERA, A., CAMPOS, I., OSANN, A., D'URSO, G., and MENENTI, M., 2017. Remote sensing for crop water management: From ET modelling to services for the end users. *Sensors (Switzerland)*, **17**, pp. 1–25. DOI: 10.3390/s17051104
- CAMPOS, I., NEALE, C.M.U., CALERA, A., BALBONTÍN, C., and GONZÁLEZ-PIQUERAS, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manag.*, **98**, pp. 45–54. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.07.011
- FUENTES, J., and GARCÍA, G., 1999. Técnicas de riego. Sistemas de riego en la agricultura. *México y España: Mundi-Prensa México, SA de CV*.
- HECLMAN, J.L., HEILMAN, W.E., and MOORE, D.G., 1982. Evaluating the Crop Coefficient Using Spectral Reflectance 1. *Agron. J.*, **74**, pp. 967–971. DOI: 10.2134/agronj1982.00021962007400060010x
- KIM, J.H., KEANE, T.D., and BERNARD, E.A., 2015. Fragmented local governance and water resource management outcomes. *J. Environ. Manage.*, **150**, pp. 378–386. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.12.002
- MANIDA, M., 2022. The future of food and agriculture trends and challenges. *Agriculture & Food E-Newsletter*, **4**(2), pp. 27–29.
- MATHENGE, M., SONNEVELD, B.G.J.S., and BROERSE, J.E.W., 2022. Application of GIS in Agriculture in Promoting Evidence-Informed Decision Making for Improving Agriculture Sustainability: A Systematic Review. *Sustain.*, **14**. DOI: 10.3390/su14169974
- MCCALL, M.K., 2003. Seeking good governance in participatory-GIS: A review of processes and governance dimensions in applying GIS to participatory spatial planning. *Habitat Int.*, **27**, pp. 549–573. DOI:10.1016/S0197-3975(03)00005-5
- ODI-LARA, M., CAMPOS, I., NEALE, C. M., ORTEGA-FARÍAS, S., POBLETE-ECHEVERRÍA, C., BALBONTÍN, C., and CALERA, A., 2016. Estimating evapotranspiration of an apple orchard using a remote sensing-based soil water balance. *Remote Sensing*, **8**(3), 253. DOI: 10.3390/rs8030253
- ORTIZ, R., PAZMIÑO, J., and CHILE, M., 2021. Eficiencias en el sistema de riego Tumbaco, Ecuador. *Cienc. y Tecnol.*, **14**, pp. 1–10.

- OSTROM, E., and GARDNER, R., 1993. Coping with Asymmetries in the Commons: Self-Governing Irrigation Systems Can Work. *J. Econ. Perspect.*, **7**, pp. 93–112. DOI: 10.1257/jep.7.4.93
- PLAYAN-JUBILLAR, E., 1994. Eficiencia en el Aprovechamiento de Agua por Regadío. Escuela Politécnica Superior de Huesca. *Geórica: revista del espacio rural*, **3**, pp. 99-128 (1994)
- SISHODIA, R.P., RAY, R.L., and SINGH, S.K., 2020. Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sens.*, **12**, pp. 1–31. DOI: 10.3390/rs12193136
- VERCHICK, R.R.M., and HULEN, R.M., 2003. Why the global environment needs local government: Lessons from the Johannesburg summit. *Urban Lawyer*, **35**, pp. 471–494.
- VILLAZÓN-GÓMEZ, J.A., NORIS-NORIS, P., and MARTÍN-GUTIÉRREZ, G., 2021. Determinación de la precipitación efectiva en áreas agropecuarias de la provincia de Holguín. *Idesia* (Arica), **39**, pp. 85–90. DOI: 10.4067/s0718-34292021000200085