






Sostenibilidad hídrica y productividad del maíz (*Zea mays*): Validación de tecnologías de bajo costo para la resiliencia agroalimentaria en Zapotillo, Ecuador

*Water sustainability and maize (*Zea mays*) productivity: Validation of low-cost technologies for agri-food resilience in Zapotillo, Ecuador*

Vicente Agustín, Valdivieso-Vida¹  ; Martín Italo, Orrala-Icaza² ; Danna Belén, Castillo-Quijije¹ ; Carlos Alberto, Nieto-Cañarte³ 

(1) Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador.

(2) Universidad Tecnológica Ecotec, Guayaquil, Ecuador.

(3) Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador.

Resumen

La gestión ineficiente del agua en el cultivo de maíz dentro del sistema de riego Zapotillo, Ecuador, representa una amenaza crítica para la sostenibilidad agrícola y la rentabilidad de los pequeños productores. El uso de métodos de riego empíricos que ignoran los requerimientos hídricos reales, provocando un desperdicio del recurso o un estrés hídrico que limita el rendimiento del grano. Ante este escenario de vulnerabilidad climática en una zona de bosque seco-tropical, surge la necesidad de validar herramientas tecnológicas de bajo costo que permitan una programación de riego con precisión científica y accesibilidad económica. Metodológicamente, la investigación se desarrolló en la granja experimental del INIAP, evaluando cuatro láminas de riego por goteo basadas en la evaporación de un tanque Clase A, frente a un tanque evaporímetro artesanal diseñado para la agricultura familiar. Se determinó el coeficiente de cultivo (Kc) para el híbrido Dekalb-7088 y se realizó un análisis de varianza para comparar el rendimiento biológico y la eficiencia del uso del agua (EUA), complementado con una evaluación de la relación beneficio/costo. Los resultados demostraron una correlación del 98% entre ambos instrumentos evaporímetros, validando el uso del dispositivo artesanal con un coeficiente de ajuste de 0,95. El tratamiento de reposición del 100% de la evapotranspiración (T2) alcanzó la mayor productividad con 8,56 t/ha y una rentabilidad económica de 1,14. Se concluye que la tecnificación hídrica de bajo costo no solo maximiza el potencial genético del maíz, sino que transforma una actividad de subsistencia en un modelo de resiliencia agroalimentaria financieramente viable.

Palabras clave: maíz, riego, evapotranspiración, eficiencia, rentabilidad, Zapotillo.

Abstract

Inefficient water management in maize cultivation within the Zapotillo irrigation system, Ecuador, represents a critical threat to agricultural sustainability and the profitability of small-scale producers. The use of empirical irrigation methods that ignore actual crop water requirements causes either resource waste or water stress that limits grain yield. Given this scenario of climate vulnerability in a tropical dry forest zone, there is a need to validate low-cost technological tools that allow for irrigation scheduling with scientific precision and economic accessibility. Methodologically, the research was conducted at the INIAP experimental farm, evaluating four drip irrigation depths based on evaporation from a Class A pan compared to an artisanal pan evaporimeter designed for family farming. The crop coefficient (Kc) was determined for the Dekalb-7088 hybrid, and an analysis of variance was performed to compare biological yield and water use efficiency (WUE), complemented by an assessment of the benefit/cost ratio. The results demonstrated a 98% correlation between both evaporation instruments, validating the use of the artisanal device with an adjustment coefficient of 0.95. The 100% evapotranspiration replenishment treatment (T2) achieved the highest productivity at 8.56 t/ha and an economic profitability of 1.14. It is concluded that low-cost water technification not only maximizes the genetic potential of maize but also transforms a subsistence activity into a financially viable model of agro-food resilience.

Keywords: maize, irrigation, evapotranspiration, efficiency, profitability, Zapotillo.

Recibido/Received	06-02-2026	Aprobado/Approved	31-03-2026	Publicado/Published	03-04-2026
-------------------	------------	-------------------	------------	---------------------	------------

Introducción

La seguridad alimentaria global en el siglo XXI se enfrenta a una encrucijada sin precedentes, donde la convergencia de la variabilidad climática y la degradación de los servicios ecosistémicos pone en riesgo la estabilidad de los sistemas de producción primaria. En este escenario, el cultivo del maíz (*Zea mays* L.) trasciende su función como simple commodity agrícola (o mercancía básica) para consolidarse como el eje termodinámico y sociocultural de las poblaciones rurales en América Latina. Para el caso específico de Ecuador, la región de Zapotillo representa un microcosmos de estos desafíos, donde la implementación de infraestructuras hídricas de gran escala intenta compensar un déficit pluviométrico estructural. No obstante, la sostenibilidad de estos sistemas no depende únicamente de la disponibilidad del recurso, sino de la eficiencia termodinámica con la que el agua es transducida en biomasa económica.

La evolución del maíz, desde su ancestro silvestre el teocintle en las tierras altas de Mesoamérica hace aproximadamente ocho milenios, hasta los híbridos de alto rendimiento contemporáneos, es un testimonio de la plasticidad genómica de la especie. Sin embargo, esta misma especialización productiva ha incrementado la vulnerabilidad del cultivo ante el estrés hídrico, especialmente en las etapas de diferenciación floral y llenado de grano. En Zapotillo, el maíz no es solo un componente de la dieta a través del consumo de humitas o mote, sino el motor de una cadena de valor que abastece a los mercados de balanceados en Guayaquil y El Oro. Esta relevancia macroeconómica exige que el manejo del riego abandone el empirismo y se ancle en modelos biofísicos de precisión que garanticen la resiliencia del sector frente a las sequías recurrentes.

Desde una perspectiva geográfica y administrativa, el Sistema de Riego Zapotillo ha experimentado una expansión acelerada de su frontera agrícola, alcanzando en la actualidad cerca de 1.000 hectáreas dedicadas exclusivamente al maíz duro. Sectores como Garza Real, Hacienda Vieja y Zapallal han integrado nuevas tierras bajo riego, impulsadas en gran medida por la inversión de actores locales y foráneos atraídos por la fertilidad potencial del valle. No obstante, este crecimiento superficial no ha sido correspondido con una evolución simétrica en la gobernanza del agua a nivel de parcela. Según los catastros de RIDRENSUR EP-GPL (2013), la presión sobre el Ramal 2C es constante, lo que evidencia una competencia silenciosa por el recurso que solo puede mitigarse mediante la adopción de tecnologías que maximicen la productividad del agua por unidad de superficie.

La problemática técnica central radica en la asimetría de información que enfrentan los productores respecto a los requerimientos hídricos en tiempo real. Históricamente, el riego en la zona se ha gestionado mediante turnos fijos o percepciones visuales del estado del suelo, ignorando la dinámica de la evapotranspiración real (ETc). Como establecen Allen et al. (2006) en los protocolos normativos de la FAO, la omisión del coeficiente de cultivo (Kc) ajustado a las condiciones locales deriva en dos escenarios críticos: el estrés hídrico por sub-irrigación, que inhibe la expansión foliar, o el sobre-riego, que induce procesos de anoxia radicular y lixiviación de nitratos en suelos de textura arcillosa. Ambos escenarios erosionan la rentabilidad del agricultor y comprometen la integridad física del suelo, un recurso que Valarezo et al. (1998) ya identificaban como altamente vulnerable en la región sur del país.

En el ecosistema de Bosque Seco-Tropical que caracteriza a Zapotillo, la atmósfera actúa como una bomba de succión que extrae humedad de las plantas a tasas que superan con frecuencia los 5 mm diarios. Ante este desafío, la gestión de acuíferos y sistemas superficiales debe responder a retos hidrológicos y sociales complejos (Alcalá et al., 2023). La innovación tecnológica, por tanto, no puede ser vista como un lujo, sino como una herramienta de adaptación climática. No obstante, existe una barrera de entrada económica: las estaciones meteorológicas automatizadas y los sensores de humedad de suelo presentan costos inaccesibles para la agricultura familiar. Es aquí donde la validación de tecnologías disruptivas de bajo costo, como el tanque evaporímetro artesanal, cobra una importancia estratégica para democratizar el acceso a la agricultura de precisión.

La determinación del Kc para el híbrido Dekalb-7088 bajo las condiciones específicas de Garza Real constituye un aporte fundamental para la ciencia agronómica regional. La literatura clásica sugiere

valores generalistas de Kc que a menudo fallan al ser aplicados en valles con alta radiación y baja humedad relativa. Al ajustar estas curvas de consumo a la fenología real observada en campo, se permite que el sistema de riego por goteo cumpla su función de reponer diariamente el agua consumida en las funciones fisiológicas de la planta. Investigaciones recientes han demostrado que la eficiencia hídrica es un indicador que debe ser analizado en conjunto con la nutrición nitrogenada y el manejo del sustrato (Anaya-Salgado et al., 2025). Por ende, el éxito de la sostenibilidad hídrica reside en la capacidad de integrar el monitoreo atmosférico con la respuesta biológica del maíz.

El análisis de la resiliencia económica completa la visión sistémica de esta investigación. Un sistema de riego puede ser técnicamente perfecto, pero si no es financieramente viable, carecerá de adopción social. En Zapotillo, la transición de una agricultura de subsistencia a una de mercado exige que cada gota de agua se traduzca en un incremento del ingreso neto. La relación beneficio-costos suele estar condicionada por la capacidad de los campesinos para gestionar sus propios recursos (Pérez Magaña et al., 2019). Al validar que un instrumento artesanal posee una correlación estadística significativa con el Tanque Clase A, se empodera al productor, reduciendo su dependencia de asistencia técnica externa y permitiéndole optimizar sus costos operativos de bombeo y fertilización.

La vulnerabilidad del maíz frente a la variabilidad del clima es un fenómeno que afecta a diversas latitudes, donde el rendimiento es el resultado de una compleja interacción entre el genotipo y el ambiente (Carmona-Martínez et al., 2025). En el sur de Ecuador, esta interacción está mediada por la gestión del riego en el Ramal 2C. Las características edáficas de la zona, marcadas por suelos franco-arcillosos, exigen un manejo cuidadoso de las láminas de riego para evitar el sellado superficial y favorecer la profundidad radicular. Al integrar la caracterización del entorno con los resultados experimentales obtenidos en la Granja del INIAP, este estudio no solo ofrece una validación técnica, sino que construye un modelo de transferencia tecnológica replicable en otros sistemas de riego de la región andina.

Finalmente, esta investigación se plantea como una respuesta institucional a la necesidad de modernizar la agricultura en el Cantón Zapotillo. La validación de cuatro láminas de riego basadas en la evaporación busca encontrar el punto de equilibrio donde se maximiza la producción sin desperdiciar el recurso vital. En un mundo donde el agua es el nuevo determinante de la estabilidad geopolítica, la soberanía alimentaria de Ecuador depende de su capacidad para gestionar sus cuencas de manera inteligente. A través del establecimiento de objetivos claros —determinar la mejor lámina, obtener el Kc local y validar el instrumental de bajo costo—, este trabajo sienta las bases para una nueva era de resiliencia agroalimentaria en el sur del país, donde la ciencia y la práctica se unen para garantizar la prosperidad del campo.

Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en la Granja Experimental del INIAP, ubicada en la Parroquia Garza Real, Cantón Zapotillo, Provincia de Loja, Ecuador. La zona se encuentra dentro de la influencia del Sistema de Riego Zapotillo (Ramal 2C). Climáticamente, el área se clasifica como bosque seco, con una temperatura media anual de 26,5 °C y una evaporación media de 168,30 mm/mes.

Diseño experimental

Se empleó un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con cuatro tratamientos y tres repeticiones, totalizando 12 unidades experimentales. Cada parcela experimental tuvo una dimensión de 24 m² (4 m x 6 m), con un área útil de 8 m² para evitar el efecto de borde.

Los tratamientos evaluados consistieron en cuatro láminas de riego basadas en la Evapotranspiración del Cultivo (ETc): T1: 75% de la ETc; T2: 100% de la ETc; T3: 125% de la ETc., y T4: 150% de la ETc.

Modelo estadístico del DBCA

Para el análisis de las variables agronómicas y productivas, se aplicó el siguiente modelo lineal aditivo:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

- Y_{ij} : Es la respuesta observada en la unidad experimental (ej. rendimiento de maíz) que recibió el tratamiento i en el bloque j .
- μ : Es la media general del experimento.
- τ_i : Es el efecto del i -ésimo tratamiento (láminas de riego: 75%, 100%, 125%, 150% de la ETC).
- β_j : Es el efecto del j -ésimo bloque o repetición (control de la variabilidad local del terreno).
- ε_{ij} : Es el error experimental residual, que se asume independiente y normalmente distribuido.

Manejo agronómico

Se utilizó el híbrido de maíz duro Dekalb-7088, sembrado con una densidad de 62,500 plantas por hectárea (0,80 m entre hileras y 0,20 m entre plantas). El sistema de riego utilizado fue por goteo, con emisores autocompensados de 2 L/h distanciados a 0,20 m. La fertilización se fraccionó en tres etapas siguiendo los requerimientos nutricionales del cultivo para la zona.

Determinación de la evapotranspiración y necesidades hídricas

Para la programación del riego, se calcularon dos tipos de evapotranspiración:

Evapotranspiración Potencial (ETP): Estimada mediante el método de Thornthwaite, utilizando datos de temperatura media mensual.

Evapotranspiración del Cultivo (ETC): Calculada mediante la fórmula $ETc = ETo \cdot Kc$. La evapotranspiración de referencia (ETo) se obtuvo diariamente mediante un tanque evaporímetro Clase A. Los coeficientes de cultivo (Kc) se ajustaron para las cuatro fases fenológicas: inicial, desarrollo, media y final.

Validación de tecnología de bajo costo (Tanque Artesanal)

Con el objetivo de proponer una herramienta accesible para el agricultor, se instaló un Tanque Evaporímetro Artesanal (construido con materiales locales de bajo costo) adyacente al Tanque Clase A (estándar). Se realizaron lecturas diarias de evaporación en ambos instrumentos para determinar el coeficiente de ajuste (Kj) mediante la relación:

$$Kj = \frac{\text{Evaporación artesanal}}{\text{Evaporación clase A}}$$

VARIABLES DE RESPUESTA

- **Agronómicas:** Altura de planta (cm), diámetro del tallo (mm) y días a la floración.
- **Productivas:** Longitud de mazorca, número de granos por mazorca, peso de 100 granos y rendimiento final ajustado al 13% de humedad (tn/ha).
- **Eficiencia:** Eficiencia del uso del agua (EUA) y relación Beneficio/Costo.

Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a un Análisis de Varianza para determinar diferencias significativas entre tratamientos. En caso de significancia, se aplicó la prueba de rango múltiple de Tukey ($p < 0,05$). Para la validación del tanque artesanal frente al Clase A, se utilizó la Prueba Z para comparación de medias y un análisis de correlación de Pearson para verificar la precisión del instrumento de bajo costo.

Resultados

Validación de la tecnología de bajo costo (Tanque Artesanal)

El análisis comparativo entre el Tanque Clase A y el Tanque Artesanal mostró una consistencia técnica elevada para las condiciones semiáridas de Zapotillo. La evaporación media acumulada durante el ciclo del cultivo fue de 645,2 mm para el tanque estándar y 614,1 mm para el artesanal. A partir de esta relación, se determinó un coeficiente de ajuste (Kj) de 0,95, con un coeficiente de correlación de Pearson de $r = 0,98$ ($p < 0,01$). Estos valores demuestran una asociación lineal muy fuerte y positiva entre ambos instrumentos, validando la precisión del dispositivo de bajo costo (Figura 1).

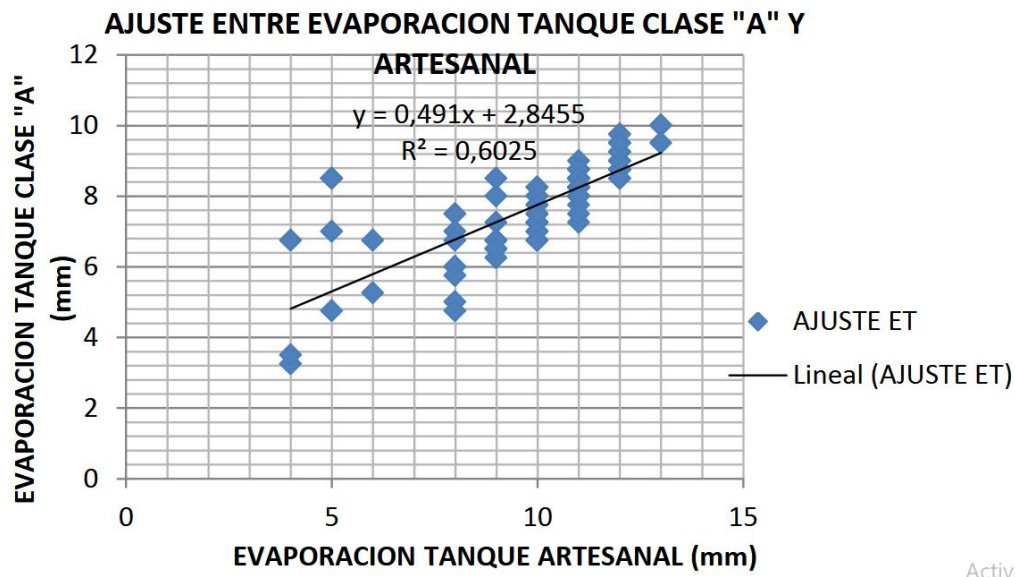


Figura 1. Diagrama de dispersión y recta de regresión entre la evaporación del Tanque Clase A y el Tanque Artesanal

La Prueba Z aplicada a las medias de evaporación confirmó que no existen diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$) entre los dos métodos de medida. Este hallazgo permite validar el tanque artesanal como una alternativa viable para la programación de riego en contextos de agricultura de pequeña escala.

Variables de crecimiento y componentes del rendimiento

El régimen hídrico afectó de manera diferencial el desarrollo del híbrido Dekalb-7088. Las variables de altura de planta y diámetro del tallo alcanzaron sus valores máximos bajo el tratamiento T2 (100% ETc) en las etapas críticas de desarrollo. Sin embargo, el análisis de varianza (ADEVA) reveló que la mayoría de las variables vegetativas mostraron una alta resiliencia, no presentando diferencias estadísticas significativas en las etapas tempranas, a excepción del número de hojas a los 29 días (Tabla 1).

En cuanto a la morfología radicular, se observó una tendencia al incremento de la profundidad en los tratamientos con mayor lámina (T3 y T4), aunque estadísticamente se mantuvieron en el mismo

rango que el T2. Estos resultados sugieren que una reposición del 100% de la ETc es suficiente para garantizar un desarrollo estructural óptimo sin incurrir en el gasto hídrico excesivo de los tratamientos T3 y T4.

Tabla 1. Análisis de Varianza (ADEVA) para variables agronómicas y productivas

Descriptor agronómico	TRATAMIENTOS ADEVA				RANGOS MULTIPLES (FC)	DUNCAN (SUPERINDICES)
	T1(75 % ETc)	T2(100 % ETc)	T3(125 % ETc)	T4(150 % ETc)		
Número de hojas de la planta a los siete días	2,167	2,167	2,667	2,333	1,143	D, C, A, B
Número de hojas de la planta a los veinte días	7,500	7,500	2,167	7,833	1,88	C, B, D, A
Número de hojas de la planta a los veinte y nueve días	11,333	12,667	11,333	10,333	6,947*	C, BC, AB, A
Altura de la planta a los siete días	4,167	4,333	4,833	5,333	4,444	D, C, B, A
Altura de la planta a los treinta días	57,333	61,667	58,667	62,333	0,493	A, A, A, A
Altura de la planta a los setenta y nueve días	226,00	234,33	224,33	22,00	0,2684	A, A, A, A
Diámetro del cuello a los siete días	0,217	0,203	0,233	0,237	0,3638	C, D, B, A
Diámetro del cuello a los treinta días	2,36	2,48	2,36	2,16	0,88	C, A, B, D
Diámetro del cuello a los setenta y un días	2,73	2,92	2,92	2,67	0,702	C, A, B, D
Profundidad radicular a los treinta días	22,83	23,33	28,33	31,17	4,290	A, A, A, A
Profundidad radicular a los sesenta días	47,00	43,00	41,00	54,83	3,600	A, A, A, A
Profundidad radicular a los noventa días	48,17	55,50	58,17	59,50	3,420	A, A, A, A

* Diferencia significativa

Productividad y eficiencia del uso del agua (EUA)

El rendimiento de grano mostró una respuesta significativamente influenciada por las láminas de riego aplicadas ($p < 0,05$) (Tabla 2). La mayor productividad se alcanzó con el tratamiento de reposición completa de la evapotranspiración (T2 - 100% ETc), con un valor de 8,56 t/ha. Según la prueba de rangos múltiples de Tukey, este resultado se separa estadísticamente de la restricción hídrica (T1), la cual presentó el rendimiento más bajo (7,00 t/ha), lo que representa una reducción del 18,2% debido al estrés hídrico. Un hallazgo relevante es que el incremento de la lámina de riego por encima del 100% de la ETc (T3 y T4) no generó aumentos significativos en la producción. Por el contrario, se observó una tendencia decreciente en el rendimiento con el tratamiento T4 (8,02 t/ha), lo que sugiere que el exceso de humedad podría inducir condiciones de anoxia radicular o lixiviación de nutrientes, disminuyendo la eficiencia biológica del híbrido Dekalb-7088.

Tabla 2. Prueba de Tukey para el rendimiento de grano (t/ha)

Tratamiento	Descripción (Lámina)	Rendimiento Medio (t/ha)*	Superíndices (Rango)
T2	100% de la ETc	8,56	A
T3	125% de la ETc	8,42	A
T4	150% de la ETc	8,02	AB
T1	75% de la ETc	7,00	B

La sostenibilidad hídrica del sistema se validó a través de la determinación de la EUA, parámetro que cuantifica la capacidad del cultivo para transformar el agua aplicada en biomasa económica. Como se detalla en la Tabla 3, el tratamiento T2 (100% ETc) demostró ser el más equilibrado, logrando la mayor productividad con 147 qq/ha y una eficiencia de 6,46 kg/m³. Si bien el tratamiento T1 (75% ETc) registró un valor nominal de eficiencia mayor (8,2 kg/m³), esto se atribuye al bajo volumen de agua aplicado (775,5 m³/ha), lo cual limitó el potencial productivo del híbrido. Por el contrario, los tratamientos con exceso de riego (T3 y T4) mostraron una degradación progresiva de la eficiencia, descendiendo hasta los 4,10 kg/m³ en el T4. Estos resultados confirman que la reposición exacta de la evapotranspiración (T2) optimiza el recurso hídrico sin comprometer la seguridad alimentaria.

Tabla 3. Eficiencia del uso del agua por tratamiento

Tratamiento	Rendimiento (qq)	Agua consumida (m ³ /ha)	Eficiencia (kg/m ³)
T1	140	775,5	8,2
T2	147	1.034,0	6,46
T3	145	1.292,5	5,09
T4	140	1,551,04	4,10

Análisis de resiliencia económica y viabilidad financiera

La viabilidad de la tecnología propuesta se validó mediante un análisis de rentabilidad que integra los costos operativos y el rendimiento comercializado. Como se detalla en la Tabla 4, la adopción de la lámina del 100% de la ETc (T2) generó la mayor rentabilidad para el productor en el sistema de riego Zapotillo, alcanzando un ingreso neto de 332,30 USD y la relación beneficio/costo (B/C) más competitiva de 1,14.

El análisis comparativo frente al Tratamiento Testigo (B/C = 1,00) revela que el uso de la programación de riego basada en el tanque artesanal incrementa el margen de ganancia de manera sustancial, transformando una actividad de subsistencia en una unidad productiva rentable. Asimismo, se observa que tanto el déficit hídrico (T1) como el exceso de riego (T3 y T4) erosionan la rentabilidad, confirmando que la eficiencia hídrica es el motor de la resiliencia económica en la región

Tabla 4. Resumen del análisis económico y relación Beneficio/Costo

TRATAMIENTO	RENDIMIENTO (qq)	INGRESO BRUTO (USD)	INGRESO NETO (USD)	RELACION BENEFICIO/COSTO
T1: 75 %(ETc)	140	2.520,00	214,00	1,09
T2: 100 %(ETc)	147	2.646,00	332,30	1,14
T3: 125 %(ETc)	145	2.610,00	298,50	1,13
T4: 100 %(ETc)	140	2.520,00	214,00	1,09
TESTIGO	130	2.340,00	43,75	1,00

Caracterización del entorno experimental y potencial de replicabilidad

Finalmente, con el objetivo de facilitar la replicabilidad de este modelo de gestión hídrica en otras zonas de la región sur de Ecuador, se describe la configuración espacial y agroecológica del ensayo. El estudio se estableció en el sector de Garza Real, Cantón Zapotillo, bajo las coordenadas UTM: N 9524472 m y E 585126 m, a una altitud de 223 msnm (Zona 17 S). Esta ubicación es estratégica, ya que se

encuentra dentro del área de influencia del Ramal 2C del Sistema de Riego Zapotillo, el cual abastece a 1.424 hectáreas netas y sustenta la producción de cultivos críticos como arroz, maíz y frutales (Figura 2).

El entorno se clasifica como Bosque Seco-Tropical (Bs-T) según el diagrama de Holdridge, caracterizándose por un clima cálido-seco con una temperatura media de 25 °C y una marcada estacionalidad hídrica, donde las precipitaciones se limitan al periodo de enero a abril. Los suelos de textura arcillosa y franco-arcillosa predominantes en la zona baja de Garza Real presentan retos específicos para la infiltración y retención de humedad, lo que otorga una relevancia mayor a la validación de las láminas de riego y al uso del tanque artesanal propuestos en esta investigación. La integración de estos factores climáticos y edáficos confirma que la metodología empleada es una herramienta robusta para enfrentar la vulnerabilidad de los sistemas de producción locales ante el déficit hídrico prolongado.

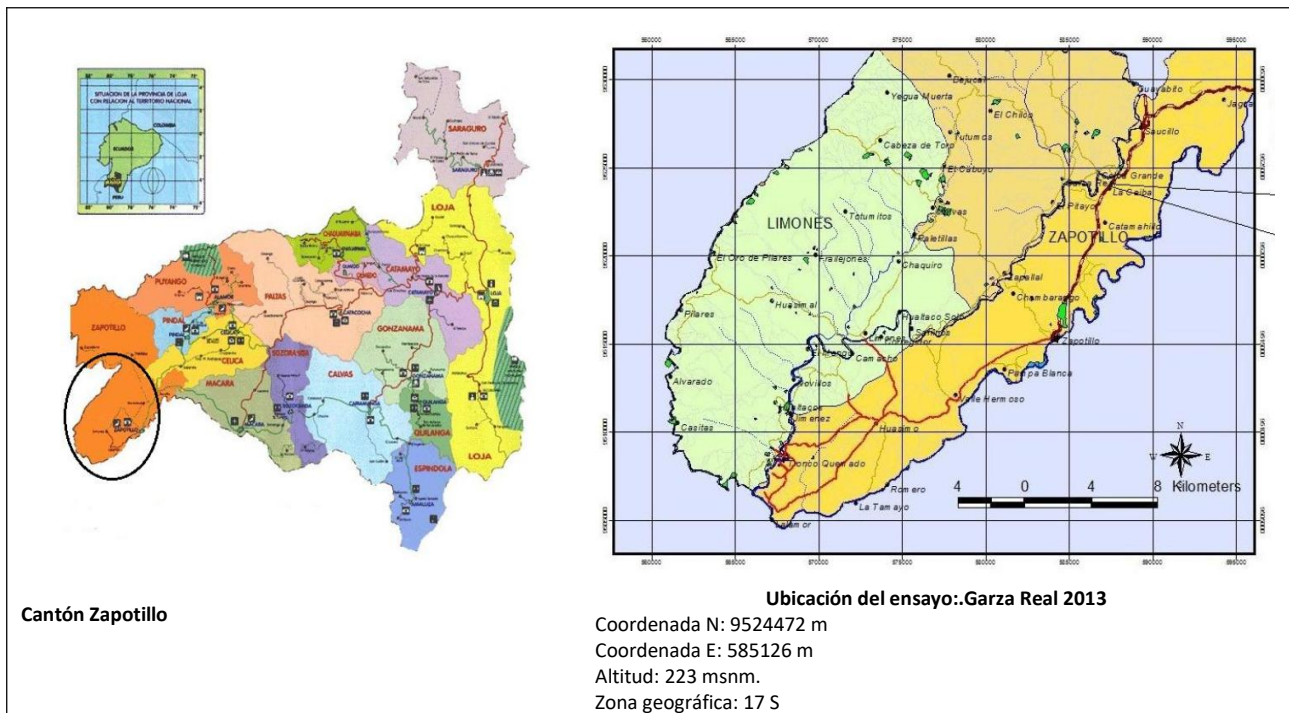


Figura 2. Mapa de ubicación experimental y distribución de bloques en el Ramal 2C del Sistema de Riego Zapotillo

Discusión

La validación del instrumental evaporímetro artesanal constituye el primer hito de esta discusión al registrar un coeficiente de ajuste (K_j) de 0,95 y una correlación de Pearson de $r = 0,98$. Estos valores demuestran que la precisión del dispositivo de bajo costo es equiparable al estándar del Tanque Clase A, permitiendo una gestión hídrica tecnificada sin las barreras económicas de la instrumentación convencional. Como señalan Allen et al. (2006), la determinación exacta de la evapotranspiración es la piedra angular para programar el riego con rigor científico. En este sentido, la implementación de métodos de bajo costo en la parcela responde a la necesidad de innovación tecnológica para mejorar la eficiencia hídrica en la agricultura familiar (Martínez-Gutiérrez et al., 2024). Esta autonomía técnica es fundamental en regiones donde la infraestructura meteorológica es limitada, permitiendo al productor una toma de decisiones basada en datos reales de su microclima local.

En relación con el comportamiento vegetativo, el híbrido Dekalb-7088 exhibió una respuesta diferencial marcada por la disponibilidad hídrica en sus etapas críticas de desarrollo fenológico. El

tratamiento T2 (100% ETc) propició las condiciones óptimas para el crecimiento, alcanzando valores máximos en altura de planta y diámetro de tallo. No obstante, es fundamental considerar que el éxito de estas variables agronómicas depende de prácticas adecuadas de manejo del cultivo y la selección de híbridos con alta utilidad hídrica (Alonso-Sánchez et al., 2025; Crosby-Galván et al., 2024). La arquitectura de la planta muestra una notable resiliencia en etapas tempranas, pero la restricción de humedad puede comprometer la biomasa final, tal como se ha observado en estudios de riego complementario (Rivetti, 2006). Por tanto, la estabilidad del crecimiento vegetativo actúa como un predictor confiable de la capacidad de carga del cultivo ante la demanda atmosférica.

El rendimiento de grano, fijado en 8,56 t/ha para el tratamiento T2, confirma que la satisfacción total de los requerimientos hídricos maximiza el potencial genético de la gramínea. La separación estadística mediante la prueba de Tukey sitúa al T2 en el rango superior de productividad, distanciándolo del déficit representado por el T1. Resulta imperativo destacar que el exceso de agua en el T4 no aumentó la producción, coincidiendo con las teorías de Doorenbos y Kassam (1980) sobre los efectos negativos de la saturación hídrica. Hallazgos similares en diferentes híbridos de maíz refuerzan que la respuesta productiva no es lineal respecto al volumen de agua aplicado, sino que depende de un umbral de optimización fisiológica (Fernández-Ortiz et al., 2022). Esta saturación hídrica puede inducir condiciones de anoxia radicular que limitan la absorción de nutrientes, reduciendo la eficiencia biológica del sistema productivo.

Desde la perspectiva de la eficiencia, el tratamiento T2 se consolida como el modelo de sostenibilidad más equilibrado, logrando transformar el recurso en biomasa comercial de forma óptima. Bajo condiciones de regiones semiáridas, la productividad del maíz está intrínsecamente ligada a la interacción entre la humedad disponible, los niveles de nitrógeno y la variación temporal de los requerimientos de riego (Anaya-Salgado et al., 2025; Guzmán Luna et al., 2023). Como proponen Sánchez et al. (2020), la sostenibilidad hídrica debe evaluarse por la capacidad de maximizar el rendimiento bajo diferentes disponibilidades de humedad. Esto es particularmente crítico ante los impactos proyectados del cambio climático en la producción regional de granos (Cruz-González et al., 2024). La gestión eficiente de la lámina de riego no solo protege el rendimiento, sino que mitiga la vulnerabilidad de los sistemas agroalimentarios ante eventos climáticos extremos.

La viabilidad financiera de estas intervenciones técnicas se manifiesta en la relación Beneficio/Costo de 1,14 obtenida bajo el manejo del T2. Al comparar este resultado con el tratamiento Testigo, se evidencia que la tecnificación mediante sistemas de goteo incrementa sustancialmente la rentabilidad frente a sistemas asociados tradicionales (Armada Rojas et al., 2025; Valdivieso Vidal, 2013). De acuerdo con Pérez Magaña et al. (2019), la situación social y tecnológica en el manejo del agua para riego condiciona la estabilidad de la economía agraria local. Por ello, el uso de tecnología de riego en zonas áridas representa una solución efectiva para mantener la producción forrajera y de grano incluso con recursos limitados (Jiménez et al., 2024; Maldonado Rojas, 2001). Esta rentabilidad es el incentivo necesario para la transición desde una agricultura de subsistencia hacia una producción comercial resiliente y competitiva.

Finalmente, la caracterización geográfica en el Ramal 2C otorga un valor de replicabilidad regional a estos hallazgos, considerando el padrón de usuarios y las particularidades del sistema local (RIDRENSUR EP-GPL, 2013). Las condiciones edáficas de textura arcillosa predominantes en Zapotillo exigen un manejo que considere las limitaciones físicas de los suelos en el sur del Ecuador (Valarezo et al., 1998). Estos desafíos hídricos deben abordarse bajo un enfoque de agricultura sostenible, integrando el riego en la parcela con la gestión ambiental de acuíferos frente al cambio global (Alcalá et al., 2023; COSV et al., 2011). En conclusión, la integración de la precisión evaporimétrica asegura la productividad del maíz ante la alta vulnerabilidad pluviométrica observada en la zona (Carmona-Martínez et al., 2025). La convergencia de la innovación técnica con el conocimiento edafoclimático local establece un precedente para la gestión hídrica en valles semiáridos transfronterizos.

Consideraciones finales

La implementación del tanque evaporímetro artesanal como herramienta de monitoreo hídrico demuestra que la precisión científica no es exclusiva de instrumentación de alto costo, validando una alternativa accesible para la agricultura familiar en zonas áridas. Este hallazgo permite que el productor asuma un rol activo en la gestión de sus recursos, rompiendo la dependencia de datos meteorológicos externos que a menudo no reflejan la realidad microclimática de la parcela. Al simplificar la tecnología sin sacrificar la exactitud técnica, se establecen las bases para una modernización del riego que es inclusiva, sostenible y directamente aplicable a la realidad socioeconómica de los valles interandinos y sistemas de riego locales.

La determinación de que la reposición completa de la demanda atmosférica constituye el punto óptimo de productividad revela que el equilibrio hídrico es el factor determinante para maximizar el potencial genético del maíz. Los resultados confirman que tanto el déficit como el exceso de agua erosionan la eficiencia del sistema, ya sea por la limitación del crecimiento o por la inducción de condiciones adversas en el suelo que asfixian el sistema radicular. Esta precisión en el manejo de la lámina de riego no solo garantiza una cosecha superior en términos de quintales por hectárea, sino que protege la integridad física y química del terreno, asegurando que la actividad agrícola no degrade el patrimonio natural del sector a largo plazo.

Finalmente, la transformación de la eficiencia técnica en rentabilidad económica tangible cierra el ciclo de resiliencia agroalimentaria propuesto en esta investigación, demostrando que la tecnificación es el único camino para superar la agricultura de subsistencia. Pasar de un margen de ganancia nulo en el manejo tradicional a un beneficio neto competitivo permite al agricultor enfrentar con mejores herramientas la volatilidad de los mercados y las amenazas del cambio climático. En última instancia, la sostenibilidad del sistema de riego depende de esta simbiosis entre el conocimiento técnico, el ahorro del recurso vital y la prosperidad financiera, factores que en conjunto garantizan la permanencia y el desarrollo de las comunidades rurales en entornos de escasez hídrica.

Agradecimientos

A nuestras universidades..

Conflicto de intereses

No se reporta.

Referencias

- Alcalá, F. J., Senent-Aparicio, J., & Martínez-Pagán, P. (2023). Coastal aquifer management: Hydrological, environmental, economic and social challenges in the context of global change. *Water*, 15(20), 3561. <https://doi.org/10.3390/w15203561>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje n.º 56). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Alonso-Sánchez, H., Espinosa-Calderón, A., López-López, C., Zaragoza-Esparza, J., Zamudio-González, B., & Tadeo-Robledo, M. (2025). Water utility in single-cross corn hybrids with detasseling and leaf removal. *Revista Terra Latinoamericana*, 43. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2266>
- Anaya-Salgado, A., Quevedo-Nolasco, A., Bolaños-González, M. A., Flores-Velázquez, J., Reyes-González, A., Santana-Espinoza, S., ... & Maldonado-Jaquez, J. A. (2025). The water efficiency and productivity of forage maize (*Zea mays* L.) in a semi-arid region under different humidity, nitrogen, and substrate levels. *Crops*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.3390/crops6010001>

- Valdivieso-Vidal, V. A., Orrala-Icaza, M. I., Castillo-Quijije, D. B., & Nieto-Cañarte, C. A. (2026). Sostenibilidad hídrica y productividad del maíz (*Zea mays*): Validación de tecnologías de bajo costo para la resiliencia agroalimentaria en Zapotillo, Ecuador. *e-Revista Multidisciplinaria Del Saber*, 4, e-RMS04062026. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v4i.431>
- Armadans Rojas, A. J., Enciso Maldonado, G. E., Ortíz Alfonso, A. A., Torres Moreno, A. A., & Pedrozo, M. (2025). Productividad y competencia en sistemas de cultivo asociado de maíz (*Zea mays* L.) y poroto (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) con y sin inoculación en Paraguay. *Revista Investigaciones y Estudios - UNA*, 16(1), 97-104. <https://doi.org/10.18004/rdgic.investig.estud.una.2025.junio.2916014312>
- Carmona-Martínez, J. L., María-Ramírez, A., & Hernández-Vázquez, M. (2025). Vulnerability of rainfed maize (*Zea mays* L.) to climate variability in the municipalities of Atltzayanca and Huamantla, State of Tlaxcala. *Revista Terra Latinoamericana*, 43. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2351>
- COSV, UNL, & AIDER. (2011). *Manual de agricultura sostenible, Módulo 6: El riego en la parcela*. Ediciones Universidad Nacional de Loja.
- Crosby-Galván, M. M., Mendoza-Pedroza, S. I., Antonio-Medina, A., & Vázquez, V. (2024). Prácticas agronómicas en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *Agro-Divulgación*, 4(3). <https://doi.org/10.54767/ad.v4i3.249>
- Cruz-González, A., Arteaga-Ramírez, R., Sánchez-Cohen, I., Soria-Ruiz, J., & Monterroso-Rivas, A. I. (2024). Impactos del cambio climático en la producción de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(1), 1-15. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i1.3327>
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1980). *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje n.º 33). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Fernández-Ortiz, C., González-Prieto, S., Da Silva-Oviedo, M. O., & Morel-López, E. (2022). Efecto del riego sobre las características agronómicas de diferentes híbridos de maíz. *Revista Científica de la UCSA*, 9(2), 86-93. <https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2022.009.02.086>
- Guzmán Luna, L., Quevedo Nolasco, A., Pascual Ramírez, F., Bolaños González, M. A., & Guzmán Luna, J. R. (2023). Variación temporal de los requerimientos de riego en maíz método Rodionov en DR001, Pabellón, Aguascalientes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(5), 52-65. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i5.3084>
- Jiménez, J. N., Barreras, C. I. C., Ramírez, J. G. L., Mancera, G. M., & Aguilar, E. de la R. (2024). Uso de la tecnología de riego para producción de maíz forrajero en zonas áridas. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(2), e70022. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n2-072>
- Maldonado Rojas, T. (2001). *Manual de diseño de métodos de riego*. Universidad de Chile.
- Martínez-Gutiérrez, G. A., Cervantes-Ortiz, F., & Rodríguez-Pérez, J. E. (2024). Innovación tecnológica y eficiencia en el uso del agua en la agricultura familiar. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 25(1), e3144. https://doi.org/10.21930/rcta.vol25_num1_art:3144
- Pérez Magaña, A., Macías López, A., & Gutierrez Villalpando, V. (2019). Situación social y tecnológica en el manejo del agua para riego en Puebla, México. *Acta Universitaria*, 29, 1-15. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2114>
- RIDRENSUR EP-GPL. (2013). *Padrón de usuarios y catastro de riego del sistema Zapotillo*. Gobierno Provincial de Loja.
- Rivetti, A. (2006). *Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina*. Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Sánchez, H. A., Robledo, M. T., Calderón, A. E., Esparza, J. Z., & López, C. L. (2020). Productividad del agua y rendimiento de maíz bajo diferente disponibilidad de humedad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(5), 1005–1016. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i5.2118>

Valdivieso-Vidal, V. A., Orrala-Icaza, M. I., Castillo-Quijije, D. B., & Nieto-Cañarte, C. A. (2026). Sostenibilidad hídrica y productividad del maíz (*Zea mays*): Validación de tecnologías de bajo costo para la resiliencia agroalimentaria en Zapotillo, Ecuador. *e-Revista Multidisciplinaria Del Saber*, 4, e-RMS04062026. <https://doi.org/10.61286/e-rms.v4i.431>

Valarezo, C., Chamba, J., & Sánchez, R. (1998). *Condiciones físicas de los suelos de la región sur del Ecuador*. Universidad Nacional de Loja. <https://koha.unl.edu.ec/bib/12809>

Valdivieso Vidal, V. A. (2013). *Efecto de cuatro láminas de riego por goteo sobre la producción del cultivo de maíz duro (*Zea mays*), según la evaporación del tanque evaporímetro clase A* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/items/04b04719-d350-49c9-afd3-b66e88bce210>