

3D geometric reconstruction and water balance analysis to estimate water retention in a high-Andean q'ocha in Pucachupa, Puno

Diaz Garcia, Lucia Viviana (1); Sanchez Mauricio, Hannia Silvia (1); Cuba Gadea, Kia Maria (1); Hsu, Libby (2);

Julca, Kathleen (3), Rodríguez Zuñiga, Ursula Fabiola (1)

1: Universidad de Ingenieria y Tecnologia - (PE)

lucia.diaz@utec.edu.pe hannia.sanchez@utec.edu.pe kia.cuba@utec.edu.pe urodriguez@utec.edu.pe

2: Massachussetts Institute of Technology - (US);

slhsu@mit.edu

3: University of Hawaii (US)

kjulca@hawaii.edu

Abstract– High-Andean q'ochas are traditional water storage systems, typically constructed from stone, clay, and earth, that help regulate water flow in mountain ecosystems. However, many studies model these systems using idealized geometries, which limits our ability to understand their dynamics and their actual storage capacity. This study integrates three-dimensional geometric reconstruction based on field measurements with a simplified water balance formulation, with the aim of estimating the storage capacity of a q'ocha located at 3,900 m a.s.l. in Pucachupa, Puno, Peru. The geometric reconstruction yielded a flooded surface area of 14.89 m² and a stored volume under field-observed conditions of 5.19 m³. Additionally, soil and environmental parameters were measured to characterize the local conditions associated with water retention. A water balance model was used to represent precipitation, evaporation, and infiltration processes, incorporating monthly precipitation reference data obtained from the National Meteorological and Hydrological Service (SENAMHI-Peru) for a preliminary simulation, thereby determining the behavior of a qocha. The results show that the actual geometry of the reservoir defines the level–area–volume relationship that controls temporary water storage and allows for an initial assessment of the qocha's hydrological response to monthly climate variability, reducing the reliance on idealized geometries to estimate its water retention capacity.

keywords– qochas; 3D geometric reconstruction; water balance; water retention; infiltration; computer simulation

Reconstrucción geométrica 3D y balance hídrico para estimar la retención de agua en una q'ocha altoandina en Pucachupa, Puno

Díaz García, Lucia Viviana (1); Sánchez Mauricio, Hannia Silvia (1); Cuba Gadea, Kia Maria (1); Hsu, Libby (2); Julca, Kathleen (3), Rodríguez Zuñiga, Ursula Fabiola (1)

1: Universidad de Ingeniería y Tecnología - (PE)

lucia.diaz@utec.edu.pe hannia.sanchez@utec.edu.pe kia.cuba@utec.edu.pe urodriguez@utec.edu.pe

2: Massachusetts Institute of Technology - (US);

slhsu@mit.edu

3: University of Hawaii (US)

kjulca@hawaii.edu

Resumen– Las q'ochas altoandinas son sistemas ancestrales de almacenamiento de agua, usualmente contruidos con piedra, arcilla y tierra, que contribuyen a la regulación hídrica en ecosistemas de montaña. Sin embargo, muchos estudios representan estos sistemas mediante geometrías idealizadas, lo que limita la estimación y el entendimiento de su dinámica y su capacidad real de almacenamiento. Este estudio integra la reconstrucción geométrica tridimensional a partir de mediciones de campo con una formulación simplificada de balance hídrico, con el propósito de estimar la capacidad de almacenamiento de una q'ocha ubicada a 3900 msnm en Pucachupa, Puno, Perú. Producto de la reconstrucción geométrica se obtuvo un área superficial inundada de 14.89 m² y el volumen almacenado bajo condiciones observadas en campo de 5,19m³. Asimismo, se midieron parámetros del suelo y ambientales para caracterizar las condiciones locales asociadas a la persistencia del agua. La formulación de balance hídrico se empleó para representar los procesos de precipitación, evaporación e infiltración, incorporando datos mensuales referenciales de precipitación obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI- Perú) para una simulación preliminar, obteniendo así, el comportamiento de una qocha. Los resultados muestran que la geometría real del reservorio define la relación nivel-área-volumen que controla el almacenamiento temporal de agua y permite evaluar, de manera inicial, la respuesta hídrica de la q'ocha frente a la variabilidad climática mensual, reduciendo la dependencia de geometrías idealizadas para estimar su capacidad de retención hídrica.

Palabras clave– qochas altoandinas; reconstrucción geométrica 3D; balance hídrico; retención hídrica; infiltración; simulación computacional.

I. INTRODUCCIÓN

Las regiones altoandinas de América Latina enfrentan una creciente vulnerabilidad hídrica asociada a la variabilidad climática, la reducción de fuentes glaciares y la marcada

estacionalidad de las precipitaciones [1]. En este contexto, las qochas altoandinas han sido históricamente utilizadas como sistemas naturales de captación y almacenamiento de agua, desempeñando un rol clave en la regulación hídrica local y en la sostenibilidad de las comunidades rurales de montaña [2]–[4].

Diversos estudios han señalado que las qochas contribuyen a la disponibilidad de agua durante la época seca mediante procesos de almacenamiento temporal, infiltración y recarga del suelo [5]. Desde una perspectiva numérica, estos sistemas pueden interpretarse como infraestructuras hidráulicas pasivas cuyo funcionamiento depende no sólo del régimen de precipitaciones, sino también de su geometría, del área superficial expuesta y de las propiedades del suelo circundante [6].

No obstante, gran parte de los enfoques existentes representan a las qochas mediante modelos hídricos simplificados, en los que se asumen áreas y profundidades constantes. Este tipo de aproximaciones limita la comprensión del papel que desempeña la geometría real del reservorio en la retención hídrica y en la persistencia del agua almacenada, particularmente en contextos donde la precipitación no es continua [7].

En los últimos años, el uso de herramientas computacionales ha permitido incorporar representaciones geométricas más realistas en el análisis de sistemas hídricos, mejorando la capacidad de modelar procesos dependientes del dominio físico [8]. Sin embargo, la aplicación de estas metodologías a sistemas tradicionales como las q'ochas altoandinas aún es limitada, especialmente cuando se busca integrar mediciones de campo, reconstrucción geométrica tridimensional y análisis

hídrico reproducible. Asimismo, estudios de balance hídrico en reservorios superficiales han señalado que una de las limitaciones frecuentes en modelos regionales es la escasa disponibilidad de información geométrica detallada del reservorio, como su forma y relación área-volumen [8].

En este trabajo se analiza una q'ocha ubicada en la comunidad de Pucachupa a 3900 msnm, la cual ha mostrado una notable persistencia de agua incluso durante la época seca. El objetivo principal en este estudio es desarrollar una metodología que integre la reconstrucción geométrica tridimensional basada en mediciones de largo, ancho y altura, con el fin de caracterizar su morfología y estimar su capacidad de almacenamiento hídrico. De esta forma, aumenta la precisión y se considera la irregularidad natural de la qocha para así disminuir los errores de estimación en su capacidad real de almacenamiento de forma dinámica y en sistemas de poco volumen.

Además, se propone representar su funcionamiento mediante una ecuación de balance hídrico que describa el comportamiento del sistema, a fin de demostrar que la capacidad de retención de agua depende tanto de la precipitación como de la interacción entre la geometría de la q'ocha y las propiedades del suelo. Esta aproximación busca aportar una base técnica reproducible para el análisis y la gestión sostenible de sistemas hídricos altoandinos.

II. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico combina trabajo de campo, procesamiento de datos, modelado geométrico, representación hídrica y simulación en Python 2.0, garantizando la trazabilidad entre las mediciones reales y los resultados obtenidos [9].

La Fig. 1 presenta el diagrama general de la metodología empleada, donde se detallan las etapas principales del estudio.

A Trabajo de campo

En una primera fase se desarrolló el trabajo de campo, el cual incluyó la selección de la qocha de estudio ubicada en la comunidad de Pucachupa, Puno (−15.040200, −70.361643), a una altitud aproximada de 3,900 m sobre el nivel del mar. La selección se realizó priorizando la capacidad de retención de agua en el área de estudio, buena calidad del agua según los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-Agua) vigentes en el Perú (D.S. N.º 004-2017-MINAM) y las guías internacionales de la OMS [10], [11] conforme reportado en Díaz et. al [12], gracias a la autorización de la comunidad de Pucachupa y previa coordinación con la propietaria de la q'ocha Sra. Jenny Marisol Afancho Pari (enero y julio de 2025).

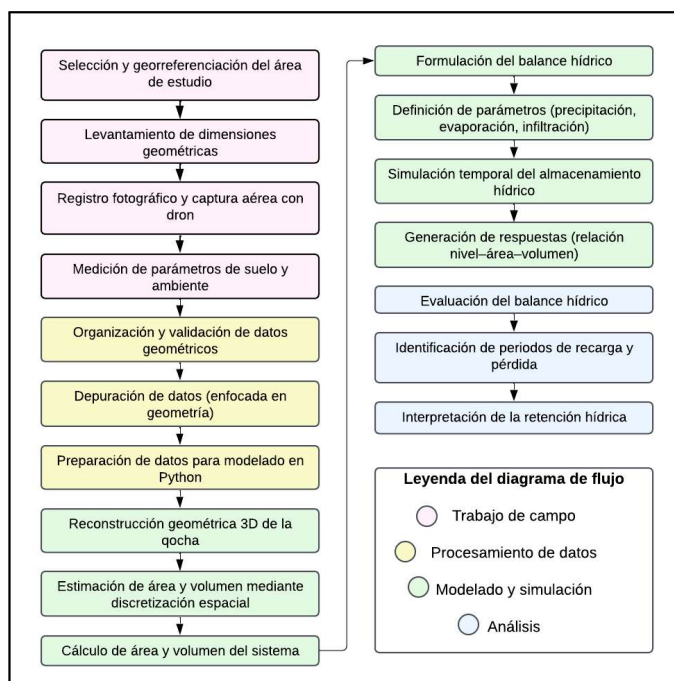


Fig. 1 Planificación del desarrollo del proyecto.

En el trabajo de campo se utilizaron herramientas digitales de medición mediante la aplicación “Medición” Apple iOS [13] para registrar dimensiones geométricas de la qocha y un dron de la marca *HOVER Air* [14], para verificación de la geometría y obtener un registro visual de su forma y extensión. También, se emplearon instrumentos como cintas métricas de 20 m [15] para validar las medidas realizadas con las herramientas digitales.

Por otro lado, se recogieron datos de calidad de suelo *in situ* y del ambiente aproximadamente a 0.5 m del borde de la qocha utilizando un sensor multiparamétrico portátil **6-in-1 Soil Tester** de Agriculture Garden Farmer [16]. Los parámetros registrados incluyeron humedad del suelo (%), conductividad eléctrica (μS/cm), pH y temperatura del suelo (°C), intensidad de radiación solar (lux) y humedad relativa del aire (%). Estas mediciones permitieron caracterizar las condiciones locales del suelo que influyen en la retención de agua y en el comportamiento de infiltración del sistema evaporación y retención hídrica.

B Reconstrucción geométrica tridimensional

Los datos geométricos resultado de las medidas de campo fueron procesados e implementados en un entorno de programación Python 3.12.0, utilizando la distribución Anaconda y el entorno de desarrollo Spyder. Para el manejo y estructuración de los datos se empleó la librería *pandas*, mientras que para la generación de gráficos y visualización de resultados se utilizó *matplotlib*. En este entorno se realizó la reconstrucción geométrica tridimensional de la qocha. El

modelo se construyó preservando las proporciones reales medidas en campo y reproduciendo de manera aproximada la forma irregular del cuerpo de agua.

C Estimación de capacidad de almacenamiento

Con base en la reconstrucción geométrica tridimensional de la q'ocha, se estimó su capacidad de almacenamiento mediante un enfoque numérico basado en discretización espacial e integración numérica para calcular el volumen total de agua almacenada. La selección de este procedimiento se justifica porque la q'ocha presenta una morfología irregular, con bordes no uniformes y variaciones de profundidad, por lo que no resulta adecuado aplicar expresiones analíticas simples asociadas a geometrías idealizadas, como prismas, cilindros o paraboloides.

En este tipo de casos, los métodos numéricos permiten aproximar magnitudes integrales dividiendo el dominio físico en elementos pequeños y sumando las contribuciones locales de cada celda. Este criterio es consistente con los fundamentos de la integración numérica aplicada a problemas de ingeniería, donde una magnitud total puede estimarse a partir de datos discretos distribuidos sobre un dominio espacial [17]. La superficie de la qocha fue discretizada mediante una malla bidimensional regular, definida por n_x y n_y divisiones en las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente. Cada celda de la malla representa un área elemental constante:

$$dA = \Delta x \cdot \Delta y \quad (1)$$

donde Δx y Δy corresponden al espaciamiento entre puntos consecutivos de la malla en las direcciones longitudinal y transversal. Estos valores fueron calculados a partir de las dimensiones reales medidas en campo indicadas en la sección II.A.

La profundidad local del agua se obtuvo directamente del modelo geométrico tridimensional, expresada en metros reales. Se consideraron únicamente aquellas celdas cuya profundidad resultó negativa con respecto al nivel de referencia, ya que estas representan zonas efectivamente ocupadas por agua dentro de la q'ocha.

El área superficial inundada A se determinó como la suma de las áreas elementales correspondientes a las celdas con presencia de agua:

$$A = N \cdot dA \quad (2)$$

donde N representa el número total de celdas inundadas. Posteriormente, el volumen almacenado V se calculó mediante la integración numérica de la profundidad local sobre el área inundada, de acuerdo con:

$$V = \sum_{i=1}^N |z_i| \cdot dA \quad (3)$$

donde Z_i representa la profundidad local en la celda i , expresada respecto al nivel de referencia. Se emplea $|z_i|$ debido a que las profundidades se registran como valores negativos en el modelo geométrico, pero para el cálculo del volumen deben considerarse como magnitudes positivas.

Este enfoque permite estimar directamente el área superficial inundada y el volumen almacenado, preservando la geometría real del sistema y evitando simplificaciones excesivas sobre la forma de este recurso hídrico. Además, garantiza la trazabilidad entre las mediciones de campo, la reconstrucción geométrica tridimensional y los resultados numéricos obtenidos.

D Balance hídrico

A partir del paso anterior, se formuló un segundo modelo matemático simplificado orientado a describir el comportamiento hídrico de la qocha durante la época de lluvias. La q'ocha se modela como un sistema de almacenamiento abierto y de pequeña escala, en el cual la precipitación directa sobre el área inundada actúa como el flujo de entrada, mientras que la evaporación y la infiltración representan los principales mecanismos de salida. La escorrentía superficial no se incorporó como término independiente en esta primera formulación. En ambientes áridos y semiáridos, la escorrentía superficial ocurre principalmente cuando la intensidad de lluvia supera la capacidad de infiltración del suelo; además, la infiltración depende del uso/coertura del suelo, tipo de suelo, intensidad de lluvia, humedad y pendiente [18]. Esta simplificación es consistente con enfoques de balance hídrico aplicados en regiones con escasa disponibilidad de datos, donde la complejidad del modelo debe mantenerse acorde con la información disponible [19]. Bajo estas consideraciones, el balance hídrico del sistema se expresa mediante la ecuación de conservación de masa:

$$\frac{dV(t)}{dt} = P(t) \cdot A(h) - E(t) \cdot A(h) - I(t) \quad (4)$$

Donde:

- $V(t)$ es el volumen de agua almacenado en la qocha (m^3)
- $P(t)$ es la precipitación efectiva ($\frac{m}{día}$).

- $E(t)$, es la tasa de evaporación superficial ($\frac{m}{día}$).
- $A(h)$ es el área superficial inundada obtenida a partir de la geometría 3D (m^2).
- $I(t)$ es el flujo de infiltración hacia el subsuelo ($\frac{m^3}{día}$).

Este planteamiento permite vincular directamente el comportamiento hídrico del sistema con su geometría real.

III.RESULTADOS

Las figuras 2 y 3 muestran el registro del trabajo en campo realizado en visitas de julio del 2025 y enero del 2026, la Fig. 2 muestra la foto con los datos obtenidos en la aplicación *Medición* de iOS, mientras que la Fig. 3 muestra una vista aérea de la geometría irregular de la qocha obtenida mediante dron de la marca *Hover Air*.

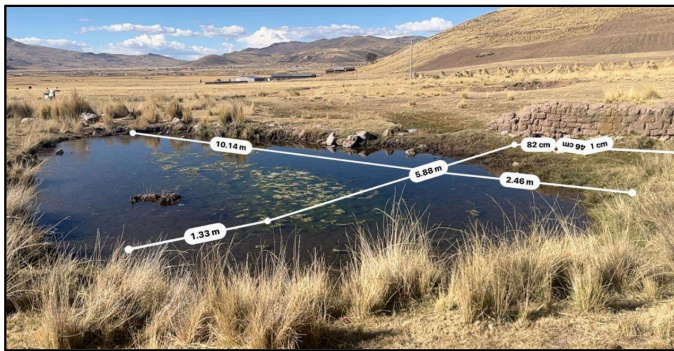


Fig. 2 Dimensiones de la qocha medidas con la aplicación *Medición* en dispositivos iOS.



Fig. 3 Dimensiones de la qocha observadas mediante registro aéreo con dron *Hover Air*.

A Capacidad geométrica de almacenamiento

A partir de la reconstrucción geométrica tridimensional se estimó la capacidad de almacenamiento de la qocha estudiada. Los resultados indican un área superficial inundada de 14.89 m^2 y un volumen almacenado aproximado de 5.19 m^3 , valores obtenidos directamente a partir de las dimensiones reales medidas en campo.

La Fig. 4 presenta el modelo tridimensional obtenido como resultado de la reconstrucción geométrica de la q'ocha conforme mencionado en la metodología, el cual constituye la base física del sistema analizado y permite establecer relaciones espaciales entre la profundidad, el área superficial inundada y el volumen almacenado. Esta reconstrucción geométrica es fundamental para el posterior análisis hídrico.

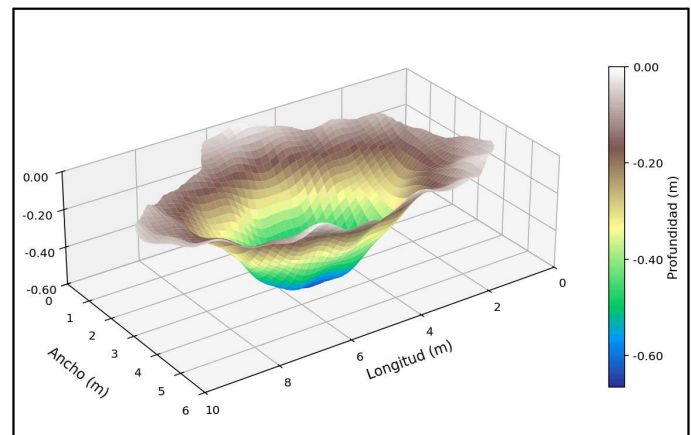


Fig. 4 Reconstrucción geométrica tridimensional de la qocha.

De acuerdo con principios hidrológicos establecidos, la retención de agua en sistemas naturales no depende solo de la precipitación incidente, sino también de la morfología del terreno, que regula los procesos de almacenamiento e infiltración [20], [21]. El análisis de la geometría reconstruida revela una distribución variable en profundidades: una zona central más profunda con bordes de pendiente suave. Esta configuración favorece la retención progresiva del agua, incrementa la permanencia del volumen almacenado y prolonga el tiempo de residencia. En este sentido, la geometría de la qocha define directamente la relación nivel-área-volumen, controlando la capacidad de almacenamiento superficial, concepto representado mediante curvas área-elevación en hidrología [22]. Este control geométrico es consistente con principios hidrológicos que destacan cómo la morfología y la distribución de elevaciones influyen en el almacenamiento e infiltración [20], [21].

B Influencia de la geometría en la retención hídrica

El balance hídrico se realizó en función del almacenamiento, el área inundada y el volumen retenido. Bajo este enfoque, una depresión central más profunda y bordes irregulares de

pendiente suave permiten distribuir el agua de manera progresiva dentro del reservorio, amortiguando las variaciones del volumen frente a cambios en el nivel del agua. Además de la geometría, la presencia de elementos pétreos en la estructura de la qocha puede contribuir a la estabilidad física del sistema [23]. Las piedras ubicadas en bordes o zonas de contención pueden actuar como elementos de refuerzo, ayudando a estabilizar los taludes, conservar la forma del reservorio y reducir el arrastre de material por acción del agua. Este aspecto es relevante porque las qochas rústicas suelen aprovechar depresiones naturales del terreno y materiales locales para captar y almacenar agua de lluvia [23].

C Caracterización del suelo y condiciones ambientales

Con el fin de complementar la caracterización del entorno de la qocha, se realizaron mediciones *in situ* de parámetros físicos y químicos del suelo y del ambiente. Los valores obtenidos se presentan en la **Tabla I**.

TABLA I
PARÁMETROS AMBIENTALES Y DEL SUELO MEDIDOS EN SITU MEDIANTE SENSOR MULTIPARAMÉTRICO

Variable	Valor Obtenido	Unidad
Conductividad eléctrica del suelo	855	uS/cm
Humedad de suelo	99	%
pH del suelo	8.0	-
Temperatura del suelo	26.6	°C
Intensidad de radiación solar	58,100	lux
Humedad relativa del aire	36	%

Los parámetros medidos *in situ* permiten interpretar de manera preliminar las condiciones edáficas y ambientales del entorno inmediato de la q'ocha. La conductividad eléctrica registrada en enero del 2026 fue de 0.855 dS/m. Al contrastar este valor con rangos de salinidad reportados para suelos, se observa que se encuentra dentro del intervalo de suelos no salinos, generalmente definido entre 0 y 2 dS/m; por encima de 4 dS/m se consideran condiciones de salinidad moderada o problemática para muchos sistemas agrícolas [24]. Por tanto, el valor obtenido no sugiere acumulación elevada de sales en el punto de medición.

Asimismo, la humedad del suelo fue de 99 %, lo que indica una condición cercana a la saturación al momento de la medición. Esta condición, junto con un pH de 8.0, correspondiente a un rango moderadamente alcalino, sugiere un entorno con alta disponibilidad de agua y sin evidencia

inmediata de salinidad elevada [24], [25]. Sin embargo, la temperatura del suelo de 26.6 °C, la radiación solar de 58,100 lux y la humedad relativa del aire de 36 % indican condiciones que podrían favorecer la evaporación superficial. En conjunto, estos resultados describen un sistema con alta humedad local durante la medición, pero cuya dinámica hídrica debe validarse con mediciones adicionales de textura, infiltración y conductividad hidráulica.

D Simulación preliminar del balance hídrico mensual

Con el fin de demostrar la aplicabilidad de la ecuación de balance hídrico (ecuación 1), se realizó una simulación mensual preliminar usando el área superficial inundada obtenida en este estudio mediante reconstrucción geométrica 3D. Para ello, se emplearon los valores anteriormente calculados $A_{max} = 14.89 m^2$, a partir del modelo geométrico

de la q'ocha, y el volumen máximo estimado de $5.19 m^3$. La precipitación mensual fue considerada como dato climático referencial para Pucará, Puno, extraídas de la página del Servicio de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) [26], los cuales integran observaciones pluviométricas para representar la precipitación en el Perú [18]. Los valores de evaporación e infiltración fueron asumidos para fines de simulación preliminar, considerando que la evapotranspiración depende de variables meteorológicas como radiación, temperatura, humedad y viento [27], mientras que la infiltración depende de las propiedades y condiciones del suelo [28].

La ecuación continua del balance hídrico fue adaptada a una escala mensual. En este caso, los términos de precipitación, evaporación e infiltración se expresaron como láminas mensuales en mm/mes. Por ello, el balance neto mensual fue convertido a metros dividiendo entre 1000 y luego multiplicado por el área superficial inundada:

$$\Delta V_{mes} = \frac{(P_{mes} - E_{mes} - I_{mes})}{1000} \cdot A_{max} \quad (5)$$

La Fig. 5 muestra las entradas y salidas consideradas en el balance hídrico mensual. Se observa que la precipitación es mayor entre diciembre y marzo, mientras que disminuye durante la época seca (mayo -agosto). En cambio, la evaporación asumida se mantiene elevada durante gran parte del año, y la infiltración asumida actúa como una pérdida constante del sistema.

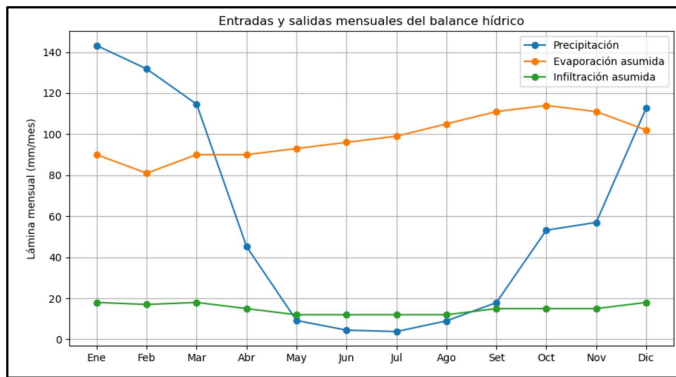


Fig. 5 Componentes mensuales considerados en el balance hídrico de la q'ocha.

La Fig. 6 presenta el balance hídrico neto mensual, calculado como $P - E - I$. Los resultados muestran valores positivos en enero, febrero y marzo, lo que indica meses con potencial de recarga. A partir de abril, el balance se vuelve negativo, especialmente entre mayo y septiembre, lo que sugiere una posible reducción del volumen almacenado durante la época seca.

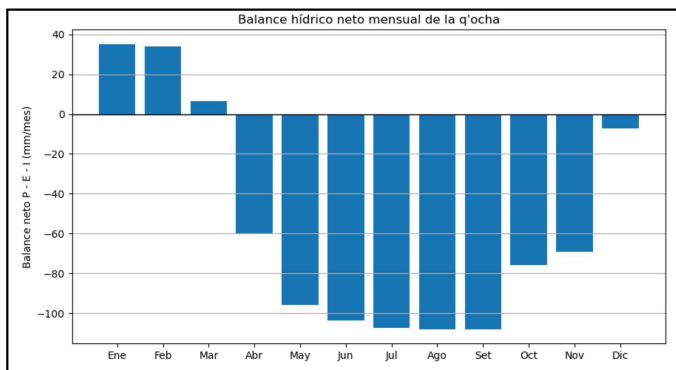


Fig. 6 Balance hídrico neto mensual estimado para la q'ocha.

La Figura 7 muestra el cambio mensual potencial del volumen almacenado en la q'ocha, convirtiendo el balance hídrico de mm/mes a m³/mes con su área real. Esto confirma que la geometría reconstruida permite estimar volúmenes y aplicar el balance hídrico de forma preliminar y representativa.

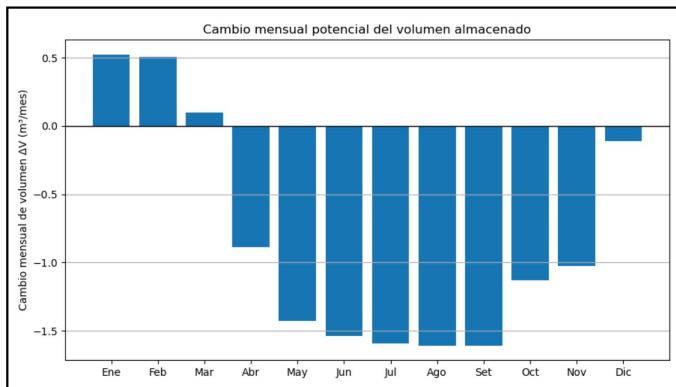


Fig. 7 Cambio mensual potencial del volumen almacenado en la q'ocha.

E Implicancias del suelo y la persistencia del agua

La persistencia de agua observada en la qocha estudiada, incluso durante la época seca, sugiere que la retención hídrica no depende únicamente de la precipitación, sino también de la interacción entre la geometría del reservorio, las condiciones del suelo circundante y la estructura física de la qocha. En ecosistemas altoandinos del Perú, los bofedales y zonas húmedas asociadas pueden retener agua en las partes altas de las cuencas, funcionando como reservas hídricas naturales [29]. Asimismo, manuales técnicos de construcción y mantenimiento de q'ochas señalan que, para sistemas de cosecha de agua, son favorables los suelos arcillosos o limosos, debido a su menor permeabilidad y mayor capacidad de almacenamiento respecto a suelos más gruesos [23].

IV. CONCLUSIONES

En este estudio se desarrolló una metodología integrada basada en mediciones de campo, reconstrucción geométrica tridimensional e integración numérica para estimar la capacidad de almacenamiento de una q'ocha altoandina. Este enfoque permitió representar la morfología irregular del sistema de manera más realista, evitando el uso de geometrías idealizadas. A partir del modelo geométrico 3D, se estimó un área superficial inundada de 14.89 m² y un volumen de almacenamiento de 5.19 m³. Los resultados evidencian que la geometría del reservorio controla directamente la relación nivel-área-volumen, influyendo en la capacidad de retención hídrica y en la persistencia del agua.

La caracterización del suelo y del entorno indicó condiciones favorables para la retención de agua, con alta humedad y baja salinidad, aunque factores como la radiación solar y la temperatura sugieren la presencia de procesos activos de evaporación. El modelo de balance hídrico, formulado a partir de la conservación de masa, permitió representar de manera conceptual la dinámica del sistema. La simulación mensual preliminar mostró un comportamiento estacional, con balances positivos durante la temporada de lluvias y negativos en la época seca, evidenciando la dependencia del almacenamiento hídrico de las condiciones climáticas.

En conjunto, los resultados demuestran que la retención de agua en la q'ocha depende de la interacción entre su geometría, las propiedades del suelo y las variables climáticas. Este trabajo aporta una base metodológica reproducible para el análisis de sistemas hídricos altoandinos. Finalmente, se recomienda incorporar en futuros estudios monitoreo temporal del nivel de agua, mediciones directas de infiltración y datos climáticos locales de alta resolución, con el fin de mejorar la precisión y validación del modelo propuesto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la comunidad de Pucachupa por su disposición, colaboración y participación durante el trabajo de campo, así como por brindar el permiso para visitar sus q'ochas y realizar la recolección de datos en el área de estudio. Asimismo, se agradece al equipo de Qochas Resilientes por el acompañamiento y apoyo durante el desarrollo del proyecto. De manera especial, se reconoce la contribución de Stephanie Gavilán y Shaela Sageth por su aporte en los talleres que forman parte de las actividades del trabajo de campo y en el proceso de recopilación de información.

REFERENCIAS

- [1] M. Perez y J. M. Libra, "Escasez en la tierra de la abundancia: riesgo hídrico en América Latina y el Caribe," 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.18235/0004140>
- [2] P. Chevallier, B. Pouyaud, W. Suarez, and T. Condom, "Climate change threats to environment in the tropical Andes: glaciers and water resources," Reg. Environ. Change, vol. 11, no. 1, supl., pp. 179–187, Mar. 2011. Accessed: Dec. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/225611787_Climate_change_threats_to_environment_in_the_tropical_Andes_Glaciers_and_water_resources
- [3] J. C. Postigo, K. R. Young, and K. A. Crews, "Change and continuity in a pastoralist community in the high Peruvian Andes," Hum. Ecol., vol. 36, no. 4, pp. 535–551, Aug. 2008. Accessed: Jan. 4, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/226073200_Change_and_Continuity_in_a_Pastoralist_Community_in_the_High_Peruvian_Andes
- [4] W. Buytaert, R. Céleri, B. De Bièvre, F. Cisneros, G. Wyseure, J. Deckers, and R. Hofstede, "Human impact on the hydrology of the Andean páramos," Earth-Sci. Rev., vol. 79, no. 1–2, pp. 53–72, 2006. Accessed: Jan. 4, 2026. [Online]. Available: <https://condesan.org/wp-content/uploads/2017/07/Articulo2.pdf>
- [5] C. Sanchis Ibor and R. Boelens, "Gobernanza del agua y territorios hidrosociales: del análisis institucional a la ecología política," Cuad. Geogr., vol. 101, pp. 13–28, 2018. Accessed: Jan. 5, 2026. [Online]. Available: <https://share.google/lxscSjPKN8YdLor5t>
- [6] P. Carrión-Mero et al., "Water Sowing and harvesting application for water management on the slopes of a volcano," Heliyon, vol. 9, no. 5, Art. no. e16029, May 2023. Accessed: Jan. 8, 2026. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10189417/>
- [7] K. J. Beven, Rainfall-Runoff Modelling: The Primer, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley-Blackwell, 2012. Accessed: Jan. 11, 2026. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Rainfall-Runoff+Modelling%3A+The+Primer%2C+2nd+Edition-p-9780470714591>
- [8] D. Koutsoyiannis, "Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation," Hydrol. Sci. J., vol. 49, no. 4, pp. 575–590, Aug. 2004. Accessed: Jan. 10, 2026. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.49.4.575.54430>
- [9] J. Pimenta, J. N. Fernandes, y A. Azevedo, "Remote Sensing Tool for Reservoir Volume Estimation", Remote Sens., vol. 17, no. 4, p. 619, feb. 2025, doi: 10.3390/rs17040619.
- [10] OMS, Guidelines for Drinking-water Quality, 4th ed., WHO, 2022.
- [11] Ministerio del Ambiente (MINAM), Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, Lima, Perú, 2017.
- [12] L. V. Díaz, M. A. Alegría, S. Gavilán Chino, K. Julca, L. Hsu y Ú. Rodríguez Zúñiga, "Caracterización físico-química y análisis morfométrico de una q'ocha altoandina en época de sequía: La Ingeniería Química para la Gestión Sostenible," en *Chem-E Day – UTEC Call for Papers 2025: Integrando tecnologías emergentes para la ingeniería química*, Lima, Perú: UTEC Press, 2025. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.utec.edu.pe/handle/20.500.12815/506>
- [13] "Medición – App Store – Apple," *Apple App Store*. Accessed: Jan. 15, 2026. [Online]. Available: <https://apps.apple.com/gt/app/medici%C3%B3n/id1383426740>
- [14] Amazon, "HOVERAir X1 PRO Cámara Drone con Seguimiento de IA," *Amazon.com*. [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.com/-/es/HOVERAir-velocidad-seguimiento-completamente-autom%C3%A1tico/dp/B0DGTCTHF8>.
- [15] "Cinta Métrica - 20 Metros," MercadoLibre, Perú. Accessed: Jan. 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.mercadolibre.com.pe/cinta-metrica-x-20-metros/p/MPE24102193>
- [16] "Probador Detector de Suelo 6 en 1 PH Temperatura Humedad Humedad Nutriente Fertilidad Medidor," *eBay*, Accessed: Jan. 17, 2026. [Online]. Available: <https://www.ebay.com/itm/205438395984?norover=1&mkevt=1>
- [17] J. Blazek, *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, 3rd ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2015. Accessed: Jan. 30, 2026. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780080999951/computational-fluid-dynamics>
- [18] C. Aybar, C. Fernández, A. Huerta, W. Lavado, F. Vega, and O. Felipe-Obando, "Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 65, no. 5, pp. 770–785, 2020, doi: 10.1080/02626667.2019.1649411.
- [19] A. Güntner, M. S. Krol, J. C. de Araújo, y A. Bronstert, "Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 49, no. 5, pp. 901–918, oct. 2004, doi: 10.1623/hysj.49.5.901.55139.
- [20] V. T. Chow, D. R. Maidment y L. W. Mays, *Applied Hydrology*. New York, USA: McGraw-Hill, 1988.
- [21] S. L. Dingman, *Physical Hydrology*, 2nd ed. Long Grove, IL, USA: Waveland Press, 2002.
- [22] W. Brutsaert, *Hydrology: An Introduction*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [23] J. Valdera, A. M. Ling, P. Alarcón, F. Valer, J. Pérez, and V. Bustinza, *Siembra y cosecha de agua: Las qochas rústicas*, Manual Técnico no. 6. Lima, Perú: FONCODES/PACC Perú, 2015.
- [24] USDA-NRCS, "Soil Electrical Conductivity". Accessed: Jan. 04, 2026. [Online]. Available: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Soil%20Electrical%20Conductivity.pdf>

- [25] R. R. Weil and N. C. Brady, The Nature and Properties of Soils, 15th ed. Columbus, OH, USA: Pearson, 2017. Accessed: Jan. 12, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition
- [26] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), “Descarga de datos meteorológicos.” [En línea]. Disponible: <https://www.senamhi.gob.pe/site/descarga-datos/>. [Accedido: 28-abr-2026].
- [27] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome, Italy: FAO, 1998.no. 5, pp. 770–785, 2020, doi: 10.1080/02626667.2019.1649411.
- [28] USDA Natural Resources Conservation Service, “Infiltration,” Soil Quality Indicators, U.S. Department of Agriculture, 2014.
- [29] M. S. Maldonado Fonkén, “An introduction to the bofedales of the Peruvian High Andes,” Mires and Peat, vol. 15, art. no. 05, pp. 1–13, 2014, doi: 10.19189/001c.128519.