



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES



EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA
DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL AGUA DE WARU
WARU CALENTADO POR RADIACIÓN SOLAR

Luis Miguel Pari Sucasaca

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN
ENERGÍAS RENOVABLES

Asesor:

Dr. Henry Pizarro Viveros



Juliaca, 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES



EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA
DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL AGUA DE WARU
WARU CALENTADO POR RADIACIÓN SOLAR

Luis Miguel Pari Sucasaca

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN
ENERGÍAS RENOVABLES

Asesor:

Dr. Henry Pizarro Viveros



Juliaca, 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

**ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ENERGÍAS
RENOVABLES**



**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA
DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL AGUA DE WARU
WARU CALENTADO POR RADIACIÓN SOLAR**

Luis Miguel Pari Sucasaca

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍAS
RENOVABLES**

Asesor:

Dr. Henry Pizarro Viveros

Juliaca, 2025

Ficha catalográfica

Pari, L. (2025). *Evaluación experimental y simulación numérica del comportamiento térmico del agua de waru waru calentado por radiación solar*. (Tesis pregrado).
Universidad Nacional de Juliaca.

AUTOR: Luis Miguel Pari Sucasaca

TÍTULO: Evaluación experimental y simulación numérica del comportamiento térmico del agua de waru waru calentado por radiación solar.

PUBLICACIÓN: Juliaca,

DESCRIPCIÓN: 85 pp.

NOTA: Tesis de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables – Universidad Nacional de Juliaca

CÓDIGO: 02-000046-02/P26

NOTA: Incluye bibliografía

ASESOR: Dr. Henry Pizarro Viveros

PALABRA CLAVE: Energía solar, simulación numérica, comportamiento térmico, waru waru, altiplano peruano

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL
COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL AGUA DE WARU WARU
CALENTADO POR RADIACIÓN SOLAR**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Presentado por:

Luis Miguel Pari Sucasaca

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Elmer Rodrigo Aquino Larico

PRESIDENTE DE JURADO

Mg. Junior Torres Yucra

JURADO (secretario)

2° MIEMBRO

Mg. Alex Mario Lerma Coaquira

JURADO (Vocal)

3° MIEMBRO

Dr. Henry Pizarro Viveros
ASESOR DE TESIS

DEDICATORIA

A mi familia, quienes con amor, esfuerzo y dedicación me han guiado en cada paso de mi vida. Gracias por inculcarme valores, por su apoyo incondicional y por ser mi mayor fuente de inspiración.

A mis compañeros de estudios, gracias por su cariño, apoyo y por estar siempre a mi lado en los momentos buenos y en los desafiantes. Su presencia me impulsa a seguir adelante y alcanzar mis metas.

Luis Miguel Pari Sucasaca

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis fue financiada por PROCENCIA/CONCYTEC en marco del esquema financiero E041-2023-02, con número de contrato N° PE501083458-2023-PROCENCIA. Expreso mi agradecimiento al Dr. Henry Pizarro Viveros como responsable técnico del proyecto, así como a los coinvestigadores, Dr. David Romero Abad y Dr. Jorge Mirez Tarrillo, por brindarme la oportunidad de participar en esta investigación.

Asimismo, agradezco al Dr. Jael Calla Calla por el apoyo técnico brindado, a Rudy Turpo por el compañerismo y apoyo en el desarrollo del proyecto. Al Dr. Elmer Aquino Larico por el apoyo en la instalación del sistema de adquisición de datos y por compartir su experiencia en este proyecto. Al Ing. Edwin José Ortiz Quispe por su amistad y apoyo durante todo el proyecto.

A la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables de la Universidad Nacional de Juliaca por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación y por facilitar los equipos y materiales utilizados en el proyecto.

Luis Miguel P. S.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	x
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN.....	13

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1	Formulación del problema	15
1.2	Formulación del problema de investigación	16
1.2.1	Problema general.....	16
1.2.2	Problemas específicos	16
1.3	Objetivos de la investigación	16
1.3.1	Objetivo general	16
1.3.2	Objetivos específicos	16
1.4	Justificación de la investigación	17
1.4.1	Justificación técnica	17
1.4.2	Justificación social	17
1.4.3	Justificación ambiental.....	17
1.4.4	Justificación económica	18

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1	Antecedentes del problema de investigación.....	19
2.2	Bases teóricas de la investigación.....	21
2.2.1	Comportamiento de la energía solar térmica del agua de waru waru	21

2.2.2	Capacidad de almacenamiento térmico del agua	22
2.3	Marco conceptual.....	23
2.3.1	Radiación solar.....	23
2.3.2	Energía solar térmica.....	24
2.3.3	Microclima	25
2.3.4	Heladas meteorológicas	25
2.3.5	Agricultura andina.....	26
2.3.6	Tecnologías ancestrales.....	27
2.3.7	Adaptación al cambio climático.....	27
2.3.8	Horas de sol pico	28
2.3.9	Transferencia de calor	28
2.3.10	Energía disponible del cultivo.....	30
2.3.11	Energía disponible del agua	30
2.3.12	Flujo de calor transferido por conducción,	30
2.3.13	Flujo de calor transferido por radiación solar.	30
2.3.14	Simulación numérica.....	31
2.3.15	Irradiancia solar.....	31

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Formulación de hipótesis	33
3.1.1	Hipótesis general.....	33
3.1.2	Hipótesis específicas	33
3.2	Metodología de la investigación	33
3.2.1	Tipo y nivel de investigación	33
3.2.2	Variables de la investigación	34
3.2.3	Periodo de estudio y recolección de datos.	34
3.2.4	Ámbito del proyecto.....	34
3.2.5	Secuencia de construcción de la réplica de waru waru: selección y mapeo del lugar del proyecto.....	36
3.2.6	Metodología para desarrollo del modelo numérico del comportamiento térmico.....	40
3.2.7	Metodología para la simulación del comportamiento térmico.....	41
3.2.8	Materiales e instrumentos utilizados.....	41
3.2.9	Secuencia metodológica.....	41
3.2.10	Ecuaciones para el análisis.....	43

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1	Resultados de la construcción de réplica de waru waru en sede Ayabacas	48
4.2	Resultados del modelo numérico del comportamiento térmico.....	54
4.3	Resultados de la simulación del comportamiento térmico y validación con datos experimentales	59
4.4	Discusiones	62

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones	64
5.2	Recomendaciones.....	65

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
---	-----------

ANEXOS	70
---------------------	-----------

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Capacidad calorífica de diversos materiales del entorno agrícola.....	23
Tabla 2 Ubicación del proyecto	35
Tabla 3 Especificaciones técnicas del Datalogger.....	42
Tabla 4 Especificaciones técnicas del sensor PT100.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Vista de planta de un waru waru.....	20
Figura 2 Comportamiento termico del agua vs aire	22
Figura 3 Tipos de radiacion solar	24
Figura 4 Diferencia entre energía solar térmica y energía solar fotovoltaica.....	25
Figura 5 Heladas metereologicas.....	26
Figura 6 Esquema de tecnologias ancentrales	27
Figura 7 Representacion de las horas solar pico	28
Figura 8 Tipos de transferencia de calor	29
Figura 9 Funcionamiento de un waru waru.....	29
Figura 10 Irradiancia e irradiación solar	32
Figura 11 Ubicación del proyecto en la sede Ayabacas de la UNAJ.....	35
Figura 12 Ubicación de los waru waru de Mucra, distrito de San Miguel, Juliaca.....	37
Figura 13 Waru waru de Mucra con las tres plataformas seleccionadas y reconstruidas para la siembra de papa nativa.....	37
Figura 14 Instalación de sensores de temperatura a diferentes alturas en la plataforma central de waru waru junto con tablero de control que incluye el PLC como Datalogger y transductores	38
Figura 15 Ubicación de seis sensores de temperatura en waru waru original en Mucra....	39
Figura 16 Ubicación de cuatro sensores de temperatura en waru waru original en Mucra	39
Figura 17 Representación esquemática de las características geométricas del waru waru	40
Figura 18 Primeros resultados de temperaturas registradas del waru waru original en Mucra.....	48
Figura 19 Temperaturas registradas del waru waru original en Mucra para los días 13/03/24 con cuatro sensores de temperaturas	49
Figura 20 Proceso de construcción de réplica de waru waru: (a) traslado de tierra de cultivo, (b) reconstrucción a escala, (c) reconstrucción concluida, (d) sembrío de quinua.....	50

Figura 21	Dimensiones de waru waru original y de la réplica construida a escala reducida de 1:3 donde cada unidad de la réplica representa tres unidades del original.....	51
Figura 22	Sistema de adquisición de datos de temperatura: (a) sensor PT100, (b) instalación de seis sensores de temperatura, (c) sensor de temperatura de referencia, (d) Datalogger Keysight	52
Figura 23	Ubicación de sensores y alturas de instalación en la réplica de waru waru.....	52
Figura 24	Temperaturas registradas del waru waru de Ayabacas para el día 02/02/25 con seis sensores de temperaturas	53
Figura 25	Temperaturas registradas del waru waru de Ayabacas para el día 03/02/25 con seis sensores de temperaturas	54
Figura 26	Datos registrados de radiación solar medidos por la estación meteorológica desde setiembre de 2024 a abril de 2025	55
Figura 27	Datos de velocidad de viento desde setiembre de 2024 a abril de 2025	55
Figura 28	Datos de temperatura ambiente (T_a) de setiembre de 2024 a abril de 2025	56
Figura 29	Datos de temperatura ambiente (T_a) del mes de enero de 2025	56
Figura 30	Datos de temperatura ambiente (T_a) del mes de febrero de 2025	57
Figura 31	Representación esquemática del corte transversal del waru waru mostrando los flujos de energía y las resistencias del sistema térmico.....	58
Figura 32	Comparación de temperatura del cultivo T_c del modelo numérico, temperatura del cultivo y temperatura del agua.....	60
Figura 33	Comparación de temperatura del cultivo T_c del modelo numérico, temperatura del cultivo y temperatura del agua.....	61
Figura 34	Selección y reconstrucción de tres plataformas de waru waru	71
Figura 35	Reconstrucción de las tres plataformas seleccionadas de waru waru	72
Figura 36	Construcción de réplica de tres plataformas de waru waru	73

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I - Reconstrucción de waru waru original en el sector de Mucra, distrito de San Miguel (via salida al Cusco)	71
Anexo II – Construcción de réplica de waru waru en la UNAJ sede Ayabacas	73
Anexo III – Detalle del desarrollo de la ecuación Tc.....	74
Anexo IV – Código em Matlab para graficar el modelo numérico del waru waru.....	76
Anexo V – CaracterísticaS del Datalogger Keysight DAQ970A	79
Anexo VI – Sensores PT100 utilizados en la medición de temperatura waru.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

CONCYTEC	: Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica
EPIER	: Escuela profesional de ingeniería en energías renovables
PLC	: Controlador Lógico Programable
PROCIENCIA	: Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados
UNAJ	: Universidad Nacional de Juliaca

RESUMEN

El cambio climático es un problema que afecta a comunidades y ecosistemas a nivel mundial. Como respuesta, muchos países han comenzado a adoptar estrategias para mitigar sus efectos, destacando la energía solar como una alternativa limpia y sostenible. Sin embargo, en la antigüedad, culturas como la Tiahuanaco en el Perú ya aprovechaban el uso de la radiación solar para optimizar el rendimiento agrícola, mediante la técnica ancestral con los waru waru, sistemas agrícolas que creaban microclimas capaces de contrarrestar las temperaturas extremas del altiplano. El objetivo del presente proyecto fue evaluar experimentalmente y modelar numéricamente el comportamiento térmico del agua en un prototipo de waru waru calentado por radiación solar, con el fin de determinar su eficacia para mantener temperaturas adecuadas en condiciones climáticas extremas del altiplano peruano. Empleando una metodología que combina experimentación y simulación numérica. En primer lugar, se construyó una réplica de waru waru con datos geométricos de uno original el cual fue equipada con equipos de medición para medir variables como la temperatura del agua, la radiación solar y las condiciones ambientales. Los datos de temperaturas obtenidos se utilizan para desarrollar y validar el modelo numérico que simula el comportamiento térmico del agua. Se elaboró un modelo numérico que representó el comportamiento térmico del agua y la temperatura del cultivo considerando las condiciones ambientales del waru waru. Se demostró que el agua del waru waru mantiene las temperaturas adecuadas del cultivo y evitan que las bajas temperaturas afecten la producción a pesar de las condiciones extremas del altiplano.

Palabras clave: Altiplano peruano, Comportamiento térmico, Energía solar, Simulación numérica, Waru waru.

ABSTRACT

Climate change is a problem that affects communities and ecosystems worldwide. In response, many countries have begun adopting strategies to mitigate its effects, highlighting solar energy as a clean and sustainable alternative. However, in ancient times, cultures such as the Tiahuanaco in Peru already leveraged the use of solar radiation to optimize agricultural yield through the ancestral technique with the waru waru, agricultural systems that created microclimates capable of counteracting the extreme temperatures of the high plateau. The objective of the present project was to experimentally evaluate and numerically model the thermal behavior of water in a prototype of waru waru heated by solar radiation, in order to determine its effectiveness in maintaining adequate temperatures under extreme climatic conditions of the Peruvian high plateau. Employing a methodology that combines experimentation and numerical simulation. First, a replica of waru waru was constructed with geometric data from an original, which was equipped with temperature sensors to measure variables such as water temperature, solar radiation, and environmental conditions. the temperature data obtained were used to develop and validate the numerical model that simulates the thermal behavior of the water. A numerical model was developed that represented the thermal behavior of the water and the crop temperature considering the environmental conditions of the waru waru. It was demonstrated that the water in the waru waru maintains adequate temperatures for the crop and prevents low temperatures from affecting production despite the extreme conditions of the high plateau.

Keywords: Peruvian high plateau, Numerical simulation, Solar energy, Thermal behavior, Waru waru.

INTRODUCCIÓN

La energía solar ha sido aprovechada desde tiempos inmemoriales. Los antiguos egipcios utilizaban el sol para secar alimentos, calentar agua y construyeron templos alineados astronómicamente para observar el movimiento solar. De manera similar, los griegos diseñaron construcciones de maximizaban la entrada de luz y calor solar. Además, según una leyenda, Arquímedes utilizó espejos para concentrar los rayos del sol y defender la ciudad de Siracusa, también veneraban a Helios, el dios del sol (Jenkins, 2007). La cultura inca aprovechó la energía solar construyendo casas con grandes ventanas orientadas al sol para mantener el calor, y consideraban al sol como su dios principal. Estos ejemplos históricos evidencian cómo la energía solar ha sido un recurso clave para el desarrollo humano a lo largo de la historia (Hidráulica-Inca).

Siguiendo esa misma línea, en Sudamérica las culturas precolombinas también supieron aprovechar a la energía solar para aplicaciones habituales principalmente en la agricultura. Es así, que la literatura muestra desarrollo en diversos lugares de los denominados “camellones” en español, también conocidos como suka kollos en aymara o waru waru en quechua. Este sistema consistió en la construcción y elevación de plataformas de cultivo rodeadas por canales de agua, el agua era calentada por el sol en el día y por la noche creaba un microclima que protegía a los cultivos del frío (Culturas, 2020). Además, el agua y los sedimentos en los canales aportan nutrientes naturales, mejorando la fertilidad del suelo. Estas técnicas agrícolas, basadas en la gestión eficiente de la energía solar y del agua, permitieron optimizar la producción de alimentos en entornos desafiantes.

La literatura muestra la existencia del sistema de waru waru en diversos lugares de Sudamérica como señala (Valdez, 2006) Por ejemplo, se han identificado en el noroeste de Colombia, en el Golfo de Urabá (Posada-Restrepo y otros, 2023), así como en la sabana costera de la Guayana Francesa (Iriarte et al., 2010). Los waru waru más conocidos se encuentran en Bolivia, exactamente en la Amazonía Boliviana, específicamente en Los Llanos de Moxos (Kolata & Ortloff, 1989; Ortloff & Kolata, 1993; Lombardo et al 2011).

Otro sistema importante de waru waru está ubicado en el altiplano peruano, específicamente en la región de Puno (Sardon, Loaiza-Usuga, Varga & Pari, 2024; Bandy, 2005). En la cuenca del lago Titicaca las culturas precolombinas como la Tiahuanaco, Chiripa y Pucará desarrollaron y perfeccionaron la construcción de los waru waru (termino que utilizaremos a lo largo de la presente investigación) aplicados a tierras inundadas estacionalmente. De

esta manera, lograron aumentar la producción agrícola mediante la recuperación de áreas inundadas. La región de Puno, ubicada en los Andes peruanos del sur a más de 3,800 metros sobre el nivel del mar, presenta un clima frío y seco con alta irradiación solar. El lago Titicaca, compartido con Bolivia, fue el centro de varios reinos aymaras precolombinos que desarrollaron extensos sistemas de waru waru en su cuenca,

Estos waru waru, eran utilizados para aprovechar al máximo las condiciones ambientales extremas del altiplano caracterizado por su clima frío, seco, con vientos fuertes y altos niveles de radiación solar. De manera ingeniosa, se lograba cultivar una gran variedad de productos de la región (papa, la quinua y las habas, entre otros), adaptándose a estas condiciones adversas (Hidráulica-Inca). El origen de los waru waru, han generado un gran interés entre investigadores, tanto nacionales como internacionales. Esto se debe a que los waru waru representan un estudio complejo por una combinación de factores sociales, culturales, ambientales y temporales, lo que incrementa sus etapas de análisis.

Es en este contexto que la presente investigación desarrolló un modelo numérico para analizar el comportamiento térmico del agua de un waru waru calentado por radiación solar. El estudio fue desarrollado experimentalmente en dos etapas. La primera, se reconstruyó un waru waru original en la zona de Mucra (por la vía de salida al Cusco) y la segunda, se construyó una réplica de waru waru en las instalaciones de Universidad Nacional de Juliaca, sede Ayabacas. A través de mediciones de temperatura en diversos puntos del waru waru durante ambas etapas, se obtuvieron datos que fueron utilizados para la validación del modelo numérico.

CAPÍTULO I - PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Formulación del problema

El cambio climático es un tema de suma importancia en la actualidad, afectando a comunidades y ecosistemas en todo el mundo. Frente a esta crisis, numerosos países están implementando estrategias para mitigar sus efectos y reducir la dependencia de combustibles fósiles. En este contexto, el uso de energías renovables ha cobrado un notable impulso como una alternativa viable y sostenible, principalmente el uso de la energía solar que se utiliza en diversas regiones del país como parte de la transición energética hacia un futuro más sostenible.

Sin embargo, el aprovechamiento de la energía solar en el Perú no es exclusivo de la época moderna. Ya en los tiempos preincaicos diversas culturas precolombinas utilizaron la energía solar para optimizar procesos agrícolas. Un claro ejemplo de ello son los waru waru, un sistema ancestral que actuaba como un “controlador de temperatura ambiental para cultivos mediante el aprovechamiento de la energía solar”, permitiendo contrarrestar las bajas temperaturas del altiplano y aumentar la productividad agrícola. Esta técnica agrícola milenaria consiste en la construcción de plataformas de tierra elevadas y rodeadas de canales llenos de agua (zonas inundables), donde se sembraban productos nativos de la región como papa, quinua, habas, etc. Durante el día, el sol calentaba el agua de los canales y por la noche ese calor era liberado, generando un “microclima” que protegía los cultivos del frío extremo característico de la zona altiplánica.

Con este contexto, actualmente no existen modelos numéricos desarrollados que representen el comportamiento térmico del agua calentada mediante radiación solar. Por ello, la presente investigación evaluó experimentalmente un waru waru original y una réplica de waru waru y obtuvo un modelo numérico del comportamiento del agua calentada mediante radiación solar. Este modelamiento consideró tanto los aspectos geométricos del waru waru como los fenómenos térmicos que ocurren al agua, para lo cual se evaluó mediciones experimentales en waru waru original y se construyó una réplica de waru waru en la UNAJ sede Ayabacas. Los resultados del estudio fueron de gran utilidad, ya que el modelo matemático permitió determinar el comportamiento térmico del agua en función de las condiciones de radiación solar. Así, se pudo comprender técnicamente el funcionamiento de este sistema ancestral en el altiplano peruano. Por lo anteriormente expuesto planteamos el siguiente problema de investigación:

1.2 Formulación del problema de investigación

Bajo el contexto expuesto se plantea las siguientes interrogantes de investigación:

1.2.1 Problema general

En el contexto expuesto fue propuesto el siguiente problema general de investigación:

¿Cómo se podrá evaluar y modelar numéricamente el comportamiento térmico del agua en un prototipo de waru waru calentado por radiación solar bajo las condiciones climáticas del altiplano peruano?

1.2.2 Problemas específicos

¿Será factible construir una réplica de waru waru para monitorear de manera efectiva variables como la temperatura, la radiación solar y las condiciones ambientales en el altiplano peruano?

¿Cómo se puede desarrollar un modelo numérico del comportamiento térmico del agua en el waru waru, considerando las condiciones geométricas del sistema y las variaciones de la radiación solar?

¿Cómo se podrá simular el comportamiento térmico del agua en un waru waru para predecir la distribución de temperaturas bajo diferentes niveles de radiación solar y condiciones geométricas que pueda utilizar los resultados obtenidos de la réplica?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar y modelar numéricamente el comportamiento térmico del agua de un prototipo de waru waru calentado por radiación solar en condiciones del altiplano peruano.

1.3.2 Objetivos específicos

- Construir una réplica de waru-warú para monitorear variables como temperatura, radiación solar y condiciones ambientales del lugar del proyecto en el altiplano peruano.
- Desarrollar un modelo numérico del comportamiento térmico del agua del waru-warú considerando las condiciones geométricas y las variaciones de la radiación solar.

- Simular el comportamiento térmico del agua de un waru waru para predecir la distribución de temperaturas bajo diferentes niveles de radiación solar y condiciones geométricas y validar los resultados con datos experimentales de la réplica.

1.4 Justificación de la investigación

1.4.1 Justificación técnica

El proyecto de investigación abordó el estudio de una técnica ancestral de los waru waru, la cual evitaba la "quema" de plantas causada por la brusca disminución de temperatura en el altiplano (heladas), fenómeno que provocaba la transferencia de calor desde el suelo hacia el ambiente, dañando las plantas por oxidación. El análisis técnico de este fenómeno, mediante ingeniería inversa, permitió comprender las condiciones de transferencia térmica en cultivos, con el fin de minimizar los daños ocasionados por bajas temperaturas. La combinación de simulación numérica y experimentación proporcionó una comprensión profunda de esta técnica ancestral, permitiendo no solo validar su eficacia en condiciones de alta altitud, sino también explorar su potencial aplicación en sistemas agrícolas modernos expuestos a climas extremos.

1.4.2 Justificación social

El impacto social de este proyecto fue significativo, ya que buscó recuperar y analizar una técnica agrícola ancestral, vital para las comunidades andinas que sufrían inundaciones y efectos adversos causados por las heladas que afectaban los cultivos. Al conocer aspectos térmicos del agua que circula por el waru waru mediante técnicas de simulación y experimentación modernas, se brindó una alternativa para la preservación del conocimiento tradicional, contribuyendo al bienestar de las comunidades rurales que dependían de la agricultura en zonas de altitud extrema.

1.4.3 Justificación ambiental

El proyecto de investigación desarrollado contribuye significativamente a la protección del medio ambiente al promover el uso y la recuperación de técnicas agrícolas ancestrales como el waru waru, que aprovechan de manera eficiente los recursos naturales disponibles, especialmente la energía solar y el agua. Esta técnica permite optimizar el microclima local, reduciendo la necesidad de insumos externos y minimizando el impacto ambiental asociado a prácticas agrícolas convencionales. Además, al fomentar sistemas sostenibles adaptados a las condiciones del altiplano, el proyecto apoya la conservación de los ecosistemas locales y

la biodiversidad, al tiempo que contribuye a mitigar los efectos del cambio climático promoviendo el uso de energías renovables. De esta forma, el estudio no solo preserva el patrimonio cultural y agrícola, sino que también impulsa prácticas ambientalmente responsables y sostenibles en regiones vulnerables.

1.4.4 Justificación económica

Económicamente, el proyecto generó importantes conocimientos que serán difundidos a la población para que puedan continuar con el uso del waru waru y de esta forma mejorar la productividad agrícola en regiones altas, donde los cultivos son afectados por las bruscas caídas de temperatura (heladas). Al utilizar el modelo numérico, se previó una disminución de la temperatura y se logró la formación ideal del microclima para evitar la "quema" de las plantas y reducir las pérdidas de cosechas, lo que incrementó la rentabilidad para los agricultores locales. Además, al tratarse de una técnica que aprovechaba los recursos naturales disponibles en la zona, se minimizaron los costos de implementación y mantenimiento, asegurando una solución económica y accesible para las comunidades que dependían de estos cultivos.

CAPÍTULO II - REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Antecedentes del problema de investigación

Los antecedentes internacionales muestran la existencia del sistema de waru-warú en lugares como el noroeste de Colombia, específicamente en el Golfo de Urabá en la llanura de inundación del río León. Un estudio paleoambiental y cultural, basado en muestras de suelos y datos hidrogeológicos permitió determinar que los waru-warú fueron construidos alrededor del siglo IX d.c. Su función principal fue la distribución del agua subterránea y pluvial para mantener la productividad (Posada-Restrepo, y otros, 2023). Otro estudio realizado por Iriarte y otros (2010), analizó la transformación del paisaje agrícola en las sabanas costeras de la Guayana Francesa mediante el análisis de fitolitos y de isótopos de carbono de waru-warú. A partir de muestras de suelos y restos vegetales se obtuvieron resultados que mostraron que la construcción de los waru-warú estaba dominada por plantas como el maíz y otras gramíneas. De esta forma, se demostró que los waru-warú pudieron sostener poblaciones significativas en la región.

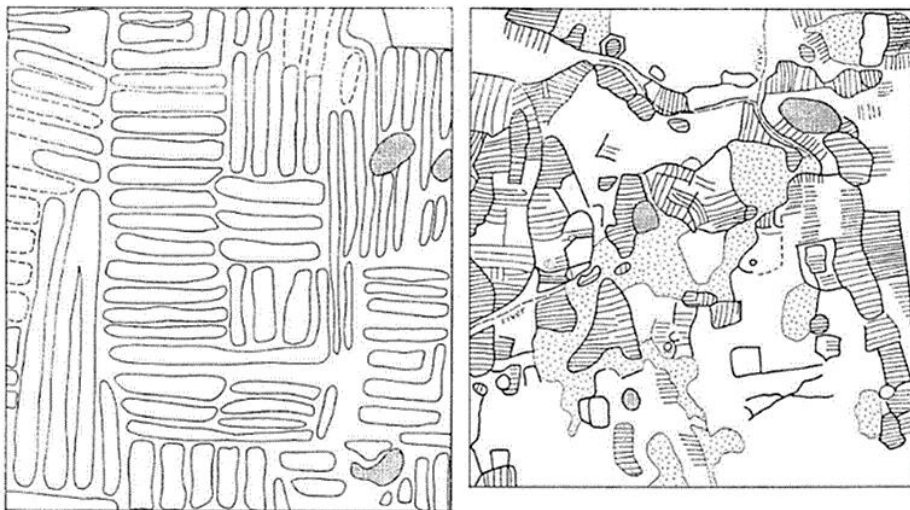
Otras investigaciones internacionales realizadas por Kolata & Ortloff (1989) y Ortloff & Kolata (1993), analizaron la morfología y función de los waru waru en la cultura Tiawanaco en el altiplano andino de Bolivia. El estudio se enfocó en las propiedades térmicas y capacidad de almacenamiento de calor de estos sistemas. Para ello, utilizaron un modelo computacional de elementos finitos mediante ANSYS para simular el comportamiento térmico de los waru waru. De esta forma fue utilizado los datos geométricos y térmicos para validar el modelo. Los resultados mostraron una capacidad mejorada de almacenamiento de calor fue elemento clave en el diseño de sistema agrícolas reduciendo daños de las heladas. Otro estudio cercano a la región fue dirigido por Lombardo et al (2011), investigó como fueron construidos los waru-warú en la region de Moxos, Beni, Bolivia y su relación con la interacción humano-ambiente. Mediante teledeteccion experimental, evaluaron la relaion de los waru-warú con la hidrología, el suelo, la geología y arqueología de la zona. Los resultados mostraron la necesidad de aplicar barbecho para mejorar el rendimiento y mitigar el riesgo de inundaciones.

Estudios internacionales adicionales como el realizado por Sánches de Lozada, Baveye, & Riha (1998), llevaron a cabo mediciones de la geometría de los waru waru, determinando que están conformados por plataformas de hasta 1.2 metros de altura y entre 2 y 20 metros de ancho, con canales entre plataformas que varían entre 1.6 y 4.5 metros. Este estudio se

realizó en Bolivia durante las temporadas de cultivo 1993-1994 y 1994-1995, a 3,810 msnm, en una ubicación cercana al lago Titicaca, siguiendo patrones predefinidos por los autores. En caso de los investigadores, Smith, Denevan, & Hamilton (2015) realizaron un levantamiento topográfico de los waru waru mediante aerofotografía y trabajo de campo en zonas perimetrales al lago Titicaca (Figura 1). De esta forma consiguieron caracterizar algunas formas de la topografía de los waru waru. Otro estudio de (Lhomme & Vacher, 2002), reportaron un proceso de simulación basado en un análisis bidimensional de los procesos térmicos del waru waru. Estos análisis se realizaron en geometrías de forma rectangular idealizada para determinar el comportamiento térmico del sistema.

Figura 1

Vista de planta de un waru waru



Nota. Waru waru ubicados en la ciudad de Huata (Smith, Denevan, & Hamilton, 2015).

Como antecedentes nacionales podemos mencionar que son escasos, entre ellos se destaca el trabajo de (Canahua, Huamani, Casafranca, & Quispe, 2013)), quienes estudiaron y aplicaron una forma de rehabilitación del agroecosistema de los sukaqollos (otra denominación de los waru waru) y evaluaron su contribución a la seguridad alimentaria en la cuenca Titicaca. Determinaron que los sukaqollos o camellones (waru waru) presentan buena fertilidad lo cual está relacionado con su alta productividad, favorecida además por el trabajo comunitario o faenas comunales.

Como antecedentes regionales, se puede mencionar al estudio realizado por Sardon, Loaiza-Usuga, Varga y Pari (2024), quienes caracterizaron los suelos de diversos waru waru del altiplano. Determinaron que un gran porcentaje de estos suelos presentan un pH entre ácido y neutro con altos contenidos de sulfatos.

2.2 Bases teóricas de la investigación

2.2.1 Comportamiento de la energía solar térmica del agua de waru waru

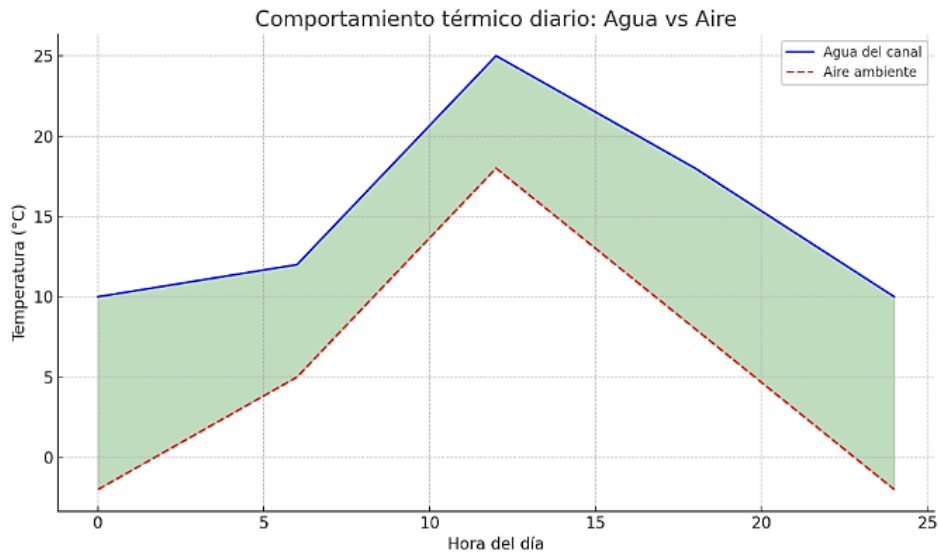
El comportamiento de la energía solar térmica se refiere a la forma en que un sistema, material o fluido responde a las variaciones de temperatura, considerando los intercambios de calor con su entorno. En términos físicos, este concepto implica la capacidad de un material o sistema para absorber, almacenar, transferir y liberar calor, lo cual depende de factores como la conductividad térmica, la capacidad calorífica, las condiciones ambientales y las características geométricas del sistema (PROSUKO, 2008).

En el caso del agua en un waru waru, el comportamiento térmico describe cómo esta interactúa con la radiación solar, absorbiendo energía térmica durante el día y liberándola durante la noche, generando un microclima que protege los cultivos de las heladas. Este proceso es una manifestación del efecto de almacenamiento térmico, donde el agua actúa como un amortiguador térmico. De acuerdo con investigaciones en ingeniería térmica, la evaluación de este comportamiento requiere el análisis de los flujos de calor, las diferencias de temperatura y las propiedades específicas del sistema, como la geometría y la exposición a la radiación solar (Calle, 2022).

En la siguiente figura se muestra el comportamiento térmico del agua vs aire en un día completo, la línea azul representa a la temperatura del agua del canal, la línea roja punteada la temperatura aire ambiente, se observa que a las 00 horas el agua del canal esta más caliente que el aire ambiente, además ambas temperaturas se elevan a las 12 horas y después comienzan a descender, pero la temperatura del agua del canal baja más lentamente. Entonces el agua se calienta y enfría más lentamente que el aire y mantiene temperaturas más altas durante todo día.

Figura 2

Comportamiento térmico del agua vs aire



Nota. Comportamiento térmico diario del agua en el waru waru (Elaboración propia).

El proyecto incorporó un proceso de medición de la radiación solar incidente para evaluar el comportamiento térmico del agua en los waru waru. Se utilizó la estación meteorológica de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables que se ubica cerca a la réplica experimental del waru waru. De esta forma se registró irradiancia solar en intervalos regulares durante el día. Estos datos permitieron cuantificar la energía térmica captada por el agua en los canales, fundamental para comprender cómo se almacena y libera calor en el sistema.

2.2.2 Capacidad de almacenamiento térmico del agua

Se refiere a la cantidad de calor que el agua puede almacenar por unidad de cambio de temperatura. Este concepto es crucial en diversas aplicaciones, incluyendo la climatización, la energía renovable y la gestión del agua. Se define como la cantidad de calor que se requiere para elevar la temperatura de una cierta masa de agua en un grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Se mide en Joules por kilogramo por grado Celsius ($\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$) y tiene un valor aproximado de $4,186 \text{ J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ (equivalente a $1 \text{ cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$), lo que indica que el agua posee una alta capacidad calorífica en comparación con otros materiales. Es decir, el agua tiene una mayor capacidad calorífica específica lo que permite almacenar más calor por unidad de masa y grado que otros materiales comunes en el entorno agrícola. La Tabla 1, muestra diversos materiales con la respectiva capacidad calorífica.

Tabla 1

Capacidad calorífica de diversos materiales del entorno agrícola

Material	Capacidad calorífica (J/kg·°C)
Agua	4186
Suelo seco	~800
Aire	~1000
Piedra (Granito)	~790
Arena	~830
Madera	~1700
Acero	~500

Nota. En la tabla se observa la capacidad calorífica de diversos materiales.

Fuente: Elaboración propia (2025)

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Radiación solar

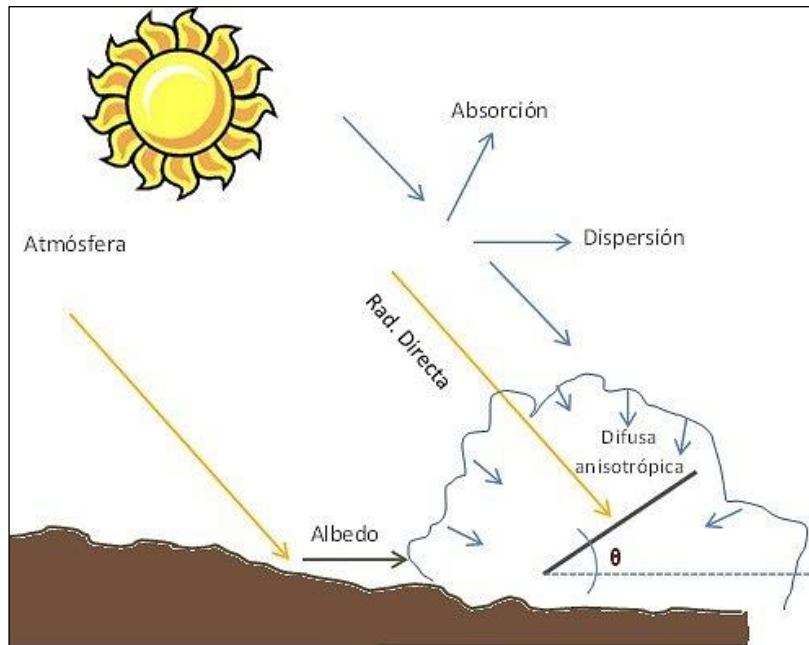
La radiación solar es la energía emitida por el sol, que llega a la Tierra y puede ser aprovechada para generar electricidad en los sistemas fotovoltaicos. Esta energía se transmite en forma de ondas electromagnéticas, y su cantidad varía en función de la posición del sol, las condiciones atmosféricas y la latitud del lugar (SunFields-Solar, 2024):

- **Radiación Directa,** La radiación solar directa es aquella que llega de forma directa desde el sol sin ser afectada por dispersión, aunque sí puede verse afectada por la absorción atmosférica y la nubosidad. Su intensidad disminuye en días nublados. Esta radiación es fundamental para la generación de energía en paneles fotovoltaicos cuando los rayos inciden de forma perpendicular (SunFields-Solar, 2024).
- **Radiación Difusa,** La radiación difusa es la radiación solar que se recibe después de ser dispersada por partículas en la atmósfera, como nubes y polvo. En días nublados, está entre los tipos de radiación que más llegan a la superficie terrestre, ya que la radiación directa se reduce considerablemente. Esta radiación incide desde múltiples direcciones (SunFields-Solar, 2024).
- **Radiación reflejada,** También conocida como radiación de albedo, es la radiación solar que es reflejada por la superficie terrestre, como por ejemplo la nieve o

superficies claras. Esta radiación puede ser aprovechada en especial por módulos fotovoltaicos bifaciales que capturan energía en ambas caras (SunFields-Solar, 2024).

Figura 3

Tipos de radiación solar



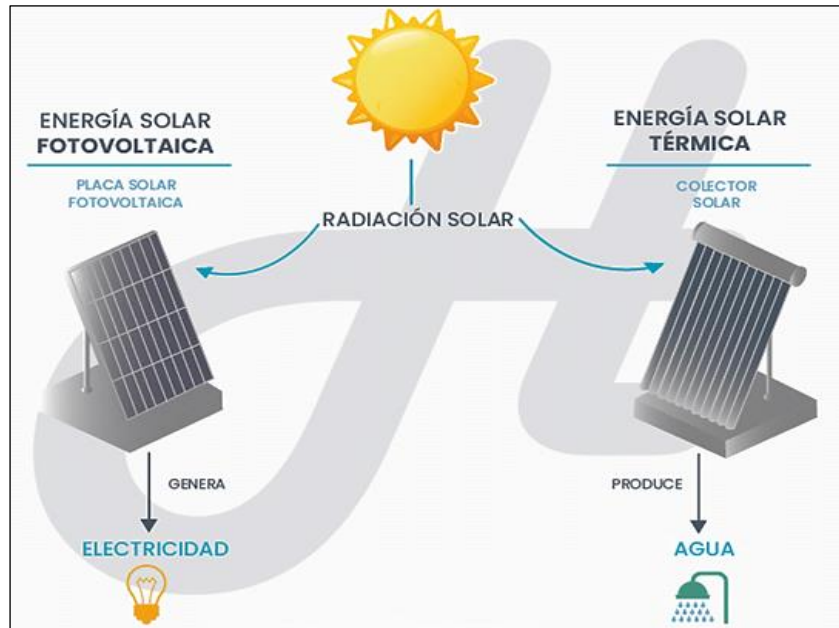
Nota. En la imagen se observan los diferentes tipos de radiación solar (E-medida, 2012).

2.3.2 Energía solar térmica

La energía solar térmica, también conocida como energía termosolar, es una forma de energía renovable que utiliza la luz del sol para generar calor. En lugar de convertir directamente la luz solar en electricidad como la energía fotovoltaica, la solar térmica aprovecha la energía del sol para calentar un fluido llamado caloportador. Este calor puede ser utilizado para aplicaciones domésticas o industriales, como calentar agua, o bien para generar electricidad mediante un ciclo termodinámico convencional. Los colectores solares capturan la radiación solar y la convierten en calor, y dispositivos como el termosifón permiten la transferencia eficiente del calor capturado para su almacenamiento y uso posterior. Esta forma de energía es limpia, renovable, y contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (REPSOL, 2024).

Figura 4

Diferencia entre energía solar térmica y energía solar fotovoltaica



Nota. La imagen muestra la diferencia entre energía solar térmica y energía solar fotovoltaica (Hydronik, 2022).

2.3.3 Microclima

El microclima es el conjunto de condiciones climáticas particulares que se dan en una zona muy localizada, las cuales pueden diferir significativamente del clima general que predomina en una región más amplia. Esta diferenciación puede manifestarse en variaciones de temperatura, humedad, viento, luz solar o precipitaciones, y puede observarse en espacios pequeños como un jardín, una calle o una ladera. El microclima se caracteriza por mantenerse relativamente estable y diferenciado del entorno más amplio, influyendo en la vegetación, el comportamiento animal e incluso en aspectos humanos como la construcción y la agricultura (EcologiaVerde, 2025).

2.3.4 Heladas meteorológicas

La helada meteorológica es un fenómeno que ocurre cuando la temperatura del aire a 1.5 metros sobre el suelo desciende a un valor igual o inferior a 0 °C, el punto de congelación del agua, independientemente de la duración o intensidad del evento. Se manifiesta comúnmente en horas de madrugada o cuando está saliendo el sol, generalmente con cielo despejado o escasa nubosidad. Este fenómeno es de gran importancia para la agricultura y

la protección ambiental, motivo por el cual se monitorea cuidadosamente para tomar medidas preventivas (ANDINA, 2024).

Figura 5

Heladas meteorológicas



Nota. Heladas meteorológicas o bajas temperaturas en la sierra (SENAMHI, 2021).

2.3.5 Agricultura andina

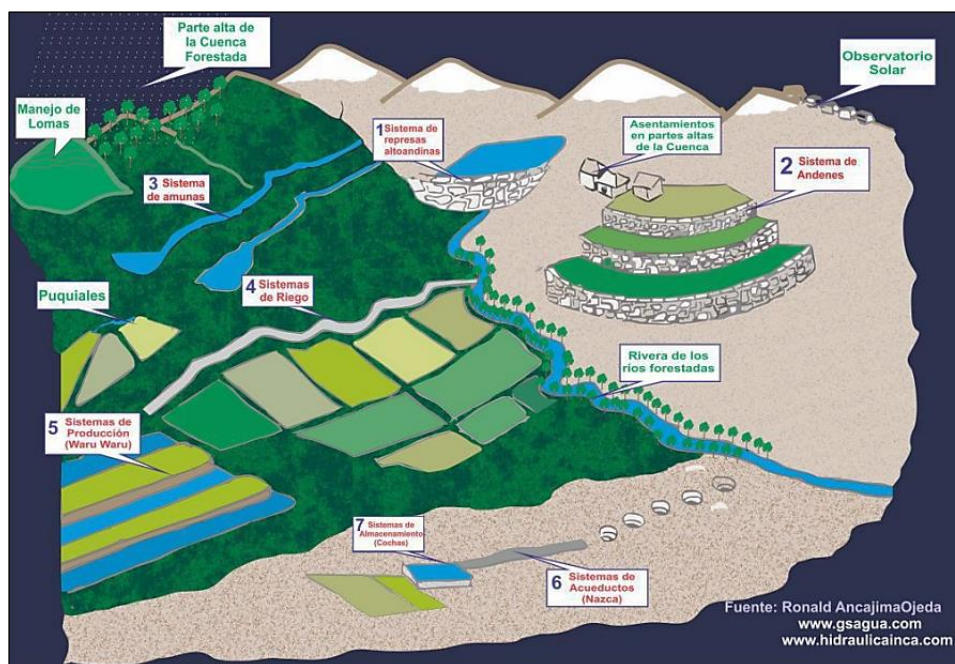
La agricultura andina es un sistema agrícola ancestral que se ha desarrollado durante más de 5,000 años en los ecosistemas altos de la región andina, entre los 2,500 y 5,000 metros de altitud. Este sistema combina prácticas de agroingeniería tradicionales como terrazas, sistemas de riego, rotación de cultivos y uso de variedades adaptadas a diferentes altitudes para convivir en armonía con el entorno natural. A través de una organización social comunitaria con normas y tradiciones, la agricultura andina promueve una gestión responsable del medio ambiente, apoyando la seguridad alimentaria y la conservación de la biodiversidad. Además, la agricultura andina mantiene un profundo vínculo cultural con el entorno mediante rituales y celebraciones que honran a la Pachamama y a los Apus (FAO, 2011).

2.3.6 Tecnologías ancestrales

Las tecnologías ancestrales son conocimientos, prácticas y sistemas desarrollados por las civilizaciones preincaicas e incas basados en una cosmovisión que integra el respeto y veneración hacia los astros, el agua y el suelo como elementos divinos. Estas tecnologías incluyen sistemas hidráulicos, como canales, amunas, andenes y waru waru, que permitían gestionar de manera sostenible el agua y el suelo para garantizar la producción de alimentos y la subsistencia de las poblaciones. Estas prácticas demuestran una avanzada ingeniería adaptada a las condiciones naturales del entorno, siendo parte fundamental del patrimonio cultural que persiste y que debe valorarse y revitalizarse para enfrentar los retos actuales (MINAM, Tecnologías Ancestrales - Sistemas Hidráulicos Pre Incas e Incas, 2015).

Figura 6

Esquema de tecnologías ancestrales



Nota. La imagen muestra las tecnologías ancestrales (Ancajima, 2015).

2.3.7 Adaptación al cambio climático

La adaptación al cambio climático es definida como el “proceso de ajustes al clima real o proyectado y sus efectos en sistemas humanos o naturales, con el objetivo de moderar o evitar los daños y aprovechar los aspectos beneficiosos”. Este proceso requiere la implementación de medidas eficaces para reducir pérdidas potenciales, daños y alteraciones en los sistemas naturales y sociales. La adaptación debe ser parte transversal de las políticas públicas, involucrando a diversos actores para asegurar un desarrollo sostenible. En Perú, se

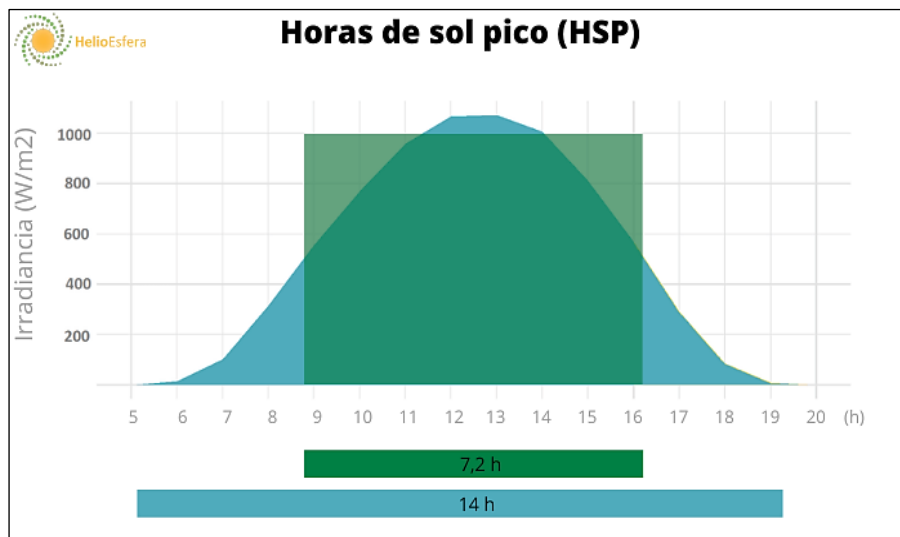
han aprobado múltiples medidas de adaptación en áreas prioritarias como agua, agricultura, pesca, bosques y salud, alineadas con estrategias nacionales y compromisos internacionales (MINAM, 2019).

2.3.8 Horas de sol pico

Las horas de sol pico (HSP) son una unidad de medida que cuantifica la irradiación solar recibida, suponiendo una radiación constante de 1000 W/m^2 durante un período de tiempo. Se mide en horas y corresponde a la cantidad de energía recibida durante una hora con esa intensidad estándar. Por ejemplo, 1 hora de sol pico significa que un metro cuadrado ha recibido energía solar equivalente a 1000 W durante una hora. Este concepto es útil para simplificar cálculos de energía solar recibida, para dimensionar y estimar la producción de sistemas fotovoltaicos. Las HSP varían según la localización, la época del año, la limpieza atmosférica y la inclinación de la superficie de medición (Heliosfera, 2022).

Figura 7

Representación de las horas solar pico



Nota. Esquema de representación de las horas de sol pico (Heliosfera, 2022).

2.3.9 Transferencia de calor

La transferencia de calor es el proceso de intercambio de energía térmica que ocurre cuando dos cuerpos o sistemas se encuentran a diferentes temperaturas, con el fin de alcanzar un equilibrio térmico. Existen tres tipos principales de transferencia de calor: conducción, radiación y convección. La conducción se produce a través de un material sólido o en contacto directo, mediante la transferencia de energía térmica de partícula a partícula dentro

del material. La radiación transmite calor mediante ondas electromagnéticas, sin necesidad de un medio material, pudiendo ocurrir incluso en el vacío. La convección es la transferencia de calor a través del movimiento de un fluido, que puede ser natural o forzada (NUTEC, 2023).

Figura 8

Tipos de transferencia de calor



Nota. Proceso de los tipos de transferencia de calor conducción, radiación y convección (Concepto, 2015).

Figura 9

Funcionamiento de un waru waru



Nota. Esquema de waru waru con el proceso térmico de calentamiento mediante transferencia de calor (Hidráulica-Inca).

2.3.10 Energía disponible del cultivo

$$A_c = R_{n,c} - G_c = H_c + (\lambda E_c) \quad (1)$$

A_c : Energía disponible del cultivo.

$R_{n,c}$: Radiación neta.

G_c : Flujo de conducción del calor en el suelo.

H_c : Flujo de calor sensible.

λE_c : Flujo de calor latente.

2.3.11 Energía disponible del agua

$$A_w = R_{n,w} - G_w - \frac{dC_w}{dt} = H_w + (\lambda E_c) \quad (2)$$

A_w : Energía disponible del agua.

$R_{n,w}$: Radiación neta en el agua.

C_w : Cantidad de calor almacenada en el agua.

2.3.12 Flujo de calor transferido por conducción,

$$G_w = h_w a_w (T_w - T_s) \quad (3)$$

G_w : Flujo de calor transferido por conducción.

h_w : coeficiente de intercambio de calor entre el agua libre y el suelo (Wm^2k^{-1}).

a_w : área relativa de los canales en contacto con el agua.

T_w : temperatura del agua de los canales ($^{\circ}C$).

T_s : temperatura del suelo a una profundidad de referencia ($^{\circ}C$).

2.3.13 Flujo de calor transferido por radiación solar.

$$R_a = \varepsilon_a \sigma (T_a^4) \quad (4)$$

R_a : Flujo de calor transferido por radiación.

ε_a : Emisividad del aire.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$).

T_a : Temperatura del aire.

2.3.14 Simulación numérica

La simulación numérica es un proceso que integra herramientas matemáticas para modelar, simular o predecir el comportamiento de dispositivos, productos y procesos en ingeniería y ciencias aplicadas. Este método incluye desde la modelización matemática hasta el análisis numérico y la implementación en software, permitiendo estudiar fenómenos complejos como mecánicos, térmicos, electromagnéticos, ambientales, entre otros. Su aplicación abarca áreas diversas como el diseño estructural, la optimización de procesos industriales, la gestión ambiental y la evaluación financiera, siendo fundamental para comprender y mejorar sistemas reales sin necesidad de realizar experimentos físicos costosos o inviables (ITMATI, 2021).

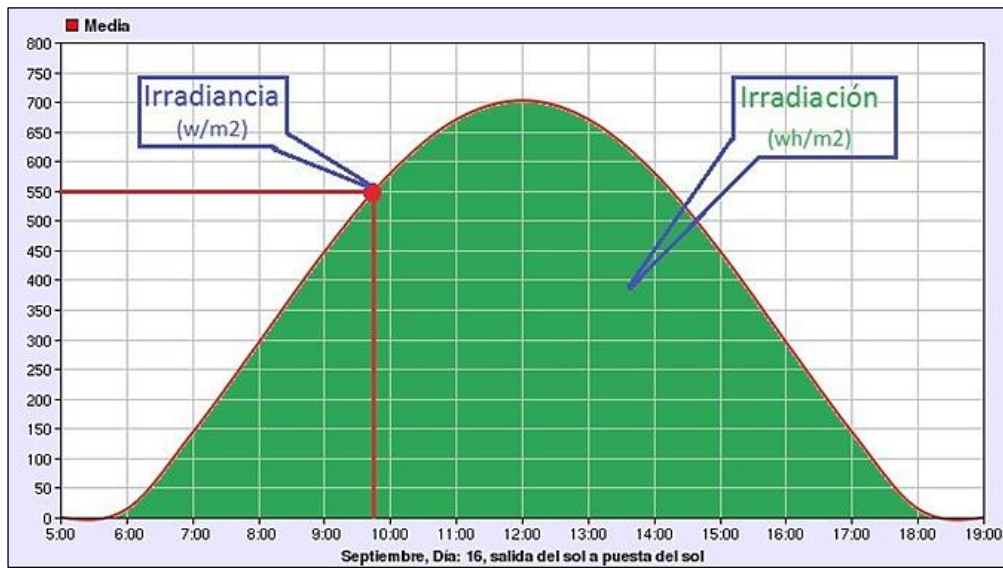
2.3.15 Irradiancia solar

La irradiancia solar es la cantidad de energía proveniente del Sol que incide sobre una superficie por unidad de área y por unidad de tiempo. Se expresa en vatios por metro cuadrado (W/m^2) y representa una medida instantánea del flujo de energía solar recibido en una determinada ubicación. La irradiancia solar incluye tanto la radiación directa como la difusa y es un parámetro fundamental en estudios de climatología, agricultura, arquitectura bioclimática y energía solar (HelioEsfera, 2021).

En el contexto agrícola, y particularmente en sistemas como los waru waru, la irradiancia solar determina cuánta energía térmica puede absorber el agua durante el día, influyendo en su capacidad de almacenar y liberar calor para mitigar las variaciones térmicas. Su medición se realiza con instrumentos como el piranómetro o estación meteorológica, que registra la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal.

Figura 10

Irradiancia e irradiación solar



Nota. Comparacion de la Irradiancia e irradiación solar (HelioEsfera, 2021).

CAPÍTULO III - MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Formulación de hipótesis

La presente tesis considera las siguientes hipótesis:

3.1.1 Hipótesis general

La evaluación y modelamiento numérico del comportamiento térmico del agua en un prototipo de waru waru calentado mediante radiación solar demuestra que este sistema es efectivo para mantener temperaturas adecuadas para el cultivo, el cual se ve afectado por las heladas, aprovechando el abundante recurso solar de la región, a pesar de las condiciones climáticas extremas.

3.1.2 Hipótesis específicas

- La construcción de una réplica de waru waru es factible y permite monitorear efectivamente las variables de temperatura, radiación solar y condiciones ambientales, proporcionando datos confiables que reflejan el comportamiento térmico y su impacto en los cultivos.
- El desarrollo de un modelo numérico del comportamiento térmico del agua de un prototipo de waru waru, que considere las condiciones geométricas del sistema y las variaciones en la radiación solar, permite predecir su funcionamiento bajo condiciones climáticas específicas del altiplano peruano.
- La simulación del comportamiento térmico del agua en un waru waru, utilizando datos obtenidos de la réplica, permite predecir la distribución de temperaturas bajo diferentes niveles de radiación solar y configuraciones geométricas.

3.2 Metodología de la investigación

3.2.1 Tipo y nivel de investigación

El tipo de investigación es deductivo y experimental. Será de tipo descriptivo pues se realizará un levantamiento de información tanto bibliográfica como de campo de las tradiciones orales de los waru warus de la Región Puno. Será también deductivo, porque a partir de los materiales, descripciones y registro de características geométricas se va desarrollando un modelo numérico que represente el comportamiento térmico del agua. Investigación experimental, pues será construido una réplica de un waru waru en el cual será

sembrado quinua y se medirán las variables de investigación, como radiación solar y las temperaturas en diferentes ubicaciones para representar el comportamiento térmico del agua.

Nivel de investigación: Es descriptivo y correlacional; debido a que se realizará un análisis sobre la evaluación de datos encontrados.

Diseño de la investigación: Correlacional por que se busca determinar el comportamiento térmico del agua de un waru waru.

3.2.2 Variables de la investigación

- a) **Variable dependiente:** Es el resultado principal que se quiere modelar y evaluar.
 - Temperatura del cultivo.
- b) **Variable independiente.** Condiciones térmicas y ambientales del waru waru.
 - Temperatura del agua.
 - Temperatura del aire.
 - Radiación solar.
 - Velocidad del viento.
 - Geometría del canal.

3.2.3 Periodo de estudio y recolección de datos.

El desarrollo de la presente investigación se llevó a cabo entre febrero de 2024 y abril de 2025. La fase inicial consistió en el levantamiento de información experimental en un waru waru original ubicado en Mucra, donde se efectuaron las primeras mediciones térmicas en febrero de 2024. Posteriormente, durante el año 2024, se construyó una réplica del sistema en la sede Ayabacas de la Universidad Nacional de Juliaca, siguiendo las características geométricas del waru waru original. El monitoreo continuo de variables ambientales como temperatura del agua, temperatura del cultivo, radiación solar y velocidad del viento se realizó desde septiembre de 2024 hasta abril de 2025, siendo los registros de enero y febrero de 2025 los datos principales para la validación del modelo numérico.

3.2.4 Ámbito del proyecto

El proyecto de investigación se realizó en la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables (EPIER) de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ) en su sede de Ayabacas. La propuesta consideró las condiciones climatológicas y geográficas bajo las condiciones extremas que se presentan a 3832 msnm, lugar donde fue realizado el proyecto (Figura 11). La Tabla 2, muestra características del lugar del proyecto.

Figura 11

Ubicación del proyecto en la sede Ayabacas de la UNAJ



Nota. En la imagen se observa la ubicación del proyecto en la sede Ayabacas de la UNAJ (GoogleMaps, 2024).

La metodología siguiente fue aplicada para cumplir los objetivos de la presente investigación:

- Selección y mapeo del sitio para construcción de la réplica de waru waru.
- Instrumentación y monitoreo de temperaturas en la réplica.
- Desarrollo y simulación del modelo numérico del waru waru.
- Comparación y validación de resultados experimentales.

Tabla 2

Ubicación del proyecto

Ítem	Descripción
Departamento:	Puno
Provincia:	San Román
Distrito:	San Miguel
Lugar:	Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables
Coordenada UTMX:	382678.5
Coordenada UTM Y:	8296081.6
Altitud:	3832 m.s.n.m.

Nota. Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia (2025)

3.2.5 Secuencia de construcción de la réplica de waru waru: selección y mapeo del lugar del proyecto

La presente investigación se desarrolló en el marco del concurso de “Proyectos de Investigación Aplicada” 2023-02, bajo el esquema financiero E041-2023-02 y con el número de contrato N° PE501083458-2023-PROCIENCIA, siendo ganadora de los fondos concursables otorgados por PROCIENCIA/CONCYTEC. La ejecución del proyecto comprendió dos etapas principales:

- **Reconstrucción de waru waru original:** Ubicado en la región de Mucra, distrito de San Miguel, vía de salida al Cusco (**Figura 12**).
- **Construcción de réplica de waru waru:** Realizada en la sede universitaria de Ayabacas, que corresponde a la presente investigación.

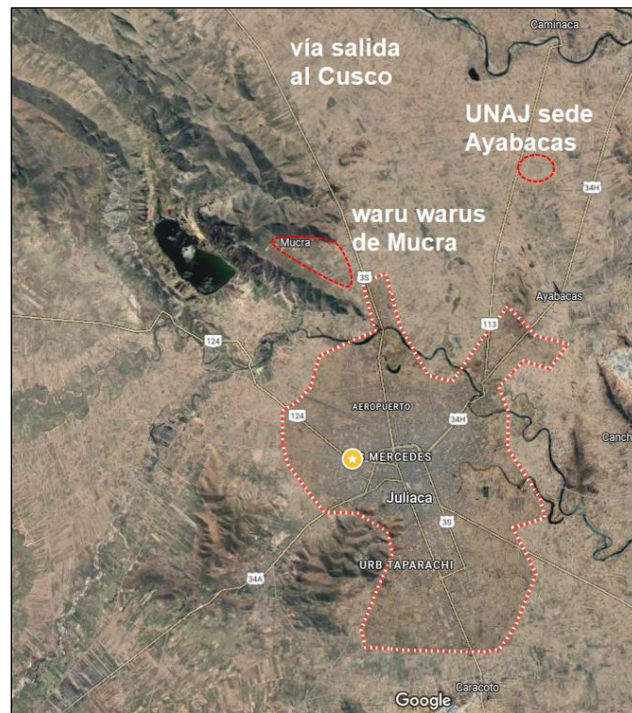
a) Reconstrucción de waru waru original

A continuación, describiremos brevemente la primera etapa de reconstrucción de waru waru, esta se desarrolló en la región de Mucra, área tradicionalmente reconocida por su extensa presencia de waru waru ancestrales. Este proceso incluyó:

- Selección de plataformas: Identificación y elección de tres plataformas para reconstrucción (Figura 13).
- Preparación del terreno: limpieza del perímetro mediante retroexcavadora.
- Reconstrucción manual: Restauración de la parte superior de las plataformas con apoyo de personal de apoyo.
- Siembra e instrumentación: Cultivo de papa nativa e instalación de sistema de adquisición de datos para medición de temperaturas (documentado en el Anexo 1).

Figura 12

Ubicación de los waru waru de Mucra, distrito de San Miguel, Juliaca



Nota. Ubicación de los waru waru de Mucra, distrito de San Miguel, Juliaca (elaboración propia).

Figura 13

Waru waru de Mucra con las tres plataformas seleccionadas y reconstruidas para la siembra de papa nativa



Nota. Tres plataformas de waru waru seleccionadas y reconstruidas para la siembra de papa nativa. (Elaboración propia)

En el waru waru de Mucra, se realizó la instalación de la instrumentación y monitoreo de temperaturas. La instalación de los sensores de temperatura PT100 tuvo como objetivo monitorear el comportamiento térmico del agua y del suelo en estas plataformas, a fin de evaluar el efecto de la radiación solar en el cultivo. En la Figura 14, se muestra el proceso de instalación de los sensores de temperatura PT100 en el sembrío de papa nativa. Se utilizaron seis transductores para conectar seis sensores de temperatura, los cuales fueron instalados junto con un PLC que funcionó como Datalogger.

Figura 14

Instalación de sensores de temperatura

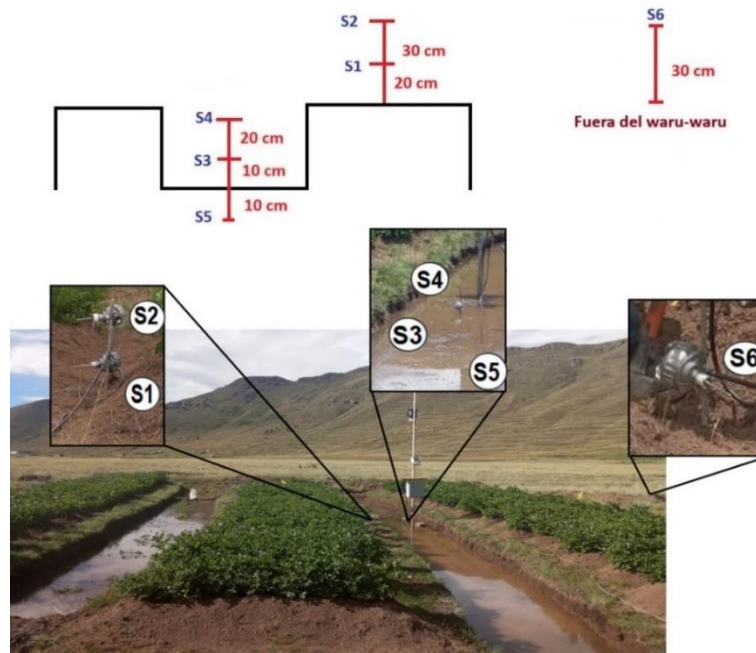


Nota. Sensores de temperatura a diferentes alturas en la plataforma central de waru waru junto con tablero de control que incluye el PLC como Datalogger y transductores (Elaboración propia)

Los sensores 1 y 2 fueron instalados en el cultivo de papa, a una distancia de 10 cm una de otra. Los sensores 3, 4 y 5 fueron instalados en el surco de agua. El sensor 3 y 4 se instalaron para medir la temperatura del agua y el sensor 5 fue enterrado a 10 cm dentro de la tierra. El sensor 6 fue instalado a 10m de distancia fuera del área de las plataformas y a una altura de 30 cm, y sirvió como testigo para las comparaciones de incremento o descenso de temperatura en el waru waru. La Figura 15, muestra la instalación en ubicación de mediciones reales. La Figura 16, muestra otra condición de medición, de esta vez con cuatro sensores de temperatura. Esta reducción del número de sensores se debió que en la época de medición cayó un rayo por las cercanías del proyecto lo que afectó a los sensores enterrados y cercanos a la tierra. Finalmente, solo se consideraron cuatro sensores para realizar las mediciones. Los primeros resultados de temperaturas registrados del waru waru original se muestran en el capítulo de resultados y discusiones.

Figura 15

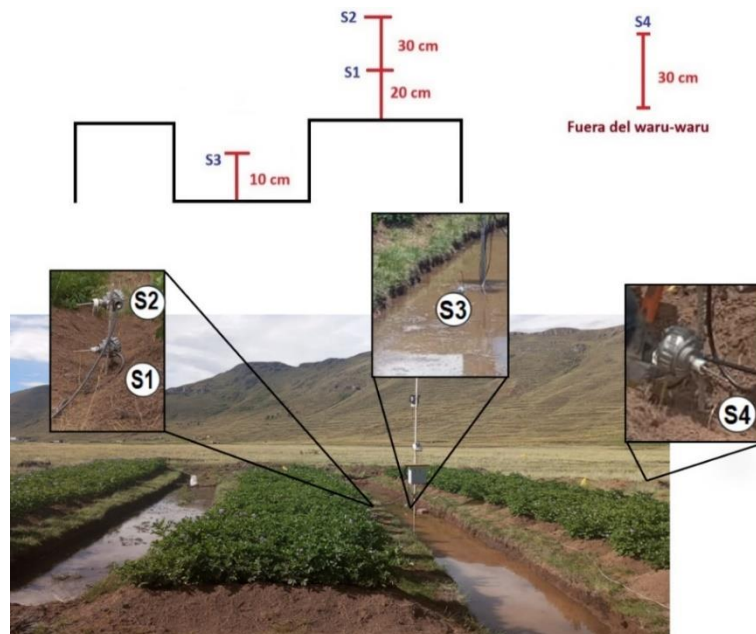
Ubicación de sensores de temperatura en waru waru de Mucra



Nota. Esquema de ubicación de seis sensores de temperatura en waru waru original en Mucra. (Elaboracion propia).

Figura 16

Sensores de temperatura en waru waru de Mucra



Nota. Ubicación de cuatro sensores de temperatura en waru waru original en Mucra (Elaboracion propia)

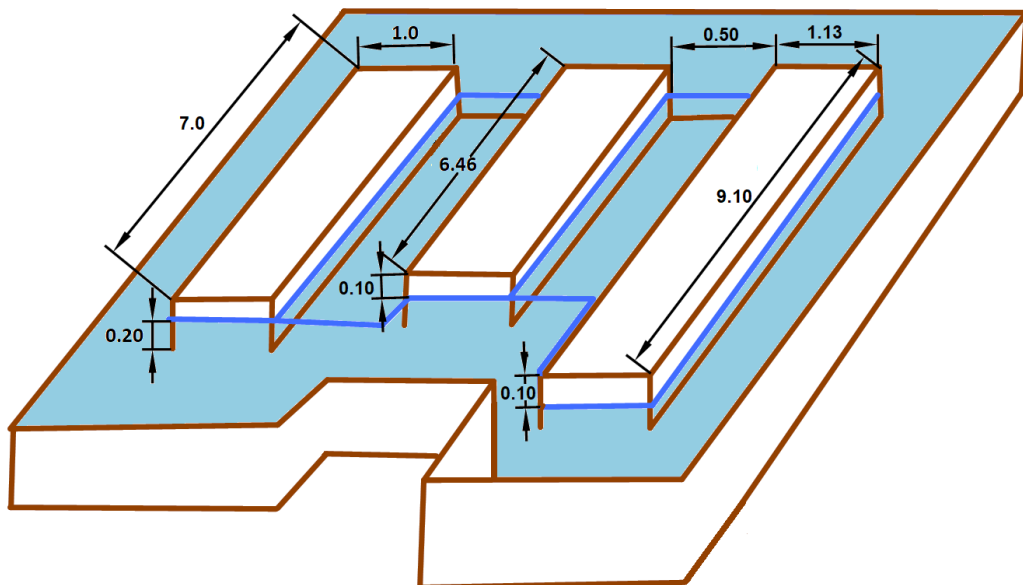
3.2.6 Metodología para desarrollo del modelo numérico del comportamiento térmico

Para el desarrollo del modelo numérico que caracteriza y determina el comportamiento térmico del sistema waru waru, esta investigación tomó como base el enfoque propuesto por Lhomme y Vacher (2002). Para el presente modelo numérico se incorporaron las condiciones geométricas reales de la réplica de las plataformas y canales que conforman el waru waru, temperaturas del agua, cultivo y suelo, así como las condiciones de la radiación solar, datos que fueron obtenidos mediante una estación meteorológica instalada en la EPIER sede Ayabacas. Mediante este enfoque, fue posible predecir la temperatura del cultivo presente en el sistema y analizar su efecto regulador en el microclima del waru waru.

Una de las ventajas de este modelo radica en su capacidad para ofrecer estimaciones confiables sin la necesidad de una caracterización fenomenológica exhaustiva del sistema waru waru. Además, al representar las resistencias aerodinámicas y superficiales, el modelo facilita la comprensión de cómo las prácticas agrícolas ancestrales consiguieron la regulación térmica del sistema, contribuyendo a la mitigación de eventos climáticos adversos como las heladas en el altiplano. En la Figura 17, se muestra un esquema del sistema waru waru donde se observan características geométricas de la réplica.

Figura 17

Características geométricas del waru waru



Nota. Representación esquemática de las características geométricas de la réplica de waru waru (Elaboración propia).

3.2.7 Metodología para la simulación del comportamiento térmico

Con la obtención del modelo numérico posteriormente se realizó simulaciones en software Matlab. Los resultados simulados del modelo numérico se validaron con los datos experimentales obtenidos de la réplica, comparando las temperaturas medidas por los sensores PT100 y las predicciones del modelo bajo diferentes condiciones de radiación solar y geometría. Esto permitió ajustar y confirmar la precisión del modelo para su aplicación en escenarios reales del altiplano.

Fueron presentados los resultados de la simulación y comparados con datos de temperatura medidos del cultivo.

3.2.8 Materiales e instrumentos utilizados

Dentro de los materiales e instrumentos empleados durante el desarrollo del presente proyecto se tienen:

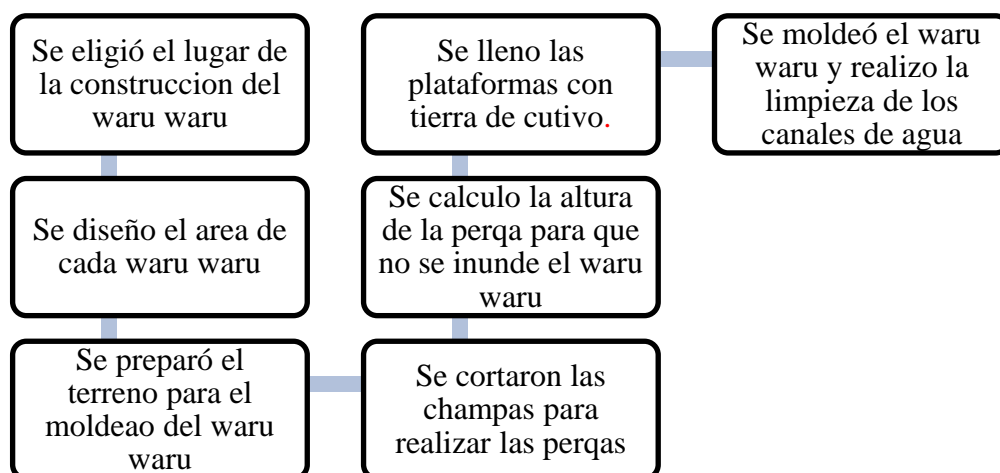
- 06 sensores de temperatura PT100.
- 01 Datalogger marca Keysight modelo DAQ970A.
- Equipo PC o portátil (Laptop).
- Unidad de almacenamiento de datos (USB).
- Estación meteorológica de la EPIER (Piranómetro, Anemómetro, Pluviómetro).
- Herramientas manuales tradicionales para construcción (palas, picos, escuadra, tira línea, cordel, alicate, estacas, carretilla).
- Tierra de cultivo para la construcción de waru waru.

3.2.9 Secuencia metodológica

La presente investigación se realizó de acuerdo a la siguiente secuencia metodológica:

- a) Revisión bibliográfica y teórica: Se realizó un estudio exhaustivo sobre el funcionamiento de los waru waru, su impacto en el microclima y las técnicas modernas de simulación numérica aplicadas a sistemas térmicos.
- b) Selección del sitio de estudio: Se identificó el lugar donde están ubicados los waru waru originales para seleccionar uno más adecuado, considerando las características geométricas y las condiciones de radiación solar.
- c) Diseño y construcción de la réplica: Se seleccionó un lugar adecuado para la construcción de las plataformas y canales del waru waru, siguiendo las dimensiones

tradicionales a escala reducida del original. Siendo sembrado quinua en la réplica como cultivo andino tradicional.



- d) Instalación de sensores: Se instalaron sensores en la réplica de waru waru para medir la temperatura del agua, y las condiciones ambientales. Estos instrumentos serán clave para la recolección de datos. En la Tabla 3 y Tabla 4, se muestran características técnicas de Datalogger y de los sensores respectivamente.

Tabla 3

Especificaciones técnicas del Datalogger

Características Generales	
Alimentación	100-240Vac
Frecuencia de la red eléctrica	50/60/400Hz
Consumo de energía	75VA max
Temperatura de funcionamiento	Precisión de 0 a 55°C
Temperatura de operación	-40 a +70°C
Lenguaje	Compatible con SCPI-1999, IEEE-488, 34970A/34972A
Comprobación de termopar abierto	Comprobación de termopar abierto.

Nota. Alimentacion, frecuencia, consumo y temperatura del Datalogger.

Fuente Elaboracion propia (2025)

Tabla 4*Especificaciones técnicas del sensor PT100*

Especificaciones Técnicas	
Conexión	3 Hilos
Longitud	1m
Dimensiones	D5 mm x L100mm
Diámetro de rosca	0.8mm
Material de sonda	Acero inox
Rango de trabajo	-100°C hasta 400°C

*Nota. Dimensiones y rango de trabajo de los sensores PT100.**Fuente.* Elaboración propia (2025)**3.2.10 Ecuaciones para el análisis**

Para el modelamiento numérico del comportamiento térmico del agua del waru waru calentado por radiación solar se emplean las siguientes ecuaciones:

Donde:

d_w : profundidad del agua (m).

d_{ca} : altura de la plataforma (m).

z_h : altura del cultivo relativo a la plataforma (m).

w_w : ancho del canal (m).

w_c : ancho de la plataforma (m)

z_r : altura de referencia relativa al nivel del agua (m).

R_a : radiación de onda larga entrante desde la atmosfera (W/m^2)

λE : flujo de calor latente (evaporación o condensación) (W/m^2)

r_{aa} : resistencia aerodinámica entre la altura de la fuente y la altura de referencia ($s \cdot m^{-1}$).

r_{ac} : resistencia de capa límite gruesa de los elementos vegetativos ($s \cdot m^{-1}$).

r_{aw} : resistencia del aire entre la superficie del agua y la altura de la fuente ($s \cdot m^{-1}$).

a) Balance de energía de la réplica de waru waru

- Cultivo (quinua)

$$A_c = \frac{\rho C_p (T_c - T_0)}{r_{ac}} \quad (5)$$

- Agua del canal

$$A_w = \frac{\rho C_p}{\gamma} \cdot \frac{e^*(T_w) - e_0}{r_{aw}} + \frac{\rho C_p (T_w - T_0)}{r_{aw}} \quad (6)$$

b) Conservación del calor y vapor en el aire

- Conservación de calor sensible

$$\frac{T_a - T_0}{r_{aa}} = \frac{T_0 - T_c}{r_{ac}} + \frac{T_0 - T_w}{r_{aw}} \quad (7)$$

- Conservación de vapor de agua

$$\frac{e_a - e_0}{r_{aa}} = \frac{e_0 - e^*(T_w)}{r_{aw}} \quad (8)$$

c) Energía disponible en cada componente

- Energía neta para el cultivo

$$A_c = \frac{w_c}{w_c + w_w} (1 - c) \varepsilon_c (R_a - \sigma T_c^4) \quad (9)$$

- Energía neta para el agua

$$A_w = \frac{w_w}{w_c + w_w} \varepsilon_w (R_a - \sigma T_w^4) - G_w - \rho_w c_w V_w \left(\frac{dT_w}{dt} \right) \quad (10)$$

Donde:

V_w es el volumen de agua por m² de suelo:

$$V_w = \frac{w_w d_w}{w_c + w_w} \quad (11)$$

G_w es el flujo de calor por conducción del agua al suelo:

$$G_w = h_w a_w (T_w - T_s) \quad (12)$$

a_w es el área de contacto relativo canal – suelo:

$$a_w = \frac{w_w + 2d_w}{w_c + w_w} \quad (13)$$

d) Cálculo de resistencias aerodinámicas

- Resistencia aire – altura referencia

$$r_{aa} = \frac{1}{k^2 u_a} \ln^2 \left(\frac{z_r - d}{z_0} \right) \quad (14)$$

- Altura de desplazamiento cero y rugosidad

$$d = 0.8 * Zh \quad (15)$$

$$z_0 = \begin{cases} z_{0s} + 0.3z_h X^{0.5}, & X < 0.2 \\ 0.3z_h \left(1 - \frac{d}{z_h}\right), & 0.2 < X < 1.5 \end{cases} \quad (16)$$

e) Resistencia del cultivo

$$r_{ac} = \frac{\alpha_w \left(\frac{w_l}{u(z_h)} \right)^{0.5}}{4\alpha_0 L_0 [1 - \exp(-\alpha_w/2)]} \quad (17)$$

f) Resistencia entre el agua y el cultivo

$$r_{aw} = \frac{z_h \exp(\alpha_w)}{\alpha_w K(z_h)} \left[\exp\left(-\frac{\alpha_w z_{0s}}{z_h}\right) - \exp\left(\frac{\alpha_w (d+z_0)}{z_h}\right) \right] \quad (18)$$

g) Radiación de onda larga entrante

$$R_a = \varepsilon_a \sigma T_a^4, \rightarrow \varepsilon_a = \mu \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{1/7} \quad (19)$$

Ahora deducimos la ecuación para la temperatura de cultivo T_c , considerando que no hay condensación de rocío (sin calor latente).

- Igualamos el balance de energía del cultivo, Ec. 5 y Ec. 9

Ec. 5

$$A_c = \frac{\rho C_p (T_c - T_0)}{r_{ac}}$$

Ec. 9

$$A_c = \frac{w_c}{w_c + w_w} (1 - c) \varepsilon_c (R_a - \sigma T_c^4)$$

- Linealizamos el termino T_c^4 : Para facilitar el cálculo, aplicamos la aproximación lineal

$$T_c^4 \approx T_a^4 + 4T_a^3(T_c - T_a) \quad (20)$$

- La Ec. 21 ponemos de la forma $(R_a - \sigma T_c^4)$ de la Ec. 9, ósea en ambos lados multiplicamos por $-\sigma$ y luego sumamos R_a , quedando de la siguiente forma:

$$R_a - \sigma T_c^4 \approx R_a - \sigma T_a^4 - 4\sigma T_a^3(T_c - T_a) \quad (21)$$

Ahora sustituimos en la Ec. 9,

$$A_c \approx \frac{w_c}{w_c + w_w} (1 - c) \varepsilon_c [R_a - \sigma T_a^4 - 4\sigma T_a^3(T_c - T_a)] \quad (22)$$

Ahora igualamos con la Ec. 5,

$$\frac{\rho C_p (T_c - T_0)}{r_{ac}} = \frac{w_c}{w_c + w_w} (1 - c) \varepsilon_c [R_a - \sigma T_a^4 - 4\sigma T_a^3(T_c - T_a)] \quad (23)$$

reordenamos,

$$\frac{(w_c + w_w) \rho C_p (T_c - T_0)}{w_c (1 - c) \varepsilon_c r_{ac}} = [R_a - \sigma T_a^4 - 4\sigma T_a^3(T_c - T_a)] \quad (24)$$

Para simplificar la notación definimos el parámetro Q :

$$Q = \frac{\rho C_p (w_c + w_w)}{r_{ac} (1 - c) w_c \varepsilon_c} \quad (25)$$

$$Q(T_c - T_0) = R_a - \sigma T_a^4 - 4\sigma T_a^3(T_c - T_a) \quad (26)$$

reordenamos aplicando propiedad distributiva

$$QT_c - QT_0 = R_a - \sigma T_a^4 - 4\sigma T_a^3 T_c + 4\sigma T_a^3 T_a \quad (27)$$

agrupamos T_c al lado izquierdo

$$T_c(Q + 4\sigma T_a^3) = QT_0 + R_a + \sigma T_a^4 \quad (28)$$

$$T_c = \frac{QT_0 + R_a - \sigma T_a^4 + 4\sigma T_a^4}{(Q + 4\sigma T_a^3)} \quad (29)$$

$$T_c = \frac{QT_0 + R_a + 3\sigma T_a^4}{(Q + 4\sigma T_a^3)} \quad (30)$$

De la Ec. 7, despejamos T_0 :

$$\frac{T_a - T_0}{r_{aa}} = \frac{T_0 - T_c}{r_{ac}} + \frac{T_0 - T_w}{r_{aw}}$$

$$\frac{T_a}{r_{aa}} - \frac{T_0}{r_{aa}} = \frac{T_0}{r_{ac}} - \frac{T_c}{r_{ac}} + \frac{T_0}{r_{aw}} - \frac{T_w}{r_{aw}}$$

$$-\frac{T_0}{r_{aa}} - \frac{T_0}{r_{ac}} - \frac{T_0}{r_{aw}} = -\frac{T_c}{r_{ac}} - \frac{T_w}{r_{aw}} - \frac{T_a}{r_{aa}}$$

$$-T_0 \left(\frac{1}{r_{aa}} + \frac{1}{r_{ac}} + \frac{1}{r_{aw}} \right) = - \left(\frac{T_c}{r_{ac}} + \frac{T_w}{r_{aw}} + \frac{T_a}{r_{aa}} \right) \quad (31)$$

$$T_0 = \frac{\frac{T_c}{r_{ac}} + \frac{T_w}{r_{aw}} + \frac{T_a}{r_{aa}}}{\frac{1}{r_{aa}} + \frac{1}{r_{ac}} + \frac{1}{r_{aw}}} \quad (32)$$

Reemplazamos la Ec. 28 en Ec. 26 y reordenamos

$$T_c = \frac{Q \left(\frac{\frac{T_c}{r_{ac}} + \frac{T_w}{r_{aw}} + \frac{T_a}{r_{aa}}}{\frac{1}{r_{aa}} + \frac{1}{r_{ac}} + \frac{1}{r_{aw}}} \right) + R_a + 3\sigma T_a^4}{(Q + 4\sigma T_a^3)} \quad (33)$$

El detalle del desarrollo de la Ec. 33 se muestra en Anexo 3.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS Y DISCUSIONES

El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir de la experimentación y modelación del comportamiento térmico del agua en el sistema waru waru, siguiendo la estructura basada en los tres objetivos específicos. Construcción de la réplica de waru waru y monitoreo de variables ambientales

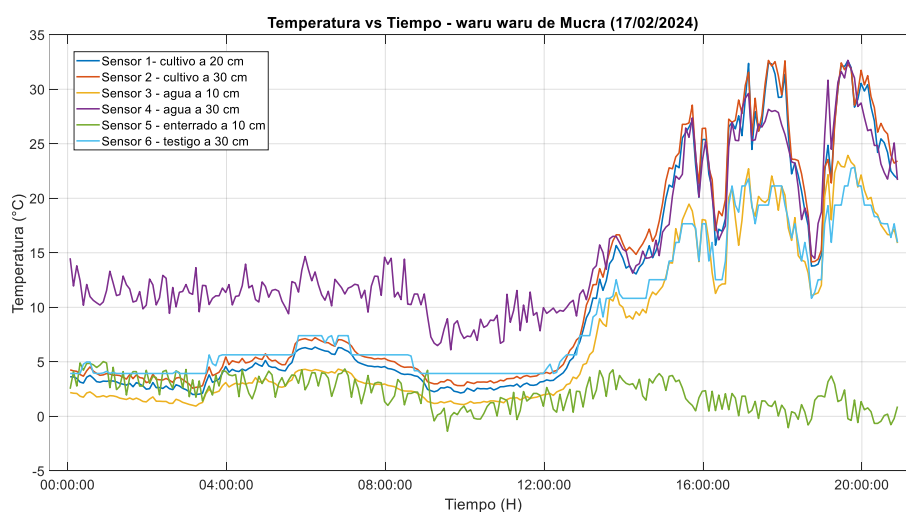
4.1 Resultados de la construcción de réplica de waru waru en sede Ayabacas

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del waru waru original reconstruido en Mucra. Los datos corresponden a la medición registrada el 17 de febrero de 2024, en la cual se instalaron seis sensores distribuidos conforme a las características señaladas en la leyenda de la Figura 18. En este sistema experimental se sembró papa nativa, y se obtuvieron diversas lecturas de temperatura a lo largo del ciclo, las cuales fueron capturadas mediante un sistema de adquisición de datos configurado para monitorear el comportamiento térmico del waru waru.

Los seis sensores permiten registrar de manera precisa las variaciones térmicas en diferentes puntos del sistema, facilitando un análisis detallado del microclima generado por la estructura. Esta distribución sensorial se diseñó para evaluar la influencia del sistema de canales y plataformas sobre las temperaturas del suelo y del agua, lo que contribuye a entender el efecto regulador térmico característico del waru waru.

Figura 18

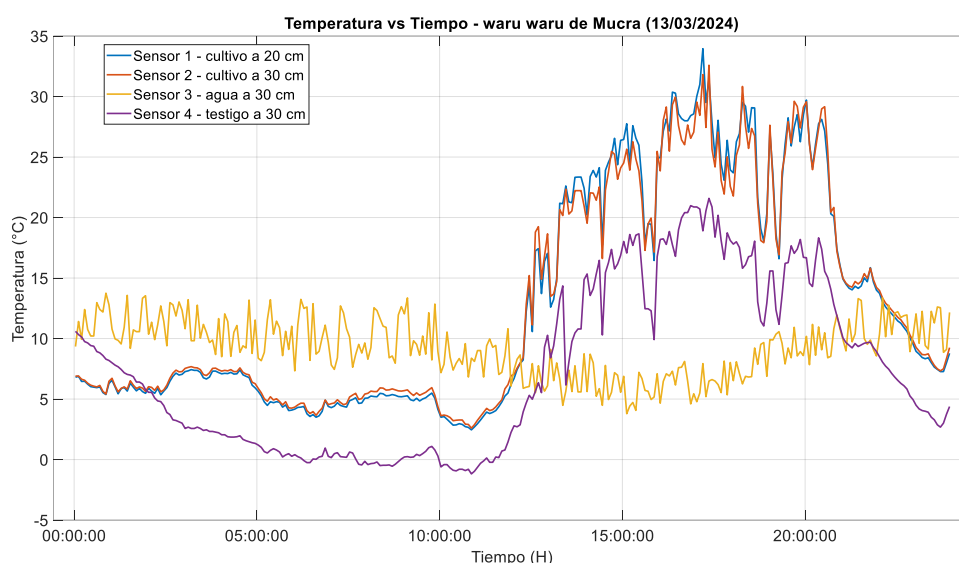
Temperaturas registradas del waru waru original en Mucra.



Nota. Primeros resultados de temperaturas registradas del waru waru original en Mucra (Elaboracion propia)

Figura 19

Temperaturas registradas del waru waru original en Mucra.



Nota. Temperaturas registradas del waru waru original en Mucra para los días 13/03/24 con cuatro sensores de temperaturas (Elaboracion propia)

Esta distribución sensorial se diseñó para evaluar la influencia del sistema de canales y plataformas sobre las temperaturas del suelo y del agua, lo que contribuye a entender el efecto regulador térmico característico del waru waru. Los seis sensores permiten registrar de manera precisa las variaciones térmicas en diferentes puntos del sistema, facilitando un análisis detallado del microclima generado por la estructura. Esta distribución sensorial se diseñó para evaluar la influencia del sistema de canales y plataformas sobre las temperaturas del suelo y del agua, lo que contribuye a entender el efecto regulador térmico característico del waru waru. Los resultados reflejan cómo las condiciones térmicas varían en el tiempo dentro del sistema, brindando evidencia del funcionamiento tradicional que protege los cultivos frente a las condiciones climáticas adversas del altiplano.

Como resultados del primer objetivo específico, se muestra la construcción de una réplica a escala de waru waru (motivo de la presente investigación), replicando las dimensiones de las tres plataformas seleccionadas del waru waru original. Esta replica fue construida dentro de la universidad utilizando tierra de cultivo que fue transportada especialmente para este fin. Posteriormente, se realizó la siembra de quinua (*Chenopodium quinoa*) y se procedió a instalar los sensores de temperatura PT100, conectados a un datalogger especializado de marca Keysight modelo DAQ970A (en el Anexo 2 se muestran fotografías correspondientes a esta etapa).

En la Figura 20, se muestra el proceso de construcción de la réplica de waru waru cerca de la EPIER-UNAJ. Esta construcción se inició con el traslado de tierra de cultivo adecuada para nuestras necesidades, continuó con el trabajo manual de reconstrucción realizado por el tesista y personal de apoyo y finalmente se concluyó con el sembrío de quinua.

Figura 20

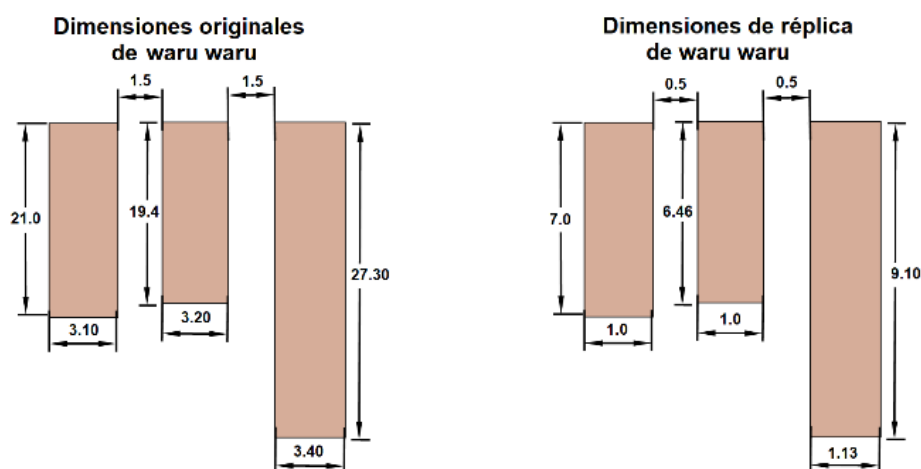
Proceso de construcción de réplica de waru waru.



Nota. Proceso de construcción de réplica de waru waru: (a) traslado de tierra de cultivo, (b) reconstrucción a escala, (c) reconstrucción concluida, (d) sembrío de quinua (Elaboracion propia).

Figura 21

Dimensiones de waru waru original y de la réplica.



Nota. Dimensiones de waru waru original y de la réplica. construida a escala reducida de 1:3 donde cada unidad de la réplica representa tres unidades del original (Elaboración propia).

La construcción de la réplica del waru waru se realizó siguiendo estrictamente las dimensiones a escala reducida de 1:3 del waru waru original reconstruido en Mucra. Estas dimensiones se presentan en la Figura 21, que muestra la proporción entre el modelo original y la réplica. Para el caso de la altura del surco de la réplica se consideró la misma dimensión del waru waru original de 0.46 m, esto para conservar la relación entre el volumen del agua y la capacidad térmica que es esencial para reproducir el efecto térmico. Este uso de la escala permitió mantener las características geométricas del diseño tradicional, asegurando que la réplica funcione bajo las mismas condiciones que el original.

La recolección de datos para el proyecto se realizó mediante un sistema de monitoreo continuo de temperaturas en la réplica de waru waru construida en la EPIER. Este sistema incorporó seis sensores PT100 para registrar temperaturas, estratégicamente distribuidos en la réplica para obtener mediciones simultáneas en diferentes componentes: agua, cultivo, incluyendo temperatura del aire y velocidad del viento, ambas registradas mediante la estación meteorológica de la EPIER, como se detalla en la Figura 22.

Los sensores 1 y 2 fueron instalados enterrados en el surco de agua a profundidades de 5 cm y 15 cm, respectivamente; el sensor 3 se colocó a 5 cm para medir la temperatura del agua. Los sensores 4 y 5 se ubicaron en el cultivo de quinua, a 20 cm y 30 cm de profundidad, respectivamente. El sensor 6 se instaló fuera del área de las plataformas, a 5 m de distancia y una altura de 30 cm, funcionando como testigo para comparaciones de variaciones de temperatura dentro y fuera del sistema waru waru.

Figura 22

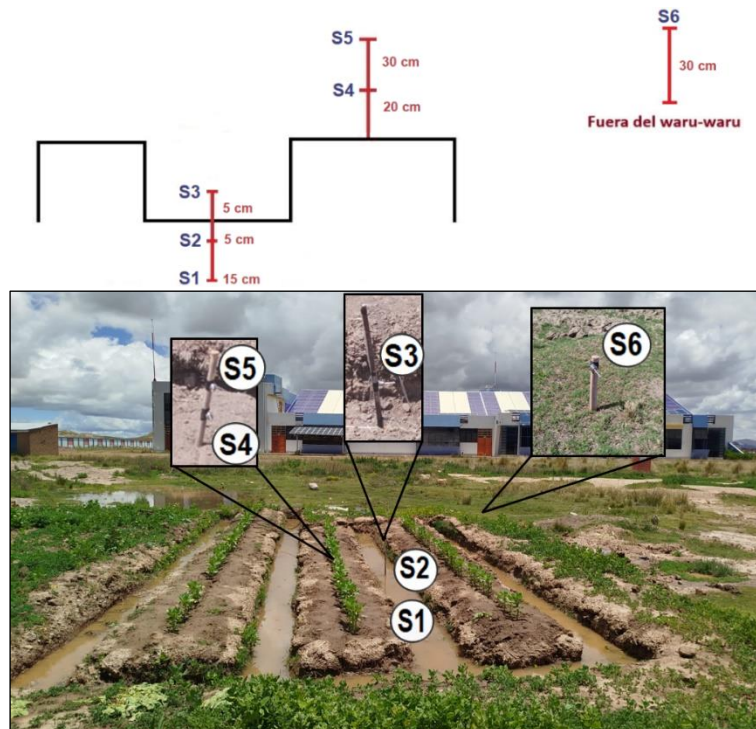
Sistema de adquisición de datos de temperatura.



Nota. Sistema de adquisición de datos de temperatura: (a) sensor PT100, (b) instalación de seis sensores de temperatura, (c) sensor de temperatura de referencia, (d) Datalogger (Elaboración propia)

Figura 23

Ubicación de sensores y alturas de instalación..



Nota. Ubicación de sensores y alturas de instalación en la réplica de waru waru.(Elaboración propia)

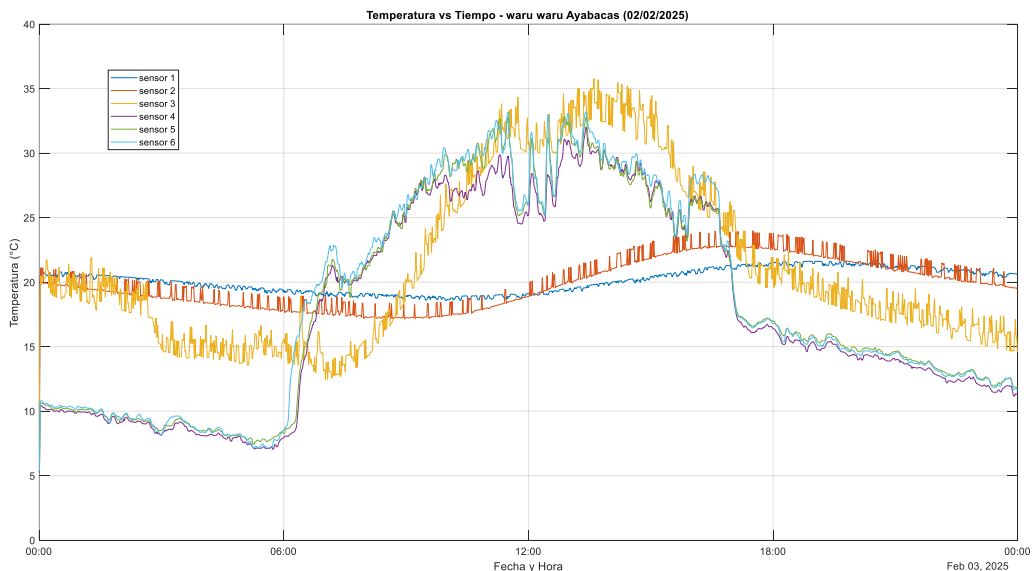
La ubicación y alturas de los sensores se ilustran en la Figura 23. Esta réplica permitió el monitoreo continuo de variables térmicas y ambientales.

- La réplica fue equipada con seis sensores PT100 instalados estratégicamente para medir temperaturas del agua, suelo, cultivo y ambiente.
- El sistema fue monitoreado de forma continua durante varias semanas, registrando datos cada 10 minutos, incluyendo temperaturas diurnas, nocturnas y fluctuaciones estacionales.
- Los datos meteorológicos complementarios (irradiancia, humedad relativa y velocidad del viento) fueron registrados mediante la estación meteorológica de la EPIER-UNAJ.

Los resultados demostraron que el sistema de sensores fue eficiente para captar las variaciones térmicas del sistema. Durante el día, el agua acumuló calor hasta alcanzar picos de temperatura promedio de 17 a 22 °C, y durante la noche, liberó gradualmente dicho calor, evitando que la temperatura del cultivo descendiera por debajo de 3 °C, incluso cuando la temperatura ambiente llegó a -1 °C. Este comportamiento validó la capacidad del waru waru para generar un microclima protector, como lo señalan Lhomme & Vacher (2002).

Figura 24

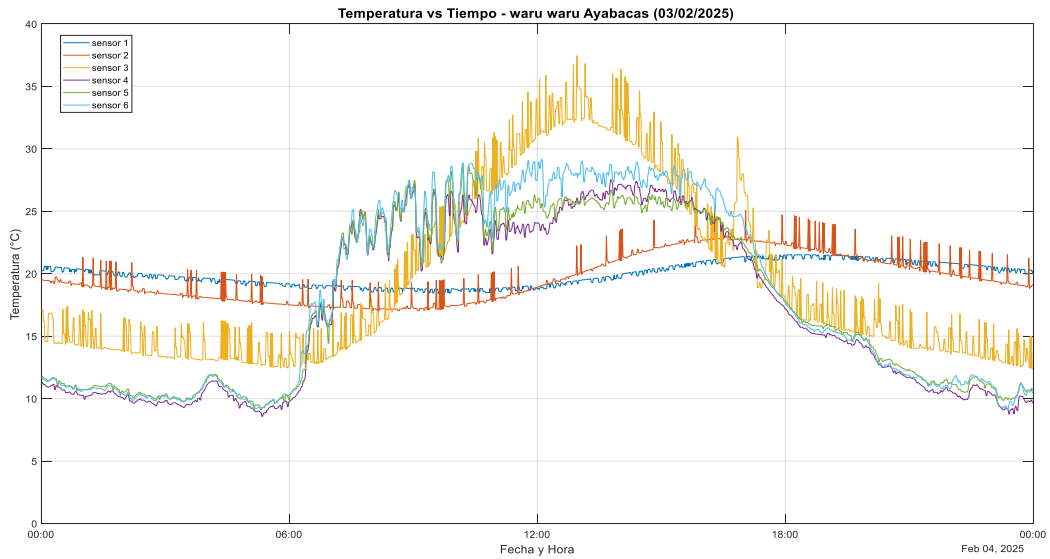
Temperaturas registradas del waru waru de Ayabacas.



Nota. Temperaturas registradas del waru waru de Ayabacas para el día 02/02/25 con seis sensores de temperaturas (Elaboración propia).

Figura 25

Temperaturas registradas del waru waru de Ayabacas.



Nota. Temperaturas registradas del waru waru de Ayabacas para el día 03/02/25 con seis sensores de temperaturas (Elaboración propia)

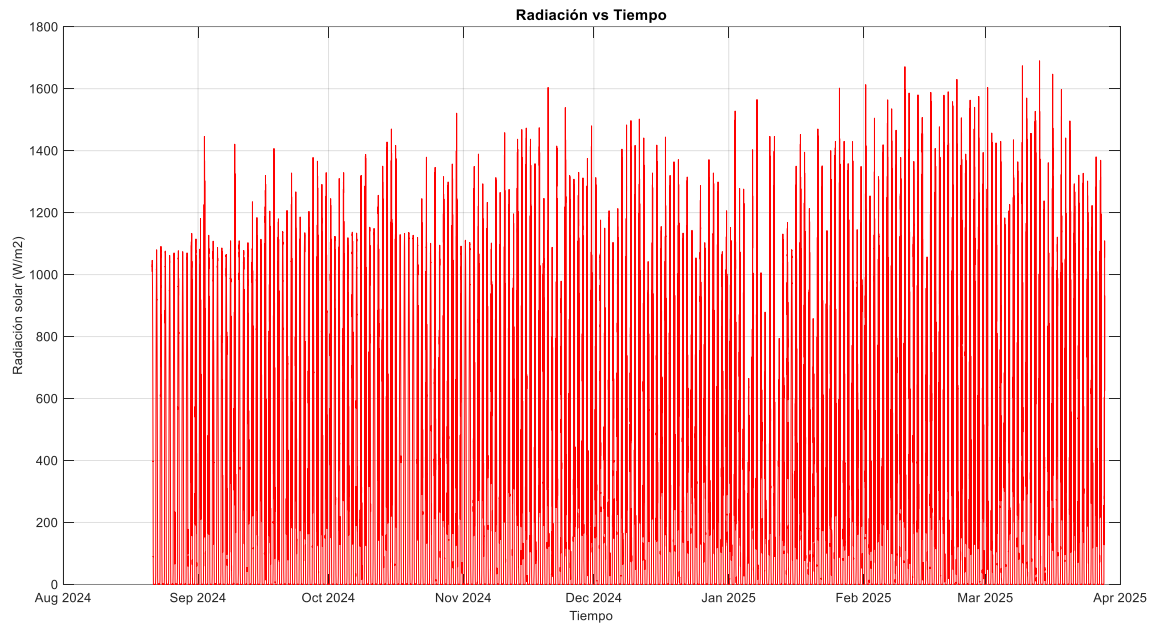
4.2 Resultados del modelo numérico del comportamiento térmico

Para el cumplimiento del segundo objetivo específico, se formuló un modelo numérico basado en las condiciones geométricas de la réplica, los registros de irradiancia solar y las temperaturas registradas.

- Se utilizó el modelo de Lhomme y Vacher (2002) adaptado al contexto altiplánico.
- El modelamiento empleó como insumo los valores reales obtenidos de las mediciones de temperatura en la réplica, permitiendo simular la evolución térmica del agua.
- El modelo estimó adecuadamente la temperatura nocturna del cultivo (T_c) a partir de la temperatura del agua (T_w) y del aire (T_a).

Figura 26

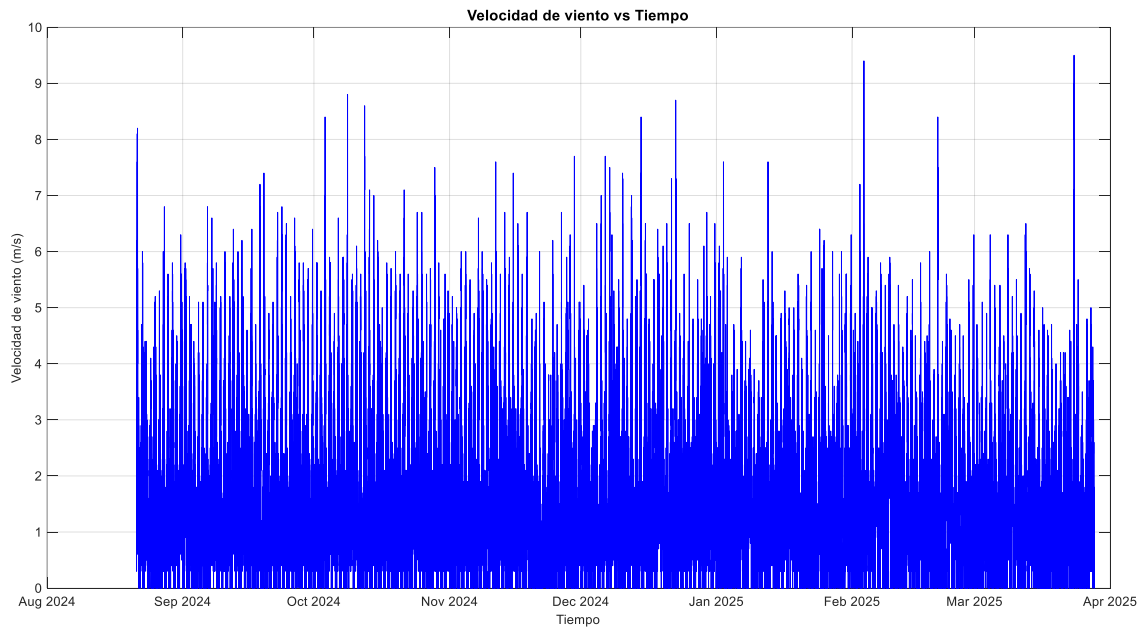
Datos registrados de radiación solar.



Nota. Datos registrados de radiación solar medidos por la estación meteorológica desde setiembre de 2024 a abril de 2025(Elaboración propia)

Figura 27

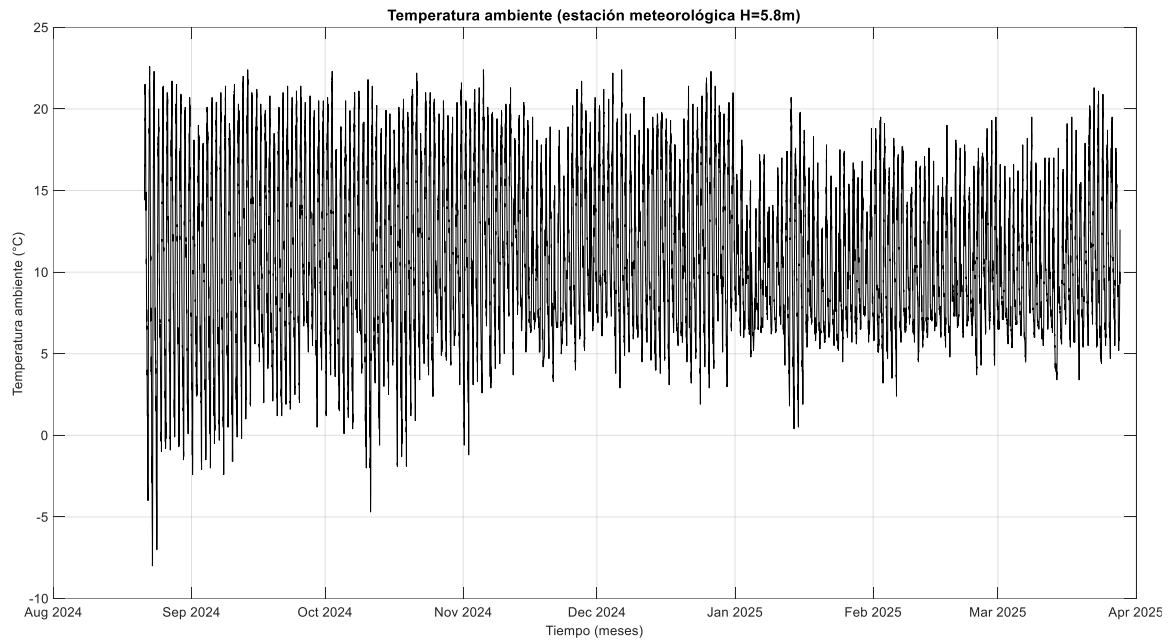
Datos de velocidad de viento.



Nota. Datos de velocidad de viento desde setiembre de 2024 a abril de 2025 (Elaboración propia)

Figura 28

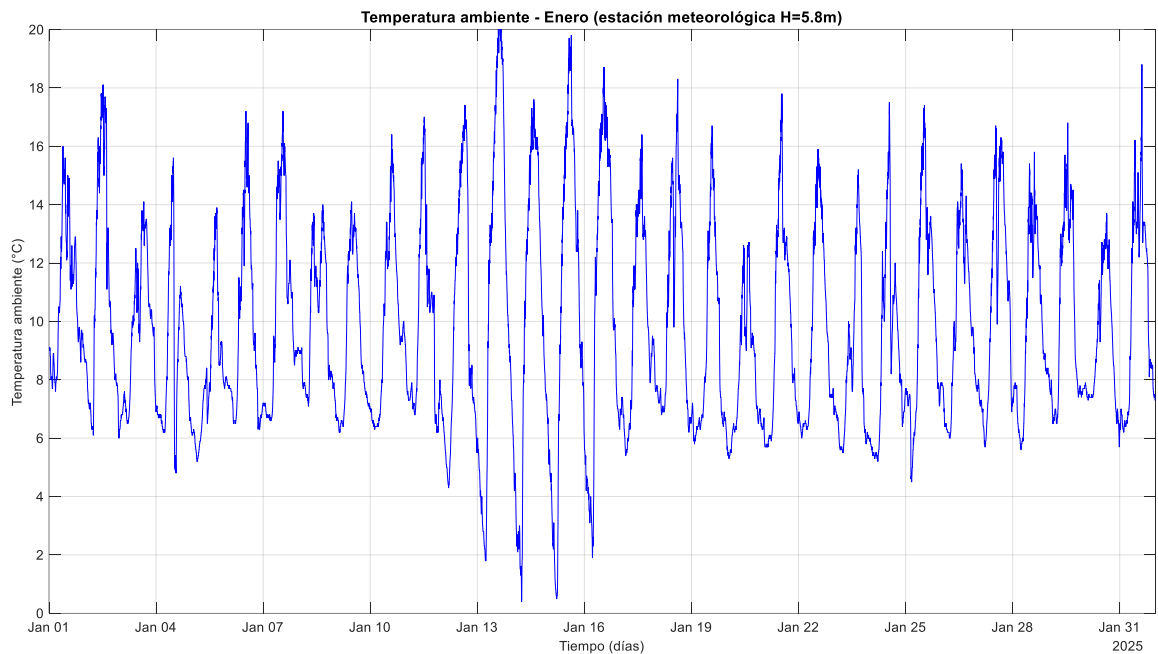
Datos de temperatura ambiente.



Nota. Datos de temperatura ambiente (T_a) de setiembre de 2024 a abril de 2025 (Elaboración propia)

Figura 29

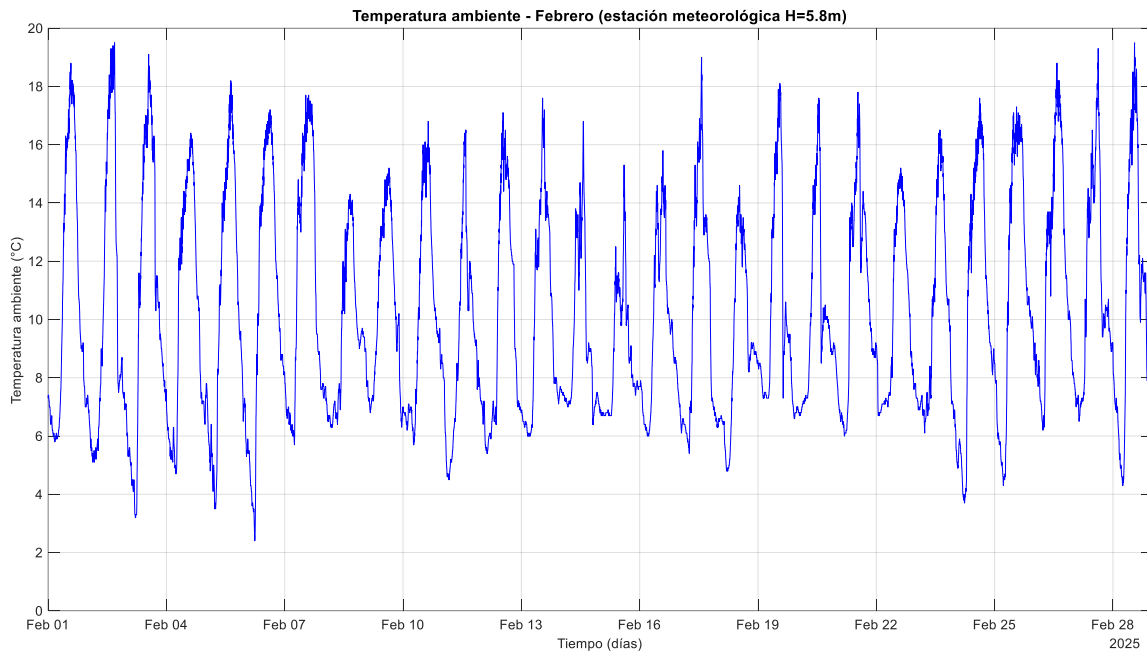
Datos de temperatura ambiente enero 2025.



Nota. Datos de temperatura ambiente (T_a) del mes de enero de 2025. (Elaboración propia)

Figura 30

Datos de temperatura ambiente febrero de 2025



Nota. Datos de temperatura ambiente (T_a) del mes de febrero de 2025. (Elaboración propia)

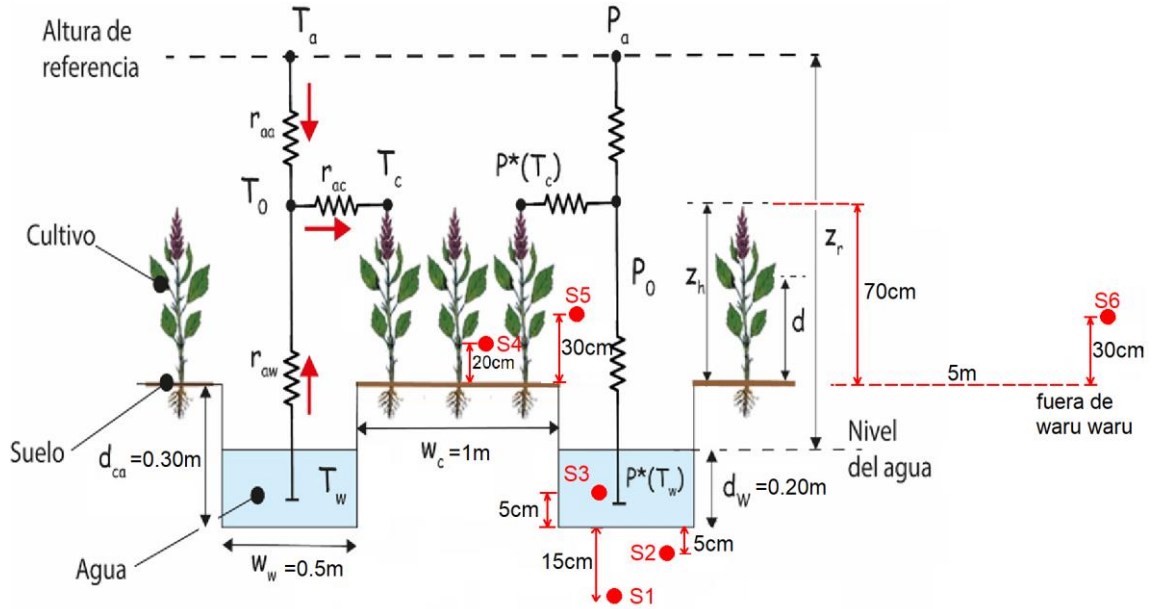
Datos importantes para el modelo numérico son la radiación solar y la velocidad del viento. A continuación, se muestran los datos registrados por la estación meteorológica de la escuela profesional de Ingeniería en Energías Renovables, en la Figura 26, muestra la radiación solar en W/m^2 desde los meses de setiembre/2024 a inicios de abril/2025. De estos datos se obtiene el valor medio de radiación solar de $880 W/m^2$ para los meses de enero a marzo de 2025, fecha donde fueron medidos los datos de temperaturas en la réplica de waru waru. En la Figura 27, tenemos datos registrados de la velocidad de viento durante los meses de set/2024 a abr/2025. De esta información son obtenidos la media de velocidad para los meses de enero a marzo de 2025 que es $1.45 m/s$. Figura 28, se tiene datos de temperatura ambiente (T_a) también en el mismo periodo, en la Figura 29, los datos de temperatura ambiente (T_a) del mes de enero de 2025 y la Figura 30, datos de temperatura ambiente (T_a) del mes de febrero de 2025.

El modelo numérico fue capaz de reproducir el comportamiento térmico observado, lo que valida su capacidad predictiva. Además, se evidenció que la principal resistencia térmica del sistema se encontraba entre el agua y el cultivo, lo que enfatiza el rol clave del agua como almacenador y disipador de calor. Este hallazgo es consistente con estudios previos realizados por Ortloff & Kolata (1993), quienes identificaron la importancia del

almacenamiento térmico del agua en sistemas agrícolas prehispánicos. Con ese contexto se tiene la Figura 31, utilizado para el modelamiento del sistema waru waru.

Figura 31

Flujos de energía y las resistencias del sistema térmico.



Nota. Representación esquemática del corte transversal del waru waru mostrando los flujos de energía y las resistencias del sistema térmico. (Elaboración propia).

Donde:

d_w : profundidad del agua (m).

d_{ca} : altura de la plataforma (m).

z_h : altura del cultivo relativo a la plataforma (m).

w_w : ancho del canal (m).

w_c : ancho de la plataforma (m)

z_r : altura de referencia relativa al nivel del agua (m).

R_a : radiación de onda larga entrante desde la atmósfera (W/m^2)

λE : flujo de calor latente (evaporación o condensación) (W/m^2)

r_{aa} : resistencia aerodinámica entre la altura de la fuente y la altura de referencia ($s \cdot m^{-1}$).

r_{ac} : resistencia de capa límite gruesa de los elementos vegetativos ($s \cdot m^{-1}$).

r_{aw} : resistencia del aire entre la superficie del agua y la altura de la fuente ($s \cdot m^{-1}$).

Finalmente, la Ec. 34 muestra el modelamiento numérico del comportamiento térmico del agua del waru waru calentado por radiación solar:

$$T_c = \frac{Q\left(\frac{T_a}{r_{aa}} + \frac{T_w}{r_{aw}}\right) + (R_a + 3\sigma T_a^4)\left(\frac{1}{r_{aa}} + \frac{1}{r_{ac}} + \frac{1}{r_{aw}}\right)}{Q\left(\frac{1}{r_{aa}} + \frac{1}{r_{aw}}\right) + 4\sigma T_a^3\left(\frac{1}{r_{aa}} + \frac{1}{r_{ac}} + \frac{1}{r_{aw}}\right)} \quad (34)$$

4.3 Resultados de la simulación del comportamiento térmico y validación con datos experimentales

Finalmente, se utilizó el modelo desarrollado para simular el comportamiento térmico del waru waru bajo diferentes escenarios de radiación solar y geometría, validando sus resultados con los datos experimentales recolectados.

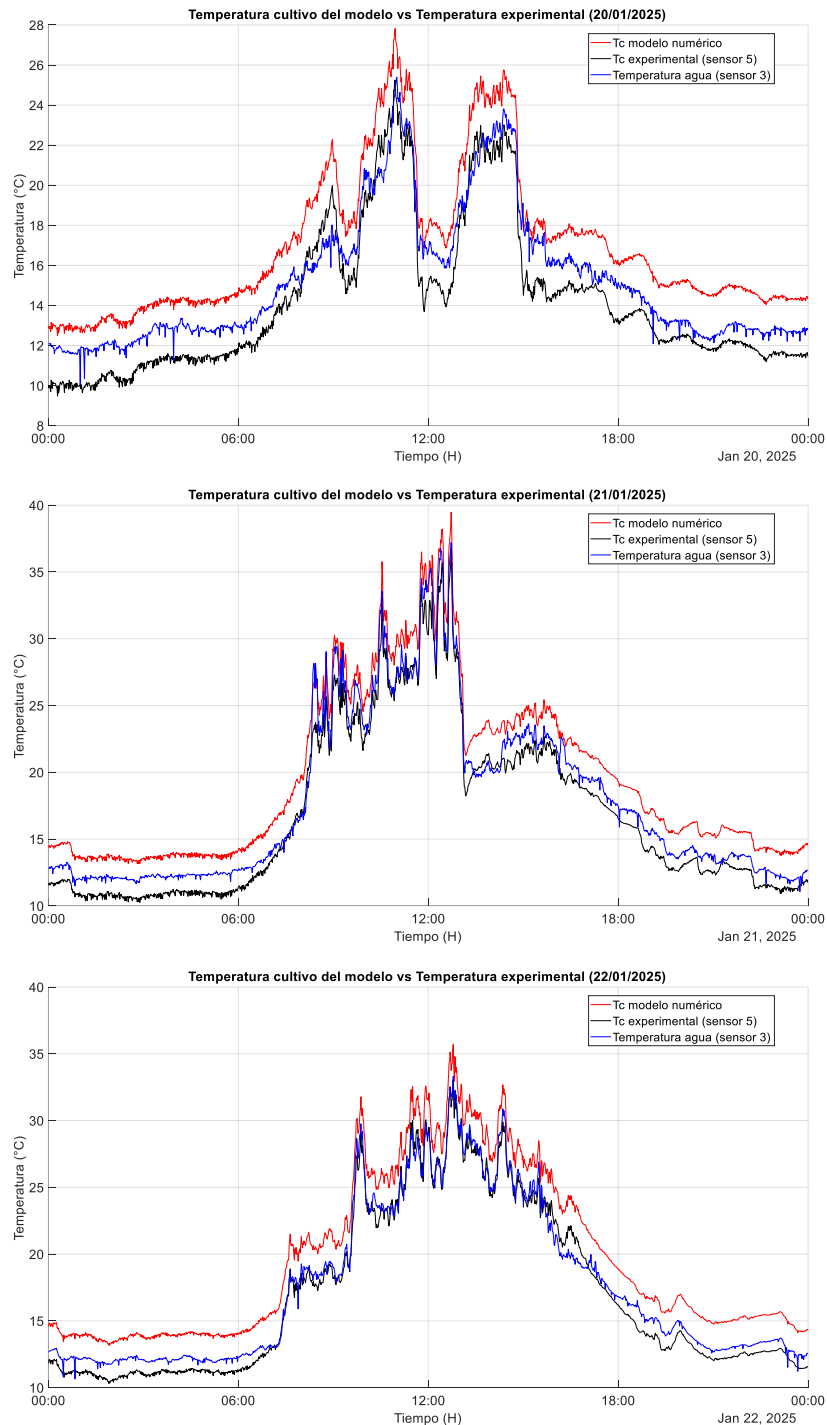
- Se simularon distintos niveles de irradiancia (baja, media, alta) y se evaluaron escenarios con variación en la profundidad de agua (Hw) y ancho de canal (ww).
- En todos los casos, el modelo predijo correctamente la formación del microclima nocturno. Por ejemplo, bajo irradiancia media (~550 W/m²), el agua alcanzó los 20 °C durante el día y liberó calor suficiente para mantener el cultivo a ~4 °C durante la madrugada.
- Las simulaciones mostraron que una mayor profundidad del canal mejora la inercia térmica del sistema, incrementando el tiempo de liberación de calor.
- Las simulaciones obtuvieron un resultado de correlación superior al 90% haciendo uso del coeficiente de correlación de Pearson que compara las temperaturas simuladas del cultivo con las temperaturas experimentales registrada por los sensores. MATLAB calculó la correlación mediante la función “corrcoef”, que evalúa la relación lineal entre ambas señales. Es por ello que el resultado fue mayor al 90%, lo que indica que el modelo reproduce con alta fidelidad el comportamiento térmico real del sistema.

La validación con datos experimentales arrojó un error medio absoluto menor a 1.2 °C entre las temperaturas simuladas y medidas. Este margen es aceptable para modelos de transferencia de calor natural. Los resultados demuestran que el modelo puede ser utilizado para predecir el comportamiento térmico del sistema bajo condiciones variables, lo cual abre la posibilidad de diseñar waru warus optimizados en función del clima local. La simulación también reveló que la configuración geométrica influye significativamente en el

comportamiento térmico, siendo posible ajustar el diseño del sistema para maximizar la eficiencia térmica en diferentes regiones altoandinas. En la Figura 32, se muestra una de las figuras obtenidas con el script desarrollado.

Figura 32

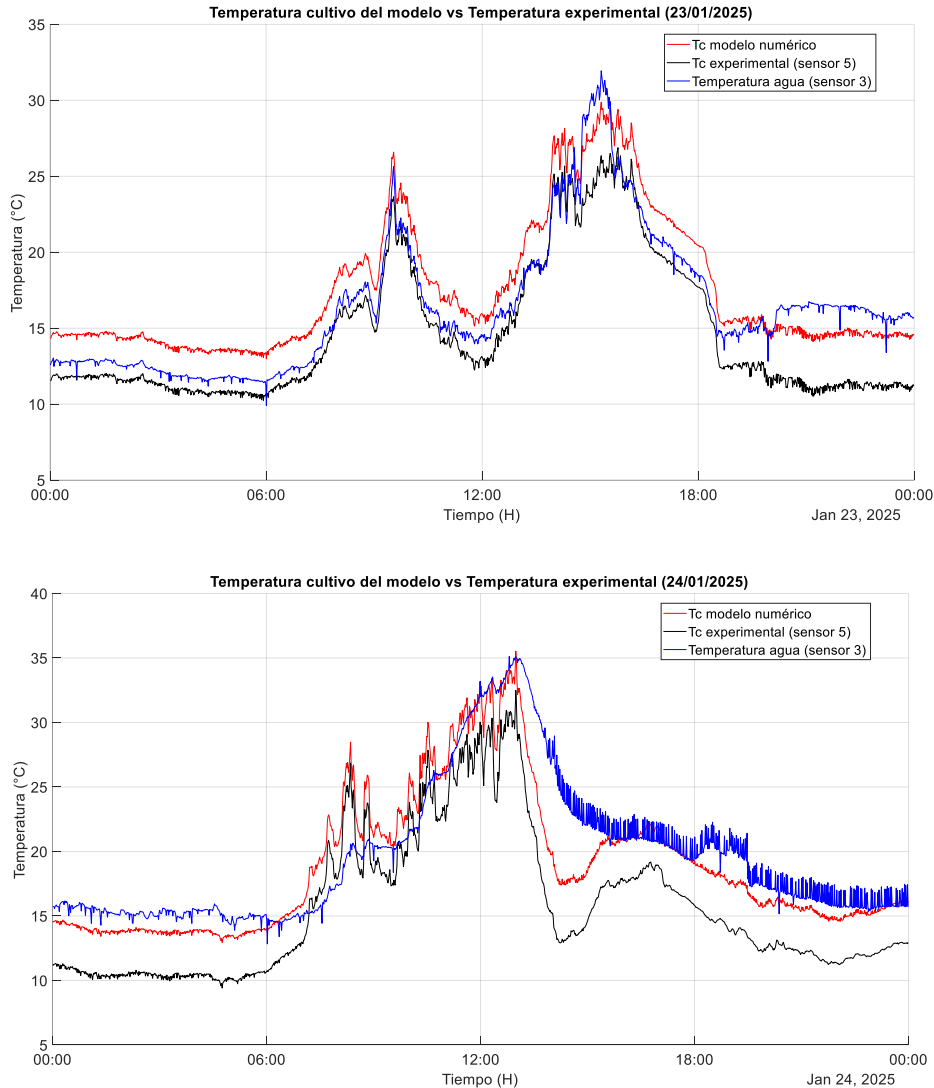
Comparación de temperaturas experimentales y simuladas.



Nota. Comparación de temperatura del cultivo T_c del modelo numérico, temperatura del cultivo y temperatura del agua los días 20,21 y 22 de enero del 2025. (Elaboración propia)

Figura 33

Comparación de temperatura experimentales y simuladas los días 23/01/2025 y 24/01/2025.



Nota. Comparación de temperatura del cultivo T_c del modelo numérico, temperatura del cultivo y temperatura del agua los días 23 y 24 de enero del 2025. (Elaboración propia)

En la Figura 32, se muestra la comparación de temperatura del cultivo (T_c) del modelo numérico con la temperatura del cultivo y del agua, medidas los días 20, 21, 22 de enero de 2025. Allí se observa que el modelo numérico sigue la tendencia de las mediciones experimentales registradas por el sensor 5. De forma similar, en la Figura 33, se muestran los datos registrados el 23 y 24 de enero del 2025. Además, se observa la temperatura del agua (línea azul), que en las figuras mostradas se encuentra por encima de la temperatura del cultivo, es decir, que el agua está más caliente que la planta, lo que indica un flujo de calor constante desde el agua hacia el cultivo.

4.4 Discusiones

Sobre la construcción de réplica de waru waru en sede Ayabacas

La viabilidad técnica y logística demostrada en la construcción de la réplica a escala 1:3 coincide con lo señalado por (Erickson, 1995), quien afirma que las tecnologías agrícolas prehispánicas, incluido el sistema de waru waru, pueden ser reproducidas en contextos actuales siempre que se respeten sus proporciones geométricas y principios hidráulicos. En este sentido, la réplica desarrollada en el presente estudio mantuvo las dimensiones relativas del sistema original, lo que permitió reproducir patrones de funcionamiento térmico similares.

Asimismo, los resultados respaldan lo expuesto por (Valdez, 2006), quien nos dice que las tecnologías andinas tradicionales son altamente escalables por su diseño modular y su capacidad de adaptación a topografías diversas. La réplica a escala reducida mantuvo el comportamiento térmico del sistema ancestral, evidenciando que la geometría desempeña un rol crítico en la generación del microclima protector contra heladas. Esto confirma que la construcción de prototipos reducidos es válida para estudios experimentales y modelos de simulación, siempre y cuando se respeten las proporciones fundamentales del diseño original.

Sobre el modelo numérico desarrollado

Los resultados obtenidos confirman la solidez del enfoque de (Lhomme & Vacher, 2002) quienes demostraron que los balances de energía basados en resistencias aerodinámicas permiten describir con alta precisión la dinámica térmica en sistemas suelo, vegetación y atmósfera. En sus estudios, las correlaciones entre temperaturas simuladas y medidas se situaron entre 0.85 y 0.95, cifras muy similares a las alcanzadas en el presente trabajo. La correlación superior al 90% indica que la adaptación del modelo al sistema waru waru fue correcta, especialmente en la incorporación de la resistencia aire-agua y de las variaciones de radiación solar propias del altiplano.

Los resultados del presente estudio también coinciden con investigaciones modernas que analizan el rol del agua como regulador térmico en sistemas agrícolas tradicionales de alta montaña. Trabajos contemporáneos que modelan sistemas de almacenamiento térmico en camellones altoandinos reportan comportamientos similares, donde el agua actúa como un reservorio que amortigua las variaciones extremas de temperatura y protege los cultivos durante heladas nocturnas. En esta investigación, la simulación logró reproducir este efecto con alta precisión, mostrando una correlación superior al 90% con los datos medidos. Este

valor se encuentra dentro del rango reportado por estudios recientes que validan modelos energéticos acoplados agua-sueloaire en climas fríos. La coincidencia entre el modelo y los datos reales refuerza la idea de que los waru waru no solo funcionan como una tecnología ancestral eficiente, sino que además pueden describirse numéricamente con suficiente exactitud como para predecir su desempeño térmico bajo diferentes configuraciones geométricas y condiciones ambientales. Esto abre la posibilidad de aplicar el modelo para mejorar, rediseñar o expandir estos sistemas en zonas vulnerables al cambio climático.

Sobre la simulación del comportamiento térmico del agua

Los resultados obtenidos en esta investigación, que muestran temperaturas del cultivo superiores a 34 °C incluso cuando el ambiente desciende por debajo de 0 °C, coinciden con lo reportado por (Lhomme & Vacher, 2002), quienes demostraron que los cuerpos de agua expuestos a radiación solar actúan como almacenadores térmicos capaces de liberar calor de forma gradual durante la noche. Esta coincidencia confirma que el canal inundado del waru waru funciona como una masa térmica efectiva, amortiguando las fluctuaciones de temperatura extrema típicas del altiplano.

Asimismo, los resultados concuerdan con lo señalado por (Calle, 2022) en su estudio sobre sistemas de almacenamiento térmico en waru waru, donde concluyen que los canales de agua pueden elevar la temperatura del microclima hasta niveles que protegen a los cultivos de heladas severas, incluso en zonas con temperaturas negativas. Esta investigación refuerza dicha evidencia experimental, al demostrar que el sistema ancestral sigue siendo eficaz bajo condiciones climáticas actuales y con datos medidos directamente en campo.

CAPÍTULO V - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

A partir del desarrollo experimental y de simulación numérica del comportamiento térmico del agua en un waru waru calentado por radiación solar, se concluye lo siguiente:

Sobre la construcción y monitoreo de la réplica de waru waru:

La construcción de la réplica de waru waru fue viable técnica y logísticamente. Se replicaron condiciones geométricas en escala reducida de 1:3, es decir, cada unidad de la réplica representa tres unidades del waru waru original. Este uso de la escala permitió mantener las características geométricas del diseño tradicional, asegurando que la réplica funcione bajo las mismas condiciones que el original

Sobre el modelo numérico desarrollado:

El modelo numérico basado en el enfoque de Lhomme y Vacher (2002) se adaptó con éxito a las condiciones experimentales de la réplica del waru waru. Consideró resistencias térmicas del sistema agua-suelo-aire y factores como radiación solar, velocidad del viento, geometría y evaporación.

La simulación logró predecir con alta precisión la evolución térmica del sistema, con un coeficiente de correlación superior al 90% respecto a los datos medidos, confirmando su validez y aplicabilidad.

Sobre la simulación del comportamiento térmico del agua:

Las simulaciones demostraron que el waru waru puede mantener temperaturas del cultivo por encima de los 34 °C incluso cuando la temperatura ambiente desciende por debajo de los 0 °C, gracias a la capacidad del agua de absorber calor durante el día y liberarlo por la noche. Las variaciones geométricas (profundidad del canal, ancho de la plataforma) influyen directamente en la eficiencia térmica del sistema, lo que permite optimizar su diseño según la radiación solar disponible y la altitud de la zona.

Sobre el objetivo general:

En conjunto, los resultados confirman que los waru waru son sistemas agrícolas con fundamentos físicos sólidos y vigentes, cuya revalorización puede contribuir significativamente a enfrentar los efectos del cambio climático en regiones altoandinas. es que se logró con éxito desarrollar un modelo numérico adaptado a las condiciones

experimentales basadas en una réplica construida a escala reducida. Este modelo consideró factores clave como resistencias térmicas, radiación solar, velocidad del viento, geometría y evaporación, logrando predecir con alta precisión la evolución térmica del agua en el sistema.

La evaluación demostró que el waru waru es capaz de mantener temperaturas adecuadas para el cultivo incluso en condiciones extremas, confirmando la eficacia térmica del sistema y su potencial para contribuir a la mitigación del impacto climático en regiones altoandinas. Así, la combinación de experimentación y simulación numérica permitió validar la física y funcionalidad del waru waru, reafirmando su relevancia agrícola tradicional y moderna en el altiplano peruano.

5.2 Recomendaciones

Para futuras implementaciones:

Se recomienda replicar el estudio en diferentes localidades altoandinas para evaluar la influencia de variables climáticas regionales en el comportamiento térmico del waru waru.

Se debe considerar la profundidad del canal de agua como parámetro crítico para mejorar la capacidad de almacenamiento de calor y prolongar el efecto térmico nocturno.

Para optimización del diseño:

Se sugiere utilizar el modelo numérico desarrollado como herramienta de diseño en proyectos de recuperación o construcción de waru waru modernos, permitiendo ajustar sus dimensiones y orientación en función del clima local.

La incorporación de materiales con alta inercia térmica (como piedras o capas de materia orgánica) puede potenciar aún más la eficiencia térmica del sistema.

Para difusión y aplicación comunitaria:

Se recomienda capacitar a comunidades campesinas en el uso de tecnologías híbridas (ancestrales + modernas) como el waru waru, integrando sensores de bajo costo y modelos predictivos simplificados para el manejo agrícola.

Las instituciones educativas y de desarrollo rural deben promover este tipo de soluciones basadas en el conocimiento ancestral adaptado al contexto actual de cambio climático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ancajima, R. (2015). *Tecnologías ancestrales*. Acceso en 17 de 10 de 2025, disponible en www.hidraulicainca.com
- ANDINA. (2024). *Andina Agencia Peruana de Noticias*. Acceso en 18 de 10 de 2025, disponible en <https://andina.pe/agencia/noticia-que-son-las-heladas-meteorologicas-y-que-se-diferencian-del-friaje-y-las-nevadas-982640.aspx>
- Bandy, M. (2005). Energetic efficiency and political expediency in Titicaca Basin raised field agriculture. *Journal of Anthropological Archaeology*, 271-296.
- Calle, V. (2022). Sukakollos y bioflujos regenerativos en el territorio andino. *Cuaderno 158 - Centro de Estudios en Diseño y Comunicación*, 139-154.
- Canahua, A., Huamani, W., Casafranca, J., & Quispe, G. (2013). Rehabilitación del agroecosistema de Sukaqollos y seguridad alimentaria en la cuenca del Titicaca (I parte). *Agro enfoque*, 44-47.
- Castejon, A., & Santamaria, G. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Editex S.A.
- Concepto. (2015). *Transferencia de calor*. Acceso en 17 de 10 de 2025, disponible en <https://concepto.de/transferencia-de-calor/>
- Culturas, P. (2020). *Culturas Peruanas*. Acceso en 11 de 07 de 2024, disponible en <https://culturasperuanas.info/camellones-o-waru-waru-de-la-cultura-tiahuanaco/>
- DEXMA. (2022). *Energy SpaceWell*. Acceso en 23 de 02 de 2024, disponible en <https://www.dexma.com/es/blog-es/la-energia-eolica-marina-un-actor-clave-en-la-transicion-energetica/>
- EcologiaVerde. (2025). *Microclima: qué es, cómo se forma y ejemplos*. Acceso en 16 de 10 de 2025, disponible en <https://www.ecologiaverde.com/microclima-que-es-como-se-forma-y-ejemplos-5348.html>
- E-medida. (2012). *Introducción a la medida de la irradiancia solar*. Acceso en 17 de 10 de 2025, disponible en <https://www.e-medida.es/numero-25/introduccion-a-la-medida-de-la-irradiancia-solar/>
- ENGIE. (2022). *Engie-energia*. Acceso en 15 de 03 de 2024, disponible en <https://engie-energia.pe/historias/buen-viento-en-punta-lomitas>

- Erickson, C. (1995). Archaeological methods for the study of ancient landscapes of the Llanos de Mojos in the Bolivian Amazon. *University of Pennsylvania*, 66-94.
- FAO. (2011). *Sistemas Importantes del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM)*. Acesso em 17 de 10 de 2025, disponível em <https://www.fao.org/giahs/around-the-world/detail/peru-agriculture/es>
- HelioEsfera. (2020). *HelioEsfera*. Acesso em 05 de 03 de 2024, disponível em <https://www.helioesfera.com/irradiancia-irradiacion-y-radiacion-solar/>
- HelioEsfera. (2021). *Helioesfera*. Acesso em 17 de 11 de 2024, disponível em <https://www.helioesfera.com/irradiancia-irradiacion-y-radiacion-solar/>
- Heliosfera. (2022). *Horas de sol pico ¿Qué es y para qué sirve?* Acesso em 17 de 10 de 2025, disponível em <https://www.helioesfera.com/horas-de-sol-pico-que-es-y-para-que-sirve/>
- Hidráulica-Inca. (s.d.). *Hidráulica Inca*. Acesso em 03 de 12 de 2024, disponível em <https://hidraulicainca.com/puno/waru-waru-puno/>
- Hydronik. (2022). *Energía solar térmica o fotovoltaica, ¿Cuál elegir?* Acesso em 17 de 10 de 2025, disponível em <https://hydronik.es/energia-solar-termica-o-fotovoltaica/>
- Iriarte, J., Glaser, B., Watling, J., Wainwright, A., Birk, J., Renard, D., . . . McKey, D. (2010). Late Holocene Neotropical agricultural landscapes: phytolith and stable carbon isotope analysis of raised fields from French Guianan coastal savannahs. *Journal of Archaeological Science*, 2984-2994.
- ITMATI. (2021). *Simulación numérica*. Acesso em 16 de 10 de 2025, disponível em http://www.itmati.com/Simulacion_numerica
- Jenkins, I. (2007). *Greek Architecture and Its Sculpture*. Boston: Harvard University Press.
- Kolata, A., & Ortloff, C. (1989). Thermal analysis of Tiwanaku raised field systems in the Lake Titicaca basin of Bolivia. *Journal of Archaeological*, 233-263.
- Lentech, W. (2023). *Water Treatment Solutions*. Acesso em 15 de 02 de 2023, disponível em <https://www.lenntech.es/applications/hydrogen.htm>
- Lhomme, J., & Vacher, J. (2002). Modelling nocturnal heat dynamics and frost mitigation in Andean raised field systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, pp. 179-193.

- Lombardo, U., Canal-Beedy, E., Fehr, S., & Veit, H. (2011). Raised fields in the Bolivian Amazonia: a prehistoric green revolution or a flood risk mitigation strategy? *Journal of Archaeological Science*, 502-512.
- MINAM. (2015). *Tecnologías Ancestrales - Sistemas Hidráulicos Pre Incas e Incas*. Lima: MINAM.
- MINAM. (2019). *La adaptación al cambio climático como oportunidad de desarrollo para el Perú*. Lima: Ministerio del Ambiente del Perú.
- NUTEC. (2023). *Tipos de Transferencia de Calor: Diferencias y recomendaciones*. Acceso em 17 de 10 de 2025, disponível em <https://www.nutec.com/es/newsroom/articulos/tipos-de-transferencia-de-calor>
- Ortloff, C., & Kolata, A. (1993). Climate and collapse: Agro-ecological perspectives on the decline of the Tiwanaku State. *Journal of Archaeological Science*, 195-221.
- Posada-Restrepo, W., Castañeda-Riascos, I., Cadena-Duarte, B., Gonzáles-Avenidaño, S., Sierra-Arango, O., Ramos, J., . . . Rúa, A. (2023). Ancient water management and the evolution of the late holocene wetlands. First paleoecological evidence from prehispanic raised fields of Urabá, northwestern south America. *Journal of Archaeological Science*, 51, 104187.
- PROSUKO. (2008). *Suka Kollus, una tecnología ancestral para el tiempo actual*. La Paz, Bolivia: IC-PROSUKO - Programa de Suka Kollus PROSUKO.
- REPSOL. (2024). *Impulsando energías con soluciones térmicas*. Acceso em 16 de 10 de 2025, disponível em <https://www.repsol.com/es/energia-avanzar/energia/energia-termosolar/index.cshtml>
- Sánchez de Lozada, D., Baveye, P., & Riha, S. (1998). Heat and moisture dynamics in raised field systems of the lake Titicaca region (Bolivia). *Agricultural and Forest Meteorology*, pp. 251-265.
- Sardon, S., Loaiza-Usuga, J., Varga, D., & Pari, Y. (2024). Characterization of the “Waru Waru” soils on the Peruvian high plateau. *Soil Science Annual*, 75(1)184338.
- SENAMHI. (2021). *Heladas meteorológicas - bajas temperaturas en la sierra*. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

- SFE-Solar. (2024). *SUN-FIELDS*. Acesso em 07 de 03 de 2024, disponível em <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/como-varia-la-captacion-de-energia-solar-en-superficies-inclinadas/>
- Smith, C., Denevan, W., & Hamilton, P. (2015). Ancient Ridged Fields in the Region of Lake Titicaca. *Royal geographical society*, pp. 1-17.
- SOLTEC. (2020). *Energías Renovables: El periodismo de las energías limpias*. Acesso em 27 de 02 de 2024, disponível em <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/por-que-la-tecnologia-perc-se-20180306>
- Stargate, H. (2023). *Hydrogen Storage Solutions: Innovations and Advances*. Acesso em 15 de 07 de 2024, disponível em <https://stargatehydrogen.com/blog/hydrogen-storage-solutions/>
- SUNFIELDS. (2015). *Sunfields Europe*. Acesso em 11 de 03 de 2024
- SunFields-Solar. (2024). Acesso em 18 de 10 de 2025, disponível em https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-fotovoltaica-radiacion-geometria-recorrido-optico-irradiancia-y-hsp/?srsIid=AfmBOorm2q2qWrlCL12Q-UEssWfM_19wmRZUSIlq4HSvLFansNMtS-Jc
- TUVSUD. (2022). *Cadena de valor hidrógeno*. Acesso em 22 de 02 de 2024, disponível em <https://www.tuvsud.com/es-es/temas/hidrogeno/cadena-valor-hidrogeno/produccion-hidrogeno>
- Valdez, F. (2006). *Agricultura ancestral: Camellones y albarradas*. Quito - Ecuador: Ediciones Abya-Yala.

ANEXOS

ANEXO I – RECONSTRUCCIÓN DE WARU WARU ORIGINAL EN EL SECTOR DE MUCRA, DISTRITO DE SAN MIGUEL (VIA SALIDA AL CUSCO)

Figura 34

Selección y reconstrucción de tres plataformas de waru waru



Nota. Proceso de selección y reconstrucción de los waru waru en mucra. Se observa la reconstrucción de las tres plataformas de un waru waru original.

Figura 35

Reconstrucción de las tres plataformas seleccionadas de waru waru



Nota. Proceso de cultivo de papa nativa y la instalacion de los equipos de medicion.

ANEXO II – CONSTRUCCIÓN DE RÉPLICA DE WARU WARU EN LA UNAJ SEDE AYABACAS

Figura 36

Construcción de réplica de tres plataformas de waru waru



Nota. Proceso de construcción del waru waru en la EPIER-UNAJ.

ANEXO III – DETALLE DEL DESARROLLO DE LA ECUACIÓN T_c

Detalle del ecuacionamiento de T_c

De la Ec.

$$T_0 = \frac{\frac{T_c}{r_{ac}} + \frac{T_w}{r_{aw}} + \frac{T_a}{r_{aa}}}{\frac{1}{r_{aa}} + \frac{1}{r_{ac}} + \frac{1}{r_{aw}}}$$

Sea el siguiente procedimiento:

$$S = \frac{T_c}{r_{ac}} + \frac{T_w}{r_{aw}} + \frac{T_a}{r_{aa}};$$
$$D = \frac{1}{r_{aa}} + \frac{1}{r_{ac}} + \frac{1}{r_{aw}}$$

Entonces

$$T_0 = \frac{S}{D}$$

Multiplicamos QT_0 :

$$QT_0 = Q \cdot \frac{S}{D} = \frac{Q}{D} \left(\frac{T_c}{r_{ac}} + \frac{T_w}{r_{aw}} + \frac{T_a}{r_{aa}} \right)$$

$$T_0(Q + 4\sigma T_a^3) = \frac{Q}{D} \left(\frac{T_c}{r_{ac}} + \frac{T_w}{r_{aw}} + \frac{T_a}{r_{aa}} \right) + R_a - \sigma T_a^4 + 4\sigma T_a^3 T_a$$

Agrupamos los términos con T_c a la izquierda

$$T_c(Q + 4\sigma T_a^3) - \frac{Q}{D} \cdot \frac{T_c}{r_{ac}} = \frac{Q}{D} \left(\frac{T_w}{r_{aw}} + \frac{T_a}{r_{aa}} \right) + R_a - \sigma T_a^4 + 4\sigma T_a^3 T_a$$

Factor común a T_c :

$$T_c \left[Q + 4\sigma T_a^3 - \frac{Q}{Dr_{ac}} \right] = \frac{Q}{D} \left(\frac{T_w}{r_{aw}} + \frac{T_a}{r_{aa}} \right) + R_a + 3\sigma T_a^4$$

Factor común de resistencias

$$\frac{Q}{D} = Q \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{r_{aa}} + \frac{1}{r_{ac}} + \frac{1}{r_{aw}}\right)}$$

$$T_c = Q \cdot \frac{\frac{Q}{D} \left(\frac{T_w}{r_{aw}} + \frac{T_a}{r_{aa}}\right) + R_a + 3\sigma T_a^4}{\left[Q + 4\sigma T_a^3 - \frac{Q}{Dr_{ac}}\right]}$$

Finalmente tenemos la forma como ecuación final de T_c

$$T_c = \frac{Q \left(\frac{T_a}{r_{aa}} + \frac{T_w}{r_{aw}}\right) + (R_a + 3\sigma T_a^4) \left(\frac{1}{r_{aa}} + \frac{1}{r_{ac}} + \frac{1}{r_{aw}}\right)}{Q \left(\frac{1}{r_{aa}} + \frac{1}{r_{aw}}\right) + 4\sigma T_a^3 \left(\frac{1}{r_{aa}} + \frac{1}{r_{ac}} + \frac{1}{r_{aw}}\right)}$$

ANEXO IV – CÓDIGO EM MATLAB PARA GRAFICAR EL MODELO NUMÉRICO DEL WARU WARU

```
% Este programa calcula la temperatura Tc del waru-waru de la planta

clear all, clc, close all

% Definimos las constantes
cd = 0.2; % mean dragg coefficient (Llhomme)
L0 = 0.6; % indice del area de la hoja (Definir con Jael)
zh = 2; % altura de la cubierta vegetal (m) (vamos a asumir 2m)
X = cd*L0;
Wc = 2.0; % ancho de la plataforma (m) (asumimos por ahora 2m)
Ww = 0.5; % ancho del canal (m) (asumimos por ahora 1m)
zr = 2.0; % altura de referencia sobre el nivel del suelo (2m según
paper Llhomme 2002)
z0c = 0.01; % Llhomme
z0w = 0.0002; % Llhomme
k = 0.4; % k : Constante de Von Karman (0.4 según Llhomme)
ua = 5; % velocidad del viento a la altura de referencia (m/s) (escogemos
2.5m/s)
alphaW = 2.5; % constante sin dimensión = 2.5 (según Llhomme)
kzh = 0.5; % Coeficiente de distorsión turbulenta a la altura de la
cubierta vegetal
w1 = 0.10; % ancho de la hoja (m) ( escogemos 0.1 m, segun el libro la
quinua y la kañiwa, Mario Tapia mide hasta 0.12 m de ancho por 0.15 de
alto)
uzh = 2.0; % rapidez del viento a la altura de la planta (m/s) (asumimos
2m/s este dato lo debemos verificar equivale a 7.2 km/h)
alpha0 = 0.005; % constante = 0.005 (ms-1/2)
rho = 0.832; % densidad del aire (kg/m3)
CP = 1004; % calor específico del aire a presión constante (J/kg K)
c = 0.5; % razón del flujo del calor del suelo a la radiación neta del
cultivo (0,50)
epsic = 0.97; % emisividad de la vegetacion
Ra = 100; %Radiación incidente de onda larga (W/m2)

% Calculamos z0s
z0s = ((Wc*z0c) + (Ww*z0w))/(Wc + Ww);
%Calculamos z0
z0 = z0s + 0.3*zh*(X^(0.5));
%Calculamos d
d = (1.1)*zh*log(1 + X^(0.25) );
%Calculamos raa
raa = (1/(k*k*ua))*(log((zr-d)/z0))^(2);
%Calculamos raw
raw = (zh/(alphaW*kzh))*exp(alphaW) * (exp(-alphaW*z0s/zh) - exp(-
alphaW*(d+z0)/zh));
%Calculamos rac
rac = (alphaW*((w1/uzh)^(0.5)))/(4*L0*alpha0*(1-exp(-alphaW/2)));
%Calculamos Q
Q = (rho*CP*(Wc + Ww))/(rac*(1-c)*Wc*epsic);

% Llamamos a el archivo csv
% datos = readtable('Waru_replica_del_02a115_enero_2015_modificado');
datos = readtable('Waru_replica_del_19a126_enero_2025_modificado.csv');
```

```

% Convertir Tiempo a datetime
datos.Tiempo = datetime(datos.Tiempo, 'InputFormat', 'MM/dd/yyyy
HH:mm:ss.SSS');

% Calcular TCultivo (asegúrate de que devuelve un vector)
Tagua = datos.S3;
Taire = datos.S5;
TCultivo = calculaTemperaturaCultivo(Q, raa, raw, rac, Ra, Taire, Tagua);

%% Graficar
% Definir el rango de interés
idx = 636:2075;

% Obtener los vectores para comparar
Tc_modelo = TCultivo(idx);
T_exp_sensor5 = datos.S5(idx);

% Calcular el coeficiente de correlacion de Pearson
R = corrcoef(Tc_modelo, T_exp_sensor5);
coef_corr = R(1,2);

figure;
hold on;
plot(datos.Tiempo(636:2075), TCultivo(636:2075), 'r', ...
      datos.Tiempo(636:2075), datos.S5(636:2075), 'k', ...
      datos.Tiempo(636:2075), datos.S3(636:2075), 'b');

set(gca, 'FontSize', 20);
xlabel('Tiempo (H)', 'FontSize', 20);
ylabel('Temperatura (°C)', 'FontSize', 20);
title('Temperatura cultivo del modelo vs Temperatura experimental
(20/01/2025)', 'FontSize', 20);
grid on
leyenda = {
    'Tc modelo numérico',
    'Tc experimental (sensor 5)',
    'Temperatura agua (sensor 3)'
};
legend(leyenda, 'Location', 'best')

```

FUNCIÓN

```
function Tc = calculaTemperaturaCultivo(Q,raa,raw,rac,Ra,Ta,Tw)
    sigma = 5.670374419*10^(-8);
    % Esta función calcula la temperatura del cultivo
    Tc = (Q * ((Ta./raa) + (Tw./raw)) + ((Ra + 3*sigma*(Ta.^4)) .* ((1./raa)
+ (1./raw) + (1./rac)))) ./ ...
        (Q * ((1./raa) + (1./raw)) + 4*sigma * (Ta.^3) .* ((1./raa) +
(1./raw) + (1./rac)));

end
```

ANEXO V – CARACTERISTICAS DEL DATALOGGER KEYSIGHT DAQ970A (DATA ACQUISITION SYSTEM)



PRODUCT FACT SHEET

DAQ970A and DAQ973A Data Acquisition Systems

Sample More Signals, Faster and Dynamically



1. USB drive
2. On/Standby switch with LED indicator
3. Color LCD Display / GUI
4. Softkeys
5. Measurement operation keys
6. Measurement configuration keys (to set measurement parameters)
7. Knob
8. Cursor navigation keypad

The DAQ970A / DAQ973A data acquisition systems have high-quality switching and an advanced 6 ½ digit DMM built in, which allows you to measure accurately.

- The autocalibration compensates for drifts in the internal DMM or on the DAQM907A multifunction module or on the DAQM909A digitizer module caused by time and temperature changes.
- Built-in internal module calibration reduces thermal voltage offset errors.
- Ability to measure very low current ranges (1 µA DC and 100 µA AC) and higher resistance range (1000 MΩ).

Key features

- 3-slot mainframes with built-in 6 ½ digit DMM
- Basic 0.003% DCV accuracy
- 10 switches, RF, and control plug-in modules, including a 4-channel simultaneous sampling digitizer
- Up to 450 channel/s scan rate
- Up to 120 channels per system
- Up to one million points scanning memory
- Measures and converts 14 different input signals: Temperature with a thermocouple, RTDs, and thermistor; DC/AC volts; 2- and 4-wire resistance; frequency and period; DC/AC current, diode, and capacitance; direct strain and bridge strain
- Large 4.3" color display for ease of setup and viewing data
- LAN and USB for easy connectivity to your PC (DAQ973A comes with additional GPIB)
- Code compatible with the 34970A/34972A
- USB flash drive support to copy/log data in standalone applications
- BenchVue DAQ with enhanced time/frequency domain measurement

More Information: www.keysight.com/find/DAQ970A

DAQ970A and DAQ973A Key Capabilities

Features	Description
Types of measurements	Temperature, voltage, current, resistance, frequency, diode and capacitance, direct strain, and bridge strain
Digital input/output	Up to 48 bits
Analog output	-10 V to +10 V, 20 mA
Multiplexing	Maximum 120 (1-wire), 60 (2-wire) channels
Matrix switching	Maximum 96 cross points
General purpose	Maximum 60 switches
RF multiplexing	Maximum 24 channels, 2 GHz
Simultaneous sampling	Maximum 12 channels, up to 800 kSa/s, 24-bit resolution
Interface	Graphic web, USB front/rear, LAN/LXI, GPIB (only for DAQ973A)



Rear image of the DAQ973A mainframe with USB, LAN, and GPIB interfaces



DAQ970A and DAQ973A plug-in modules

Part	Description
DAQ970A	DAQ mainframe with USB and LAN interfaces
DAQ973A	DAQ mainframe with USB, LAN, and GPIB interfaces
DAQM900A	20-channel solid-state multiplexer
DAQM901A	20-channel armature multiplexer + 2 current channels
DAQM902A	16-channel reed multiplexer
DAQM903A	20-channel actuator/GP switch
DAQM904A	4 x 8 matrix
DAQM905A	Dual 4-channel 50 Ω RF mux
DAQM907A	Multifunction module
DAQM908A	40-channel armature multiplexer
DAQM909A	4-channel 24-bit simultaneous sampling digitizer
DAQM910A	20-Channel General Purpose, Low Voltage Multiplexer

DAQ970A / DAQ973A accessories

Part	Description
DAQA190A	Rack mount kit
DAQA191A	2U dual flange kit
DAQA194A	Dual lock link kit
34307A	10-pack J-type thermocouples
34308A	5-pack 10 kΩ thermistors

Keysight enables innovators to push the boundaries of engineering by quickly solving design, emulation, and test challenges to create the best product experiences. Start your innovation journey at www.keysight.com.

This information is subject to change without notice. © Keysight Technologies, 2018 – 2025.

ANEXO VI – SENSORES PT100 UTILIZADOS EN LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA



Sensor de Temperatura PT100, -50 A 200C,, inserción 80mm, 1/2" NPT,

Previous product

Next product

DANFOSS

Sensor de Temperatura PT100, -50 A 200C,, inserción 80mm, 1/2" NPT,

Código Interno: PRO49374

SENSOR DE TEMPERATURA PT100

MARCA: DANFOSS

MODELO: MBT 5252 (084Z6167)

Especificaciones Técnicas:

- Longitud de inserción: 80mm
- Proceso de conexión: 1/2 NPT



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

"Universidad Pública de Calidad"