

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA**



**Tesis**

**Impacto de los escenarios climáticos en la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi - 2023**

**Asesor:**

Mg. Carrasco Ustua Haydee

**Autor:**

Hilares Pumapillo, Félix

**Para optar el Título Profesional: Ingeniero Agrónomo**

**Abancay - Apurímac – Perú**

**2025**

## Acta de sustentación



Universidad  
Tecnológica de los Andes

Transformando vidas



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA

Acta N°: 012

### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Abancay, a los 25 días del mes de febrero del 2025, siendo las 10:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 032-2025-UTEA-FI-DEPA de la Escuela Profesional de Agronomía, Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Dr.C. Alarcón Camacho Juan
Dictaminante:	MSc. Maldonado Mendivil Ángel
Replicante :	M.Sc. Yanqui Díaz Franklin

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis  Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

**Impacto de los escenarios climáticos en la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) del distrito de Curahuasi-2023**

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: Hilares Pumapillo, Félix  
(Apellidos y Nombres)

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Agrónomo

(Denominación del Título)

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad  
(Unanimidad o Mayoría) (\*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Hilares Pumapillo, Félix	Aprobado

Siendo las 12:00 pm horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Dr.C. Alarcón Camacho Juan  
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

Dictaminante: MSc. Maldonado Mendivil Ángel  
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

Replicante: M.Sc. Yanqui Diaz Franklin  
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(Firma)

(Firma)

(Firma)

Se expide la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 208.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES  
Ciudad Universitaria, Av. Perú N° 700, Abancay, Central Telefónica 051 (083) 321559  
Filial Cusco, Av. Grau N° 516, Teléfono (084) 251565  
Filial Andahuaylas, San Jerónimo Jr. Ccatalay N° 100 Teléfono (083) 421752  
[www.utea.edu.pe](http://www.utea.edu.pe)

(\*) Mayoría: Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; Unanimidad: Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban. Art. 18 RCGAT.  
(\*\*) 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción. Art. 18 RCGAT.

# Reporte de similitud






## 21% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

### Filtrado desde el informe

- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

### Fuentes principales

- 19%  Fuentes de Internet
- 8%  Publicaciones
- 17%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## Metadatos

<b>Datos del Autor</b>	
Apellidos y nombres	: Hilares Pumapillo Felix
Tipo de documento de identidad	: Documento Nacional de Identidad
Número de documento de identidad	: 42470040
URL ORCID	: <a href="https://orcid.org/0009-0000-1415-7330">https://orcid.org/0009-0000-1415-7330</a>
<b>Datos del Asesor</b>	
Apellidos y nombres	: Mg. Carrasco Ustua Haydee
Tipo de documento de identidad	: Documento Nacional de Identidad
Número de documento de identidad	: 42381893
URL ORCID	: <a href="https://orcid.org/0000-0001-7031-5882">https://orcid.org/0000-0001-7031-5882</a>
<b>Datos de la Investigación</b>	
Facultad	: Ingeniería
Escuela Profesional	: Agronomía
Línea de investigación	: Agricultura y Ambiente
Rango de años en la que se realizó la investigación	: 2023
Nota de financiamiento	: Recursos propios
Porcentaje de similitud	: 21%
URL de OCDE	: <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#4.01.06">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#4.01.06</a>

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi familia por apoyarme en todo momento durante mi formación académica. Así mismo a todos aquellos que luchan por un futuro mejor, los conocimientos aquí plasmados contribuirán de alguna manera a ese objetivo que todos soñamos llegar.

**Félix**

## **Agradecimiento**

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mi Asesora Mag. Haydee Carrasco Ustua por guiarme en la formulación de mi proyecto de tesis, y así mismo por compartir sus conocimientos y experiencias. A todos mis docentes: Ing. Rosa Eufemia Marrufo Montoya, Dr. Ely Jesús Acosta Valer, Mag. Sandra Creseida Caballero Ramírez, Dr. Juan Alarcón Camacho y Dr. Francisco Medina Raya, quienes han sido fundamentales en mi formación académica y personal. Su dedicación, paciencia y compromiso con la enseñanza han sido una Nota constante de inspiración.

Gracias por fomentar en mí el amor por el aprendizaje y por abrirme las puertas a nuevas ideas y perspectivas. Estoy profundamente agradecido por cada uno de sus consejos y por creer en mí.

**Félix**

## Resumen

Este estudio se realizó en el distrito de Curahuasi con el objetivo de evaluar el impacto de los escenarios climáticos RCP 6.0 y RCP 8.5 en la huella hídrica verde del cultivo de maíz. Se utilizaron datos históricos del periodo 2000-2022 y se proyectaron hasta 2051. La metodología fue cuantitativa, descriptiva y no experimental, enfocándose en cambios en la huella hídrica bajo diferentes escenarios climáticos. Para calcular la huella hídrica, se aplicó la metodología del Water Footprint Network y el método Hargreaves-Samani para la estimación de la evapotranspiración. Se utilizó el downscaling estadístico para adaptar los datos del modelo climático bcc-csm1-1 a las condiciones locales. Los resultados indicaron que en el escenario RCP 6.0, se espera una reducción del 21.16% en la huella hídrica para 2030, pero un aumento del 70.67% para 2051 debido al incremento de la evapotranspiración. En el escenario RCP 8.5, la huella hídrica disminuiría en un 21.31% para 2030, pero aumentaría en un 91.44% para 2051. En el año 2000, la huella hídrica fue de 2706.39 m<sup>3</sup>/t, y para 2051 podría alcanzar los 2981.59 m<sup>3</sup>/t. Se concluye que la huella hídrica verde del cultivo de maíz disminuiría en 2030, pero aumentaría considerablemente para 2051, lo que subraya la necesidad de implementar estrategias más eficientes para la gestión del agua.

**Palabras clave:** Escenarios climáticos, huella hídrica, maíz.

## **Abstract**

This study was conducted in the district of Curahuasi with the aim of evaluating the impact of the RCP 6.0 and RCP 8.5 climate scenarios on the green water footprint of maize cultivation. Historical data from the period 2000-2022 were used and projected until 2051. The methodology was quantitative, descriptive, and non-experimental, focusing on changes in the water footprint under different climate scenarios. To calculate the water footprint, the Water Footprint Network methodology and the Hargreaves-Samani method for estimating evapotranspiration were applied. Statistical downscaling was used to adapt the data from the bcc-csm1-1 climate model to local conditions. The results indicated that in the RCP 6.0 scenario, a 21.16% reduction in the water footprint is expected for 2030, but an increase of 70.67% is projected for 2051 due to the rise in evapotranspiration. In the RCP 8.5 scenario, the water footprint would decrease by 21.31% for 2030, but would increase by 91.44% for 2051. In 2000, the water footprint was 2706.39 m<sup>3</sup>/t, and by 2051, it could reach 2981.59 m<sup>3</sup>/t. It is concluded that the green water footprint of maize cultivation would decrease in 2030 but increase significantly by 2051, highlighting the need to implement more efficient water management strategies.

**Keywords:** Climate scenarios, water footprint, maize.

## Índice

<b>Portada.....</b>	<b>i</b>
<b>Acta de sustentación.....</b>	<b>ii</b>
<b>Reporte de similitud.....</b>	<b>iii</b>
<b>Metadatos.....</b>	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimiento.....</b>	<b>vi</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>viii</b>
<b>Índice.....</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de tablas.....</b>	<b>xii</b>
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de anexos.....</b>	<b>xiv</b>
<b>I. Introducción.....</b>	<b>15</b>
<b>II. Planteamiento del problema.....</b>	<b>16</b>
2.1. Descripción y formulación del problema.....	16
2.1.1. <i>Problema general</i> .....	17
2.1.2. <i>Problemas específicos</i> .....	17
2.2. Objetivos.....	17
2.2.1. <i>Objetivo general</i> .....	17
2.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	17
2.3. Justificación e importancia.....	18
2.4. Hipótesis.....	19
2.4.1. <i>Hipótesis general</i> .....	19
2.4.2. <i>Hipótesis específicos</i> .....	19
2.5. Variables.....	20
<b>III. Marco Teórico.....</b>	<b>23</b>

3.1. Antecedentes.....	23
3.2. Bases teóricas.....	26
3.2.1. Escenarios Climáticos.....	26
3.2.2. Huella Hídrica.....	31
3.2.3. Cultivo de Maíz.....	32
3.2.3.1. Taxonomía.....	33
3.2.3.2. Origen.....	33
3.2.3.3. Requerimientos Edafoclimáticos.....	34
3.2.3.4. Importancia Económica del Cultivo de Maíz Choclero.....	35
3.2.3.5. Requerimiento Hídrico en el Proceso Fenológico de Maíz.....	35
3.3. Definición de términos.....	36
<b>IV. Metodología.....</b>	<b>39</b>
4.1. Tipo y nivel de investigación.....	39
4.1.1. Tipo de investigación.....	39
4.1.2. Nivel de investigación.....	39
4.1.3. Diseño de la investigación.....	39
4.2. Ámbito temporal y espacial.....	40
4.2.1. Ámbito temporal.....	40
4.2.2. Ámbito espacial.....	40
4.3. Población y muestra.....	41
4.3.1. Población.....	41
4.3.2. Muestra.....	41
4.3.3. Muestreo.....	41
4.4. Instrumentos.....	42
4.5. Procedimientos.....	42
4.6. Análisis de datos.....	44
4.7. Consideraciones éticas.....	44
<b>V. Resultados y discusión.....</b>	<b>45</b>

5.1. Resultados.....	45
5.1.1. <i>Huella hídrica verde del cultivo de maíz (Zea mays L.) del distrito de curahuasi para el periodo 2000 al 2022.....</i>	45
5.1.2. <i>Huella hídrica verde del cultivo de maíz (Zea mays L.) en el distrito de Curahuasi bajo el escenario climático RCP 6.0 para el periodo 2030 al 2051.....</i>	50
5.1.3. <i>Huella hídrica verde del cultivo de maíz (Zea mays L.) en el distrito de Curahuasi bajo el escenario climático RCP 8.5 para el periodo 2030 al 2051.....</i>	55
5.1.4. <i>Incremento proyectado de la huella hídrica del cultivo de maíz (Zea mays L.) en comparación con la huella hídrica histórica, bajo los escenarios climáticos RCP 6.0 y RCP 8.5.....</i>	58
5.2. Discusión.....	61
<b>VI. Conclusiones.....</b>	<b>63</b>
<b>VII. Recomendaciones.....</b>	<b>64</b>
<b>VIII. Referencias.....</b>	<b>65</b>
<b>IX. Anexos.....</b>	<b>71</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1:</b> Operacionalización de variables.....	22
<b>Tabla 2:</b> Rendimiento del cultivo de maíz periodo 2000 al 2022.....	46
<b>Tabla 3:</b> Valores del coeficiente de cultivo (kc) en maíz.....	48
<b>Tabla 4:</b> Huella hídrica verde del cultivo de maíz periodo 2000 al 2022.....	49
<b>Tabla 5:</b> Rendimientos proyectados del cultivo de maíz.....	51
<b>Tabla 6:</b> Huella hídrica verde del cultivo de maíz periodo 2030 - 2051 bajo el escenario climático RCP 6.0.....	54
<b>Tabla 7:</b> Huella hídrica verde del cultivo de maíz periodo 2030 - 2051 bajo el escenario climático RCP 8.5.....	57
<b>Tabla 8:</b> Comparación entre la huella hídrica proyectada en escenario RCP 6.0 y la huella hídrica histórica.....	59
<b>Tabla 9:</b> Comparación entre la huella hídrica proyectada en escenario RCP 8.5 y la huella hídrica histórica.....	61
<b>Tabla 10:</b> Matriz de consistencia.....	72
<b>Tabla 11:</b> Valores de precipitación periodo 2000 - 2022.....	74
<b>Tabla 12:</b> Valores de evapotranspiración periodo 2000 – 2022.....	76
<b>Tabla 13:</b> Valores de precipitación escenario RCP 8.5 periodo 2030 al 2051.....	78
<b>Tabla 14:</b> Valores de evapotranspiración escenario RCP 8.5 periodo 2030 al 2051.....	80
<b>Tabla 15:</b> Valores de precipitación escenario RCP 6.0 periodo 2030 al 2051.....	82
<b>Tabla 16:</b> Valores de evapotranspiración escenario RCP 6.0 periodo 2030 al 2051.....	84

## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Rendimientos del cultivo de maíz en el distrito de Curahuasi.....	47
<b>Figura 2:</b> Huella hídrica del periodo 2000 al 2022.....	50
<b>Figura 3:</b> Rendimientos del cultivo de maíz proyectados del periodo 2030 al 2051.....	52
<b>Figura 4:</b> Huella hídrica del periodo 2031 al 2051 bajo el escenario RCP 6.0.....	55
<b>Figura 5:</b> Huella hídrica del periodo 2031 al 2051 bajo el escenario RCP 8.5.....	58
<b>Figura 6:</b> Huella hídrica histórica versus huella hídrica proyectada bajo el escenario RCP 6.0.....	60
<b>Figura 7:</b> Huella hídrica histórica versus huella hídrica proyectada bajo el escenario RCP 8.5.....	62
<b>Figura 8:</b> Ámbito del estudio donde se analizó la huella hídrica verde del cultivo de maíz .....	87
<b>Figura 9:</b> Siembra de maíz comunidad Bacas – Curahuasi.....	88
<b>Figura 10:</b> Primer aporque comunidad de Ccoc-Hua - Curahuasi.....	88
<b>Figura 11:</b> Desarrollo vegetativo de cultivo de maíz (comunidad de Trancapata).....	89
<b>Figura 12:</b> Crecimiento y desarrollo vegetativo de cultivo de maíz (comunidad de Trancapata).....	89
<b>Figura 13:</b> Floración y llenado de granos de cultivo de maíz (comunidad de Asmayacu)	90
<b>Figura 14:</b> Trabajo en gabinete.....	90

## Índice de anexos

A) Matriz de consistencia.....	71
B) Base de datos.....	73
C) Ubicación del ámbito de estudio.....	85
D) Evidencias.....	86

## I. Introducción

El cambio climático es uno de los mayores desafíos del siglo XXI, generando alteraciones significativas en las condiciones climáticas a nivel mundial, afectando directamente la disponibilidad y el uso eficiente de los recursos hídricos, especialmente en el sector agrícola. Este estudio tuvo como propósito evaluar el impacto de los escenarios climáticos en la huella hídrica verde del cultivo de maíz en el período 2000-2022 y proyectar del 2030-2051 bajo los escenarios climáticos RCP 6.0 y RCP 8.5, lo cual es de vital importancia para anticipar y adaptarnos a los desafíos climáticos que podrían presentarse en futuro. La comparación de los datos históricos del 2000-2022, con los datos hallados del 2030-2051 permitirá identificar y establecer estrategias para disminuir el impacto del cambio climático en la producción agrícola en este Distrito.

La importancia de esta investigación es proporcionar información útil para mejorar la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos en futuros escenarios climáticos que podrían suscitarse, estos datos son útiles para los agricultores y gestores de recursos hídricos que puedan adoptar medidas que permitan el uso más eficiente del agua. El Distrito de Curahuasi es una zona de alta actividad agrícola, donde el cultivo de maíz es de vital importancia para el sustento económico de los agricultores, siendo los principales abastecedores al mercado regional y nacional, sin embargo, la huella hídrica verde que representa el agua de lluvia almacenada en el suelo, se está viendo comprometida por los cambios en los patrones de precipitación y la elevación de las temperaturas. Este estudio al analizar el impacto de los escenarios climáticos en la huella hídrica verde en esta localidad, busca identificar las vulnerabilidades del sistema agrícola y proponer estrategias adaptativas que ayuden a disminuir los efectos del cambio climático en la producción de maíz.

## **II. Planteamiento del problema**

### **2.1. Descripción y formulación del problema**

El cultivo de maíz es fundamental para la economía y seguridad alimentaria en el distrito de Curahuasi, ubicado en la región de Apurímac. Sin embargo, en los últimos años, los efectos del cambio climático han generado una serie de desafíos que afectan de manera significativa a la producción agrícola en esta zona. Los cambios en los patrones de precipitación, las temperaturas extremas y la variabilidad climática están alterando el ciclo de cultivo del maíz, lo que tiene un impacto directo en la huella hídrica verde de este cultivo, es decir, en el volumen de agua de lluvia que se almacena en el suelo y que es aprovechado por las plantas.

La problemática del cultivo de maíz en el Distrito de Curahuasi está marcada por la variabilidad de las precipitaciones, el aumento de temperaturas y eventos climáticos extremos, lo que incrementa la demanda hídrica y reduce la disponibilidad de agua verde. Los pequeños agricultores, sin acceso a tecnologías modernas de riego, se ven especialmente vulnerables a estos cambios climáticos. Como resultado, disminuyen los rendimientos, aumentan los costos de producción, se intensifican los conflictos por el agua, y empeora la situación socioeconómica de las comunidades dependientes del maíz.

El estudio del impacto de los escenarios climáticos en la huella hídrica verde del maíz en el Distrito de Curahuasi es importante para diseñar estrategias de adaptación que permitan a los agricultores locales enfrentar los desafíos que trae consigo el cambio climático. Medir y analizar la huella hídrica verde ayudará a implementar prácticas sostenibles para optimizar el uso del agua de lluvia y mejorar la gestión de recursos hídricos en la agricultura, contribuyendo al bienestar de las comunidades rurales del Distrito de Curahuasi y garantizando la seguridad alimentaria en la región.

En consecuencia, para proporcionar las proyecciones de los posibles escenarios futuros modelados se emplearán los escenarios climáticos RCP 6.0 y RCP 8.5 a fin de comprender mejor el futuro alternativo de la huella hídrica verde del cultivo de maíz.

### **2.1.1. Problema general**

¿Cuál es el Impacto de los escenarios climáticos en la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi – 2023?

### **2.1.2. Problemas específicos**

- ¿Cuánto fue la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi para el periodo 2000 al 2022?
- ¿Cuánto será la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi bajo un escenario climático RCP 6.0 para el periodo 2030 al 2051?
- ¿Cuánto será la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi bajo un escenario climático RCP 8.5 para el periodo 2030 al 2051?
- ¿Cuánto será el incremento proyectado de la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en el distrito de Curahuasi para el periodo 2030-2051, en comparación con la huella hídrica histórica (2000-2022), bajo los escenarios climáticos RCP 6.0 y RCP 8.5?

## **2.2. Objetivos**

### **2.2.1. Objetivo general**

Estimar el impacto de los escenarios climáticos en la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi – 2023.

### **2.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi para el periodo 2000 al 2022.
- Estimar la proyección de la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi bajo un escenario climático RCP 6.0 para el periodo 2030 al 2051.

- Estimar la proyección de la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi bajo un escenario climático RCP 8.5 para el periodo 2030 al 2051.
- Cuantificar el incremento proyectado de la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en el distrito de Curahuasi para el periodo 2030-2051, en comparación con la huella hídrica histórica (2000-2022), bajo los escenarios climáticos RCP 6.0 y RCP 8.5.

### **2.3. Justificación e importancia**

Esta investigación se justifica por su relevancia social, económica y ambiental en el contexto del cambio climático y la gestión hídrica en el distrito de Curahuasi. Desde el punto de vista social, el estudio adquiere importancia al analizar cómo los escenarios climáticos futuros afectarán la demanda de agua en el cultivo de maíz, principal sustento agrícola de la zona. Los resultados permitirán que autoridades locales, agricultores y organismos de gestión hídrica tomen decisiones informadas para garantizar una distribución equitativa del recurso, evitando así posibles conflictos sociales por su escasez. En una región donde el agua es fundamental para la seguridad alimentaria, anticipar estos cambios resulta crucial para la planificación territorial y el bienestar de las comunidades.

En el ámbito económico, la investigación es pertinente porque el estrés hídrico derivado del cambio climático podría incrementar los costos de producción agrícola, afectando directamente la economía local. Al cuantificar la huella hídrica futura del maíz bajo diferentes escenarios climáticos, este estudio proporcionará datos clave para implementar estrategias de uso eficiente del agua. Esto no solo protegerá la rentabilidad de los agricultores, sino que también contribuirá a mantener la competitividad del sector agrícola en la región. Una gestión preventiva del recurso hídrico, basada en evidencia científica, ayudará a mitigar riesgos económicos asociados a la variabilidad climática.

Desde una perspectiva ambiental, el trabajo adquiere especial relevancia al evaluar el impacto de los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5 en la disponibilidad de agua verde para el cultivo. Los hallazgos permitirán diseñar medidas que garanticen no solo la sostenibilidad agrícola, sino también la preservación de los ecosistemas dependientes de los recursos hídricos de la microcuenca. Una gestión sostenible del agua, fundamentada en los resultados de esta investigación, asegurará el equilibrio entre las necesidades productivas y la conservación ambiental, protegiendo así la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de la zona.

Finalmente, el impacto trasciende lo académico, pues los resultados servirán como base para políticas públicas y planes de adaptación al cambio climático. Al integrar el conocimiento científico con la toma de decisiones, este estudio promoverá un desarrollo agrícola resiliente, reducirá vulnerabilidades socioeconómicas y contribuirá a la seguridad hídrica de Curahuasi en las próximas décadas. Por ello, la investigación no solo representa un avance en el entendimiento de la huella hídrica en contextos climáticos cambiantes, sino que también se posiciona como una herramienta esencial para la sostenibilidad integral de la región.

## **2.4. Hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

Los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5 climáticos incrementarán significativamente en la huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi – 2023.

### **2.4.2. Hipótesis específicos**

- La huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi para el periodo 2000 al 2022, presenta variaciones significativas respecto al valor histórico.

- La huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi bajo un escenario climático RCP 6.0 para el periodo 2030 al 2051, genera un incremento mayor al 5% respecto al valor histórico.
- La huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) del distrito de Curahuasi bajo un escenario climático RCP 8.5 para el periodo 2030 al 2051, genera un incremento mayor al 10% respecto al valor histórico.

## 2.5. Variables

### A) Variable 1: Escenarios climáticos

#### **Definición conceptual.**

Conceptualmente, los escenarios climáticos RCP (Trayectorias Representativas de Concentración) constituyen proyecciones estandarizadas que estiman la evolución de las concentraciones de gases de efecto invernadero y su impacto climático asociado. Para esta investigación, se analizan específicamente los escenarios RCP 6.0 (que proyecta una estabilización moderada de emisiones) y RCP 8.5 (que representa el peor escenario de altas emisiones), los cuales determinan cambios en los patrones de temperatura, precipitación y evapotranspiración.

#### **Definición operacional.**

Operacionalmente, estos escenarios se miden a través de tres indicadores clave: (1) los cambios en la temperatura media expresados en grados Celsius, calculados como la diferencia entre los valores proyectados y los históricos; (2) la variación en la precipitación anual medida en milímetros, que refleja las alteraciones en los regímenes pluviométricos; y (3) los cambios en la evapotranspiración, cuantificados mediante el método Penman-Monteith. Estos indicadores se clasifican en una escala nominal que distingue entre las categorías RCP 6.0 y RCP 8.5.

**B) Variable 2: Huella hídrica del cultivo de maíz****Definición conceptual.**

Desde una perspectiva conceptual, la huella hídrica verde (HHV) del maíz representa el volumen de agua de lluvia consumido durante el ciclo del cultivo, expresado en metros cúbicos por tonelada producida ( $\text{m}^3/\text{ton}$ ). Este indicador refleja la eficiencia en el uso del agua verde (precipitación almacenada en el suelo) y su variabilidad bajo diferentes condiciones climáticas.

**Definición operacional.**

En su definición operacional, la HHV se analiza en tres dimensiones temporales. Para el período histórico (2000-2022), se calcula mediante la fórmula  $\text{HHV} = \text{ET}_{\text{verde}}/Y$ , donde  $\text{ET}_{\text{verde}}$  es la evapotranspiración verde y  $Y$  el rendimiento del cultivo, considerando además su variación interanual y la relación precipitación-rendimiento. Para los períodos proyectados (2030-2051) bajo los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5, se miden: el cambio porcentual respecto al histórico, la variación estacional y la sensibilidad climática. Todos estos indicadores se expresan en escala de razón ( $\text{m}^3/\text{tonelada}$  y %).

### C) Operacionalización de variables

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

<b>Variables</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Escala</b>
<b>Variable independiente: Escenarios climáticos</b>	Escenario climático RCP 6.0	- Cambios en temperatura media - Variación en precipitación anual - Cambios en evapotranspiración	Nominal (categorías climáticas)
	Escenario climático RCP 8.5	- Cambios en temperatura media - Variación en precipitación anual - Cambios en evapotranspiración	Nominal (categorías climáticas)
<b>Variable dependiente: Huella hídrica del cultivo de maíz</b>	Huella hídrica verde histórica (2000-2022)	- Volumen de agua verde consumida - Variación interanual - Relación precipitación/rendimiento	Razón (m <sup>3</sup> /tonelada)
	Huella hídrica verde bajo RCP 6.0 (2030-2051)	- Cambio porcentual respecto al histórico - Variación estacional - Sensibilidad climática	Razón (m <sup>3</sup> /tonelada y %)
	Huella hídrica verde bajo RCP 8.5 (2030-2051)	- Cambio porcentual respecto al histórico - Variación estacional - Sensibilidad climática	Razón (m <sup>3</sup> /tonelada y %)
	Incremento de huella hídrica verde bajo RCP 8.5 y RCP 8.5(2030-2051)	- Cambio porcentual respecto al histórico - Variación estacional - Sensibilidad climática	Razón (m <sup>3</sup> /tonelada y %)

*Nota.* Elaboración propia

### III. Marco Teórico

#### 3.1. Antecedentes

Arrien (2019) desarrolló una investigación pionera sobre la eficiencia hídrica en sistemas de producción de maíz en las regiones argentinas de Tandil y Balcarce. Su estudio comparativo entre cultivos de secano y bajo riego durante el período 2016-2017 empleó un enfoque metodológico riguroso, combinando los estándares de la Water Footprint Network con herramientas de modelamiento en CROPWAT 8.0. Los hallazgos revelaron diferencias estructurales en los componentes hídricos: mientras la huella total en secano fue de 1.290 m<sup>3</sup>/t, los sistemas irrigados alcanzaron 1.737 m<sup>3</sup>/t, destacando particularmente las variaciones en los componentes azul (agua superficial/subterránea) y gris (agua requerida para dilución de contaminantes). Estos resultados, aunque coincidentes con patrones globales, mostraron particularidades regionales atribuibles a las condiciones edafoclimáticas específicas de la pampa húmeda argentina.

Godoy (2017) abordó la problemática hídrica en el cultivo de maíz en el municipio de El Espinal (departamento de Tolima, Colombia), integrando análisis climáticos detallados con modelamiento agronómico avanzado. Su investigación demostró la aplicabilidad del software CROPWAT 8.0 para optimizar los planes de riego en condiciones tropicales, considerando variables clave como evapotranspiración real, precipitación efectiva y características fenológicas del cultivo. El estudio proporcionó un marco metodológico adaptable para la toma de decisiones en agricultura de secano y sistemas irrigados, destacando la importancia de ajustar las estrategias de riego a las condiciones microclimáticas locales y a los patrones de variabilidad climática característicos del valle del Magdalena.

Álvarez et al. (2016) realizaron una contribución significativa al estudio de la huella hídrica en sistemas de producción de maíz en las provincias centrales y nororientales de Argentina. Su investigación comparó tres sistemas de manejo (secano, riego convencional y riego con fertilización edáfica) mediante el empleo del modelo AquaCrop,

obteniendo resultados diferenciados: 803 l/kg (secano), 602 l/kg (riego) y 488 l/kg (riego con fertilización). Estos hallazgos demostraron empíricamente cómo las prácticas agronómicas intensivas pueden mejorar significativamente la eficiencia en el uso del agua, particularmente mediante la optimización sinérgica del riego y la nutrición vegetal. La investigación subrayó la importancia de desarrollar políticas agrícolas que promuevan sistemas de producción sostenibles, basados en evidencia científica rigurosa sobre relaciones agua-rendimiento.

Sun et al. (2016) desarrollaron un análisis temporal exhaustivo (1978-2008) de los componentes hídricos en la producción de maíz en la región de Beijing, China. Su investigación reveló una estructura hídrica compuesta por 56% agua verde (precipitación), 25% agua azul (riego) y 19% agua gris (depuración). El estudio identificó patrones claros de variabilidad interanual vinculados tanto a factores climáticos (particularmente durante el período cálido-seco registrado) como antropogénicos (intensificación del uso de insumos agrícolas). Los autores documentaron tendencias preocupantes en los requerimientos hídricos, con incrementos anuales de 0.52 mm en agua verde y 2.86 mm en agua azul, señalando la creciente presión sobre los recursos hídricos en contextos de cambio climático y expansión agrícola.

Fuster (2018) validó metodológicamente el uso combinado de la norma Hoekstra y el software CROPWAT para calcular huellas hídricas en condiciones agroecológicas complejas del distrito de Chaglla (región Huánuco, Perú). Su investigación en cultivos de maíz choclo obtuvo una huella hídrica de 1,088.26 m<sup>3</sup>/t, demostrando la adaptabilidad de estos instrumentos a sistemas agrícolas de montaña. El estudio destacó la importancia de incorporar variables altitudinales y microclimáticas específicas en los modelos de simulación, proponiendo ajustes metodológicos para mejorar la precisión en ecosistemas de alta gradiente ambiental. Los resultados proporcionaron lineamientos técnicos para la gestión hídrica en sistemas de producción tradicionales andinos.

Bernuy Pacheco (2018) realizó un ejercicio prospectivo innovador en el distrito de Huaros (provincia de Canta, Perú), evaluando los impactos de escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 sobre la huella hídrica verde en cultivos de papa. Su investigación combinó datos meteorológicos históricos (1971-2000) y recientes (2013-2018) con proyecciones a 2050, revelando patrones contrastantes: mientras el escenario RCP 4.5 mantenía condiciones similares al presente, el RCP 8.5 mostraba un aumento en la disponibilidad de agua verde. Este hallazgo, aparentemente contraintuitivo, se explica por los cambios proyectados en los regímenes pluviométricos en zonas altoandinas, con implicaciones importantes para la planificación de sistemas agropecuarios resilientes.

Peña (2017) desarrolló un análisis integral de sostenibilidad en la subcuenca del río Achamayo (región Junín, Perú), focalizado en cinco cultivos representativos. Su investigación reveló que el maíz consumía el 53% del total hídrico (4,088.4 m<sup>3</sup>/t de 7,652.8 m<sup>3</sup>/t totales), evidenciando un patrón de uso insostenible del recurso. El estudio combinó análisis climáticos, modelamiento en CROPWAT y evaluación de balances hídricos, proponiendo estrategias de reconversión productiva y optimización de riegos. Los resultados alertaron sobre la necesidad de implementar sistemas de monitoreo hídrico continuo y políticas de gestión adaptativa en cuencas andinas sometidas a presión agrícola creciente.

Mallma (2015) cuantificó los flujos de agua virtual asociados a 14 cultivos comercializados desde Junín a Lima, obteniendo una huella hídrica total de 161.28 Hm<sup>3</sup>/año. Su investigación destacó las marcadas diferencias entre cultivos (desde 0.008 hasta 75.52 Hm<sup>3</sup>), subrayando la importancia de desarrollar estrategias diferenciadas de gestión hídrica. El estudio propuso mecanismos de compensación hídrica en cadenas comerciales agrícolas, considerando tanto la eficiencia productiva como los impactos ambientales acumulativos en la región de origen.

Ayala (2022) realizó un análisis detallado de la huella hídrica en cultivos de palta en Abancay (Perú), integrando modelamiento (CROPWAT con datos PISCO-SENAMHI)

con encuestas a 75 productores. Los resultados mostraron una predominancia del componente azul (1,160.674 m<sup>3</sup>/t) sobre el verde (1,899.277 m<sup>3</sup>/t) y gris (97.726 m<sup>3</sup>/t), revelando una fuerte dependencia del riego durante estiaje. La investigación propuso mejoras en los sistemas de almacenamiento y distribución de agua, junto con prácticas de riego de precisión, para aumentar la sostenibilidad del importante cultivo de exportación.

## **3.2. Bases teóricas**

### **3.2.1. Escenarios Climáticos**

Los escenarios climáticos son representaciones verosímiles de cómo podría ser el clima en el futuro. Se construyen a partir de distintos supuestos sobre las futuras emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) generadas por la actividad humana.

El propósito principal de estos escenarios es investigar las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico. Además, funcionan como un punto de referencia fundamental para la gestión de riesgos y la planificación de políticas de adaptación a nivel regional y mundial (IPCC, 2019; Ministerio del Ambiente & Senamhi, 2020).

Para su elaboración, se parte de las proyecciones climáticas, que son simulaciones de la respuesta del sistema climático a distintas concentraciones de GEI. Estas proyecciones luego se procesan y se combinan con datos observados del clima actual para generar un escenario más completo y útil (IPCC, 2019).

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el cambio climático es cualquier alteración del clima en el tiempo, sin importar si su origen es natural o humano. Este fenómeno se produce al desequilibrar el balance energético del sistema climático de la Tierra. Dicha influencia se cuantifica mediante el concepto de "forzamiento radiativo", que mide cómo un factor altera la energía que entra y sale de la atmósfera (IPCC, 2019).

Finalmente, es importante señalar que la generación de estos complejos escenarios climáticos está a cargo de numerosas instituciones dedicadas a la investigación del clima en todo el mundo (IPCC, 2018).

1. **RCP 8.5** “Caminos Representativos de Concentración 8.5” es uno de las cuatro trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero utilizadas en los modelos climáticos y en la investigación sobre cambio climático, según los informes del IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). Representa un escenario de altas emisiones, a menudo denominado de "continuidad de las emisiones habituales", en el que no se aplican esfuerzos significativos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

**Características principales del RCP 8.5:**

- a. Escenario de altas emisiones: Supone que las emisiones de gases de efecto invernadero siguen aumentando a lo largo del siglo XXI debido al uso continuado de combustibles fósiles y al crecimiento de la población.
- b. Concentración de CO<sub>2</sub>: En este escenario, la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) podría superar las 900 partes por millón (ppm) para el año 2100, más del doble de los niveles actuales.
- c. Aumento de la temperatura global: Se proyecta un aumento de la temperatura media global de entre 4°C y 5°C para el año 2100 en comparación con los niveles preindustriales.
- d. Elevación del nivel del mar: El RCP 8.5 prevé un aumento considerable del nivel del mar, debido al derretimiento de las capas de hielo y la expansión térmica de los océanos.
- e. Eventos climáticos extremos: Se espera un aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos, como olas de calor, tormentas e inundaciones.

El RCP 8.5 suele considerarse un escenario pesimista o de referencia, útil para comprender los impactos potenciales más graves del cambio climático si no se toman medidas para mitigar las emisiones. (Barriga, Avila, 2019).

2. **RCP 6.0** “Caminos Representativos de Concentración 6.0” es uno de los cuatro escenarios de trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero utilizados en los modelos climáticos y en la investigación sobre el cambio climático, definidos por el IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). Representa un escenario de emisiones moderadas, en el que se implementan algunas políticas para limitar el crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Características principales del RCP 6.0:

- a. Escenario de emisiones moderadas: RCP 6.0 asume que las emisiones globales de gases de efecto invernadero alcanzarán su punto máximo alrededor de 2080 y luego comenzarán a disminuir, pero no se aplican políticas drásticas para reducir las emisiones.
- b. Concentración de CO<sub>2</sub>: En este escenario, se proyecta que las concentraciones de dióxido de carbono alcancen aproximadamente 670 partes por millón (ppm) para el año 2100.
- c. Aumento de la temperatura global: Se proyecta que las temperaturas globales aumenten entre 2°C y 3°C para el año 2100 en comparación con los niveles preindustriales.
- d. Elevación del nivel del mar: Aunque el aumento del nivel del mar sería menor que en el escenario de altas emisiones (RCP 8.5), aún se prevé un incremento notable, debido al derretimiento de los glaciares y la expansión térmica del agua oceánica.

- e. Cambios en el clima: Este escenario proyecta un incremento moderado en la frecuencia de eventos climáticos extremos como olas de calor, tormentas intensas y cambios en los patrones de precipitaciones.

El RCP 6.0 refleja un escenario en el que se toman algunas medidas para controlar las emisiones, pero sin ser suficientemente ambiciosas para evitar impactos climáticos significativos a largo plazo. (Barriga, Avila, 2019).

- 3. **RCP 4.5.** “Caminos Representativos de Concentración 4.5” es uno de los cuatro escenarios de trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero utilizados en los modelos climáticos del IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). Representa un escenario intermedio de estabilización de emisiones, en el que se implementan políticas climáticas moderadas para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático.

Características principales del RCP 4.5:

- a. Escenario de estabilización: En este escenario, las emisiones globales de gases de efecto invernadero alcanzan su punto máximo alrededor de 2040 y luego disminuyen, lo que implica la implementación de políticas climáticas que promueven energías limpias y reducciones de emisiones.
- b. Concentración de CO<sub>2</sub>: Bajo el RCP 4.5, la concentración de dióxido de carbono se estabilizaría en alrededor de 650 partes por millón (ppm) para el año 2100.
- c. Aumento de la temperatura global: Se espera que las temperaturas globales aumenten entre 1.8°C y 2.5°C para el año 2100 en comparación con los niveles preindustriales.
- d. Elevación del nivel del mar: Aunque el aumento del nivel del mar sería moderado en comparación con escenarios de mayores emisiones como el RCP 8.5, aún se proyecta una subida considerable debido a la expansión térmica de los océanos y el derretimiento de glaciares.

- e. Eventos climáticos extremos: Aun con medidas de mitigación, se proyecta un aumento en la frecuencia de eventos climáticos extremos como olas de calor e intensas tormentas, aunque en menor grado que en los escenarios de emisiones más altas.

El RCP 4.5 asume que se adoptan estrategias y tecnologías para la mitigación del cambio climático, como la eficiencia energética, la reforestación y la adopción de energías renovables, lo que conduce a un escenario en el que se logra una estabilización de las emisiones a finales del siglo XXI. (Barriga, Avila, 2019).

- 4. **RCP 2.6.** “Caminos Representativos de Concentración 2.6” es el escenario más optimista y ambicioso de las cuatro trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero utilizados por el IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). Representa un escenario de bajas emisiones, donde se implementan políticas climáticas agresivas y rápidas para reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero, con el objetivo de limitar el calentamiento global a niveles manejables.

**Características principales del RCP 2.6:**

- a. Escenario de bajas emisiones: En este escenario, las emisiones globales alcanzan su punto máximo antes de 2020 y luego disminuyen de manera rápida y significativa, logrando emisiones netas negativas hacia finales del siglo XXI.
- b. Concentración de CO<sub>2</sub>: Bajo el RCP 2.6, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera se estabiliza en aproximadamente 420 partes por millón (ppm) para el año 2100, un nivel mucho menor en comparación con otros escenarios.
- c. Aumento de la temperatura global: Se proyecta un aumento de la temperatura global de alrededor de 1.5°C a 2°C para el año 2100 en comparación con los niveles preindustriales, con el objetivo de limitar el calentamiento a menos de 2°C, un umbral considerado crítico para evitar los peores impactos del cambio climático.

- d. Elevación del nivel del mar: Aunque el nivel del mar seguirá aumentando, el incremento será significativamente menor en comparación con escenarios de mayores emisiones, debido a la reducción en el derretimiento de los glaciares y la expansión térmica de los océanos.
- e. Eventos climáticos extremos: A pesar de la mitigación, algunos eventos extremos como olas de calor, lluvias intensas y huracanes seguirán ocurriendo, pero con menor frecuencia e intensidad que en escenarios como el RCP 8.5.

El RCP 2.6 asume un cambio radical hacia energías renovables, tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, y una reducción significativa en el uso de combustibles fósiles. Es el único escenario que plantea la posibilidad de limitar el calentamiento global a un nivel seguro, pero requiere una acción rápida y coordinada a nivel global para lograrlo. (Barriga, Avila, 2019).

### 3.2.2. Huella Hídrica

La huella hídrica es un indicador de consumo del recurso hídrico para sustentar diversas actividades económicas, que busca, principalmente, mostrar los vínculos existentes entre el uso del agua y la gestión de los recursos hídricos. La huella hídrica (HH) puede ser evaluado matemáticamente de la siguiente manera.

$$HH = HH_{verde} + HH_{azul} + HH_{gris}$$

La huella hídrica se clasifica en tres tipos: verde, azul y gris. (Hoekstra, 2009).

1. **Huella hídrica verde.** Se refiere a la cantidad de agua de lluvia que es necesaria para un cultivo a lo largo de todas sus fases fenológicas. Esto abarca desde el momento de la siembra hasta la cosecha. Este indicador permite medir el impacto del uso del agua de lluvia en la producción agrícola, ayudando a entender mejor cómo los cultivos dependen de los recursos hídricos naturales a lo largo de su ciclo de vida.

$$HH_{verde} = \frac{UAC_{verde}}{Y}$$

Donde  $UAC$  es el uso de agua de lluvia por el cultivo ( $m^3/ha$ ) mientras que  $Y$  es el rendimiento del cultivo ( $t/ha$ ). No obstante, en la huella hídrica verde se debe integrar la evapotranspiración durante el ciclo fenológico del cultivo.

$$UAC_{verde} = 10 * \sum_{i=1}^{dcf} ET_{verde}$$

En la fórmula presentada, la variable  $ET$  corresponde a la evapotranspiración, mientras que  $dcf$  indica la duración del ciclo fenológico del cultivo (Arenas & Jimenez, 2018).

A continuación, se definen dos tipos de huella hídrica:

2. **Huella Hídrica Azul:** Esta métrica cuantifica el volumen de agua dulce "azul" —es decir, agua superficial de ríos y lagos, o agua subterránea de acuíferos— que se consume a lo largo de toda la cadena de producción de un bien. Se considera "consumo" cuando el agua se pierde de la cuenca local, ya sea por evaporación o por quedar incorporada en el producto final. Por lo tanto, la huella azul mide la cantidad de agua disponible que es efectivamente utilizada por los seres humanos, dejando el volumen restante para el sustento de los ecosistemas naturales (Arenas & Jimenez, 2018).
3. **Huella Hídrica Gris:** Se refiere al volumen de agua dulce que se necesitaría para diluir una carga de contaminantes hasta que la concentración de estos se reduzca a un nivel seguro, de acuerdo con las normativas de calidad ambiental y los niveles de concentración natural. Básicamente, este concepto permite expresar la magnitud de la contaminación hídrica en términos de la cantidad de agua limpia requerida para asimilarla y hacerla inofensiva (Arenas & Jimenez, 2018).

### **3.2.3. Cultivo de Maíz**

El maíz es una planta monocotiledónea. En particular, la variedad de maíz amiláceo se caracteriza por un grano de textura suave y harinosa, y presenta una notable diversidad en cuanto a su color, composición, apariencia y grado de madurez al momento

de la cosecha. En Perú, su cultivo ocupa aproximadamente 250,000 hectáreas. De esta área, el 82% se destina a la producción de grano seco, con un rendimiento anual de 230,000 toneladas, mientras que el 18% restante se cultiva como choclo (maíz fresco), alcanzando las 375,000 toneladas anuales (MINAM & SENAMHI, 2021).

Según Salhuana (2004), la gran distribución del cultivo de maíz en todo el territorio peruano se explica por la existencia de múltiples grupos y razas que han logrado adaptarse a las diversas condiciones climáticas del país.

### **3.2.3.1. Taxonomía**

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Poales

Familia: Poaceae

Género: *Zea*

Especie: *mays*

N. Cient: *Zea mays* L.

### **3.2.3.2. Origen**

Los registros arqueológicos sugieren que la diversificación del maíz en Perú inició hace aproximadamente 7,000 años. Prueba de ello son tres razas antiguas de gran importancia —Proto Confite Morocho, Kculli y Confite Chavinense— que datan de hace unos 4,000 años.

Posteriormente, este proceso de diversificación se intensificó, en especial en la región de la sierra, impulsado tanto por la inmensa variabilidad ecológica del territorio como por los hábitos de consumo de los agricultores locales. De hecho, existe una notable diferencia en cómo se consume: en las zonas altas de Perú, Ecuador y Bolivia, el maíz amiláceo se come directamente, con poca o ninguna transformación. Esto contrasta con países como México, Venezuela y Colombia, donde el maíz para consumo humano

suele cultivarse en valles de clima cálido y se procesa principalmente para la elaboración de harinas (MIDAGRI & INIA, 2021).

### **3.2.3.3. Requerimientos Edafoclimáticos**

- a)** Para su óptimo desarrollo, el cultivo de maíz presenta requisitos agroclimáticos y edáficos específicos (MIDAGRI & SENAMHI, 2021):
- b)** Temperatura: La temperatura ideal durante la producción se sitúa entre 18 °C y 21 °C. Aunque la planta puede tolerar temperaturas mínimas de hasta 3 °C en su fase de crecimiento, exposiciones a heladas de entre -2 °C y 1 °C reducen significativamente el rendimiento del grano. Sin embargo, durante la etapa de maduración, las heladas no son perjudiciales si el grano ya ha acumulado al menos un 60% de materia seca.
- c)** Suelo: El maíz requiere suelos con una profundidad efectiva de 0.8 a 1 metro y una textura franco-arenosa. El rango de pH debe estar entre 6.1 y 7.8. Es crucial que el suelo tenga un buen drenaje, ya que el cultivo no tolera el encharcamiento.
- d)** Precipitación: El requerimiento hídrico promedio por campaña es de unos 650 mm/ha (equivalente a 6,500 m<sup>3</sup> de agua por hectárea), aunque esta cifra puede variar según el clima y la variedad de maíz.
- e)** Humedad: Prospera en ambientes con una humedad relativa que oscila entre el 60% y el 95%. Por el contrario, los climas más secos favorecen un secado más rápido del grano.
- f)** Luz y Fotoperiodo: La planta demanda abundante exposición a la luz solar, por lo que las regiones con nubosidad persistente no son adecuadas. Respecto a la duración del día, existen tanto variedades de día corto (requieren menos de 10 horas de luz) como variedades de día neutro (adaptadas a entre 10 y 14 horas).
- g)** Altitud: Su cultivo es viable en un amplio rango altitudinal, que va desde el nivel del mar hasta los 3,300 metros.

#### **3.2.3.4. Importancia Económica del Cultivo de Maíz Choclero**

El choclo, conocido como "elote" en México y Centroamérica o "jojoto" en Venezuela, corresponde a la mazorca tierna del maíz amiláceo, cuyos granos aún están húmedos y se destinan al consumo humano directo. Su cultivo en Perú se remonta a unos 7,000 años y se extiende desde el nivel del mar hasta los 3,300 metros de altitud, con una fuerte presencia en las zonas altoandinas. Una de sus características más notables, especialmente en Perú, México, Bolivia y Ecuador, es su impresionante diversidad de razas, colores y texturas. Gracias a ello, este maíz se ha consolidado como un pilar para el desarrollo de la agricultura familiar en la sierra peruana (MIDAGRI, 2023).

En el caso específico del distrito de Curahuasi, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) reporta que se cultivan maíz amarillo duro, maíz amiláceo y maíz choclero, ocupando superficies de 191.49, 308.57 y 880.20 hectáreas, respectivamente.

Por su parte, el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA, 2018) indica que este cultivo está muy bien adaptado a los valles interandinos. Señala que el rendimiento promedio es de 11 toneladas por hectárea (t/ha) para choclo y 5.3 t/ha para grano seco. El INIA también confirma que el maíz prospera en suelos de textura franco-arenosa, con alto contenido de materia orgánica y buen drenaje. Respecto a la siembra, se recomienda iniciar en julio si se cuenta con riego, o esperar la temporada de lluvias entre septiembre y octubre en caso contrario.

#### **3.2.3.5. Requerimiento Hídrico en el Proceso Fenológico de Maíz**

La gestión del agua para el cultivo de maíz es crucial y varía significativamente según la etapa de desarrollo de la planta. Según Rodríguez Mendoza (2018), las necesidades hídricas del maíz se distribuyen de la siguiente manera:

- **Germinación y Desarrollo Inicial:** Se requiere un suelo con humedad adecuada al inicio para la siembra y germinación. Posteriormente, durante el crecimiento vegetativo temprano (hasta los 40-60 días), las necesidades de riego son

menores. Sin embargo, en siembras realizadas en meses secos, se recomienda un riego clave en este período para facilitar el aporque.

- **Fase Crítica (Floración y Llenado de Grano):** Este es el período de máxima demanda de agua, ya que define el rendimiento potencial del cultivo. Comienza justo antes de la floración (entre 90 y 100 días desde la siembra) y se extiende hasta la maduración del grano (hasta 120 días después de florecer). Durante esta fase, es fundamental mantener una alta y constante humedad en el suelo. Este lapso, que a menudo coincide con la temporada de lluvias (diciembre a abril), requiere entre 3,500 y 4,500 m<sup>3</sup>/ha de agua.
- **Maduración Final y Secado:** Una vez que el grano alcanza su madurez fisiológica y hasta la cosecha (aproximadamente a los 240 días), el riego debe reducirse progresivamente.

En total, se calcula que el ciclo completo del cultivo de maíz, desde la siembra hasta la cosecha, tiene una demanda hídrica total que ronda los 7,000 m<sup>3</sup>/ha (Rodríguez Mendoza, 2018).

### **3.3. Definición de términos**

1. **Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5):** Es una iniciativa global coordinada en la que participan diversos grupos de modelación climática. Su objetivo es profundizar la comprensión del cambio climático pasado y futuro a través de un conjunto de experimentos estandarizados. Para ello, utiliza un conjunto de escenarios que describen la evolución de los impactos humanos sobre el clima, como los cambios en el uso del suelo y las emisiones de combustibles (Moss, 2010; Taylor, Stouffer, & Meehl, 2012).
2. **Modelo Climático Global (GMC):** Consiste en una representación matemática del sistema climático que se fundamenta en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, así como en sus interacciones y procesos de retroalimentación. Debido a su naturaleza, el sistema climático puede ser

representado por una variedad de modelos, cada uno con un distinto nivel de complejidad (Ramos, 2014).

3. Escenarios RCP (Trayectorias de Concentración Representativas): Son representaciones de posibles evoluciones futuras de las emisiones de gases y sustancias que alteran el balance energético del planeta. Se utilizan para evaluar la incertidumbre asociada a los futuros cambios climáticos. El término "representativo" indica que cada RCP es solo una de las muchas trayectorias posibles que podrían resultar en un nivel específico de forzamiento radiativo (Armenta, Villa, & Jácome, 2016; Barriga & Avila, 2019).
4. Forzamiento Radiativo: Se define como una alteración en el balance energético de la Tierra; específicamente, mide el cambio en el flujo neto de energía (la diferencia entre la radiación solar que entra y la radiación infrarroja que sale). Se expresa en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) y puede ser causado por factores como un cambio en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera o variaciones en la energía solar que llega al planeta (IPCC, 2001).
5. Resolución: En el contexto de los modelos climáticos, se refiere a la distancia física (medida en grados o kilómetros) que separa los puntos de una cuadrícula sobre la que el modelo realiza sus cálculos (IPCC, 2013).
6. Parametrización: Es una técnica utilizada en los modelos climáticos para representar procesos que ocurren a una escala demasiado pequeña o rápida para ser calculados explícitamente (procesos de sub-escala). En lugar de simularlos directamente, sus efectos se aproximan o "parametrizan" basándose en el estado de las variables a mayor escala que el modelo sí resuelve (IPCC, 2013).
7. Downscaling: Es un conjunto de técnicas que tienen como objetivo tomar la información de los modelos climáticos globales (que tienen una resolución gruesa) y adaptarla para obtener proyecciones más detalladas y precisas a una escala local o regional (Von, Zorita, & Cubash, 1993).

8. **Evapotranspiración de Referencia (ET<sub>o</sub>):** En situaciones donde no se dispone de datos climáticos suficientes para aplicar el método estándar de Penman-Monteith, se puede utilizar una ecuación alternativa desarrollada por Hargreaves y Samani (1985). La ventaja de este método es que solo requiere datos de temperatura (mínima, máxima y media) para estimar la evapotranspiración de referencia.

$$ET = 0.0023 Ra * (T_{media} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

Donde  $Ra$  es la radiación extraterrestre (mm/día) que depende de la latitud y el mes del año mientras que  $T_{media}$ ,  $T_{max}$  y  $T_{min}$  representan la temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima respectivamente.

9. **Coefficiente de Cultivo.** El coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) se define como la relación entre las necesidades hídricas del cultivo ( $ET_c$ ) y la evapotranspiración de una superficie de referencia ( $ET$ ) (Allen, Doorenbos, & Monteith, 2006).

$$K_c = \frac{ET_c}{ET}$$

Determinar el coeficiente de cultivo ( $k_c$ ) resulta importante para establecer las necesidades de agua de los cultivos (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

10. **Temperatura del Aire.** La temperatura es un truco o artificio para medir, de algún modo, el nivel térmico de un cuerpo (Ledesma, 2011).
11. **Clima.** El clima es un promedio temporal del estado de la atmósfera para una región en concreto (Sendiña & Pérez, 2006).
12. **Tiempo Climático.** El tiempo climático es una combinación de temperatura, humedad, viento y precipitaciones (Ledesma, 2011).

## IV. Metodología

### 4.1. Tipo y nivel de investigación

#### 4.1.1. Tipo de investigación

Esta investigación se enmarca como un estudio aplicado con enfoque predominantemente cuantitativo. Pertenece al campo de la investigación aplicada porque busca resolver un problema concreto: evaluar el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica para el cultivo de maíz en Curahuasi, con el fin de proponer estrategias de adaptación basadas en evidencia científica. Al utilizar metodologías estandarizadas como los escenarios RCP y el cálculo de huella hídrica verde, la investigación aplica conocimientos científicos existentes a una problemática local específica.

#### 4.1.2. Nivel de investigación

En cuanto a su nivel metodológico, el estudio es descriptivos. Por un lado, describe cuantitativamente el comportamiento histórico (2000-2022) de la huella hídrica verde del maíz mediante indicadores medibles ( $m^3$ /tonelada). Por otro lado, establece relaciones estadísticas entre las variables climáticas proyectadas (temperatura, precipitación bajo RCP 6.0 y 8.5) y los cambios esperados en la huella hídrica (2030-2051), sin manipulación experimental pero con rigurosidad analítica. Esto permite no solo caracterizar el fenómeno, sino también explicar las causas potenciales de sus variaciones. Por otro lado La investigación adopta un enfoque prospectivo al generar escenarios futuros basados en modelos climáticos globales adaptados a condiciones locales.

#### 4.1.3. Diseño de la investigación

Es no experimental, ya que el investigador no realiza ninguna intervención sobre las variables de estudio, es decir no se manipula las variables durante el proceso del estudio. El estudio es de corte transversal, en donde la recolección de datos se realizó por única vez. (Hernandez Sampieri, 2015).

## 4.2. **Ámbito temporal y espacial**

### 4.2.1. **Ámbito temporal**

Esta investigación se desarrolló durante el periodo comprendido entre **setiembre y diciembre del año 2023**. Durante este lapso, se ejecutaron las siguientes etapas clave:

1. **Recopilación de datos históricos** (2000–2022): Se obtuvieron y procesaron series climáticas y agronómicas del distrito de Curahuasi para establecer la línea base de la huella hídrica verde del maíz.
2. **Modelado de escenarios futuros** (2030–2051): Entre octubre y noviembre de 2023, se aplicaron proyecciones bajo los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5 utilizando software especializado (ej.: CROPWAT, AquaCrop).
3. **Análisis comparativo y validación**: En diciembre de 2023, se contrastaron los resultados históricos con las proyecciones, culminando con la interpretación de hallazgos y la redacción del informe final.

### 4.2.2. **Ámbito espacial**

El presente estudio se realizó en el Distrito de Curahuasi y sus comunidades que comprende, Luis de la Puente Uceda, Concacha, Challhuahuacho, Saywite, Ccorimarca, San Luis.

#### **Ubicación política**

- País : Perú
- Región : Apurímac
- Provincia : Abancay
- Distrito : Curahuasi
- Comunidad : Saiwite, Luis de la Puente Uceda, Occoruro, Ccooc-Hua, Asmayacu, Ccocha, Puca puca, Curahuasi, Alameda y Concacha

#### **Ubicación geográfica**

- Latitud : -13.5389° S
- Longitud : -72.6990° O

- Altitud : 2688 msnm a 3500 msnm.

#### **Ubicación hidrográfica**

- El distrito pertenece a la cuenca hidrográfica Alto Apurímac.

### **4.3. Población y muestra**

#### **4.3.1. Población**

La población de esta investigación comprende la totalidad de la superficie cultivada con maíz (*Zea mays* L.) en el distrito de Curahuasi durante los períodos analizados. Esto incluye todas las parcelas agrícolas dedicadas al cultivo de maíz dentro de la jurisdicción distrital, abarcando las diferentes variedades cultivadas, los diversos sistemas de producción (desde los tradicionales hasta los tecnificados) y las distintas condiciones agroecológicas presentes en la zona. La población se extiende temporalmente tanto para el análisis histórico (2000-2022) como para las proyecciones futuras (2030-2051), considerando la totalidad del área maicera registrada en estos periodos.

#### **4.3.2. Muestra**

Para efectos prácticos de la investigación, se trabajó con una muestra representativa de esta población, seleccionada mediante un muestreo aleatorio simple. La muestra incluyó parcelas distribuidas en diferentes altitudes del distrito, con diversos sistemas de riego (secano y asistido) y sobre distintos tipos de suelo predominantes. Esta selección se realizó garantizando que la muestra capturara la variabilidad real de las condiciones de cultivo en Curahuasi, tanto en aspectos climáticos como agronómicos.

#### **4.3.3. Muestreo**

Para la selección de las unidades de estudio, se empleó un muestreo aleatorio simple, garantizando que todas las parcelas cultivadas con maíz en el distrito de Curahuasi tuvieran la misma probabilidad de ser incluidas en la investigación.

#### **4.4. Instrumentos**

En la presente investigación, no se usó instrumentos de medición de manera directa en campo. No obstante, la información empleada fue obtenida de los datos proporcionados por satélites y modelos climáticos de NASA POWER, los cuales recaban la información mediante sensores especializados a bordo de satélites como Terra, Aqua, y otros. A partir de los datos satelitales se obtuvo información climática importante, como radiación solar, temperatura y precipitación, necesarios para los análisis de la huella hídrica verde del cultivo de maíz.

En cuanto a los escenarios climáticos RCP, se utilizó los datos del portal del Real Instituto Meteorológico de los Países Bajos cuya página web para acceder es la siguiente <http://climexp.knmi.nl/start.cgi>, este portal almacena y distribuye conjuntos de datos que provienen de simulaciones de modelos climáticos océano - atmósfera acoplados CMIP5. Para este estudio, se empleó el modelo climático global “bcc-csm1-1” del que se seleccionaron las variables de precipitación y evapotranspiración para los escenarios climáticos RCP 6.0 y 8.5 con los que se realizaron las proyecciones climáticas para el periodo 2030 al 2051.

De otra parte, se usó el software R Project para el desarrollo de códigos que permitieron automatizar la estimación de la evapotranspiración a través del método de Hargreaves – Samani, la precipitación efectiva por el método USDA-SC y el downscaling estadístico, método de Quantile Mapping (QM), a los datos de precipitación y evapotranspiración que fueron obtenidos del modelo climático global “bcc-csm1-1” con el propósito de realizar las proyecciones climáticas locales para estimar la huella hídrica proyectada, y finalmente, el uso de la hoja de cálculo Excel de Microsoft Office para la estimación de la huella hídrica verde.

#### **4.5. Procedimientos**

La presente investigación se desarrolló del siguiente modo:

## **1. Recopilación de datos importantes (SENHAMI)**

### **a) Datos climáticos actuales**

- Precipitación.
- Temperatura.
- Radiación solar.

### **b) Datos climáticos futuros**

- Precipitación y evapotranspiración proyectadas bajo los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5 para el periodo 2030 – 2051.

### **c) Datos de producción del cultivo de maíz obtenidos del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú (<https://siea.midagri.gob.pe/portal/>) obtenidos a partir del año 2000 al 2022.**

## **2. Preparación de los datos**

- Se organizó los datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración y producción en las escalas de tiempo mensual/anual.

## **3. Cálculo de la huella hídrica verde del cultivo de maíz**

### **a) Cálculo con datos históricos (2000 – 2022)**

- Evapotranspiración de referencia (método de Hargreaves - Samani) y Coeficiente de cultivo para calcular la evapotranspiración de cultivo.
- Precipitación Efectiva (USDA-SC) estimada a partir de los datos actuales de precipitación.
- Datos de rendimiento del cultivo de maíz.
- Estimación de la Huella hídrica verde.

### **b) Cálculo con datos proyectados (2030-2051).**

- Proyecciones climáticas
- Se utilizó los datos de precipitación y evapotranspiración proyectados para los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5, que posteriormente fueron

ajustados a las condiciones locales mediante el downscaling estadístico.

- Proyección de los rendimientos del cultivo de maíz para el periodo 2030 – 2051. Para realizar la proyección de los rendimientos se utilizó el modelo matemático de la curva potencia.
- Evapotranspiración de referencia (método de Hargreaves – Samani y Coeficiente de cultivo para calcular la evapotranspiración de cultivo proyectada.
- Estimación de la huella hídrica verde proyectado para el periodo 2030 al 2051.

#### **4.6. Análisis de datos**

Corrección de Sesgo mediante Mapeo de Cuantiles, se calculan los cuantiles de las variables climáticas (precipitación, evapotranspiración) del ámbito de estudio y de los datos del modelo climático global. Mediante este método se emplea la distribución empírica de los datos observados para mapear los cuantiles del modelo climático a los cuantiles observados. En el ajuste del mapeo de cuantiles se usa uno de tipo lineal, es decir se basa en una relación lineal de los datos observados y con los datos del modelo.

Comparación huella hídrica histórica y la huella hídrica proyectada bajo los escenarios climáticos RCP, se comparó los distintos escenarios de huella hídrica del cultivo de maíz con el fin de identificar similitudes y diferencias entre periodos de tiempo.

#### **4.7. Consideraciones éticas**

Durante la realización del estudio se respetaron los principios éticos y se siguieron los protocolos y normas institucionales de la Universidad Tecnológica de los Andes. Además, se cumplió con los principios de integridad y objetividad, los cuales son fundamentales para lograr objetivos con fundamentos válidos que garanticen la fiabilidad de los resultados obtenidos.

## V. Resultados y discusión

### 5.1. Resultados

#### 5.1.1. Huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) del distrito de curahuasi para el periodo 2000 al 2022

De acuerdo con los datos de rendimiento del cultivo de maíz registrados entre los años 2000 y 2022, existe una variación significativa en la producción. En este período, los rendimientos fluctuaron entre un mínimo de 9.5 toneladas y un máximo de 120 toneladas.

En la siguiente **Tabla** se observa los valores de rendimiento obtenidos en función de la superficie sembrada en el Distrito de Curahuasi:

**Tabla 2**

*Rendimiento del cultivo de maíz periodo 2000 al 2022*

Año	Área cosechada (ha)	Rendimiento total (t)
2000	60.00	90.00
2001	30.00	45.00
2002	15.00	30.00
2003	60.00	120.00
2004	5.00	9.50
2005	26.00	65.70
2006	23.00	61.20
2007	21.00	57.00
2008	30.00	90.00
2009	17.00	50.10
2010	25.00	102.50
2011	10.00	43.00
2013	13.00	42.50
2014	7.00	10.50
2015	15.00	22.50
2016	8.00	24.00
2017	18.00	54.00
2018	25.00	100.00
2019	12.00	36.00
2020	19.00	52.50
2021	21.00	56.20
2022	23.00	60.20

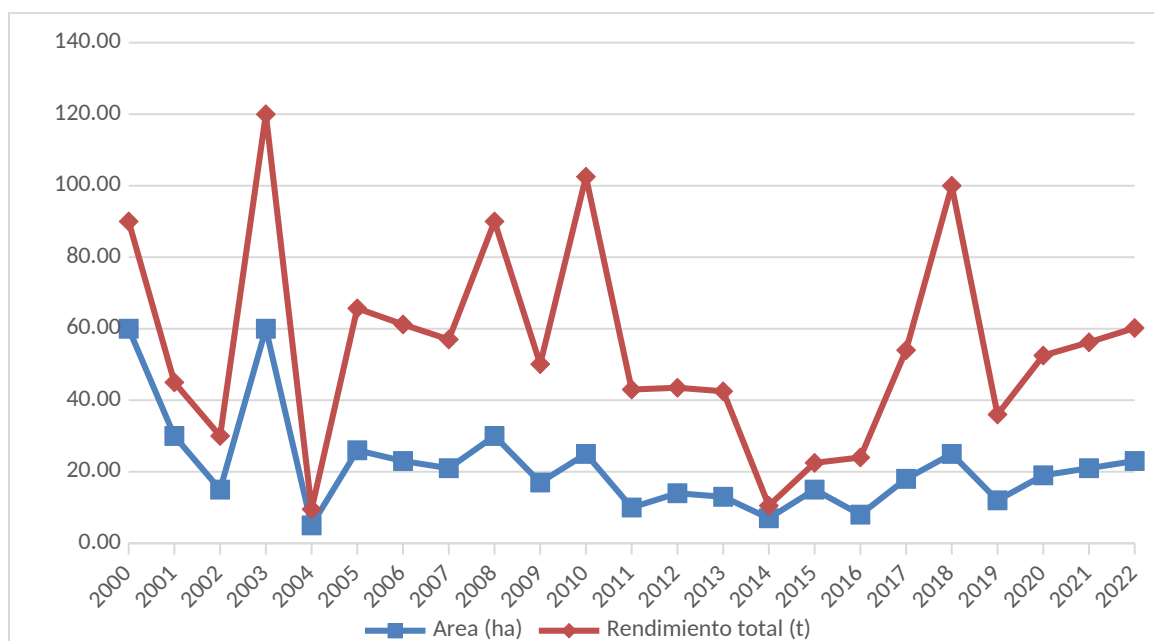
*Nota.* Adaptado del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú

(<https://siea.midagri.gob.pe/portal/>).

Los valores del rendimiento alcanzados por el cultivo de maíz en el distrito de Curahuasi se presentan de manera visual en la siguiente **Figura**.

**Figura 1**

*Rendimientos del cultivo de maíz en el distrito de Curahuasi*



*Nota.* Adaptado del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú (<https://siea.midagri.gob.pe/portal/>)

De otra parte, mediante el software R Project (ver **Figura 9**), se obtuvo los valores de la precipitación efectiva a partir de los datos de precipitación recabados en el ámbito de estudio para el periodo 2000 al 2022 mediante el método USDA – SC. Estos valores de precipitación corresponden al periodo de diciembre a abril de cada campaña agrícola, donde la siembra del maíz se lleva a cabo en diciembre y su madurez de cosecha ocurre en abril. Del mismo modo, el cálculo de la evapotranspiración de referencia, Hargreaves – Samani, se desarrolló en R Project a partir de los datos de temperatura máxima, mínima y radiación solar.

Con respecto al coeficiente de cultivo (kc), dado que el ciclo del cultivo de maíz en el área de estudio tiene una duración aproximada de cinco meses, este coeficiente se determinó en función de estudios previos realizados con cultivos principales en zonas altoandinas del Perú, obteniendo los siguientes valores.

**Tabla 3***Valores del coeficiente de cultivo (kc) en maíz*

Días después de la siembra	Kc
30	0.35
60	0.62
90	0.91
120	1.02
150	0.80

*Nota.* Adaptado de Garay (2009).

Utilizando los valores de evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo, se estimó la evapotranspiración del cultivo de maíz. Con base en la evapotranspiración del cultivo, la precipitación efectiva y los datos de rendimiento del periodo 2000-2022, se procedió a estimar la huella hídrica del cultivo de maíz. La huella hídrica se obtuvo mediante la siguiente expresión matemática:

$$HH_{verde} = \frac{UAC_{verde}}{Y}$$

Donde  $UAC$  representa el uso de agua de lluvia por el cultivo ( $m^3/ha$ ) mientras que  $Y$  es el rendimiento del cultivo ( $t/ha$ ). Además, en la huella hídrica verde se debe integrar la evapotranspiración durante el ciclo fenológico del cultivo.

$$UAC_{verde} = 10 * \sum_{i=1}^{dcf} ET_{verde}$$

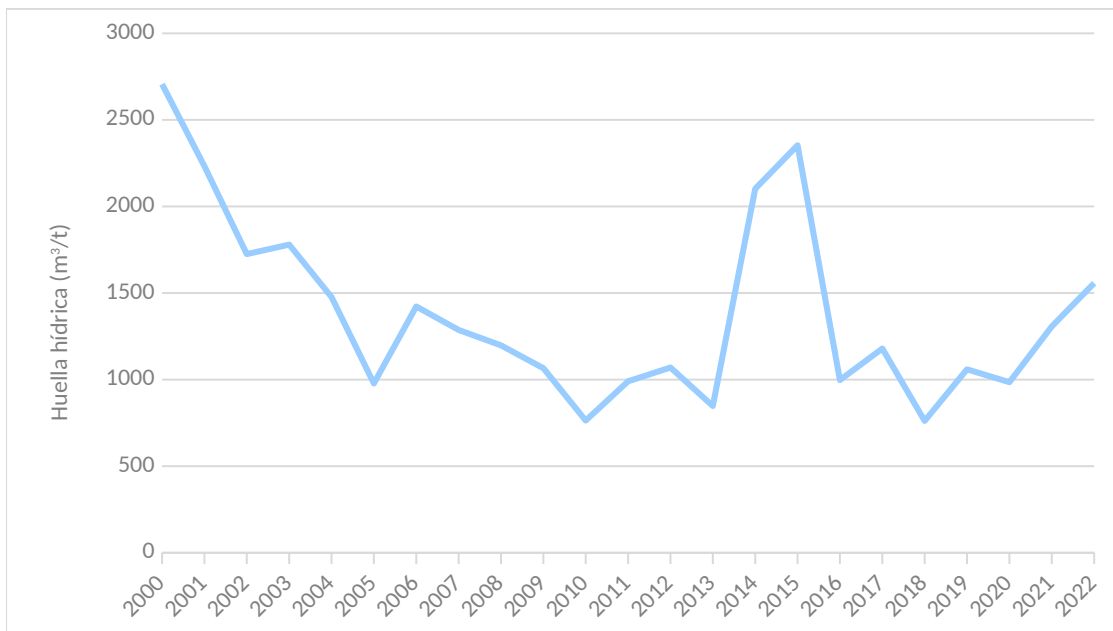
Donde  $ET$  es la evapotranspiración de referencia estimado por el método de Hargreaves – Samani y  $dcf$  representa la duración del ciclo fenológico del cultivo, en nuestro estudio, fueron de cinco meses. Posteriormente se obtiene los valores de la huella hídrica verde del periodo 2000 al 2022 que se muestran en la **Tabla 4**.

**Tabla 4***Huella hídrica verde del cultivo de maíz periodo 2000 al 2022*

Año	UAC	Rendimiento (t/ha)	Huella hídrica verde (m <sup>3</sup> /t)
2000	4059.59	1.50	2706.39
2001	3348.93	1.50	2232.62
2002	3449.61	2.00	1724.81
2003	3558.88	2.00	1779.44
2004	2805.66	1.90	1476.66
2005	2470.45	2.53	977.65
2006	3784.39	2.66	1422.24
2007	3493.25	2.71	1286.99
2008	3593.65	3.00	1197.88
2009	3141.36	2.95	1065.93
2010	3130.82	4.10	763.61
2011	4257.57	4.30	990.13
2012	3324.48	3.11	1069.95
2013	2770.97	3.27	847.59
2014	3153.73	1.50	2102.48
2015	3529.97	1.50	2353.31
2016	2992.38	3.00	997.46
2017	3538.00	3.00	1179.33
2018	3046.33	4.00	761.58
2019	3178.57	3.00	1059.52
2020	2721.96	2.76	985.09
2021	3498.14	2.68	1307.13
2022	4076.40	2.62	1557.43

*Nota.* Elaboración propia.

De la **Tabla 4** se observa que la huella hídrica del cultivo de maíz en el año 2000 fue de 2706.39 m<sup>3</sup>/t. Eso significa que, en ese año se requirieron 2706.39 metros cúbicos de agua por cada tonelada de maíz producida durante todo el ciclo productivo del cultivo. La interpretación para los años siguientes sigue el mismo criterio para el año 2000.

**Figura 2***Huella hídrica del periodo 2000 al 2022*

*Nota.* Elaboración propia.

**5.1.2. Huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en el distrito de Curahuasi bajo el escenario climático RCP 6.0 para el periodo 2030 al 2051**

A partir de los valores presentados en la **Tabla 2**, se realizó el pronóstico de los rendimientos y áreas cosechadas mediante el modelo matemático de la curva potencia cuya fórmula es:

$$Y = aX^b$$

Donde Y es la variable predicha (en nuestro caso rendimiento o área cosechada); X es la variable independiente (años); a y b son coeficientes que se ajustan a los datos históricos. Después de aplicar el modelo matemático de la curva potencia se presentan los valores proyectados de área cosechada y rendimiento para el periodo 2030 al 2051.

**Tabla 5**

*Rendimientos proyectados del cultivo de maíz*

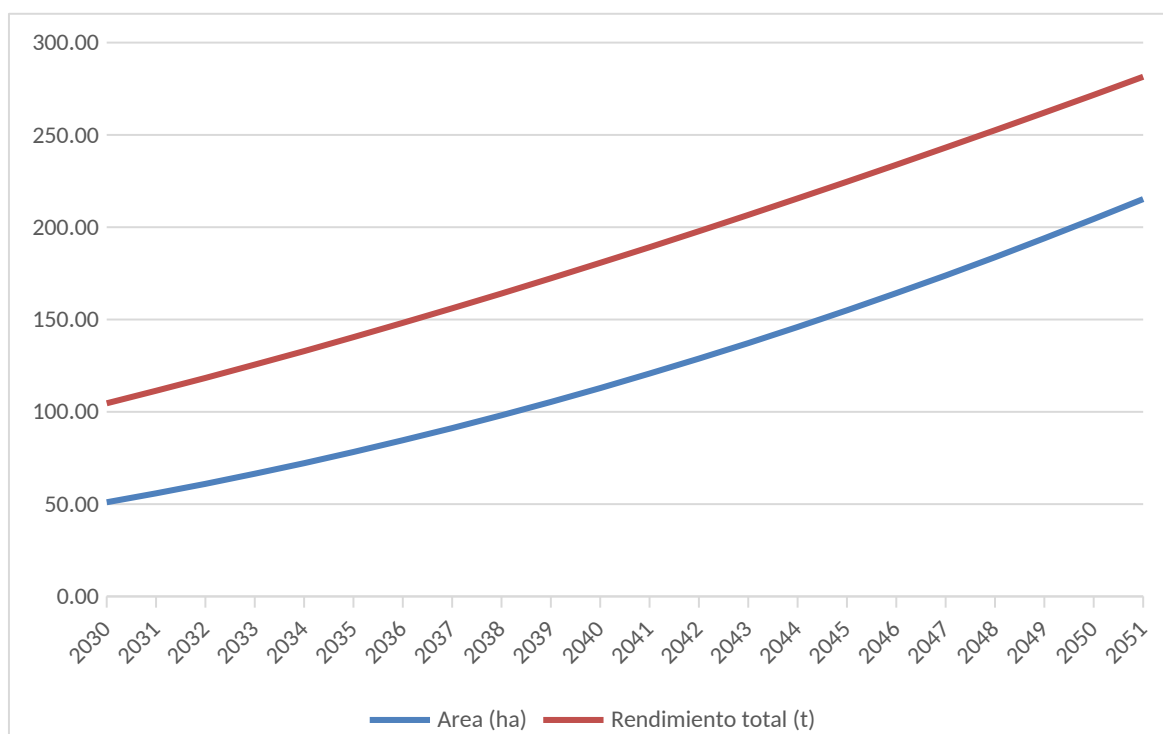
Año	Área cosechada (ha)	Rendimiento total (t)
2030	50.95	104.63
2031	55.81	111.38
2032	60.96	118.35
2033	66.41	125.52
2034	72.16	132.89
2035	78.20	140.43
2036	84.54	148.16
2037	91.18	156.05
2038	98.11	164.11
2039	105.34	172.32
2040	112.87	180.69
2041	120.69	189.20
2042	128.81	197.85
2043	137.23	206.64
2044	145.94	215.56
2045	154.95	224.62
2046	164.25	233.80
2047	173.85	243.10
2048	183.75	252.52
2049	193.95	262.06
2050	204.44	271.72
2051	215.23	281.49

*Nota.* Elaboración propia.

De manera visual, se observa los valores de producción proyectados para el periodo 2030 al 2051 en la siguiente **Figura**.

**Figura 3**

*Rendimientos del cultivo de maíz proyectados del periodo 2030 al 2051*



*Nota.* Elaboración propia.

De otra parte, los datos de precipitación en el escenario climático RCP 6.0 fueron obtenidos del modelo climático global “bcc-csm1-1”. A partir de estos datos de precipitación global para el periodo 2030 al 2051 se redujo a escala local (ámbito del distrito de Curahuasi) mediante el downscaling estadístico a través del método Quantile Mapping (QM).

Este método es una técnica de corrección de sesgo (bias correction), en este contexto, el sesgo se refiere a las diferencias sistemáticas entre las simulaciones de modelos climáticos globales (GCM) y los datos observados. El objetivo del Quantile Mapping es ajustar la distribución de las variables simuladas para que coincidan más estrechamente con las distribuciones de los datos observados históricos.

Con los datos de precipitación escalados a nivel local y proyectados para el período 2030-2051 bajo el escenario climático RCP 6.0, se estimaron los valores de

precipitación efectiva utilizando el método USDA-SC. Estos valores de precipitación corresponden al periodo de diciembre a abril de cada campaña agrícola, donde la siembra del maíz se lleva a cabo en diciembre y su madurez de cosecha ocurre en abril.

Respecto a los valores de la evapotranspiración bajo el escenario RCP 6.0, también fueron obtenidos del modelo climático global “bcc-csm1-1”. A partir de estos datos de evapotranspiración global para el periodo 2030 al 2051 se redujo a escala local (ámbito del distrito de Curahuasi) mediante el downscaling estadístico a través del método Quantile Mapping (QM). Cabe indicar que los valores de evapotranspiración también corresponden al periodo diciembre a abril de cada campaña agrícola.

Los valores del coeficiente de cultivo (kc) en maíz se siguen manteniendo tal como se presenta en la **Tabla 3**, En consecuencia, usando los valores de la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo, se estimó la evapotranspiración proyectada del cultivo de maíz.

Utilizando los valores proyectados de precipitación efectiva y evapotranspiración del cultivo, junto con los datos de rendimiento pronosticado, se estimó la huella hídrica del cultivo de maíz para el período 2030-2051 bajo el escenario climático RCP 6.0, siguiendo el mismo criterio que la estimación de la huella hídrica verde del cultivo de maíz con datos actuales.

En la **Tabla 6**, se presentan los valores de huella hídrica verde del cultivo de maíz obtenido con los valores proyectados de precipitación y evapotranspiración del cultivo además el rendimiento pronosticado.

**Tabla 6**

*Huella hídrica verde del cultivo de maíz periodo 2030 - 2051 bajo el escenario climático RCP 6.0*

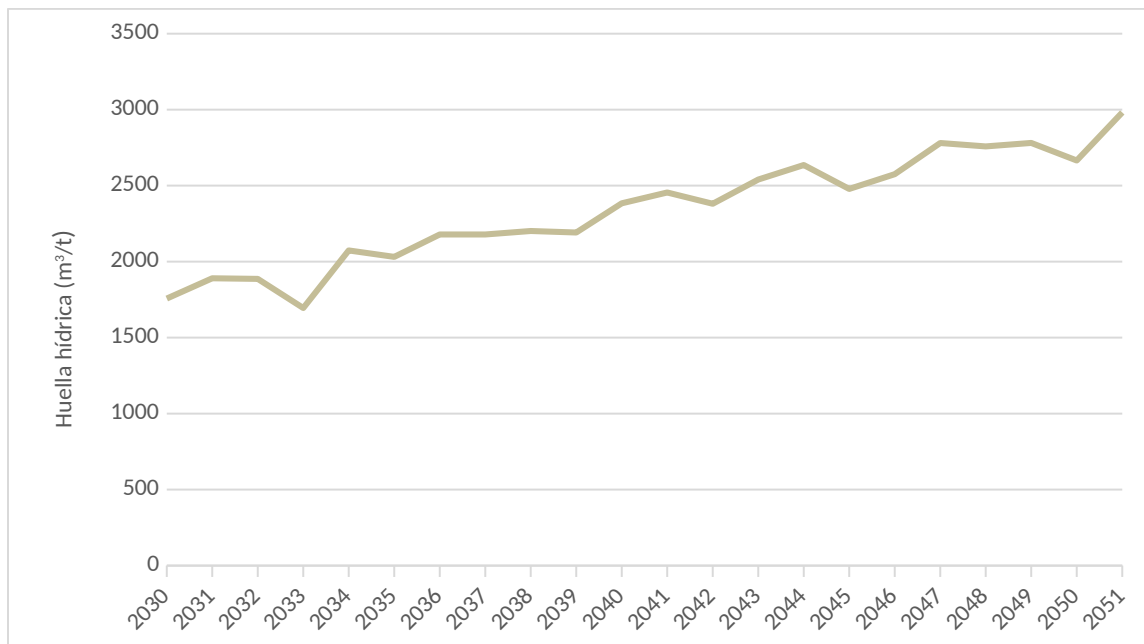
Año	UAC	Rendimiento t/ha	Huella hídrica verde (m <sup>3</sup> /t)
2030	3614.91	2.05	1760.20
2031	3773.36	2.00	1890.50
2032	3744.49	1.94	1928.67
2033	3752.52	2.00	1876.26
2034	3705.74	1.84	2012.22
2035	3784.01	1.80	2107.14
2036	3543.50	1.75	2021.97
2037	3677.95	1.71	2148.95
2038	3804.00	1.67	2274.21
2039	3466.32	1.64	2118.99
2040	3400.22	1.60	2123.99
2041	3685.21	1.57	2350.84
2042	3879.78	1.54	2525.94
2043	3570.26	1.51	2370.95
2044	3638.45	1.48	2463.27
2045	3591.31	1.45	2477.40
2046	3786.00	1.42	2659.84
2047	3878.58	1.40	2773.80
2048	3833.12	1.37	2789.24
2049	3732.94	1.35	2762.67
2050	3635.46	1.33	2735.29
2051	3476.45	1.31	2658.11

*Nota.* Elaboración propia.

De la **Tabla 6** se observa que la huella hídrica del cultivo de maíz para el año 2051 podría alcanzar los 2658.11 m<sup>3</sup>/t. Esto implica que en ese año se requerirían 2658.11 metros cúbicos de agua por cada tonelada de maíz producida a lo largo de todo el ciclo productivo del cultivo. La interpretación para los años restantes sigue el mismo criterio aplicado al año 2051.

**Figura 4**

*Huella hídrica del periodo 2031 al 2051 bajo el escenario RCP 6.0*



*Nota.* Elaboración propia.

### **5.1.3. Huella hídrica verde del cultivo de maíz (*Zea mays L.*) en el distrito de Curahuasi bajo el escenario climático RCP 8.5 para el periodo 2030 al 2051**

Los datos de área cosechada y rendimiento para el periodo 2030 al 2051 son los mismos datos que se presentan en la **Tabla 5**. Mientras que los datos de precipitación en el escenario climático RCP 8.5 fueron obtenidos del modelo climático global “bcc-csm1-1”. En base a estos datos de precipitación global para el periodo 2030 al 2051 se redujo a escala local (ámbito del distrito de Curahuasi) mediante el downscaling estadístico a través del método Quantile Mapping (QM).

Con los datos de precipitación escalados a nivel local y proyectados para el período 2030-2051 bajo el escenario climático RCP 8.5, se estimaron los valores de precipitación efectiva utilizando el método USDA-SC. Estos valores de precipitación corresponden al periodo de diciembre a abril de cada campaña agrícola, donde la siembra del maíz se lleva a cabo en diciembre y su madurez de cosecha ocurre en abril.

En cuanto a los valores de la evapotranspiración en el escenario RCP 8.5, también fueron obtenidos del modelo climático global “bcc-csm1-1”. A partir de estos datos de evapotranspiración global para el periodo 2030 al 2051 se redujo a escala local (ámbito del distrito de Curahuasi) mediante el downscaling estadístico a través del método Quantile Mapping (QM). Los valores obtenidos de evapotranspiración corresponden también al periodo de diciembre hasta abril de cada campaña agrícola.

En cuanto a los valores del coeficiente de cultivo ( $k_c$ ) en maíz se siguen manteniendo tal como se presenta en la **Tabla 3**. Por tanto, haciendo uso de los valores de la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo, se estimó la evapotranspiración proyectada del cultivo de maíz.

Y, por último, empleando los valores proyectados de precipitación efectiva y evapotranspiración del cultivo, junto con los datos de rendimiento pronosticado, se estimó la huella hídrica del cultivo de maíz para el período 2030-2051 bajo el escenario climático

RCP 8.5, siguiendo el mismo criterio que la estimación de la huella hídrica verde del cultivo de maíz con datos actuales.

En la **Tabla 7** se presentan los valores de huella hídrica verde del cultivo de maíz obtenido con los valores proyectados de precipitación y evapotranspiración del cultivo además el rendimiento pronosticado.

**Tabla 7**

*Huella hídrica verde del cultivo de maíz periodo 2030 - 2051 bajo el escenario climático RCP 8.5*

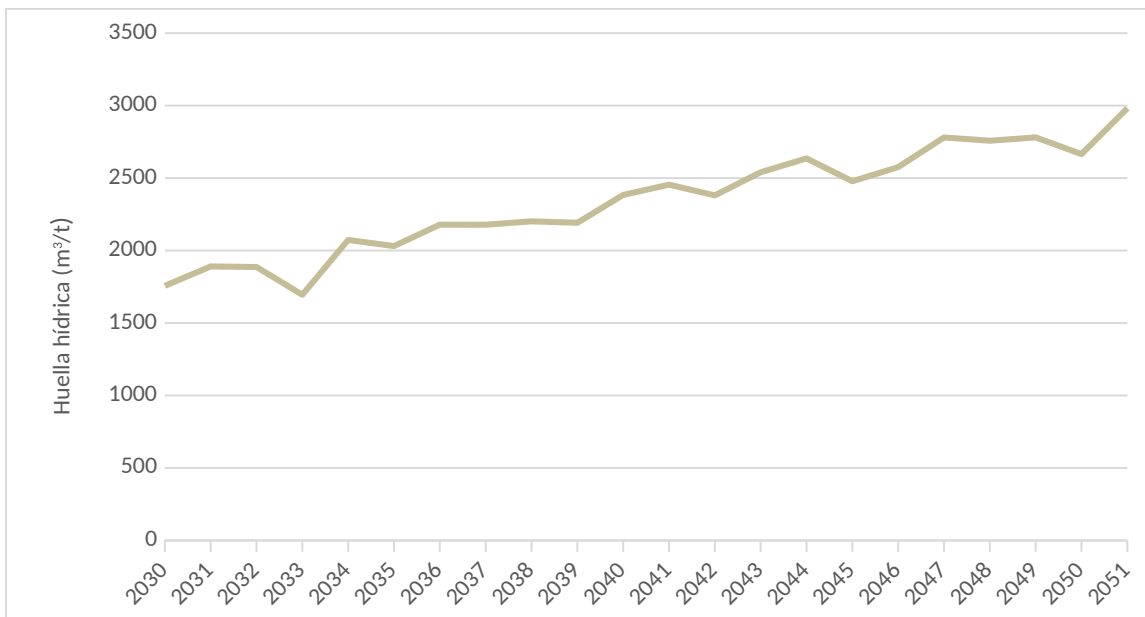
Año	UAC	Rendimiento t/ha	Huella hídrica verde (m <sup>3</sup> /t)
2030	3607.89	2.05	1756.78
2031	3773.27	2.00	1890.46
2032	3662.33	1.94	1886.35
2033	3389.40	2.00	1694.70
2034	3818.56	1.84	2073.48
2035	3647.65	1.80	2031.20
2036	3818.18	1.75	2178.71
2037	3728.27	1.71	2178.36
2038	3682.52	1.67	2201.58
2039	3584.99	1.64	2191.53
2040	3815.81	1.60	2383.60
2041	3848.17	1.57	2454.79
2042	3656.66	1.54	2380.68
2043	3825.05	1.51	2540.16
2044	3893.25	1.48	2635.77
2045	3592.22	1.45	2478.03
2046	3665.89	1.42	2575.46
2047	3887.72	1.40	2780.34
2048	3790.18	1.37	2758.00
2049	3757.49	1.35	2780.84
2050	3542.64	1.33	2665.44
2051	3899.51	1.31	2981.59

*Nota.* Elaboración propia.

De la **Tabla 7** se observa que la huella hídrica del cultivo de maíz para el año 2051 podría alcanzar los 2981.59 m<sup>3</sup>/t. Esto implica que en ese año se requerirían 2981.59 metros cúbicos de agua por cada tonelada de maíz producida a lo largo de todo el ciclo productivo del cultivo. La interpretación para los años restantes sigue el mismo criterio aplicado al año 2051.

**Figura 5**

*Huella hídrica del periodo 2031 al 2051 bajo el escenario RCP 8.5*



*Nota.* Elaboración propia.

**5.1.4. Incremento proyectado de la huella hídrica del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en comparación con la huella hídrica histórica, bajo los escenarios climáticos RCP 6.0 y RCP 8.5**

Para cuantificar el incremento o disminución de la huella hídrica proyectada respecto a la histórica, se aplicó la fórmula de variación porcentual. Esta fórmula permite calcular cuánto ha cambiado un valor respecto a otro en términos porcentuales. La fórmula del cambio porcentual para nuestro estudio se representó del siguiente modo.

$$\Delta = \frac{\text{Huella hídrica proyectada} - \text{Huella hídrica histórica}}{\text{Huella hídrica histórica}} * 100$$

**Tabla 8**

*Comparación entre la huella hídrica proyectada en escenario RCP 6.0 y la huella hídrica histórica*

Año	Huella hídrica verde (histórica)(m <sup>3</sup> /t)	Escenario RCP 6.0 Huella hídrica verde (m <sup>3</sup> /t)	Incremento (%)
2030	2232.62	1760.20	-21.16
2031	1724.81	1890.50	9.61
2032	1779.44	1928.67	8.39
2033	1476.66	1876.26	27.06
2034	977.65	2012.22	105.82
2035	1422.24	2107.14	48.16
2036	1286.99	2021.97	57.11
2037	1197.88	2148.95	79.40
2038	1065.93	2274.21	113.35
2039	763.61	2118.99	177.49
2040	990.13	2123.99	114.52
2041	1069.95	2350.84	119.72
2042	847.59	2525.94	198.01
2043	2102.48	2370.95	12.77
2044	2353.31	2463.27	4.67
2045	997.46	2477.40	148.37
2046	1179.33	2659.84	125.54
2047	761.58	2773.80	264.22
2048	1059.52	2789.24	163.25
2039	985.09	2762.67	180.45
2050	1307.13	2735.29	109.26
2051	1557.43	2658.11	70.67

*Nota.* Elaboración propia.

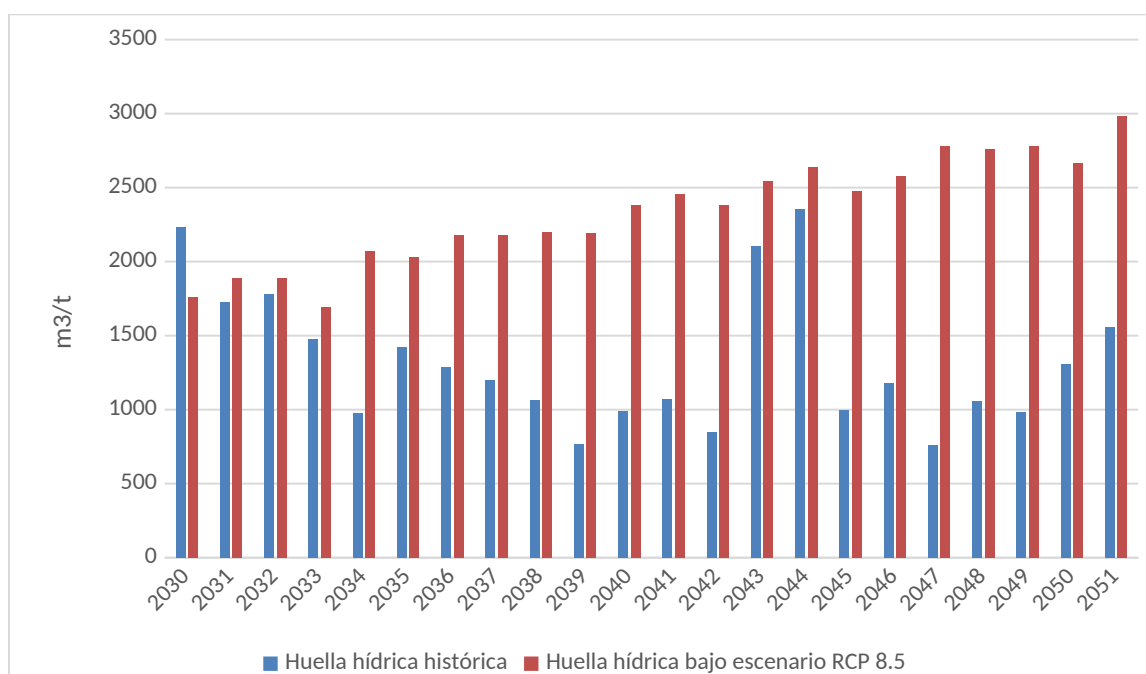
A partir de la fórmula se aplicó para calcular el incremento de la huella hídrica en el escenario climático RCP 6.0 del periodo 2030 al 2051 respecto a la huella hídrica histórica (2001-2022). En la **Tabla 8** se presenta los valores de cambio de la huella hídrica del cultivo de maíz bajo el escenario RCP 6.0.

De acuerdo con los resultados de la **Tabla 8**, en el escenario climático RCP 6.0, la huella hídrica proyectada presenta una reducción del 21.16% para el año 2030 respecto al valor histórico, lo que indica que se necesitaría un 21.16% menos de agua por tonelada de maíz producido en dicho año. Sin embargo, en el año 2051, la tendencia cambia significativamente, ya que la huella hídrica proyectada muestra un incremento del 70.67% respecto al valor histórico. Este aumento sugiere que, en ese año, se necesitaría un 70.67% más de agua por tonelada de maíz producida.

En la **Figura 6** se puede observar las diferencias entre la huella hídrica histórica del periodo 2000 al 2022 y la proyectada bajo el escenario climático RCP 6.0.

**Figura 6**

*Huella hídrica histórica versus huella hídrica proyectada bajo el escenario RCP 6.0*



*Nota.* Elaboración propia.

Por otro lado, en la **Tabla 9** se presenta los valores de cambio la huella hídrica del cultivo de maíz bajo el escenario RCP 8.5.

**Tabla 9**

*Comparación entre la huella hídrica proyectada en escenario RCP 8.5 y la huella hídrica histórica*

Año	Huella hídrica verde (histórica)(m <sup>3</sup> /t)	Escenario RCP 8.5 Huella hídrica verde (m <sup>3</sup> /t)	Incremento (%)
2030	2232.62	1756.78	-21.31
2031	1724.81	1890.46	9.60
2032	1779.44	1886.35	6.01
2033	1476.66	1694.70	14.77
2034	977.65	2073.48	112.09
2035	1422.24	2031.20	42.82
2036	1286.99	2178.71	69.29
2037	1197.88	2178.36	81.85
2038	1065.93	2201.58	106.54
2039	763.61	2191.53	186.99
2040	990.13	2383.60	140.74
2041	1069.95	2454.79	129.43
2042	847.59	2380.68	180.88
2043	2102.48	2540.16	20.82
2044	2353.31	2635.77	12.00
2045	997.46	2478.03	148.43
2046	1179.33	2575.46	118.38
2047	761.58	2780.34	265.07
2048	1059.52	2758.00	160.31
2039	985.09	2780.84	182.29
2050	1307.13	2665.44	103.92
2051	1557.43	2981.59	91.44

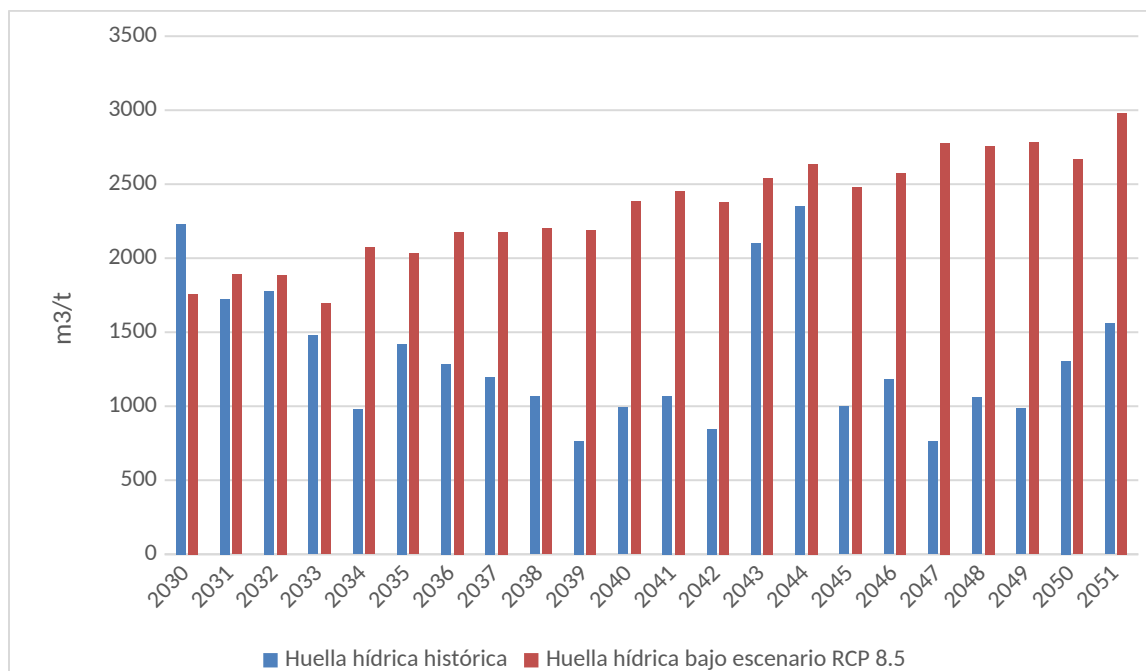
*Nota.* Elaboración propia.

Los resultados de la **Tabla 9**, en el escenario climático RCP 8.5, indican que la huella hídrica proyectada presenta una reducción del 21.31% para el año 2030 respecto al valor histórico, lo que indica que se necesitaría un 21.31% menos de agua por tonelada de maíz producido en dicho año. No obstante, para el año 2051, la tendencia cambia significativamente, ya que la huella hídrica proyectada muestra un incremento del 91.44% respecto al valor histórico. Este aumento sugiere que, en ese año, se necesitaría un 91.44% más de agua por tonelada de maíz producida.

La **Figura 7** representa los cambios de la huella hídrica proyectada bajo el escenario climático RCP 8.5 respecto a la huella hídrica histórica del periodo 2000 al 2022.

**Figura 7**

*Huella hídrica histórica versus huella hídrica proyectada bajo el escenario RCP 8.5*



*Nota.* Elaboración propia.

Estos cambios reflejados en las huellas hídricas bajo los escenarios climáticos RCP 6.0 y RCP 8.5, podría estar relacionado con cambios en la precipitación y la evapotranspiración además de otros factores climáticos que influyen en el uso del agua del cultivo.

## 5.2. Discusión

Los resultados de la huella hídrica histórica del cultivo de maíz obtenidos en esta investigación superan los valores reportados por Arrien (2019) en su estudio. En dicho trabajo, el autor evaluó la huella hídrica del cultivo de maíz durante la campaña 2016-2017, obteniendo un valor de 1,290 m³/t, cifra que es inferior al promedio de 1,324.49 m³/t registrado en el presente estudio. Esta diferencia podría estar relacionada con variaciones en las condiciones climáticas o el manejo agronómico del cultivo.

En el estudio de Alvarez et al. (2016) se evaluó la huella hídrica del cultivo de maíz bajo condiciones de secano obteniéndose un valor de 803.00 m³/t. Este resultado es inferior en comparación con los 1,324.49 m³/t obtenidos en el presente estudio, lo que

sugiere una mayor demanda de agua por tonelada de maíz producido en las condiciones analizadas en esta investigación.

En la investigación de Fuster (2018) se estimó la huella hídrica del cultivo de papa amarilla y maíz choclo. De acuerdo a sus resultados la huella hídrica para el cultivo de maíz choclo reporta valores de 1,088.26 m<sup>3</sup>/t mientras que en los resultados de la presente investigación se reportó un valor de 1,324.49 m<sup>3</sup>/t. Esta discrepancia de resultados podría deberse a las condiciones climáticas de ambas zonas de estudio y el manejo agronómico.

Bajo el escenario RCP 6.0, los resultados muestran una tendencia mixta. Para el año 2030, se proyecta una disminución del 21.16% en la huella hídrica en comparación con los valores históricos. Esta reducción podría estar relacionada con una menor evapotranspiración proyectada o un aumento en la precipitación efectiva. Sin embargo, hacia el año 2051, se proyecta un aumento del 70.67% en la huella hídrica, lo que indica una mayor presión sobre los recursos hídricos a largo plazo. Este incremento puede atribuirse a un aumento de la temperatura media, lo que intensificaría la evapotranspiración del cultivo y compensaría los beneficios iniciales de un incremento en las precipitaciones.

En el escenario RCP 8.5, que asume mayores emisiones y un cambio climático más severo, la huella hídrica proyectada para el período 2030-2051 es superior a la histórica, con un valor de 1,756.78 m<sup>3</sup>/t. No obstante, hacia el año 2051, se proyecta un aumento del 91.44% en la huella hídrica, lo que también sugiere una mayor presión sobre los recursos hídricos en el futuro. Este aumento estaría impulsado por el incremento significativo en la temperatura media proyectada, lo que elevaría la evapotranspiración del cultivo y superaría cualquier beneficio derivado del aumento en la precipitación.

En ambos escenarios, los beneficios iniciales de una mayor precipitación serían contrarrestados por el aumento de la evapotranspiración debido al incremento de las temperaturas.

## VI. Conclusiones

De los resultados alcanzados en esta investigación se concluye lo siguiente:

- La huella hídrica verde del cultivo de maíz en el distrito de Curahuasi para el período histórico 2000-2022 presentó un valor promedio de 1324.49 m<sup>3</sup>/t, lo cual es superior a estudios previos realizados en otras regiones, lo que indica una mayor demanda hídrica bajo las condiciones locales.
- Bajo el escenario climático RCP 6.0, se proyecta una disminución del 21.16% en la huella hídrica para el año 2030, lo que sugiere una mejora temporal en la eficiencia del uso del agua. No obstante, para 2051, la huella hídrica se incrementa en un 70.67%, evidenciando la presión adicional que el cambio climático ejercerá sobre los recursos hídricos a largo plazo.
- En el escenario RCP 8.5, que considera mayores emisiones, se observa una tendencia inicial de reducción del 21.31% en 2030. Sin embargo, para 2051, se proyecta un incremento del 91.44% en la huella hídrica verde, lo que implica un aumento considerable en la demanda hídrica debido a la intensificación del cambio climático.
- Las proyecciones a largo plazo bajo ambos escenarios climáticos sugieren que los incrementos en la temperatura media y la mayor evapotranspiración del cultivo superarán cualquier beneficio inicial asociado a un aumento en la precipitación efectiva.

## **VII. Recomendaciones**

En base a la línea de investigación de esta tesis, se recomienda lo siguiente:

- Promover la investigación continua en la estimación de la huella hídrica en otros cultivos estratégicos de la región, para generar datos más precisos que orienten políticas públicas enfocadas en la gestión sostenible del agua.
- Incentivar la utilización de modelos climáticos regionalizados y herramientas de downscaling en estudios futuros, para obtener proyecciones climáticas más precisas que puedan aplicarse a nivel local en la toma de decisiones.

## VIII. Referencias

- Alegre, J., Loli, O., & La Torre, B. (2007). *Manual práctico de fertilidad de suelos*. INIA-UNALM-CGIAR.
- Allen, R. G., Doorenbos, J., & Monteith, L. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: Estudio FAO Riego y Drenaje, boletín 56.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Evapotranspiración de cultivos: directrices para calcular los requisitos de agua de los cultivos, documento de riego y drenaje 56*. FAO.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Evapotranspiración de cultivos: directrices para calcular los requisitos de agua de los cultivos, documento de riego y drenaje 56*. FAO.
- Alvarez, A., Morábito, J., & Shilardi, C. (2016). Huellas hídricas verde y azul del cultivo de maíz (*Zea mays*) en provincias del centro y noreste argentino. *FCA UNCUYO*, 48(1), 161-177.
- Amaury, V. (2009). Agua, ciudad y derecho. *Alegatos*(72), 229-246.
- Arenas, Jimenez, C. F. (2018). *Estimacion de la huella hidrica que se genera a partir de la produccion agricola a partir del cultivo predominante en la zona alta de la cuenca de la quebrada de angula*. Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana. Obtenido de file:///C:/Users/pc/Downloads/digital\_38286%20(1).pdf
- Arenas, Jimenez, C. F. (2018). *Estimacion de la huella hidrica que se genera a partir de la produccion agricola del cultivo predominante en la zona alta de la cuenca de la quebrada de Angula*. Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Arévalo, D. (2012). *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica*.
- Armenta, G., Villa, J., & Jácome, P. (2016). *Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, para distintos escenarios de cambio climático*. Quito: INAMHI. Obtenido de <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/ECU/14%20Proyecciones%20de%20Cli>
- Arrequin, F., & López, M. (2007). Agua virtual en México. *Ingeniería hidráulica en México*, 22(4), 121-132.

- Arrien, M. (2019). *Huella hídrica del cultivo de maíz en los partidos de Tandil y Balcarce*. Buenos Aires: Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires.
- Ayala, O. (2022). *Estimación de la huella hídrica del cultivo de palto (Persea americana Mill) en el distrito de Abancay*. Universidad Tecnológica de los Andes.
- Barriga, N. (2019). *Escenarios futuros de una muestra de los glaciares más representativos de la zona central de Chile, a partir de sus variaciones climáticas*. Santiago: Universidad de Chile.
- Bocchiola, D., Nana, E., & Soncini, A. (2013). Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agric. Water Manag.*, 116, 50-61.
- Catalán, W. (2012). *Manejo integrado en el cultivo de maíz amiláceo*. Agrobanco.
- Chapagain, A., & Hoekstra, A. (2004). *Water foot prints of nations. Evaluación exhaustiva del manejo del agua en la agricultura*. Londres: Instituto Internacional del Manejo del Agua.
- Chapagain, A., Hoekstra, A., Savernake, H., & Gautam, R. (2006). The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological economics*, 60(1), 186-203.
- Chenoweth, J. (2013). Quantifying the human impact on water resources: a critical review of the water footprint concept. *Magazine hydrology an earth system sciences*, 74.
- Dummont, A., & Salmoral, G. (2010). Hidrology and Earth System Sciences. Global Inventory. *Magazine Science Direct*, 43.
- Fernández, L. (2009). *Identificación de razas de maíz (Zea mays L) presentes en el germoplasma cubano*. INIFAT.
- Fuster, V. (2018). *La simulación prospectiva mediante el software Cropwat para la determinación de la huella hídrica influye en los cultivos de papa amarilla "Solanum pareja" y el maíz choclo "Zea mays" del distrito de Chaglla, departamento de Huánuco, 2018*. Lima: Universidad Cesar Vallejo.
- Garay, O. (2009). *Manual de uso consultivo del agua para los principales cultivos de los andes centrales peruanos*. Estación Experimental INIA Santa Ana.

- Godoy, A. (2017). *Evaluación del uso y gestión del recurso hídrico en la finca San Francisco de la vereda Guadalemo para la producción de maíz en el municipio del Espinal –Tolima*. Tolima: Universidad de la Salle.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 96-99.
- Hernandez Sampieri, R. (2015). *Metología de Investigacion*. Mexico: INTERAMERICANA EDITORES, S.A. .
- Hoekstra, A. (2009). *Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis*. USA: Ecological Economics.
- Hoekstra, A., Chapagain, A. K., & Zhang, G. P. (2016). Water footprints and sustainable water allocation. *Sustainability*, 7(3), 2-23.
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). *El manual de Evaluación de la Huella Hídrica*. . Earthscan.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2013). *IV Censo Nacional Agropecuario 2012*.
- IPCC(2019) Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Intituto Nacional de Innovación Agraria. (2006). *Maíz choclero prolífico*. INIA.
- IPCC. (2018). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. (2018). *Cambio climático: bases físicas. Contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático*. Cambridge: Cambridge University. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI\\_AR5\\_glossary\\_ES.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf)
- IPCC. (2016). *Cambio climático 2014. Informe de síntesis resumen para responsables de políticas*. Obtenido de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_SPM\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM_es.pdf)
- Ledesma, M. (2011). *Principios de meteorología y climatología*. Ediciones Paraninfo.

Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., García-Gonzalo, J., . . . Kolström, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manag*(259), 698-709. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>

Mallma, T. (2015). *Huella hídrica de los productos agrícolas de la región Junín comercializadas en la ciudad de Lima*. Lima: UNALM.

Meehl, G., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J., . . . Taylor, K. (2013). The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 521-530.

Ministerio del Ambiente, Senamhi. (14 de diciembre de 2020). *Infografía escenarios climáticos*. Obtenido de Infografía escenarios climáticos: file:///C:/Users/pc/Downloads/Infografía-escenarios-climaticos\_2020.pdf

Ministerio del Ambiente, Senamhi (2021) [https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/1420/Ma%C3%ADz-Amil%C3%A1ceo-ficha-t%C3%A9cnica-agroclim%C3%A1tica\\_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/1420/Ma%C3%ADz-Amil%C3%A1ceo-ficha-t%C3%A9cnica-agroclim%C3%A1tica_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Moss, R. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 747-756.

MIDAGRI (2023) Observatorio de siembras y perspectivas de la producción – Maíz choclo

MIDAGRI, SENAMHI (2021). [https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/1420/Ma%C3%ADz-Amil%C3%A1ceo-ficha-t%C3%A9cnica-agroclim%C3%A1tica\\_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/1420/Ma%C3%ADz-Amil%C3%A1ceo-ficha-t%C3%A9cnica-agroclim%C3%A1tica_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Nana, E., Corbari, C., & Bocchiola, D. (2014). A model for crop yield and water footprint assessment: Study of maize in the Po valley. *Agricultural Systems*, 139-149.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). (2015). *Status of the Worlds Soil Resources*. FAO. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *The state of the worlds land and water resources for food and agriculture*. FAO. Obtenido de <https://www.fao.org/3/i1688e/i1688e.pdf>
- Paliwal, R., Granados, G., Lafitte, H., & Violic, A. (2001). *El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción*. Roma: FAO.
- Pegram, G., Conyngam, S., Orr, S., Álvarez, C., Germaná, C., Riberos, J., & Mariluz, J. (2015). *Huella hídrica del Perú, sector agropecuario*. Lima: ANA.
- Peña, A. (2017). *Análisis de sostenibilidad ambiental a través de la cuantificación de la huella hídrica verde de la actividad agrícola en la subcuenca del río Achamayo en la localidad de Ingenio - 2016*. Huancayo: Universidad Continental.
- Ramos, L. (2014). *Estimación del efecto del cambio climático en la precipitación en la costa norte del Perú usando simulaciones de modelos climáticos globales*. Lima: UNALM.
- Rodríguez Mendoza, A. Densidad de plantas y niveles de guano de isla en el rendimiento de maíz amiláceo (*Zea mays* L.), Huayaupuquio 3040 msnm - Ayacucho
- Salhuana, W. (2004). *Diversidad y descripción de las razas de maíz en el Perú*. Lima: PCIM.
- Sendiña, I., & Pérez, V. (2006). *Fundamentos de Meteorología*. Universidade de Santiago de Compostela.
- Sun, S. K., Wu, P. T., Wang, Y. B., & Zhao, X. N. (2013). Temporal variability of water footprint for maize production: The case of Beijing from 1978 to 2008. *Water resources management*, 27(7), 2447-2463.
- Taylor, K., Stouffer, E., & Meehl, G. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*(93), 485-498.
- Tolón, A., Lastra, X., & Fernández, V. (2013). Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. *Revista electrónica de medio ambiente*, 56-86.
- Von, H., Zorita, E., & Cubash, U. (1993). Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime. *Journal of climate*, 1161-1171.

World Wildlife Fund. (2012). *Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica*.  
Obtenido de [http://www.huellahidrica.org/Reports/AgroDer,  
%202012.%20Huella%20h%C3%ADdrica%20en%20M%C3%A9xico.pdf](http://www.huellahidrica.org/Reports/AgroDer,%202012.%20Huella%20h%C3%ADdrica%20en%20M%C3%A9xico.pdf)

Yang, N., Men, B., & Lin, C. (2011). Impact Analysis of Climate Change on Water  
Resources. *Procedia Engineering*(24), 643-648.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2710>

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes