

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE LA INFRAESTRUCTURA
HIDRÁULICA DEL VALLE DE MAJES (AREQUIPA) MEDIANTE EL MÉTODO
AWARE-LCA**

Tesis para obtener el título profesional de **INGENIERO CIVIL**

Autor:

RICARDO IVÁN RUPAY HOSPINAL

Asesor:

DR. FEDERICO ALEXIS DUEÑAS DÁVILA


Lima, abril 2024

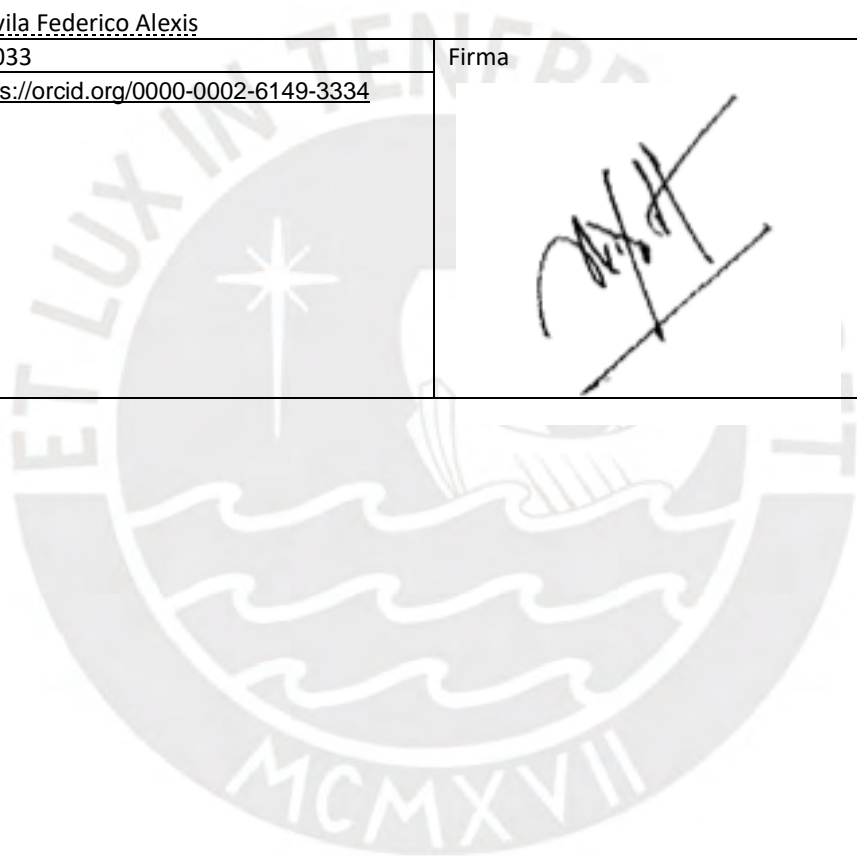
Informe de Similitud

Yo, Federico Alexis Duenas Davila, docente asociado de la Facultad de Ciencias e Ingenieria de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado "Estimación de la huella hídrica de la infraestructura hidráulica del valle de Majes (Arequipa) mediante el método AWARE-LCA" del autor Ricardo Ivan Rupay Hopsinal, dejo constancia de lo siguiente:

El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 13%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* de fecha 02/05/2024. De otro lado, he revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio. Por ultimo, se deja constancia que las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: San Felipe, Jesus Maria, 2 de mayo de 2024.

Apellidos y nombres del asesor: <u>Dueñas Dávila Federico Alexis</u>	
DNI: 23860033	Firma 
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6149-3334	



Resumen

Con el transcurso de los años, alrededor del mundo se ha venido dando un crecimiento poblacional sostenido. Esto representa un mayor requerimiento de bienes y servicios, tales como alimentos, vehículos, transporte, infraestructura, entre otros. Esta demanda implica también una creciente extracción de recursos naturales, que en su mayoría son limitados. Dentro de estos recursos, el agua se presenta como la base para el sustento del desarrollo poblacional y, a su vez, es un recurso que se ve amenazado por factores como el consumo irresponsable, el calentamiento global, entre otros. Es debido a estos problemas que algunos países están siendo más afectados debido a su grado de vulnerabilidad climática, como es el caso de Perú, debido a sus condiciones geográficas. El tema de tesis desarrollado tiene como objetivo principal analizar el impacto hídrico generado por la construcción de la infraestructura hidráulica en el valle Majes, Arequipa, mediante el método AWARE (*Available WATER REmaining* por sus siglas en inglés) establecido por WULCA (*Water Use in Life Cycle Assessment* por sus siglas en inglés) bajo un Análisis de Ciclo de Vida. Esta zona árida ha sido habilitada para la agricultura mediante métodos de riego usando agua trasvasada desde la cuenca del río Colca, mediante la construcción de infraestructura hidráulica que cuenta con un embalse, bocatomas, canales, túneles y desarenadores. El método AWARE ha sido empleado para determinar la huella de escasez hídrica modificada a causa de la construcción de esta infraestructura tomando en cuenta parámetros tales como la fabricación de materiales de construcción empleados, la disponibilidad del recurso hídrico en las zonas de trabajo y los usos del agua (uso consuntivo), relacionando este volumen de agua obtenido con factores de caracterización que determinan el estrés hídrico de la zona. Este análisis permite establecer valores que relacionan niveles de estrés hídrico con la escasez para determinar, a nivel local, el impacto causado por la construcción de esta infraestructura. Los resultados obtenidos muestran que, debido a la magnitud de la construcción de la infraestructura, se ha utilizado un gran volumen de agua en la producción, construcción, transporte y puesta en obra de los materiales de construcción. Este volumen, relacionado con el factor de caracterización, representa un aumento en la escasez del recurso hídrico en la zona de estudio. Asimismo, estos valores de consumo de agua han sido utilizados para establecer indicadores de ecoeficiencia que muestran las rentabilidades y eficiencias de los distintos cultivos que son producidos en la zona en base al caudal provisto por la infraestructura de riego habilitada. Estos resultados establecen valores comparativos para poder determinar qué cultivos son más convenientes de

fomentar en base a un análisis económico y ambiental. Esta metodología de estudio y los resultados obtenidos, permiten establecer un marco referencial de análisis que puede ser replicado en futuras construcciones con el fin de reducir niveles de consumo de agua y, de esta manera, garantizar la existencia y buen manejo de los recursos hídricos a través de los años.



Abstract

Over the years, there has been sustained population growth around the world. This represents a greater requirement for goods and services, such as food, vehicles, transportation, infrastructure, among others. This demand implies an increasing extraction of natural resources, most of which are limited. Of these resources, water is presented as the basis for the sustenance of population development and, also, it is a resource that is threatened by factors such as irresponsible consumption, global warming, among others. It is due to these problems that some countries are being more affected because of their degree of climate vulnerability, as is the case of Peru, based on its geographical conditions. The main objective of the thesis topic developed is to analyze the water impact generated by the construction of hydraulic infrastructure in the Majes valley, Arequipa, using the AWARE (Available WATER REmaining) method established by WULCA (Water Use in Life Cycle Assessment) under a Life Cycle Analysis. This arid zone has been adapted for agriculture through irrigation methods using water transferred from the Colca River basin. This has been made possible because of the construction of hydraulic infrastructure that includes a reservoir, intakes, canals, tunnels and desanders. The AWARE method has been used to determine the modified water footprint due to the construction of this infrastructure considering parameters such as the manufacture of construction materials used, the availability of water resources in the work areas and water uses (consumptive use), relating this volume of water obtained with characterization factors that determine the water stress of the area. This analysis makes it possible to establish values that relate water stress levels to scarcity in order to determine, at a local level, the impact caused by the construction of this infrastructure. The results obtained show that, due to the magnitude of the construction of the infrastructure, a large volume of water has been used in the production, construction, transport and commissioning of construction materials. This volume, related to the characterization factor, represents an increase in the scarcity of the water resource in the study area. Also, these water consumption values have been used to establish eco-efficiency indicators that show the profitability and efficiency of the different crops produced in the area based on the flow provided by the irrigation infrastructure. These results can be used to determine which crops are more convenient to promote based on an economic and environmental analysis. This study methodology and the results obtained allow establishing a reference framework of analysis that can be replicated in future constructions in order to reduce water consumption levels and, in this way, guarantee the existence and good management of water resources over the years.

DEDICATORIA

*A mi familia. Su apoyo y amor incondicional
han sido la parte fundamental
de mi crecimiento como persona y como profesional*



AGRADECIMIENTOS

A mi mamá y mi papá por haber hecho posible este logro. Gracias por depositar toda su confianza en mí. Sin ustedes nada hubiera sido posible.

A mi hermana y mi hermano por siempre estar dispuestos a aconsejarme y apoyarme.

A Ángela (coneje) por haberme acompañado y apoyado en todo momento.

A los amigos de siempre que me acompañaron en las buenas y en las malas.

A Cachihormigas por tener siempre una respuesta a cualquier pregunta.

A mi asesor y profesor, Alexis Dueñas, por haber sido un guía y mentor de excelentísimo nivel.

Por último, a Pelusa y Lancelot por acompañarme en todas las amanecidas.



ÍNDICE

Resumen	2
1. Justificación	1
2. Objetivos	3
2.1 Generales	3
2.2 Específicos.....	3
3. Problemas.....	4
4. Marco teórico	5
4.1 Introducción.....	5
4.2 Caso de estudio previo.....	6
4.3 Situación en las regiones de estudio	7
4.4 La industria de la construcción y la huella hídrica: casos de estudio previo	7
5. Metodología	14
5.1 En el contexto sectorial del proyecto Majes-Siguas.....	14
5.2 Procedimiento de análisis de estudio	15
5.3 Análisis de Ciclo de Vida bajo los lineamientos ISO 14040 e ISO 14044	15
5.4 Medición de huella hídrica.....	17
5.4.1 Análisis de ciclo de vida de la infraestructura.....	18
5.4.2 Huella hídrica clásica.....	19
5.4.3 Metodología AWARE	19
5.5 Formulación de impacto	21
5.6 Unidad funcional de estudio	22
5.7 Descripción del sistema de elementos estructurales.....	22
5.7.1 Infraestructura presente en el proyecto Majes Etapa I.....	22
5.8 Materiales de construcción empleados en el proyecto	32
5.9 Análisis de ciclo de vida del proyecto	36
6. Análisis de datos y modelado	38

6.1 Parámetros establecidos en software SimaPro – Materiales básicos.....	38
6.2 Parámetros establecidos en software SimaPro – Elementos estructurales	42
6.3 Modelamiento de información:	48
7. Análisis de resultados	49
7.1 Volúmenes de agua obtenidos:	49
7.2 Estimación de la escasez:	52
7.3 Comparación de métodos de estimación de factores de caracterización:.....	54
7.3 Indicadores de ecoeficiencia:.....	56
8. Comentarios y conclusiones	60
9. Bibliografía	63



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Consumo de agua por fuente (m ³ /año) UNICON.....	8
Tabla 2 Dosificaciones para diferentes elementos estructurales de concreto.....	9
Tabla 3 Huella hídrica azul por kilogramo de material componente del concreto armado	10
Tabla 4 Cantidad de agua gris generada por kilogramo de material	11
Tabla 5 Desarrollo del concepto de huella hídrica a través del tiempo.....	17
Tabla 6 Ratios de materiales usados en estructuras hidráulicas existentes en proyectos similares	33
Tabla 7 Cantidades de material en base a la relación de las dimensiones con ratios conocidos	34
Tabla 8 Inventario de equipos y elementos mecánicos principales	35
Tabla 9 Volúmenes de agua estandarizada consumidos por cada elemento en el proyecto Majes	50
Tabla 10 Valores de consumo total de agua estandarizada, consumo total y escasez por unidad de área	53
Tabla 11 Criterios de evaluación para obtener valores de factores de caracterización.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ratios de consumo de agua en litros por cada m ² construido.....	12
Figura 2 Esquema general del proyecto de irrigación Majes.....	14
Figura 3 Diagrama de flujo propuesto para el desarrollo de la investigación.....	16
Figura 4 Valores de los factores de caracterización en la zona de estudio provistos por WULCA.....	21
Figura 5 Esquema de la configuración de la presa Condoroma.....	23
Figura 6 Esquema del embalse de la presa Condoroma.....	23
Figura 7 Fotografía del embalse tomada desde la corona de la presa Condoroma.	24
Figura 8 Fotografía de la salida de agua a través de las compuertas hidráulicas.....	25
Figura 9 Fotografía de la Bocatoma Tuti tomada desde el extremo derecho de la estructura	26
Figura 10 Fotografía del inicio de recorrido de túneles y canales	27
Figura 11 Fotografía de la salida de túnel de un canal subterráneo abierto.....	28
Figura 12 Fotografía de la Bocatoma Pitay	29
Figura 13 Fotografía de la parte posterior de la Bocatoma Pitay.....	29
Figura 14 Fotografía de la parte delantera del desarenador terminal.....	30
Figura 15 Fotografía de la salida de agua del desarenador terminal.....	31
Figura 16 Fotografía del canal que parte del desarenador terminal hasta las zonas de cultivo	31
Figura 17 Esquema general del Análisis de Ciclo de Vida del proyecto de irrigación Majes.....	36
Figura 18 Parámetros que conforman el concreto premezclado considerado en la construcción del proyecto	39
Figura 19 Parámetros que conforman el acero estructural considerado en la construcción del proyecto	39
Figura 20 Parámetros que conforman un metro cúbico de tierra removida en la construcción del proyecto	40

Figura 21 Parámetros que conforman el motor eléctrico tipo elevador puesto en obra en Majes	40
Figura 22 Parámetros que conforman una compuerta de 10 toneladas en Condoroma	41
Figura 23 Procesos considerados para la construcción de la represa de Condoroma	42
Figura 24 Procesos considerados para la construcción de la bocatoma Tuti	43
Figura 25 Procesos considerados para la construcción de un kilómetro de túnel	44
Figura 26 Procesos considerados para la construcción de la bocatoma Pitay.....	44
Figura 27 Procesos considerados para la construcción de un kilómetro de canal trapezoidal.....	45
Figura 28 Procesos considerados para la construcción del desarenador terminal	46
Figura 29 Procesos considerados para la construcción de un kilómetro de canal trapezoidal de derivación.....	46
Figura 30 Procesos considerados para la construcción del proyecto de irrigación Majes	47
Figura 31 Porcentajes de agua estandarizada para cada estructura del proyecto Majes	49
Figura 32 Gráfico comparativo de volumen de agua estandarizada consumida por estructura.....	51
Figura 33 Comparación normalizada entre rendimientos de cultivo y precios en chacra en Majes	57
Figura 34 Comparación normalizada entre requerimiento hídrico y precios en chacra en Majes	58
Figura 35 Comparación normalizada entre requerimiento hídrico y rendimiento normalizado en Majes.....	59

1. Justificación

El contexto medioambiental y social demanda de métodos y mecanismos de mitigación de impactos ambientales a todo nivel, entre ellos el impacto relacionado con la depredación de los recursos hídricos. Es por esto que a través de esta tesis se obtendrán indicadores relacionados con la huella de escasez hídrica modificada para poder obtener una medida más adecuada del impacto de la construcción de infraestructura de este tipo. Para este propósito, el método AWARE se presenta como una alternativa viable que pueda representar la situación de estrés hídrico y escasez de agua en la zona de estudio (Boulay et al. 2017).

El Perú, al formar parte del grupo de países que se van a ver más afectados debido al calentamiento global (Baraer et al., 2012), es vulnerable frente a la escasez de agua durante las próximas décadas. Debido a esto, resulta importante analizar ámbitos poco estudiados (en nuestro medio) en este aspecto, tal como es el caso de la infraestructura hidráulica dado que, en su construcción, mantenimiento y puesta en funcionamiento se utilizan una gran cantidad de recursos naturales.

A través del estudio de la huella de escasez hídrica modificada utilizando el método AWARE y haciendo un análisis de ciclo de vida, es posible estimar el impacto hídrico generado por la construcción de la infraestructura hidráulica en la zona de Majes, Arequipa. Este método hace uso de factores de caracterización locales propuestos por Ridoutt & Pfister (2010) que representan los niveles de estrés hídrico en la zona de estudio. De esta manera, la zona de riego habilitada puede ser analizada desde la perspectiva de estrés hídrico correspondiente a una zona árida.

Las ventajas de obtener indicadores que permitan cuantificar la huella de escasez hídrica de este tipo de infraestructura se verán reflejadas en la metodología que, posteriormente, puede ser aplicada en futuros proyectos con la finalidad de hacerlos más eficientes en cuanto al uso de los recursos hídricos para que, de esta manera, se controle adecuadamente el impacto generado y se garantice la calidad y la disponibilidad de este recurso natural a largo plazo en zonas propensas a tener elevados niveles de escasez de agua.

Asimismo, los indicadores económicos, de eficiencia hídrica y de productividad que se tienen en esta zona relacionados con el caudal provisto por la infraestructura hidráulica, son una herramienta útil que permiten definir cuáles son los tipos de cultivo que generan mayores ingresos y que, a su vez, requieren de un menor volumen de agua. También, permiten identificar nuevas oportunidades de desarrollo e investigación que permitan mejorar las técnicas agrícolas en la zona de estudio.

La importancia del desarrollo de esta tesis recae en la viabilidad de ser replicada en distintos escenarios a nivel nacional. Además, la metodología propuesta no solo se limita a la infraestructura hidráulica, sino que puede ser aplicada a diversos productos y servicios porque depende de una perspectiva de ciclo de vida y de factores de caracterización que están pre establecidos. Por último, a través de los indicadores de ecoeficiencia que relacionan variables con el volumen de agua que se consume en la actividad, se pueden establecer parámetros que mejoren los niveles de uso de agua para que este recurso no sea depredado de manera indiscriminada.



2. Objetivos

2.1 Generales

- Determinar la huella de escasez hídrica de la construcción de infraestructura hidráulica y el uso del recurso hídrico en el valle de Majes, para inferir su impacto ambiental (mediante la metodología AWARE).

2.2 Específicos

- Cuantificar la huella de escasez hídrica de la infraestructura hidráulica construida en el valle de Majes mediante la metodología AWARE.
- Estimar el consumo de agua en el ámbito agrícola y geográfico de la zona de estudio con la medición de volúmenes utilizados en la producción de cultivos.
- Establecer un sistema de indicadores para plantear una gestión sostenible en diferentes escenarios vinculados a la construcción de obras civiles mediante análisis de eco-eficiencia.
- Identificar los indicadores de eco-eficiencia relacionando el área de cultivo entre el caudal que abastece los terrenos agrícolas.

3. Problemas

Los estudios de impacto ambiental están ligados a un análisis respecto a la utilización de materia prima, contaminación de los recursos primarios, utilización de tierras, consumo de energía, entre otros; sin embargo, una variable importante no es tomada en cuenta al momento de realizar estos análisis: la disponibilidad de agua en las zonas de trabajo (Ridoutt, Pfister, 2010).

Dado que los recursos hídricos son indispensables para el desarrollo de cualquier proyecto de infraestructura, debido a que forman parte de cualquier elemento constructivo y también de su proceso de fabricación, es pertinente cuestionarse si la disponibilidad de agua en la zona es una variable a tomar en cuenta. De esta manera se dispondría de un análisis local más representativo.

Partiendo de este análisis, se tiene que definir cómo se puede medir este impacto con esta nueva variable. Es por esto que un análisis de ciclo de vida convencional no es suficiente debido a que no incluye la información mencionada. Debido a esto, resulta adecuado emplear el método AWARE con la finalidad de tomar en cuenta la disponibilidad del agua en las zonas de estudio.

Otro tema de investigación pertinente será el de corresponder este estudio a distintos escenarios de construcción convencional puesto que no existe precedente que permita guiarse sobre métodos constructivos que sean más eficientes al momento de la utilización de agua en base a su disponibilidad en las zonas de trabajo.

En base a estos problemas mencionados, se pueden plantear las siguientes preguntas: ¿Cuál es la huella de escasez hídrica, bajo el enfoque WULCA, de la infraestructura hidráulica desarrollada en el valle de Majes? ¿Cómo cuantificar la huella de escasez hídrica para estos casos? ¿Cómo influye la geografía en el impacto ambiental? y ¿Cuáles son los indicadores y cómo se pueden replicar los resultados en futuros proyectos de construcción?

4. Marco teórico

4.1 Introducción

El escenario ambiental que se aproxima en las próximas décadas advierte que el consumo de recursos y la mayor demanda de los mismos irá en crecimiento constante generando mayores riesgos ambientales debido al cambio climático (Lyon et al., 2022). Esto se debe a que los niveles de consumo y producción de bienes y servicios irán en aumento de la mano con el crecimiento poblacional (Gerbens-Leenes et al., 2021). En base a este escenario se puede inferir que uno de los recursos que será más demandado será el agua, dado que es un elemento básico, tanto de consumo directo como indirecto.

Actualmente se estima que existen entre dos mil y cuatro mil millones de personas que sufren escasez de agua (de leve a moderada) en el mundo y se prevé que la cifra irá en aumento en los próximos años (Unesco, 2023). Con estos escenarios planteados, surge la necesidad de contar con métodos de estimación de impacto ambiental que nos permitan mitigar los efectos de la depredación de los recursos naturales de manera más acertada (Mekonnen, Hoekstra, 2016)

Haciendo énfasis en el impacto ambiental ligado al consumo del agua, se tiene el concepto de huella hídrica clásica que, básicamente, mide y cuantifica los volúmenes de consumo del agua azul, verde y gris. El término agua azul hace referencia al agua superficial (ríos, lagos, lagunas, etc.) y al agua subterránea utilizadas. El término agua verde implica el volumen de agua de lluvia aprovechada y el término agua gris se muestra como la cantidad de agua necesaria para asimilar cargas contaminantes (usualmente ligado al agua afectada por los fertilizantes en las actividades agrícolas) (Hoekstra et al., 2011).

La huella hídrica clásica, ha sido uno de los métodos cotidianos debido a que la información obtenida nos refleja un volumen de agua global que se consumió; sin embargo, cabe hacer hincapié en que la principal limitación es que este método no brinda una idea de impacto ambiental sino de un inventario de consumo de agua. Bajo esta idea, es válido relacionar ámbitos geográficos con este inventario de consumo con la finalidad de tener resultados más de acorde a cada realidad (Boulay et al. 2017).

Para poder tener una mejor concepción de esta relación planteada, se puede tomar el caso de Perú, debido a que se presentan escenarios muy variados de acuerdo con las regiones presentes

(costa, sierra y selva). En la región costa se tiene un espacio desértico con precipitaciones muy aisladas y ríos poco caudalosos que tienen sus orígenes en la cordillera de los Andes; sin embargo, en esta región se encuentra la mayor parte de la población del país, por lo que el uso de agua de la población es la mayor del territorio nacional (Salmoral et al., 2020). En la sierra se tienen ríos de mediano caudal, así como lagos y lagunas. Asimismo, se tiene poca población en comparación a la costa. En la selva, se tienen elevados niveles de lluvia y ríos muy caudalosos para una población pequeña en comparación a las otras regiones (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI], s.f.).

Dada esta situación geográfica y demográfica, es válido cuestionar si el efecto del consumo del agua se da igual en cada una de las regiones. También se puede analizar si es suficiente medir únicamente el consumo de agua y cuantificar el volumen para tener, de esta manera, un impacto más acertado en este tipo de consumo o si es necesario establecer relaciones con las características locales de la disponibilidad del agua para tener una mayor precisión en el análisis.

Bajo este planteamiento de ideas, se han desarrollado métodos que abarcan conceptos más allá de los concebidos por la huella hídrica clásica. Uno de estos es el desarrollado a través de la metodología WULCA con el método AWARE. Este método relaciona y cuantifica la disponibilidad relativa del agua en el área de estudio con el consumo del caso estudiado (Boulay et al. 2017). De esta manera, se obtienen indicadores que muestran un resultado que relaciona la demanda de agua con la disponibilidad de la misma en la zona.

4.2 Caso de estudio previo

La aplicación de este método se puede analizar en el caso de estudio realizado en Australia, donde se muestra cómo se cuantifica realmente el impacto del agua cuando se produce pasta de tomate Dolmio y maní M&M a través del análisis de estrés hídrico. El estudio muestra que, a través de una medición de huella hídrica clásica, el maní M&M requiere hasta 5 veces más la cantidad de agua requerida por la pasta de tomate; sin embargo, si se toman en cuenta factores adicionales tales como la disponibilidad del agua en la zona donde se produjeron los tomates para la pasta y la disponibilidad de agua en la zona de donde se obtiene el cacao para el maní, se advierte que el impacto difiere mucho de la concepción inicial obtenida por el análisis tradicional y nos muestra que el impacto del consumo de agua del maní es hasta 20

veces menor que el del tomate a pesar de consumir mayores volúmenes de agua (Ridoutt, Pfister, 2010)

Con estas nuevas consideraciones, se obtienen indicadores más adecuados, dado que se considera la disponibilidad del recurso y su aprovechamiento respecto a la fuente de donde proviene. Asimismo, en contraste con la medición de la huella hídrica clásica, se pueden realizar comparaciones de niveles de impacto en situaciones que no impliquen condiciones específicas (Boulay et al., 2017).

4.3 Situación en las regiones de estudio

La situación en la costa peruana implica la necesidad de un estudio de este tipo puesto que a lo largo del litoral se ha venido desarrollando una gran actividad agrícola que se ha ido masificando en las últimas décadas. Esta situación se da con mayor intensidad en regiones como Ica, Arequipa y Tacna, en el sur; así como en La Libertad y Lambayeque en el norte (Salmoral et al., 2020).

Este escenario ha sido analizado para el caso de la producción de pisco y el cultivo de uva, por ejemplo. Los resultados obtenidos nos muestran la necesidad de una mayor inversión en tecnología de riego porque alrededor del 70% se realiza a través de inundación (Vásquez et al. 2017). Además, al ser esta zona desértica, se tiene un mayor impacto debido a que la disponibilidad del agua es limitada a acuíferos sobreexplotados y a volúmenes de agua de la región sierra.

Al requerir grandes volúmenes de agua en la costa, se han realizado proyectos de infraestructura de grandes proporciones para poder solventar la demanda hídrica. Tal es el caso del gran proyecto de irrigación de Majes; sin embargo, no ha sido realizado un estudio de impacto hídrico en la zona para medir cuánto ha afectado esta infraestructura realmente a la disponibilidad del agua destinada al consumo humano.

4.4 La industria de la construcción y la huella hídrica: casos de estudio previo

La construcción es una de las principales actividades económicas en el mundo, dado que requiere inversiones importantes de capital, una gran cantidad de recursos naturales y una fuerza laboral numerosa en comparación a otras actividades. También genera oportunidades

indirectas que promueven un flujo económico activo en distintos niveles (Holloway Houston Inc., 2018). A su vez, es una de las actividades económicas con mayor proyección de crecimiento e inversión en los próximos años (Oxford Academics et al.,2021).

Esta actividad, al ser masificada y prioritaria para el desarrollo del país, implica también que el impacto ambiental sea de una magnitud mayor en comparación a otras actividades debido a que la utilización de recursos y los requerimientos energéticos son elevados (Pontificia Universidad Católica del Perú, 2017). Dentro de este impacto, cabe resaltar la utilización del agua en todos los procesos ligados a la construcción desde la fabricación de materiales de construcción hasta su puesta en obra (Akan et al., 2017).

Desde la fabricación de los materiales utilizados hasta los procesos constructivos, tales como el curado de elementos de concreto, el agua forma parte fundamental en cada una de las etapas. Por ejemplo, el agua forma parte fundamental en la fabricación de cemento, acero, ladrillos y aditivos. Es utilizada también al momento de generar energía (en plantas hidroeléctricas o termoeléctricas) que se utiliza en las fábricas de estos materiales. Asimismo, actúa como agente clave para la conglomeración de los elementos del concreto (Pires dos Santos et Da Silva, 2015).

El concreto representa el principal material de construcción alrededor del mundo debido a su versatilidad y disponibilidad. Este material compuesto por cemento, agregados y agua predomina tanto en construcción de edificaciones como de infraestructura (Chemistry World, 2008). Para poder dar cuenta del volumen de agua utilizado en esta actividad principal de la construcción (preparación de concreto), se muestra la Tabla 1, que indica cuántos metros cúbicos de agua se utilizaron en las plantas, canteras y oficinas de la empresa Unión de Concreteras S.A. (UNICON) durante el año 2018:

Tabla 1

Consumo de agua por fuente (m³/año) UNICON

Fuente de agua	2016	2017	2018
Agua Subterránea	305 765 205	348 894 974	445 817
Red Pública	25 506	50 352	20 404
Total	305 790 711	348 945 326	466 221

Nota: Unión de Concreteras. (2018). Memoria Integrada 2018. (p. 108). Los valores totales representan el volumen de agua (en metros cúbicos) que consumió la empresa UNICON durante los años 2016, 2017 y 2018.

De acuerdo con la Memoria Integrada 2018 (UNICON, 2018), el agua subterránea es provista por terceros que obtienen el agua de pozos para luego ser transportada por cisternas a las plantas concretas de la compañía. Es preciso notar que, para el año 2018, se redujo drásticamente el volumen de agua que se utilizó en la compañía dadas las nuevas políticas medioambientales y las mejoras de procesos, así como también la utilización de aditivos, tales como los reductores de agua que, a su vez, aumentan la trabajabilidad y plasticidad del concreto. De la misma manera se implementaron sistemas de recirculación y reutilización de agua para la preparación del concreto premezclado (UNICON, 2018)

Para una cuantificación a nivel general, se tienen como referencia, las dosificaciones requeridas para el concreto recomendadas por instituciones como la Unión Andina de Cementos (UNACEM). En la Tabla 2, se pueden notar las cantidades de agua requeridas para obtener las resistencias requeridas:

Tabla 2:
Dosificaciones para diferentes elementos estructurales de concreto

Tipo	f _c Resistencia a 28 días (kg/cm ²)	Tamaño de piedra	Cemento kg (bolsas)	Agua (litros)	Arena (kg)	Piedra (kg)	Hormigón (kg)
Cimiento Corrido							
Con adición de piedra grande (8")	100	1"	242 (5.7)	171	774	1 170	-
	100	-	242 (5.7)	178	-	-	1 885
Con adición de piedra mediana (6")	140	1"	283 (6.7)	196	640	1 205	-
	140	-	283 (6.7)	200	-	-	1 792
Falsa Zapata							
Con adición de piedra mediana (6")	140	1"	283 (6.7)	196	640	1 205	-
Zapata con o sin refuerzo							
Zapata con o sin refuerzo	175	1"	317 (7.5)	204	816	1 029	-

Nota: El símbolo “ se refiere al calibre medido en pulgadas. Fuente: Unión Andina de Cementos. (2013). Tabla de Dosificaciones y Equivalencias.

Como se puede apreciar, para cimientos se requieren entre 171 y 204 litros de agua por cada metro cúbico de concreto, dependiendo de la conformación del agregado grueso de acuerdo con la Tabla 2. Bajo esta consideración, es válido afirmar que una cantidad de agua utilizada en una construcción convencional con elementos de concreto armado o simple estará dada por la cantidad de metros cúbicos de concreto utilizado, el tipo de elemento estructural y la resistencia requerida. Sin embargo, para tener una mayor comprensión del impacto hídrico, es necesario tener en cuenta también la fabricación de los componentes básicos del concreto armado: cemento Portland y el acero estructural (Gerbens-Leenes, Hoekstra, y Bosman, 2018).

La caracterización de la huella hídrica ligada a la construcción se limita a la utilización del agua durante el proceso de mezclado del concreto; sin embargo, no toma en cuenta el empleo del agua durante la fabricación del cemento o del acero. Estos volúmenes son importantes y deben tomarse en cuenta debido a que su fabricación está ligada al consumo de agua azul que está dejando de ser utilizada para actividades de consumo directo humano; es decir, la fabricación de cemento y acero aumentan la escasez del agua de manera sustancial (Gerbens-Leenes, Hoekstra, y Bosman, 2018).

Para cuantificar la huella hídrica de la producción de estos materiales, se pueden aplicar conceptos de análisis de cadenas de valor y producción ligados mediante un análisis de ciclo de vida. De esta forma se pueden obtener valores que involucren tanto la producción como la energía utilizada en la producción final del material. (Gerbens-Leenes et al. 2018). La Tabla 3 muestra un resumen de la huella hídrica azul por kilogramo de material componente del concreto armado. En este caso se consideraron como materiales al acero con aleación, acero sin aleación, cemento Portland, cemento compuesto tipo Portland y vidrio sódico-calcáreo:

Tabla 3

Huella hídrica azul por kilogramo de material componente del concreto armado

	Acero con aleación de cromo-níquel	Acero sin aleaciones	Cemento Portland	Cemento compuesto tipo Portland	Vidrio flotado sódico-calcáreo
Huella hídrica azul de energía consumida (L/kg)	65.39	3.8	1.49	1.22	2.67

Huella hídrica azul de procesos de producción (L/kg)	11.48	8.03	0.68	0.58	3.22
--	-------	------	------	------	------

Nota: Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y., & Bosman, R. (2018). The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass. Water resources and industry, 19 (p. 7). Los valores indicados representan el volumen de agua utilizado en la producción de los componentes del concreto armado por kilogramo de material.

La Tabla 3 muestra que la mayor cantidad de agua azul utilizada se da para la generación de energía necesaria en la fundición de acero estructural. Esto es debido a la alta demanda hídrica de las plantas termoeléctricas (Petrakopoulou, F. et al., 2020). Para los demás casos, se mantiene la correlación que muestra como mayor aporte de la huella hídrica azul, el proceso correspondiente a la energía consumida en la producción del material.

Es válido afirmar que esta cantidad de agua representa un volumen importante para la industria de la construcción, puesto que para la preparación de grandes volúmenes de concreto se requieren toneladas de cemento y acero; por lo tanto, elevados metros cúbicos de agua que dejan de ser aprovechados de manera directa (Gerbens-Leenes, P. et al. 2018). Es decir, mayor escasez y mayores niveles de estrés hídrico (Ridoutt, Pfister, 2010).

A pesar de que los volúmenes de agua azul requeridos no representan cantidades elevadas en comparación a otras actividades (Gerbens-Leenes, P. et al. 2018), es necesario estimar la cantidad de agua gris para los mismos materiales tal como se puede apreciar en la Tabla 4:

Tabla 4:

Cantidad de agua gris generada por kilogramo de material

	Acero con aleación de cromo-níquel	Acero sin aleaciones	Cemento Portland	Cemento compuesto tipo Portland	Vidrio flotado sódico-calcáreo
Huella hídrica gris de procesos de producción (L/kg)	1500	2270	210	210	1300

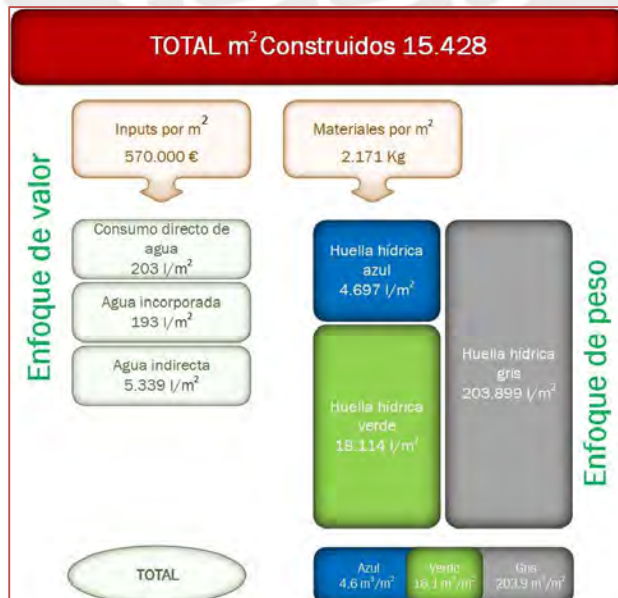
Nota: Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y., & Bosman, R. (2018). The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass. Water resources and industry, 19 (p. 8)

Los resultados en la Tabla 4, muestran una elevada cantidad de litros de agua gris por cada kilogramo de material producido (en comparación con los valores de agua azul), siendo el acero el principal aportante a este valor de huella hídrica. Los volúmenes de agua gris son el principal aporte a la huella hídrica en la cadena de producción de los principales componentes del concreto armado; por lo tanto, también de la industria de la construcción. Con estas magnitudes referenciales se pueden analizar proyectos de construcción a cualquier escala con la finalidad de poder determinar cuáles son los puntos a mejorar en la cadena de producción en cuanto a manejo hídrico se refiere. De esta forma, se pueden manejar de manera más eficiente los niveles de estrés hídrico, huella hídrica y consumo en la industria de la construcción.

Tal es el caso de estudio realizado por la Universidad Autónoma de Madrid (2019) en el que se estima la huella hídrica para un proyecto inmobiliario típico con 15, 428 m² construidos por la compañía Vía Célere. En el estudio se consideraron tanto los volúmenes de agua consumidos directa e indirectamente. Los resultados de este estudio indican que, por cada metro cuadrado construido, la huella hídrica azul es de 4.6 m³/m², la huella hídrica verde de 18.1 m³/m² y la gris de 203.9 m³/m². De esta manera se mantiene la correlación previamente mostrada en la Tabla 4, en la que podemos dar cuenta de que el mayor impacto de la industria de la construcción se da por los elevados volúmenes de huella hídrica gris. (Universidad Autónoma de Madrid, 2019). En la Figura 1 se muestran los ratios de consumo de agua en litros por cada m² construido:

Figura 1

Ratios de consumo de agua en litros por cada m² construido



Nota: Universidad Autónoma de Madrid (2019). Estimación de la Huella Hídrica de una Promoción Residencial. Los valores muestran la relación entre el volumen de agua en litros y un metro cuadrado de construcción en el Proyecto Vía Célere.

Históricamente, los estudios de impacto ambiental ligados al uso del agua por parte de las industrias, han estado ligados únicamente a las operaciones directas; sin embargo, tal como se evidencia, el consumo indirecto es el que influye más en la huella hídrica. (Zhang, Hoekstra y Mathews, 2013). En el caso de la construcción, se debe tomar en cuenta el consumo indirecto en la fabricación de los materiales para poder comprender un impacto más adecuado de esta industria. Además, sumado a este análisis, es fundamental relacionar también los niveles de estrés hídrico de las zonas de interés con la finalidad de tener una mejor aproximación del impacto a causa del consumo directo e indirecto (Ridoutt & Pfister, 2010).

En el caso de la región Arequipa, se tienen elevados niveles de consumo de agua a causa del consumo directo en agricultura, industria, entre otros, debido a la densidad poblacional en las ciudades más grandes y a la creciente superficie agrícola (Sedapar, 2018). Asimismo, la construcción de infraestructura hidráulica para habilitar nuevos terrenos agrícolas en el valle de Majes, ha significado alterar el consumo directo de agua en la región debido a que se utiliza agua trasvasada de la cuenca del río Colca (Proyecto Especial Majes Sigwas-Autodema, 2016).

A través del método AWARE es posible determinar el impacto hídrico en la zona mencionada, teniendo en cuenta la disponibilidad y los índices de escasez del agua (Ridoutt & Pfister, 2010). Estos valores, de acuerdo con la zonificación, indican que existe un índice de escasez elevado dada su condición de poca disponibilidad de agua para consumo directo. Para el desarrollo de esta metodología, Boulay et al. (2017), establecen un análisis basado en un análisis de ciclo de vida ligado, en este caso, a la construcción de la infraestructura hidráulica construida en el valle de Majes.

5. Metodología

5.1 En el contexto sectorial del proyecto Majes-Siguas

La industria de la construcción se presenta como una de las más influyentes en el país en lo que respecta al ámbito económico. Esto es debido a que se presenta como una actividad que influye directa e indirectamente sobre el desarrollo económico nacional y también cuenta con un retorno de inversión elevado. Asimismo, los alcances de las construcciones abarcan grandes terrenos y su alcance socioeconómico influye en sectores de producción a todo nivel en la cadena de producción. (Sociedad de Comercio Exterior del Perú [COMEX], 2022)

En el distrito de Majes se desarrolló un proyecto de infraestructura de regadío con el fin de abastecer de agua a las zonas agrícolas y para crear nuevos sectores de cultivo. Esta necesidad conllevó al desarrollo del proyecto de irrigación Majes-Siguas etapa I, mediante el cual se garantiza el abastecimiento de agua mediante el trasvase de este recurso desde la cuenca del río Colca (Proyecto Especial Majes Siguas-Autodema, 2017). Proyectos de similares características se han venido desarrollando principalmente a lo largo de la costa peruana en las zonas de Olmos, Alto Piura, Virú, Trujillo, entre otros. (Gestión, 2019)

En el caso del proyecto Majes-Siguas etapa I, se contempla una habilitación aproximada de quince mil hectáreas de terrenos de regadío en el valle de Majes. La infraestructura involucrada incluye una presa, bocatomas, desarenadores, túneles, canales abiertos y canales cerrados que contemplan un recorrido de alrededor de cien kilómetros desde la presa de Condoroma hasta su distribución por riego en el valle. (Proyecto Especial Majes Siguas-Autodema, 2016). En la Figura 2 se muestra un esquema (en base a una vista satelital) del recorrido del proyecto y del área de irrigación habilitada

Figura 2:

Esquema general del proyecto de irrigación Majes



Nota: Esquema general del proyecto Majes visto vía Satélite a través de Google Earth. En la imagen se muestra con línea naranja el recorrido del agua desde la represa de Condoroma y su punto final en el área de irrigación encerrada en los polígonos. Elaboración propia vía Google Earth.

5.2 Procedimiento de análisis de estudio

El análisis de este estudio requiere de información que ha sido recolectada a través de distintos medios para luego poder ser analizada mediante el uso de herramientas informáticas. Dentro de la recolección de datos, se tiene la información pública, estudios previos, información recolectada *in-situ* a través de una visita a campo, entre otros, que permiten tener un inventario relacionado con la actividad constructiva e hídrica de la zona de estudio, mientras que para el procesamiento de datos se dispone del software SimaPro y la base de datos Ecoinvent. Con esta herramienta se procesan los datos obtenidos para poder realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la construcción de infraestructura hidráulica.

5.3 Análisis de Ciclo de Vida bajo los lineamientos ISO 14040 e ISO 14044

La Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés), establece los lineamientos para el desarrollo de estudios de Análisis de Ciclo de Vida en las normas ISO

14040 y 14044. La primera incluye los principios y marco teórico, mientras que la segunda norma establece los requerimientos y guías necesarios para el desarrollo de los Análisis de Ciclo de Vida. Ambas normas se complementan y engloban los lineamientos previos desarrollados en años anteriores por ISO (Finkbeiner et al., 2006).

Las normas ISO 14040 y 14044 se desarrollan bajo siete principios: Apreciación general del ciclo de vida, Enfoque ambiental, Enfoque relativo y unidad funcional, Enfoque iterativo, Transparencia, Integridad y Prioridad en el enfoque científico. Asimismo, contemplan cuatro etapas: Definición del objetivo y alcance, Análisis del inventario, Evaluación del impacto e Interpretación. Bajo estos lineamientos, los estudios de Análisis de Ciclo de Vida permiten mantener una estructura adecuada bajo una metodología estandarizada (ISO, 2006).

El Análisis de Ciclo de Vida del presente estudio permite establecer la metodología de trabajo para obtener el volumen de agua requerido para la construcción de la infraestructura hidráulica. Este volumen de agua, obtenido bajo la metodología establecida por ISO en las normas ISO 14040 y 14044, es el primer resultado obtenido previo a la evaluación de la metodología AWARE para estimar el aumento de la escasez hídrica en la zona de estudio. A manera de resumen, se tiene el siguiente diagrama de flujo propuesto en la Figura 3:

Figura 3

Diagrama de flujo propuesto para el desarrollo de la investigación



Nota: Esquema del Análisis de Ciclo de Vida empleado para estimar la huella de escasez hídrica realizado bajo los lineamientos ISO. Elaboración propia.

5.4 Medición de huella hídrica

Los estudios de huella hídrica se originaron por la necesidad de cuantificar volúmenes de agua requeridos para satisfacer productos, servicios y funcionalidades de las actividades humanas. Con el paso del tiempo, estos análisis han ido tomando enfoques cada vez más especializados y adaptados a nuevas herramientas como los Análisis de Ciclo de Vida. Esta evolución de desarrollo de medición de huella hídrica se puede identificar en la Tabla 5, en la que se muestran los diversos enfoques desarrollados en las últimas décadas por diversos autores:

Tabla 5

Desarrollo del concepto de huella hídrica a través del tiempo

	Objetivo	Metodología
Huella ecológica (Rees, 1992)	Cuantificación de los requerimientos humanos para lograr el desarrollo sostenible de la sociedad.	Se determina el área necesaria basándose en rendimientos de productos primarios como cultivos, bosques, pesca, entre otros.
Agua virtual (Allan, 1998)	Medir el volumen de agua involucrada en la producción de bienes (haciendo énfasis en los productos agrícolas).	Analizar, en base al comercio internacional, los productos que requieran más “agua virtual” para promover el intercambio comercial más racional. Con esto, los países con mayor estrés hídrico podrían importar estos productos de países con excedentes de agua.
Huella hídrica (Hoekstra y Hung, 2002)	Cuantificar los volúmenes de agua azul y agua verde para estimar la huella hídrica de bienes y/o servicios.	Los volúmenes de agua que representan la huella hídrica, se dividen en dos tipos: agua azul (proveniente de cuerpos de agua superficiales o subterráneos) y agua verde (proveniente de lluvias).
Huella hídrica y sostenibilidad (Hoekstra et al., 2011)	Analizar cómo influyen las actividades humanas en la escasez hídrica y la polución para poder darles un enfoque más sostenible desde una perspectiva hídrica.	Cuantificación de los volúmenes de agua involucrados en la producción de bienes y/o servicios a través de la medición de agua azul, agua verde y agua gris (concepto incluido que se refiere al volumen de agua limpia que se requiere para asimilar contaminantes generados por las actividades involucradas en los procesos de producción).

Huella de agua (ISO 14046, 2014)	Analizar la huella hídrica de productos y/o servicios bajo el enfoque de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), considerando impactos en ecosistema, salud y recursos naturales.	Se procede bajo cuatro fases: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario de la huella de agua, evaluación del impacto de la huella de agua e interpretación de los resultados.
Metodología AWARE (Boulay et al., 2017)	Determinar la huella de escasez hídrica bajo los lineamientos de la norma ISO 14046 a través de la metodología AWARE (<i>Available WAter REmaining</i> , por sus siglas en inglés)	La huella de escasez hídrica se determina bajo un Análisis de Ciclo de Vida (ISO 14046) y la relación con los índices de escasez hídrica pre establecidos, obteniendo de esta manera, un volumen de agua equivalente que representa una cantidad de agua que deja de ser aprovechada para el consumo humano directo.

Nota: la tabla presenta información considerada como hito relevante dentro del desarrollo de los estudios ambientales relacionados a la cuantificación de huella hídrica. Durante el periodo de tiempo considerado, se han desarrollado, también, estudios complementarios que han ido aportando al desarrollo de esta evaluación ambiental. Elaboración propia basada en Rees (1992), Allan (1998), Hoekstra & Hung (2002), Hoekstra et. al (2011), ISO 14046 (2014) y Boulay et al. (2017).

El enfoque clásico de medición de huella hídrica se refiere a la cantidad de agua que se ha utilizado en la fabricación de algún producto o en la realización de alguna actividad económica determinada. Esta medición, bajo un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida, permite conocer los consumos de agua a través de la cadena de producción de un bien o servicio. La medición de la huella hídrica forma parte de los estudios de impacto ambiental que se realizan a todo nivel y permiten relacionar los niveles de consumo con el uso sostenible del agua. (ISO 14046, 2014).

Bajo este concepto, la infraestructura hidráulica a analizar se toma como un producto final que incluye los elementos construidos tales como canales, bocatomas, desarenadores, entre otros. A su vez, mediante un análisis de ciclo de vida (ACV), se determina la cadena de producción de estos elementos para poder estimar el valor de su huella hídrica clásica bajo el concepto propuesto por Chapagain y Hoekstra (2004). Con este análisis previo y los resultados obtenidos se establecen las relaciones correspondientes para la aplicación de la metodología AWARE.

5.4.1 Análisis de ciclo de vida de la infraestructura

Para el caso de análisis de ciclo de vida (ACV) de la infraestructura hidráulica, se definen elementos usados en un análisis de ciclo de vida ambiental (ACV-A) que incluyen recursos

tales como: energía, materia prima, agua, entre otros. (Chapagain, & Hoekstra, 2004). Se contemplan estos procesos dado que incluyen la mayor parte de la cadena de producción de los elementos estructurales. Este análisis hace énfasis en el uso del agua para poder calcular la huella hídrica clásica obteniendo de esta manera el volumen de agua consumido en la construcción de la infraestructura.

La importancia de este análisis recae en la posibilidad de identificar etapas del proceso de producción que pueden ser mejoradas para reducir el impacto ambiental de la construcción de este tipo de infraestructura. A su vez, este análisis puede ser replicado en futuros proyectos, independientemente de sus características y alcances. Para el caso de estudio se hace uso del software Simapro ® con el fin de realizar el análisis de ciclo de vida (ACV) de la infraestructura presente en el proyecto de irrigación.

5.4.2 Huella hídrica clásica

La huella hídrica clásica medida en la infraestructura a evaluar hace referencia a los volúmenes de agua utilizada para la realización de los proyectos (Chapagain, & Hoekstra, 2004). Los valores obtenidos muestran los niveles de huella hídrica azul (agua superficial y subterránea), verde (agua de lluvia almacenada en suelo) y gris (volumen de agua necesario para diluir contaminantes de agua afectada en el proceso) (Salmoral et al., 2012).

Estos volúmenes de agua, ligados al consumo a causa de la construcción de los elementos estructurales, se relacionan con los coeficientes de disponibilidad de agua establecidos por Ridoutt y Pfister (2010) en las regiones de estudio para que, de esta manera, haciendo uso de la metodología AWARE (Boulay et al., 2017), se obtengan los niveles de escasez a causa de la construcción de infraestructura hidráulica.

5.4.3 Metodología AWARE

Esta metodología tiene como objetivo relacionar los volúmenes de agua obtenidos, luego de realizar el análisis de ciclo de vida (ACV), con los factores de caracterización adecuados a AWARE (CF_{AWARE}). Este factor se obtiene de la relación y estandarización de los valores de disponibilidad, consumo, demanda hídrica de ecosistema y área, a través de las siguientes expresiones propuestas por Boulay et. al, 2017:

$$AMD = \frac{Availability - HWC - EWR}{Area} \quad (1)$$

$$ST_{ei} = \frac{1}{AMD_i} \quad (2)$$

$$CF_{AWARE} = \frac{ST_{ei}}{ST_{e\ world\ avg}} = \frac{\overline{AMD_i}}{AMD_i}$$

$$= \frac{AMD_{world\ avg}}{AMD_i}, \text{ for Demand} < \text{Availability} \quad (3)$$

$$CF_{AWARE} = Max$$

$$= 100, \text{ for Demand} \geq \text{Availability}$$

$$< 0.01 \times AMD_{world\ avg} \quad (4a)$$

$$CF_{AWARE} = Min = 0.1 \text{ for } AMD_i$$

$$> 10 \times AMD_{world\ avg} \quad (4b)$$

En la expresión (1) se tiene el valor AMD (*Availability Minus Demand*, por sus siglas en inglés), que relaciona la disponibilidad del recurso hídrico menos el volumen de consumo de agua humano, HWC (*Human Water Consumption*, por sus siglas en inglés) y el valor de requerimiento de agua del ecosistema, EWR (*Envinromental Water Requirement*, por sus siglas en inglés). Esta diferencia se la asocia con el área mediante una división simple de valores.

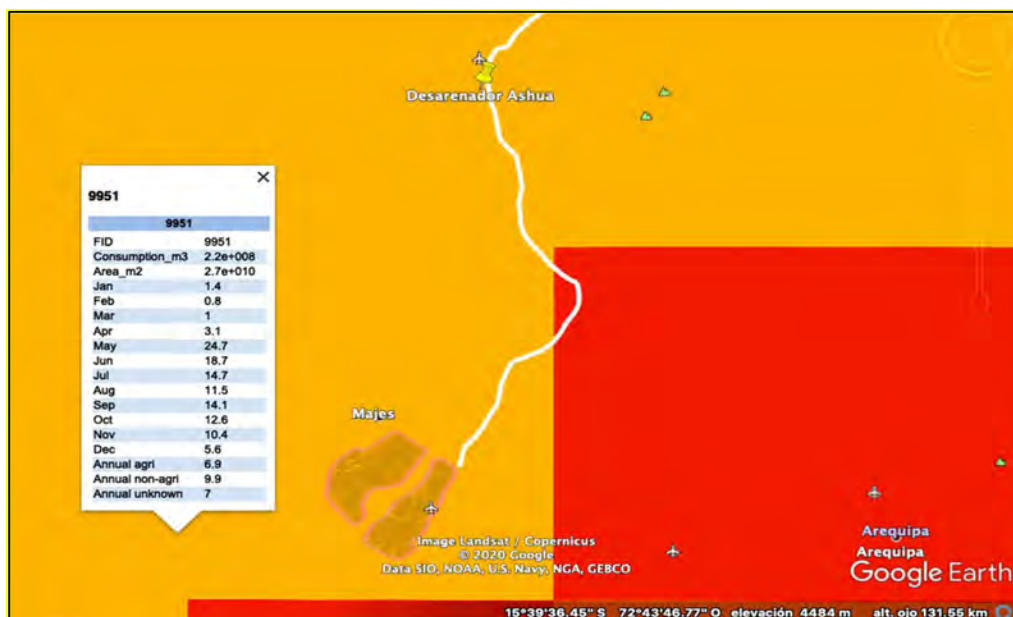
El valor de AMD se obtiene en unidades m^3/m^2 -mes, mientras que el valor inverso ST_e tiene unidades m^2 -mes/ m^3 y se puede interpretar como la superficie por mes equivalente para generar un metro cúbico de agua que deja de ser aprovechable (Boulay et al., 2017). Es decir, a mayor valor de ST_e , se indican mayores niveles de escasez de agua en la zona.

La estandarización se da mediante la relación entre el valor de AMD de la zona y el valor promedio mundial ($AMD_{world\ avg}$). El valor promedio global de AMD se estima en $0.0136 m^3/m^2$ -mes (Boulay et al., 2017). Mediante la estandarización de los valores inversos ST_e se garantiza la posibilidad de comparación de magnitudes de CF entre distintas zonas de estudio.

Los valores de caracterización se obtienen de las mediciones realizadas por el grupo de trabajo WULCA a través de una designación de acuerdo a las distintas zonas alrededor del mundo bajo el modelo WaterGAP (Alcamo et al., 2003). Para este estudio se tienen los siguientes valores en la zona del valle de Majes, mostrados a través de imagen satelital en la Figura 4:

Figura 4

Valores de los factores de caracterización en la zona de estudio provistos por WULCA.



Nota: Valores de los factores de caracterización para la zona de irrigación del proyecto Majes. Los valores a tomar en cuenta para los análisis son los valores “Annual agri” y “Annual non-agri” que hacen referencia a los valores correspondientes a las actividades agrícolas y no agrícolas respectivamente. Elaboración propia en base a la información provista por WULCA vía Google Earth.

En esta zona se tienen valores similares de CF para actividades agrícolas y no agrícolas. Esto debido a que la disponibilidad de agua para ambas actividades no está limitada para ningún caso de consumo en base a la información provista por WULCA. Los valores *Annual agri* y *Annual non-agri* representan los factores de caracterización determinados para actividades agrícolas y no agrícolas, respectivamente. Las actividades no agrícolas incluyen actividades de industria, manufactura y los servicios (Berdegué et al., 2000).

5.5 Formulación de impacto

Para estimar el impacto bajo el análisis de la metodología AWARE, se define la siguiente relación propuesta por Boulay et al. (2017):

$$Escasez = Consumo \times CF_{AWARE}$$

Esta expresión se basa en el concepto que establece que una cantidad de agua consumida en un área determinada implica un menor volumen de consumo disponible; es decir, existirá un mayor nivel de escasez (Boulay et al., 2017). Para el caso de estudio propuesto, esta relación de escasez está basada en los indicadores CF para la región y los volúmenes de agua consumidos a causa de la construcción del proyecto en mención. Estos volúmenes están relacionados con las cantidades de materiales usados durante su construcción, su proceso de fabricación y su puesta en obra.

5.6 Unidad funcional de estudio

El análisis propuesto está relacionado con el volumen de agua requerido para la construcción de infraestructura que permite habilitar zonas de riego y cultivo en regiones con escasez de precipitaciones. Dado que este proceso tiene como principal resultado nuevas áreas de riego, la unidad funcional está relacionada a la cantidad de agua utilizada para la habilitación de una determinada área de riego nueva en la zona. Es decir, la cantidad de agua necesaria para generar nuevas áreas de cultivo en la zona de estudio. La siguiente expresión representa la unidad funcional:

$$Unidad\ Funcional\ (UF) = \frac{Volumen\ de\ agua\ (m^3)}{Nueva\ área\ de\ riego\ (ha)}$$

5.7 Descripción del sistema de elementos estructurales

El análisis correspondiente requiere de la determinación de volúmenes de agua consumidos para la construcción de los elementos estructurales del proyecto Majes Etapa I. Para el caso de estudio, se consideran los siguientes componentes: Canales de regadío, Túneles, Bocatomas, Represas y Desarenadores. A continuación, se presenta una lista correspondiente de los elementos estructurales tomados a consideración para el análisis:

5.7.1 Infraestructura presente en el proyecto Majes Etapa I

El recorrido del agua inicia en la presa de Condoroma con la captación del agua de los ríos Condoroma, Parranca y Colca. Tras esto se tiene un recorrido aproximado de 100 kilómetros hasta su punto de distribución final en las zonas de cultivo del valle de

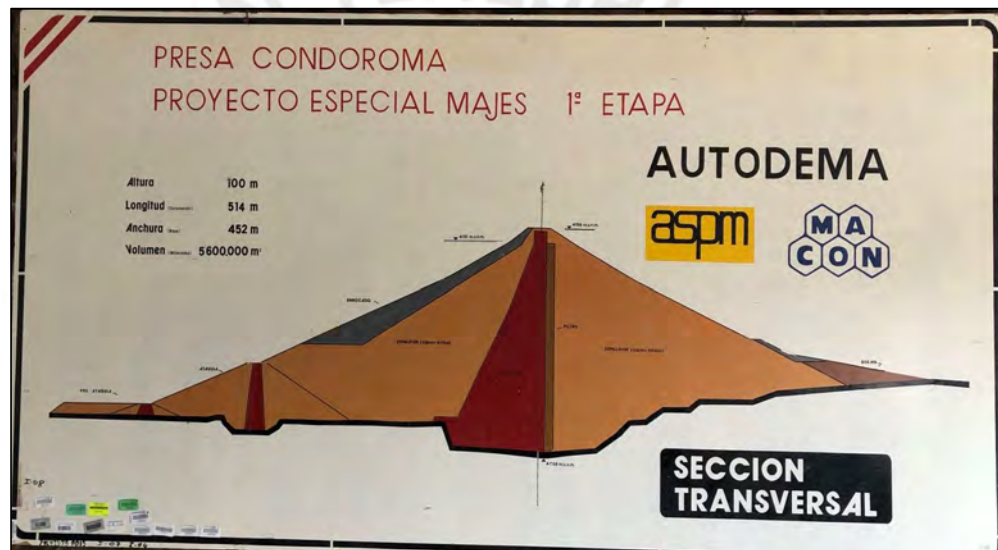
Majes. Las siguientes obras forman parte del recorrido del agua desde la represa de Condoroma hasta el punto de distribución en el valle de Majes:

- Represa de Condoroma: capacidad operativa de 285 Hm³

La represa de Condoroma es una presa de tierra que cuenta con un núcleo arcilloso que brinda una permeabilidad baja para que las filtraciones de la gran masa de agua no comprometan la estructura. En la Figura 5, se muestra un esquema general de la presa a partir de un corte transversal a la sección máxima de la presa:

Figura 5:

Esquema de la configuración de la presa Condoroma.

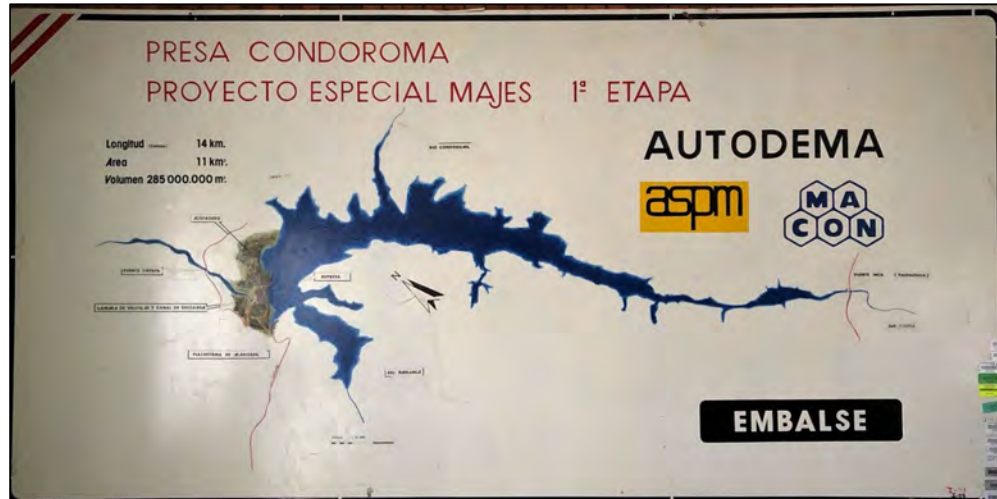


Nota: Corte transversal representativo de la presa Condoroma. Imagen propia tomada del panel informativo del campamento Condoroma – Autodema.

La presa cuenta con una altura de 100 metros, una longitud de corona de 514 metros, un ancho de base de 452 metros y un volumen de material de 5 600 000 metros cúbicos. Esta estructura permite almacenar un volumen de agua de 285 millones de metros cúbicos de agua captada de los ríos Condoroma, Parranca y Colca. En la Figura 6 se muestra el esquema del espejo de agua del embalse:

Figura 6:

Esquema del embalse de la presa Condoroma.



Nota: Embalse de la presa Condoroma. El espejo de agua cuenta con un área de 11 kilómetros cuadrados y un perímetro de 14 kilómetros. Imagen propia tomada del panel informativo del campamento Condoroma – Autodema.

El espejo de agua abarca una extensión de 11 kilómetros cuadrados de área y un perímetro de aproximadamente 14 kilómetros de longitud. Este volumen de agua es el recurso hídrico aprovechado por el valle de Majes. La Figura 7 muestra una fotografía tomada en la visita a campo desde la corona de la presa de Condoroma que muestra el espejo de agua del embalse:

Figura 7

Fotografía del embalse tomada desde la corona de la presa Condoroma.



Nota: Vista del embalse tomada desde la corona de la presa Condoroma. Fotografía propia tomada en la visita a las instalaciones de la presa Condoroma – Autodema.

La presa de Condoroma es el punto inicial del proyecto de irrigación Majes. A partir de este embalse, se controla el caudal requerido por el valle para abastecer los cultivos. Este caudal se regula a través de compuertas hidráulicas en base al requerimiento en las zonas de riego. El valor máximo de descarga, cuando ambas compuertas están abiertas en su totalidad, oscila entre 40 y 45 metros cúbicos por segundo; sin embargo, los volúmenes usuales de descarga oscilan entre 13 y 15 metros cúbicos por segundo. La Figura 8 muestra el proceso de descarga de agua desde la presa Condoroma a través de las compuertas hidráulicas:

Figura 8:

Fotografía de la salida de agua a través de las compuertas hidráulicas



Nota: salida de agua a través de las compuertas hidráulicas ubicadas en la parte posterior de la presa Condoroma. Este es el punto inicial de descarga y se regula de acuerdo a los requerimientos de riego solicitados en las zonas de cultivo. Fotografía propia tomada en la visita a las instalaciones de la presa Condoroma – Autodema.

De esta manera el volumen de agua requerido es enviado hacia la primera Bocatoma ubicada en Tuti, desde donde se deriva el agua a través de canales y túneles. El recorrido del agua desde la presa de Condoroma hasta la Bocatoma Tuti se da a

través del cauce del río Colca y la bocatoma regula el volumen requerido que luego será derivado hacia los túneles y canales.

- Bocatoma de Tuti: descarga de 15 m³/s

La Bocatoma ubicada en Tuti, representa el primer punto colector después del embalse de la Presa Condoroma. Esta estructura capta el agua que ha sido derivada desde Condoroma a través del cauce del río Colca. La estructura cuenta con una grúa de tipo pórtico de 25 toneladas, cuatro ataguías y dos *teckles* que se utilizan mediante un sistema hidráulico que controlan las compuertas. La Figura 9 muestra una fotografía frontal de la estructura:

Figura 9

Fotografía de la Bocatoma Tuti tomada desde el extremo derecho de la estructura



Nota: Bocatoma Tuti vista desde el extremo derecho de la estructura. Al final del puente de la bocatoma se ve el túnel que trasvasa el agua captada hacia los canales de derivación. Fotografía propia tomada en la visita a las instalaciones de la Bocatoma Tuti – Autodema.

La fotografía, además, muestra el túnel que da inicio a la derivación a través de canales subterráneos y descubiertos que llegan al siguiente punto de recolección en

la Bocatoma de Pitay. En promedio, el caudal derivado desde esta bocatoma es de 15 metros cúbicos por segundo; sin embargo, este varía de acuerdo a los requerimientos de las zonas de cultivo en el valle de Majes.

- Aducción Colca-Majes: 88 kilómetros de túneles y 12 kilómetros de canales

La Aducción Colca-Majes, hace referencia al recorrido que realiza el agua desde la Bocatoma de Tuti, ubicada en el valle del Colca, hasta la pampa de Majes. Este recorrido está compuesto por 88 kilómetros de túneles y 12 kilómetros de canales rectangulares de concreto armado de sección 4.0 x 6.0 m. El caudal transportado en promedio disminuye en aproximadamente 2 metros cúbicos desde que se inicia el recorrido en Tuti, debido a la evaporación y la pérdida por fricción en los canales. La Figura 10 muestra el punto inicial del recorrido de la aducción Colca-Majes:

Figura 10

Fotografía del inicio de recorrido de túneles y canales



Nota: inicio del recorrido de túneles y canales que transportan el agua desde Tuti hacia Majes. El punto inicial se ubica en Tuti. Fotografía propia tomada en la visita a las instalaciones de la Bocatoma Tuti – Autodema.

Los canales abiertos también forman parte del recorrido y se pueden apreciar a lo largo de la ruta entre Tuti-Pitay-Majes. Estos canales rectangulares de concreto

armado tienen un espesor aproximado de 40 centímetros y por ellos discurren un promedio de 14 metros cúbicos por segundo. Los canales conectan los túneles de trasvase con cauces naturales, estructuras y finalmente con los elementos de regadío en las zonas de cultivo. La Figura 11 muestra la salida de un canal subterráneo abierto ubicado en la ruta entre Tuti y Pitay:

Figura 11:

Fotografía de la salida de túnel de un canal subterráneo abierto



Nota: salida de túnel de un canal subterráneo en la ruta de Tuti hacia Pitay. Fotografía propia tomada en el recorrido de Tuti hacia Pitay.

- Bocatoma de Pitay: descarga de 14 m³/s
La Bocatoma ubicada en el distrito de Pitay, es el penúltimo paso que recorre el agua desde que parte de Condorama. Esta Bocatoma, a comparación de la de Tuti, cuenta con cuatro compuertas de barraje. Dos de tipo hidráulicas y dos de tipo deslizante. La estructura principal y el puente central cuentan con una longitud aproximada de 55 metros de longitud y 4 metros de ancho. Además, existen tres naves, de aproximadamente 60 metros, previas a la derivación por canal hasta la pampa de Majes. La Figura 12 muestra la bocatoma desde su parte posterior:

Figura 12

Fotografía de la Bocatoma Pitay



Nota: fotografía tomada desde la parte posterior de la estructura de la Bocatoma Pitay. Fotografía propia tomada en la visita a la Bocatoma Pitay.

De los catorce metros cúbicos por segundo que llegan a la Bocatoma, dos de ellos son derivados hacia el cauce natural para mantener el riego en la zona de Siguan; el resto es derivado a través de canales cubiertos y expuestos hasta el desarenador terminal previo a la Pampa de Majes. La Figura 13 muestra el inicio del recorrido del agua desde Pitay hasta el desarenador terminal:

Figura 13

Fotografía de la parte posterior de la Bocatoma Pitay



Nota: parte posterior de la Bocatoma Pitay. Fotografía tomada desde la parte posterior de la estructura. Fotografía propia tomada en la visita a la Bocatoma Pitay.

- **Desarenador Terminal:**

Previo al fin del recorrido del agua, en la Pampa de Majes se encuentra el desarenador terminal. Esta estructura cumple la función de regular los niveles de sedimentos en los canales. Para esto cuenta con cuatro naves de secciones de cuatro metros de ancho por cuatro metros de alto y con un largo de 40 metros. Cuenta también con dos pórticos de acero por los cuales se desplazan las grúas encargadas de abrir y cerrar las compuertas de cada nave. La Figura 14 muestra la distribución de la estructura:

Figura 14

Fotografía de la parte delantera del desarenador terminal



Nota: vista frontal del Desarenador Terminal desde donde se aprecian las cuatro naves y las dos ataguías que abren y cierran las compuertas hidráulicas. Fotografía propia tomada desde la parte posterior de la estructura.

El Desarenador terminal recibe un promedio de 12 metros cúbicos por segundo de agua derivada desde la Bocatoma Pitay. Dado que en este punto el agua se acumula y reduce su velocidad, el caudal mencionado se mantiene constante hasta el punto

en el que es derivado hacia la Pampa de Majes. Los sedimentos que se forman durante el proceso de flotación, son retirados periódicamente a través de una limpieza manual que se realiza a las naves mientras que el agua discurre a través de la salida mostrada a continuación en la Figura 15:

Figura 15

Fotografía de la salida de agua del desarenador terminal



Nota: Fotografía de la salida de agua del desarenador, tomada desde la parte posterior de la estructura. Fotografía propia tomada desde el puente central del desarenador terminal.

- Derivación Siguas hacia Pampa de Majes
Luego de terminar el recorrido en el desarenador, el caudal de agua recorre quince kilómetros de canales de sección rectangular de sección cuatro por seis (cuatro metros de base por cuatro metros de altura), con un espesor de pared de cuarenta centímetros. Este canal se distribuye por toda la zona para abastecer de agua a las hectáreas de cultivo habilitadas. La Figura 16 muestra un tramo del canal que va desde el desarenador terminal hasta los campos de cultivo en la Pampa de Majes:

Figura 16

Fotografía del canal que parte del desarenador terminal hasta las zonas de cultivo



Nota: canal abierto de concreto armado que va desde el Desarenador Terminal hasta la Pampa de Majes donde se distribuye el agua proveniente desde la presa de Condoroma. Fotografía propia tomada en la ruta entre Majes y el desarenador terminal.

La construcción de estos elementos estructurales, pertenecientes a la etapa I del proyecto Majes-Siguas, permitió la habilitación de riego tecnificado y el suministro continuo de agua. El desarrollo de la agricultura a gran escala logró que se habilitaran 15,950 hectáreas de zonas de cultivo en el valle de Majes, convirtiendo a la zona en un punto estratégico del desarrollo comercial en la región Arequipa.

5.8 Materiales de construcción empleados en el proyecto

Las cantidades de material utilizado en obra se determinaron a través de estimaciones en base a la información brindada por el gobierno regional y autoridades respectivas y, también, tras haber realizado un recorrido por los elementos estructurales correspondientes en una visita a campo. Asimismo, las cantidades típicas de materiales de construcción de proyectos de similares características también fueron tomadas en cuenta para establecer ratios que puedan aplicarse en este caso de estudio. Esta cuantificación de materiales muestra la cantidad de concreto, acero y el volumen de tierra removida en las excavaciones para cada una de las estructuras que componen al proyecto de irrigación de Majes.

Los proyectos utilizados para las estimaciones de materiales y dimensiones son los siguientes: Proyecto especial de irrigación e hidroenergético Alto Piura y la Derivación a Lima de las aguas de la cuenca alta del río Mantaro. Para cada uno de estos proyectos se consideraron las

cantidades de materiales mostradas en los expedientes técnicos provistos por Binnie & Partners (1976) y Gobierno Regional Piura (2015). Estos se relacionaron con la dimensión principal de cada uno de los elementos que componen el proyecto correspondiente para obtener un ratio aplicable a la situación del proyecto de irrigación de Majes.

Para este caso de estudio, se consideran ratios para el concreto, acero y movimiento de tierras. Cada uno de los volúmenes de estos materiales se ha dividido entre la altura del elemento estructural o su longitud, dependiendo de la dimensión principal de la estructura. Para el caso de la presa, se ha tomado la altura mientras que, para el desarenador, túnel y bocatoma, se han tomado en consideración sus longitudes. La Tabla 6 muestra los valores estimados obtenidos en base a los ratios que relacionan la dimensión principal de la estructura con las cantidades de material:

Tabla 6

Ratios de materiales usados en estructuras hidráulicas existentes en proyectos similares

Presa Carispaccha ⁽¹⁾		RATIO (C/A) ⁽²⁾ (m ³ /m)	RATIO (A/A) ⁽²⁾ (ton/m)	RATIO (M/A) ⁽²⁾ (m ³ /m)
Altura (m)	80.00			
Concreto (m ³)	2526.00	31.58	1.53	1400.00
Acero (ton)	122.50			
Mov. Tierras (m ³)	112000.00			
Desarenador ⁽¹⁾		RATIO (C/L) ⁽²⁾ (m ³ /m)	RATIO (A/L) ⁽²⁾ (ton/m)	RATIO (M/L) ⁽²⁾ (m ³ /m)
Longitud (m)	54.00			
Naves (glb)	1.00			
Ancho (m)	17.70			
Concreto (m ³)	3622.77	67.09	5.13	17.70
Acero (ton)	276.82			
Mov. Tierras (m ³)	955.80			
Túnel Transandino ⁽¹⁾		RATIO (C/L) ⁽²⁾ (m ³ /m)	RATIO (A/L) ⁽²⁾ (ton/m)	RATIO (M/L) ⁽²⁾ (m ³ /m)
Longitud (m)	12733.00			
Concreto (m ³)	24045.00	1.89	0.01	19.60
Acero (ton)	112.22			
Mov. Tierras (m ³)	249593.48			

	Bocatoma ⁽¹⁾	RATIO (C/L) ⁽²⁾ (m ³ /m)	RATIO (A/L) ⁽²⁾ (ton/m)	RATIO (M/L) ⁽²⁾ (m ³ /m)
Longitud (m)	40.00			
Alto (m)	6.00			
Concreto (m ³)	14255.00	356.38	13.30	1827.49
Acero (ton)	531.92			
Mov. Tierras (m ³)	73099.60			

Nota: ⁽¹⁾ la presa Carispaccha corresponde al proyecto de derivación de agua de la cuenca del río Mantaro mientras que el desarenador, túnel trasandino y bocatoma corresponden al proyecto hidroenergético del Alto Piura. ⁽²⁾ Las relaciones corresponden a la división entre la cantidad de material y la dimensión principal de la estructura. La expresión C/A relaciona volumen de concreto con altura, A/A peso de acero con altura, M/A volumen de movimiento de tierras con altura, C/L volumen de concreto con longitud central, A/L peso de acero con longitud central y M/L volumen de movimiento de tierras con longitud central. Elaboración propia basada en Binnie & Partners (1976) y Gobierno Regional Piura (2015)

La tabla muestra relaciones para cada uno de los materiales utilizados en la construcción de las mencionadas estructuras. La expresión C/A representa la relación Concreto/Altura, A/A representa Acero/Altura, M/A representa Movimiento de tierra/Altura, C/L representa Concreto/Longitud, A/L representa Acero/Longitud, M/L representa Movimiento de tierra/Longitud. De esta manera quedan establecidos los ratios entre volumen o peso de material con la dimensión principal de cada tipo de estructura.

Las estructuras del proyecto de irrigación de Majes han sido relacionadas con los valores de ratios de la Tabla N°5 para obtener la estimación de las cantidades de concreto, acero estructural y movimiento de tierras. La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos de la relación entre las dimensiones de las estructuras presentes con los ratios correspondientes a los proyectos de referencia:

Tabla 7

Cantidades de material en base a la relación de las dimensiones con ratios conocidos

Proyecto	Tipo de estructura	Concreto (m3)	Acero (ton)	Movimiento de tierras (m3)
Proyecto Majes	Represa de Condoroma	3157.50	153.13	5600000.00
Etapas I	Bocatoma de Tuti	19600.63	731.39	100511.95

Túneles (88 km.)	166179.22	775.57	1724984.39
Canales (13 km.)	11257.84	520.00	236149.69
Bocatoma de Pitay	19600.63	731.39	100511.95
Desarenador Terminal	10734.13	820.21	2832.00
Derivación Sigwas (15 km.)	12989.82	600.00	272480.41

Nota: cada una de las estructuras ha sido relacionada con el ratio correspondiente en base a los valores de los ratios de la Tabla 5. Elaboración propia basada en Binnie & Partners (1976) y Gobierno Regional Piura (2015)

Las cantidades de materiales representan, para cada uno de los proyectos, volúmenes de agua que han sido utilizados tanto en su fabricación como en su transporte y utilización en obra. Asimismo, se incluyen también equipamientos mecánicos principales presentes en la Represa de Condoroma, bocatomas de Tuti y Pitay y en el desarenador terminal. La Tabla 8 muestra un inventario simplificado de estos elementos:

Tabla 8

Inventario de equipos y elementos mecánicos principales

Estructura	Motor eléctrico (und)	Compuerta de hierro fundido (und)
Represa de Condoroma	1	2
Bocatoma de Tuti	2	6
Bocatoma de Pitay	2	6
Desarenador Terminal	2	10

Nota: el motor eléctrico por unidad representa el mecanismo presente en las grúas que operan en las estructuras para el funcionamiento de apertura y cierre de compuertas. Las compuertas de hierro fundido se han considerado de manera global; sin embargo, para cada estructura existen pesos diferentes especificados en el capítulo 7 Análisis de datos y modelamiento. Elaboración propia basada en visita a campo realizada.

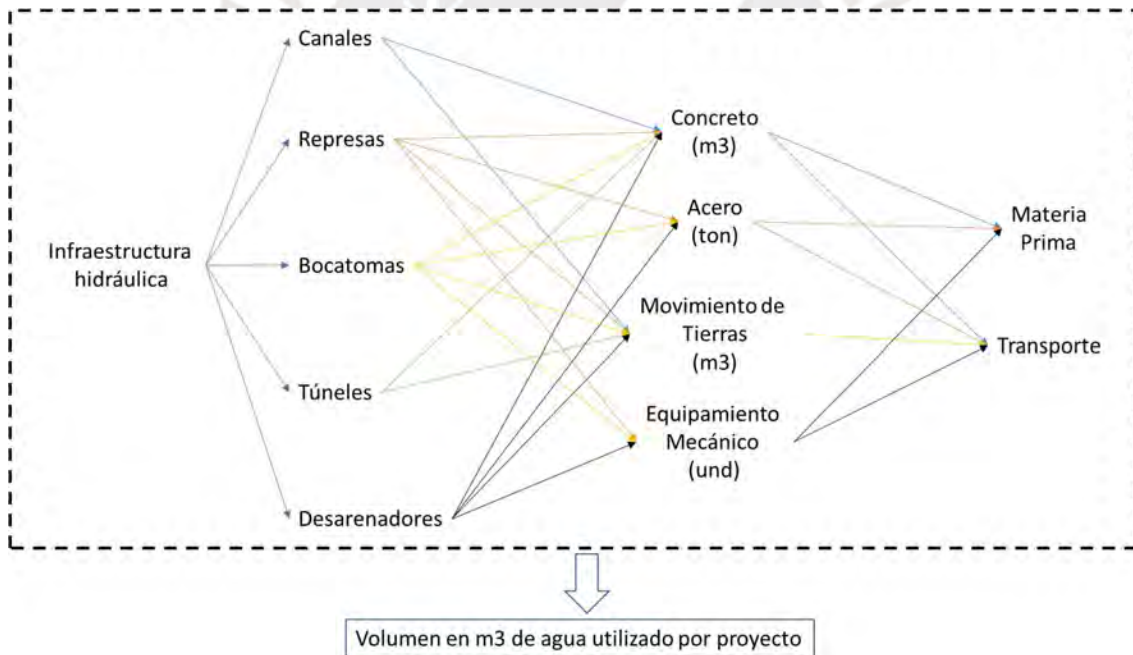
Para efectos del estudio, los análisis de consumo están hechos en el software SimaPro v9.1.0.8. Con este análisis de volúmenes de agua consumidos, se procede con la aplicación de la metodología AWARE (que se encuentra pre establecida en el software), para poder analizar los efectos de la construcción en la región de estudio.

5.9 Análisis de ciclo de vida del proyecto

Para el análisis de ciclo de vida del proyecto se consideran procesos determinados por la construcción de los elementos estructurales mencionados en la Tabla 7. Asimismo, se consideran los principales equipos mecánicos presentes en la presa, las bocatomas y el desarenador mencionados en la Tabla 8. Cada uno de estos elementos representa un proceso que involucra el uso de agua durante la fabricación y puesta en obra de los materiales involucrados en su construcción. Asimismo, se considera también el volumen de agua involucrado en los medios de transporte de materiales entre los distintos puntos de abastecimiento del proyecto. La Figura 17 muestra el esquema general de los procesos considerados para el estudio:

Figura 17

Esquema general del Análisis de Ciclo de Vida del proyecto de irrigación Majes



Nota: el esquema muestra la composición general para el Análisis de Ciclo de vida para el proyecto de irrigación Majes. Cada elemento estructural que lo conforma ha sido disgregado entre tres materiales básicos que los componen: concreto, acero y tierra removida. También se toman en cuenta los equipamientos mecánicos presentes. Elaboración propia.

Mediante el uso del software SimaPro 9.1.0.8, el proceso de construcción de la infraestructura hidráulica se modeló como resultado final compuesto por procesos individuales de cada

componente estructural que forma parte del proyecto. Cada elemento estructural, a su vez, está compuesto por sub procesos que contemplan la fabricación y puesta en obra de los materiales de construcción básicos. Estos materiales son el concreto, acero y la tierra removida y cada uno de ellos ha sido modelado de manera unitaria. Para el concreto se consideró un metro cúbico de material, para el acero una tonelada y para la tierra removida un metro cúbico de material mientras que para el equipamiento mecánico se consideran unidades de equipos.

Cada proceso de producción de material de construcción ha sido relacionado con los valores de metrados estimados para obtener un volumen total parcial de agua consumida en la construcción de cada elemento estructural. A su vez, mediante la suma de estos volúmenes parciales, se obtiene el volumen total del proyecto de irrigación Majes. Tras esto, el software permite la evaluación mediante el método AWARE para obtener un volumen de agua equivalente en base a un factor de caracterización promedio global. Finalmente, a través de la relación con el CF_{AWARE} , se obtiene el volumen total de agua equivalente debido a la construcción del proyecto, que representa el nivel de huella de escasez hídrica a causa de la construcción de esta infraestructura.

Cabe mencionar que la norma ISO 14046 contempla categorías consuntivas y degradativas relacionadas a la huella hídrica; sin embargo, el análisis de ciclo de vida propuesto abarca únicamente la categoría consuntiva. Esto es debido a las limitaciones y a la calidad de la información disponible para el presente estudio, así como también debido a las asunciones realizadas para las estimaciones de las cantidades de los materiales. Esta falta de información no permite abarcar la categoría de la huella hídrica de carácter degradativo.

6. Análisis de datos y modelado

La evaluación del proyecto ha sido realizada mediante la metodología AWARE a través del software SimaPro, mediante la versión pre establecida AWARE v 1.02 incluida en la versión 9.1.0.8 del software. De esta manera, el proyecto modelado ha sido analizado obteniéndose, para cada elemento, los valores correspondientes de consumo equivalente de agua. Estos resultados han sido relacionados también mediante relaciones simples para determinar indicadores de ecoeficiencia en base a los cultivos predominantes en la zona de estudio.

El inventario recopilado ha sido desagregado para cada uno de los elementos estructurales teniendo en cuenta que están conformados por materiales básicos. En este caso, los materiales considerados como la base del proceso constructivo son el concreto premezclado, acero estructural y tierra removida. Asimismo, para cada material y proceso se considera el transporte en un vehículo de carga promedio mundial. Cada uno de estos materiales básicos cuentan con una descripción establecida en la base de datos Ecoinvent 3, que está incluida en el software SimaPro.

Cada uno de los materiales y procesos de construcción han sido considerados del tipo *Allocation at the Point of Substitution* (APOS, por sus siglas en inglés) y también considerando procesos unitarios (U, por las siglas propuestas en la base de datos Ecoinvent 3). APOS representa un conjunto de procesos asignados a un producto final, que puede ser, por ejemplo, un metro cúbico de concreto o una tonelada de acero estructural mientras que la opción U ha sido elegida por la posibilidad de poder enlazar productos de manera lineal y unitaria. Cada material ha sido enlazado con su componente estructural y, finalmente, con el proyecto final tal como se muestra en la Figura 17.

6.1 Parámetros establecidos en software SimaPro – Materiales básicos

Para el caso del concreto premezclado, se optó por considerar concreto premezclado de 20 MPa para el mercado peruano por metro cúbico. Asimismo, se incluyó el transporte considerando un camión de transporte de carga genérico de características que se adecúan al promedio mundial bajo los estándares Euro 4. También se considera una distancia promedio de recorrido de 60 kilómetros para cada metro cúbico de concreto premezclado colocado en el proyecto en base al recorrido realizado en campo. La Figura 18 muestra la interfaz del software SimaPro

en la que se indican los procesos elegidos para tener un metro cúbico de concreto premezclado en la zona de Majes:

Figura 18

Parámetros que conforman el concreto premezclado considerado en la construcción del proyecto

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categoría	
Concreto Premezclado - Majes	1	m3	Volume	100 %		...\Obras	
(Insertar línea aquí)							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución			
Concrete, 20MPa {PE} market for concrete, 20MPa APOS, U		1	m3	Indefinido			
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS, U		60	tkm	Indefinido			

Nota: parámetros tipo APOS, U elegidos para la elaboración de un metro cúbico de concreto premezclado en la región de Majes. Se considera concreto premezclado de 20 MPa de manera comercial y un promedio de 60 kilómetros de distancia recorrida para cada metro cúbico de concreto. Elaboración propia vía software SimaPro.

Para el caso del acero estructural, se optó por considerar acero de refuerzo adecuado para el promedio mundial por tonelada. Asimismo, se incluyó el transporte considerando un camión de transporte de carga genérico de características que se adecúan al promedio mundial bajo los estándares Euro 4 con un recorrido promedio de 60 kilómetros hasta su puesta en obra. La Figura 19 muestra la interfaz del software SimaPro en la que se indican los procesos elegidos para tener una tonelada de acero de refuerzo en la zona de Majes:

Figura 19

Parámetros que conforman el acero estructural considerado en la construcción del proyecto

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categoría	
Acero de Refuerzo - Majes	1	ton	Mass	100 %	no definido	...\Obras	
(Insertar línea aquí)							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución			
Reinforcing steel {RoW} production APOS, U		1	ton	Indefinido			
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS, U		60	tkm	Indefinido			

Nota: parámetros tipo APOS, U elegidos para la elaboración de una tonelada de acero de refuerzo en la región de Majes. Se considera acero comercial y un promedio de 60 kilómetros de distancia recorrida para cada tonelada de material. Elaboración propia vía software SimaPro.

Para el caso de la tierra removida, se optó por considerar excavación mediante maquinaria hidráulica adecuada para el promedio mundial. Asimismo, se incluyó el transporte considerando un camión de transporte de carga genérico de características que se adecúan al promedio mundial bajo los estándares Euro 4 y un recorrido de 60 kilómetros para cada tonelada de material removido. La Figura 20 muestra la interfaz del software SimaPro en la que se indican los procesos elegidos para obtener un metro cúbico de tierra removida en la zona de Majes:

Figura 20

Parámetros que conforman un metro cúbico de tierra removida en la construcción del proyecto

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación ?	Tipo de residuo	Categori	
Movimiento de Tierras - Majes	1	m3	Volume	100 %		...\Obras	
(Insertar línea aquí)							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Min	Máx	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Min	Máx
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución			
Excavation, hydraulic digger {RoW} processing APOS, U		1	m3	Indefinido			
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS, U		60	tkm	Indefinido			

Nota: parámetros tipo APOS, U elegidos para la remoción de un metro cúbico de tierra en la región de Majes. Se considera el uso de maquinaria hidráulica de promedio mundial y 60 kilómetros de recorrido promedio por tonelada de material. Elaboración propia vía software SimaPro.

Para el caso de equipos mecánicos, se optó por considerar un elevador hidráulico adecuado para el promedio mundial. Asimismo, se incluyó el transporte considerando un camión de transporte de carga genérico de características que se adecúan al promedio mundial bajo los estándares Euro 4 con un recorrido promedio de 60 kilómetros hasta su puesta en obra. La Figura 21 muestra la interfaz del software SimaPro en la que se indican los procesos elegidos para tener un motor eléctrico en la zona de Majes:

Figura 21

Parámetros que conforman el motor eléctrico tipo elevador puesto en obra en Majes

Productos						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categoría
Motor eléctrico	1	p	Amount	100 %		...Obras
(Insertar línea aquí)						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx
(Insertar línea aquí)						
Entradas						
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Máx
(Insertar línea aquí)						
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución		
Elevator, hydraulic {GLO} market for elevator, hydraulic APOS, U		1	p			Indefinido
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS, U		60		tkm		Indefinido

Nota: parámetro tipo elevador hidráulico considerado como motor eléctrico encargado de la apertura y cierre de compuertas de hierro en las distintas estructuras del proyecto. Se considera un modelo promedio mundial y un promedio de 60 kilómetros de distancia recorrida para cada equipo hidráulico. Elaboración propia vía software SimaPro.

Para las compuertas de hierro fundido, se optó por considerar hierro fundido comercial por kilogramo como valor promedio mundial. Dependiendo de cada estructura, cada compuerta tiene un peso que varía entre 5 y 40 toneladas. Asimismo, se incluyó el transporte considerando un camión de transporte de carga genérico de características que se adecúan al promedio mundial bajo los estándares Euro 4 con un recorrido promedio de 60 kilómetros hasta su puesta en obra. La Figura 22 muestra la interfaz del software SimaPro en la que se indican los procesos elegidos para tener una compuerta de 10 toneladas de hierro fundido en Condorama:

Figura 22

Parámetros que conforman una compuerta de 10 toneladas en Condorama

Productos						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categoría
Compuerta de hierro fundido 10 ton - Condorama	1	p	Amount	100 %		...Obras
(Insertar línea aquí)						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx
(Insertar línea aquí)						
Entradas						
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Máx
(Insertar línea aquí)						
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución		
Cast iron {GLO} market for APOS, U		10000		kg		Indefinido
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS, U		60		tkm		Indefinido

Nota: parámetro tipo hierro fundido promedio mundial puesto en mercado listo para su distribución. Se considera un modelo promedio mundial y un promedio de 60 kilómetros de distancia recorrida para cada equipo hidráulico. Los tipos de parámetros se mantienen para cada peso de compuerta variando únicamente la cantidad de hierro fundido. Elaboración propia vía software SimaPro.

Las consideraciones de los materiales básicos para el proyecto de irrigación Majes toman en cuenta una distancia de abastecimiento promedio que se aproxima a los 60 kilómetros de recorrido. El recorrido de abastecimiento es variable de acuerdo con los puntos de ejecución de cada estructura; sin embargo, se considera, de acuerdo a los testimonios recopilados durante la visita de campo, que existen puntos principales de referencia para cada estructura que forman parte del proyecto. Estos puntos son las canteras, fábricas y plantas procesadoras que abastecieron de material a la construcción de cada sección del proyecto.

Para el caso del concreto premezclado, el acero y los equipamientos mecánicos, se tomaron en cuenta recorridos desde la ciudad de Arequipa hacia los distintos puntos del proyecto. De esta manera se consideraron 60 kilómetros de recorrido promedio de abastecimiento de estos materiales. De igual forma, para el caso de la tierra removida y los agregados, se consideraron canteras y botaderos cercanos; sin embargo, al manejar un gran volumen de material, se ha considerado una distancia también de 60 kilómetros de recorrido para la descarga.

6.2 Parámetros establecidos en software SimaPro – Elementos estructurales

Para cada uno de los elementos estructurales pertenecientes al proyecto, se establecieron cantidades de materiales en base al inventario de la Tabla 6 y Tabla 7. Asimismo, para cada elemento se determinó un procedimiento básico para la obtención de una unidad de producción. Cada uno de los elementos estructurales está compuesto por los materiales de construcción considerados (concreto y acero de refuerzo), por tierra removida durante su construcción y por equipos mecánicos principales considerados.

Para la represa de Condorama, se consideró como unidad a la estructura final construida con concreto premezclado, acero de refuerzo y tierra removida. En este caso, la tierra removida representa el volumen total de suelo usado en la construcción del núcleo arcilloso de la presa, mientras que el concreto está presente en la pantalla externa de la presa y en las sub estructuras presentes. También se tomó en cuenta la presencia de dos compuertas de 10 toneladas y un motor eléctrico. La Figura 23 muestra los procesos considerados y las cantidades de material consideradas en la interfaz del software SimaPro para la Represa de Condorama:

Figura 23

Procesos considerados para la construcción de la represa de Condorama

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categori	
Represa de Condorama (Insertar línea aquí)	1	p	Amount	100 %		...\Obras	
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)			Cantidad	Ud.	Distribución		
Concreto Premezclado - Majes			3157.5	m3	Indefinido		
Acero de Refuerzo - Majes			153.13	ton	Indefinido		
Movimiento de Tierras - Majes			5600000	m3	Indefinido		
Motor eléctrico			1	p	Indefinido		
Compuerta de hierro fundido 10 ton - Condorama			2	p	Indefinido		

Nota: procesos considerados para la construcción de la represa Condorama y sus cantidades de materiales en base a la información mostrada en la Tabla 6 y Tabla 7. Se consideran los procesos pre establecidos de manera unitaria con sus cantidades de material correspondiente. Elaboración propia vía software SimaPro.

Para la bocatoma Tuti, se consideró como unidad de producción la estructura final construida con concreto premezclado, acero de refuerzo, tierra removida y equipamiento mecánico. El volumen de tierra removida hace referencia a la cantidad removida para la construcción de la cimentación del dique, mientras que el concreto y el acero corresponden a la estructura principal de la bocatoma y sus sub estructuras. Asimismo, se consideraron dos motores eléctricos, dos compuertas de 40 toneladas y cuatro compuertas de 5 toneladas. La Figura 24 muestra la interfaz del software SimaPro con los procesos considerados y las cantidades de material correspondientes:

Figura 24

Procesos considerados para la construcción de la bocatoma Tuti

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categori	
Bocatoma de Tuti (Insertar línea aquí)	1	p	Amount	100 %		...\Obras	
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^DS	Min	Máx
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)			Cantidad	Ud.	Distribución		
Concreto Premezclado - Majes			19600.63	m3	Indefinido		
Acero de Refuerzo - Majes			731.39	ton	Indefinido		
Movimiento de Tierras - Majes			100511.95	m3	Indefinido		
Motor eléctrico			2	p	Indefinido		
Compuerta de hierro fundido 40 ton - Tuti			2	p	Indefinido		
Compuerta de hierro fundido 5 ton ataguías - Tuti			4	p	Indefinido		

Nota: procesos considerados para la construcción de la bocatoma Tuti y sus cantidades de material en base a la información de la Tabla 6 y Tabla 7. Se consideran los procesos pre establecidos de manera unitaria con sus cantidades de material correspondiente. Elaboración propia vía software SimaPro.

Para los túneles se consideró como unidad de producción un kilómetro de estructura final construida con concreto premezclado y acero de refuerzo. La tierra removida hace referencia a la cantidad de material que fue removido durante la perforación y excavación del espacio en el que se construyeron los túneles. La Figura 25 muestra los procesos considerados, las cantidades de material y la longitud total del túnel dividiendo cada una de las cantidades:

Figura 25

Procesos considerados para la construcción de un kilómetro de túnel

Productos						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de res	
Túneles	1	km	Length	100 %		
(Insertar línea aquí)						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	
(Insertar línea aquí)						
Entradas						
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín
(Insertar línea aquí)						
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)			Cantidad	Ud.		
Concreto Premezclado - Majes			121440/88 = 1.38E3	m3		
Movimiento de Tierras - Majes			5000000/88 = 5.68E4	m3		

Nota: procesos considerados para la construcción de un kilómetro de túnel y sus cantidades de material en base a la información de la Tabla 6. Se consideran los procesos pre establecidos de manera unitaria con sus cantidades de material correspondiente. Elaboración propia vía software SimaPro.

Para la bocatoma Pitay, se consideró como unidad de producción la estructura final construida con concreto premezclado, acero de refuerzo, tierra removida y equipamiento mecánico. El volumen de tierra removida hace referencia a la cantidad removida para la construcción de la cimentación del dique, mientras que el concreto y el acero corresponden a la estructura principal de la bocatoma y sus sub estructuras. Asimismo, se consideraron dos motores eléctricos, cuatro compuertas de 40 toneladas y seis compuertas de 5 toneladas. La Figura 26 muestra los procesos considerados y las cantidades de material consideradas:

Figura 26

Procesos considerados para la construcción de la bocatoma Pitay

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categoría	
Bocatoma de Pitay	1	p	Amount	100 %		...\Obras	
(Insertar línea aquí)							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Min	Max	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Min	Max
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)			Cantidad	Ud.	Distribución		
Concreto Premezclado - Majes			19600.63	m3	Indefinido		
Acero de Refuerzo - Majes			731.39	ton	Indefinido		
Movimiento de Tierras - Majes			100511.95	m3	Indefinido		
Motor eléctrico			2	p	Indefinido		
Compuerta de hierro fundido 40 ton - Pitay			4	p	Indefinido		
Compuerta de hierro fundido 5 ton ataguías - Pitay			6	p	Indefinido		

Nota: procesos considerados para la construcción de la bocatoma Pitay y sus cantidades de material en base a la información de la Tabla 6 y Tabla 7. Se consideran los procesos pre establecidos de manera unitaria con sus cantidades de material correspondiente. Elaboración propia vía software SimaPro.

Para los canales trapezoidales, se consideró como unidad de producción el kilómetro de estructura final construida con concreto premezclado y acero de refuerzo. La tierra removida hace referencia a la cantidad de material removido durante la excavación de las trincheras sobre las que se construyeron los canales. La Figura 27 muestra los procesos, las cantidades de material consideradas y la longitud total de los canales (13 kilómetros) dividiendo las cantidades de material:

Figura 27

Procesos considerados para la construcción de un kilómetro de canal trapezoidal

Productos						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de res	
Canales	1	km	Length	100 %		
(Insertar línea aquí)						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Min	
(Insertar línea aquí)						
Entradas						
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Min
(Insertar línea aquí)						
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)			Cantidad	Ud.		
Concreto Premezclado - Majes			11257.84/13 = 866	m3		
Movimiento de Tierras - Majes			236149.69/13 = 1.82E4	m3		
Acero de Refuerzo - Majes			520/13 = 40	ton		

Nota: procesos considerados para la construcción de un kilómetro de canal y sus cantidades de material en base a la información de la Tabla 6. Se consideran los procesos pre establecidos de manera unitaria con sus cantidades de material correspondiente. Elaboración propia vía software SimaPro.

Para el desarenador terminal se consideró como unidad de producción la estructura final construida con concreto premezclado, acero de refuerzo. La tierra removida hace referencia a la cantidad de material removido durante la excavación previa a la construcción de las naves del desarenador mientras que el equipo mecánico considerado contempla dos motores eléctricos y diez compuertas de dos toneladas. La Figura 28 muestra los procesos considerados y las cantidades de material correspondientes:

Figura 28

Procesos considerados para la construcción del desarenador terminal

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categoría	
Desarenador Terminal	1	p	Amount	100 %		...\Obras	
(Insertar línea aquí)							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)				Cantidad	Ud.	Distribución	
Acero de Refuerzo - Majes				820.21	ton	Indefinido	
Concreto Premezclado - Majes				10734.13	m3	Indefinido	
Movimiento de Tierras - Majes				2832	m3	Indefinido	
Motor eléctrico				2	p	Indefinido	
Compuerta de hierro fundido 2 ton - Desarenador				10	p	Indefinido	

Nota: procesos considerados para la construcción del desarenador terminal y sus cantidades de material en base a la información de la Tabla 6 y Tabla 7. Se consideran los procesos pre establecidos de manera unitaria con sus cantidades de material correspondiente. Elaboración propia vía software SimaPro.

Para los canales de derivación de Siguas, se consideró como unidad de producción un kilómetro de estructura final construida con concreto premezclado y acero de refuerzo. La tierra removida hace referencia a la cantidad de material removido durante la excavación de las trincheras sobre las que se construyeron los canales. La Figura 29 muestra los procesos, las cantidades de material consideradas y la longitud total de los canales (15 kilómetros) dividiendo las cantidades de material:

Figura 29

Procesos considerados para la construcción de un kilómetro de canal trapezoidal de derivación

Productos						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación ?	Tipo de res	
Canal de Derivación Siguas	1	km	Length	100 %		
(Insertar línea aquí)						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	
(Insertar línea aquí)						
Entradas						
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín
(Insertar línea aquí)						
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)			Cantidad	Ud.		
Concreto Premezclado - Majes			12989.82/15 = 866	m3		
Movimiento de Tierras - Majes			272480.41/15 = 1.82E4	m3		
Acero de Refuerzo - Majes			600/15 = 40	ton		

Nota: procesos considerados para la construcción de un kilómetro de canal de derivación y sus cantidades de material en base a la información de la Tabla 6. Se consideran los procesos pre establecidos de manera unitaria con sus cantidades de material correspondiente. Elaboración propia vía software SimaPro.

Cada estructura determinada por sus metrados de materiales y sus subprocesos de materiales básicos correspondientes conforman el proyecto de infraestructura total. La bocatoma de Tuti, la represa de Condoroma, la bocatoma de Pitay, el desarenador terminal, los túneles y los canales de derivación conforman el proyecto de irrigación Majes etapa I. Para el caso de los túneles y canales, cada proceso ha sido considerado como la cantidad total de su recorrido. En la Figura 30 se muestra el proceso general considerado para la construcción del proyecto Majes:

Figura 30

Procesos considerados para la construcción del proyecto de irrigación Majes

Productos						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación ?	Tipo de residuo	Categor
Proyecto Majes	1	p	Amount	100 %		...\Obra
(Insertar línea aquí)						
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx
(Insertar línea aquí)						
Entradas						
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín
Water, river, PE	in ground	1	m3	Indefinido		
(Insertar línea aquí)						
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)			Cantidad	Ud.	Distribución	
Bocatoma de Tuti			1	p	Indefinido	
Represa de Condoroma			1	p	Indefinido	
Túneles			88	km	Indefinido	
Canales			13	km	Indefinido	
Bocatoma de Pitay			1	p	Indefinido	
Canal de Derivación Siguas			15	km	Indefinido	
Desarenador Terminal			1	p	Indefinido	

Nota: procesos considerados para la construcción de del proyecto Majes. Para el caso de los túneles y canales, al ser analizados de manera unitaria, se consideraron como cantidades totales al recorrido final. Elaboración propia vía software SimaPro.

Con este proceso modelado se tiene la información representada en la Figura 17 en el software SimaPro. Este modelo de análisis de ciclo de vida representa todos los procesos considerados para la construcción del proyecto de irrigación Majes etapa I. La delimitación de los alcances de los procesos y las cantidades de materiales están en base a la disponibilidad de la información y a las observaciones realizadas durante la visita a campo de cada uno de los elementos estructurales.

6.3 Modelamiento de información:

El proyecto ha sido evaluado mediante la metodología AWARE versión 1.02 disponible en el software SimaPro 9.1.0.8 para una unidad de proyecto. El software permite realizar un análisis de los procesos involucrados en la construcción del proyecto teniendo consideraciones limitadas por la base de datos EcoInvent 3. Se han considerado a los materiales de construcción y la tierra removida, así como los equipos de construcción considerados y los medios de transporte de materiales, como elementos promedio a nivel local (si el valor está disponible) o global. Asimismo, cada proceso básico de materiales y equipos ha sido designado como APOS, U para poder enlazar cada uno de manera lineal hacia el producto final de producción representado por el proyecto de construcción final.

Esta versión del software SimaPro incluye un valor promedio mundial de factor de caracterización (CF) igual a 24.93 para todos los procesos. Debido a esto, los resultados obtenidos han sido normalizados dividiéndolos por este valor y luego han sido multiplicados por el factor de caracterización correspondiente a la zona de estudio mostrado en la Figura 4. Esta normalización permite obtener un resultado más adecuado al entorno geográfico del estudio debido a que se usa el factor de caracterización local. Los resultados y los análisis obtenidos, representan volúmenes de agua equivalente utilizados en la construcción del proyecto de irrigación Majes etapa I.

Tras obtener los resultados de los volúmenes de agua utilizados en la construcción del proyecto, estas cantidades han sido relacionadas con las características de los cultivos predominantes en la zona de estudio. De esta manera se establecieron indicadores de ecoeficiencia para determinar qué cultivos son más eficientes desde el punto de vista hídrico y económico. Con

estos resultados se tiene información que permite establecer indicadores para la promoción de ciertos cultivos que permitan una mayor rentabilidad o eficiencia hídrica.

7. Análisis de resultados

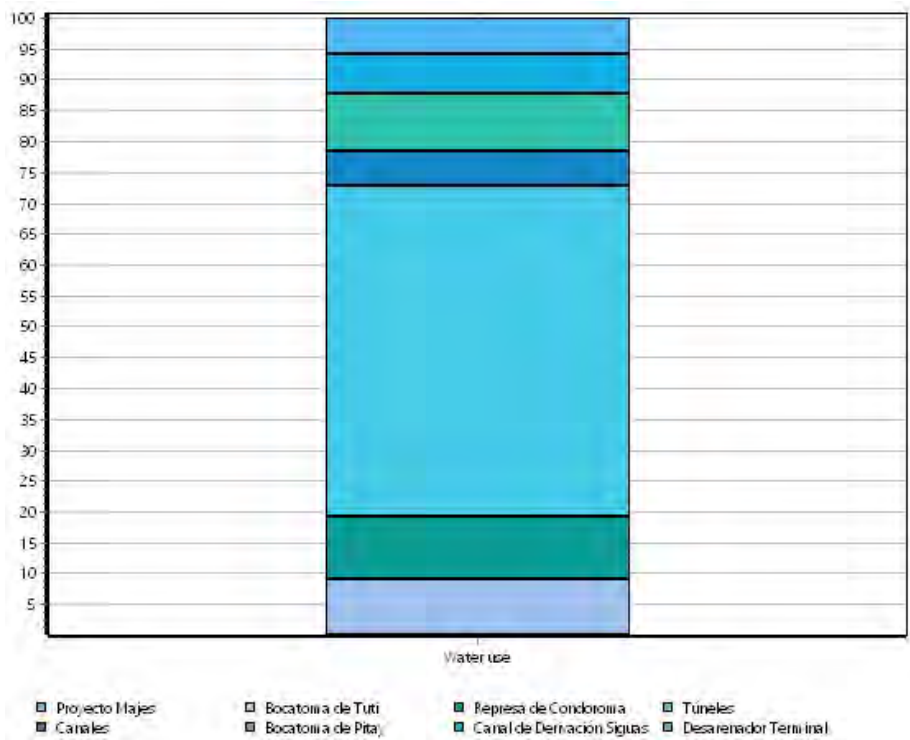
Los resultados obtenidos están ligados a un análisis de ciclo de vida que contempla la categoría consuntiva únicamente. Estos resultados también contemplan oportunidades de mejora hacia futuros estudios si es que se tienen consideraciones adicionales en las delimitaciones de los factores de caracterización. Asimismo, teniendo en cuenta que la influencia directa del desarrollo de este proyecto de infraestructura se da en la agricultura, se han obtenido indicadores de ecoeficiencia para tener un panorama más amplio de este alcance. El análisis detallado de los resultados se presenta a continuación:

7.1 Volúmenes de agua obtenidos:

En base al modelamiento propuesto, para cada elemento estructural se tiene un volumen de agua equivalente estandarizado bajo el valor del factor de caracterización nacional estimado (de acuerdo con el modelo WaterGAP establecido por WULCA) en 24.93. Este valor hace referencia al factor de caracterización ligado a actividades no agrícolas y ha sido obtenido por el software SimaPro con el promedio simple de cada uno de los valores de acuerdo al mapa establecido por WULCA en todo el territorio nacional. La Figura 31 muestra los resultados gráficos obtenidos del software SimaPro para el proyecto Majes para cada uno de sus elementos estructurales de manera consolidada:

Figura 31

Porcentajes de agua estandarizada para cada estructura del proyecto Majes



Nota: porcentajes de volúmenes de agua estandarizada para cada elemento estructural que compone el proyecto Majes. El gráfico muestra la distribución de porcentajes de volumen correspondiente de manera proporcional a su contribución en el proyecto. Elaboración propia vía software SimaPro.

En la Figura 31 se aprecia que el mayor consumo en el proyecto Majes está ligado a la construcción de los túneles que trasvasan el agua a través de las montañas. Esto va de acorde a la cantidad de material utilizado para su construcción y con las grandes dimensiones de este elemento. Asimismo, cabe mencionar que los resultados no incluyen la utilización de equipos de construcción importante para este elemento tales como perforadoras o excavadoras hidráulicas por lo que el impacto hídrico puede llegar a ser de una mayor dimensión.

Estos resultados dan una estimación de las cantidades de agua equivalente consumida para cada uno de los componentes estructurales del proyecto de manera gráfica. El análisis cuantitativo también se obtuvo de los resultados del software SimaPro en función de los volúmenes de agua estandarizada consumida. La Tabla 9 muestra los volúmenes de agua estandarizada de consumo con el factor de caracterización 24.93 para cada elemento que conforma el proyecto Majes:

Tabla 9

Volúmenes de agua estandarizada consumidos por cada elemento en el proyecto Majes

Estructura	Uso de agua estandarizada (hm ³)
Bocatoma de Tuti	3,27
Represa de Condorama	3,65
Túneles	19,17
Canales	2,03
Bocatoma de Pitay	3,29
Canal de Derivación Sigwas	2,34
Desarenador Terminal	2,06
Total Proyecto Majes	35,83

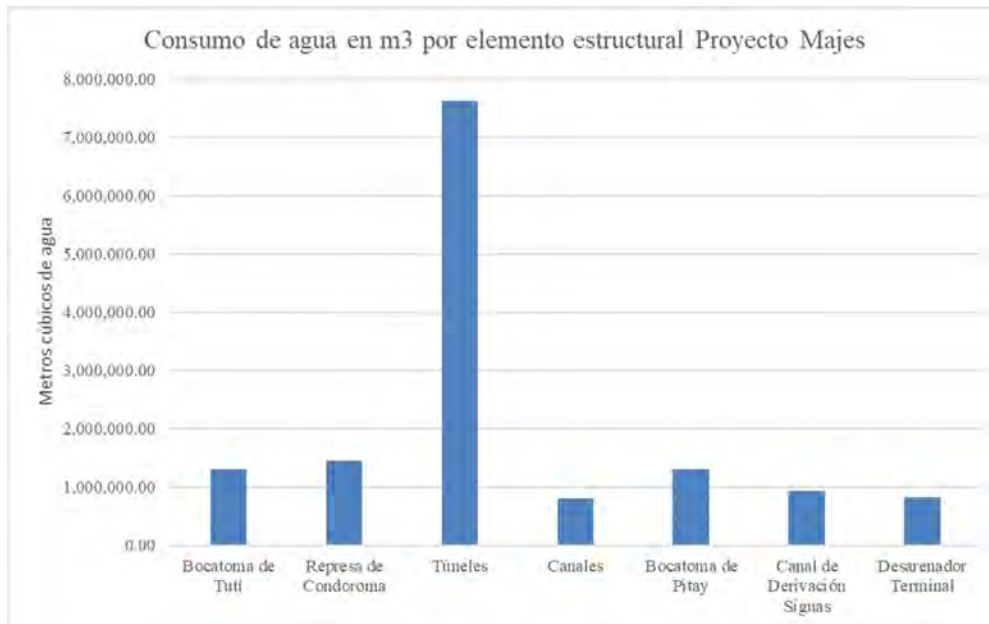
Nota: los valores mostrados en la tabla, representan volúmenes de agua estandarizada (en hectómetros cúbicos) bajo el factor de caracterización promedio mundial equivalente a 24.93. El volumen Total Proyecto Majes representa la suma de los volúmenes parciales correspondientes a cada una de las estructuras que componen el proyecto. Fuente: propia basada en información del software SimaPro.

El volumen total de agua equivalente, de acuerdo con el análisis realizado mediante el software SimaPro, es de un total de 35.83 millones de metros cúbicos de agua. Este volumen contempla la suma de agua equivalente consumida por cada estructura que compone el proyecto.

Las estructuras que componen el proyecto representan un consumo similar entre elementos del mismo tipo, como por ejemplo las bocatomas y canales, debido a que los materiales usados en su construcción, provienen de la misma región considerada. Asimismo, de acuerdo con las dimensiones y el alcance, los túneles representan la mayor cantidad de agua consumida en su construcción. La Figura 32 muestra un comparativo gráfico mediante barras que representan los volúmenes de agua estandarizada por cada estructura:

Figura 32

Gráfico comparativo de volumen de agua estandarizada consumida por estructura



Nota: volúmenes de agua estandarizada para cada elemento estructural que compone el proyecto Majes. El gráfico muestra la comparación mediante barras de los volúmenes parciales del proyecto. Elaboración propia vía software SimaPro.

7.2 Estimación de la escasez:

Al integrarse los volúmenes, estos son multiplicados por el factor de caracterización promedio de 24.93 para obtener el volumen total de agua. Tras esta operación, es necesario establecer la relación correspondiente con el factor de caracterización de la zona de estudio que es igual a 9,90 y se obtiene el impacto característico del proyecto en base a la caracterización de la zona. De manera general se puede establecer el procedimiento mencionado a través de las siguientes relaciones:

$$\text{Volumen total de agua (m3)} = \frac{\text{Volumen total CFpromedio mundial (m3)}}{\text{CFpromedio nacional}}$$

$$\text{Escasez} = \text{Volumen total de agua (m3)} \times \text{CFcorrespondiente}$$

La Tabla 10 muestra que existe un consumo total aproximado de 1.44 millones de metros cúbicos de agua que se utilizaron para la construcción del proyecto Majes. Este volumen de agua representa el uso de recursos hídricos de la zona que están siendo dejados de utilizar para el consumo humano directo. Al relacionar este volumen con el factor de caracterización local, se obtiene el valor total de escasez a raíz del consumo de agua a consecuencia de la construcción del proyecto Majes.

Tabla 10*Valores de consumo total de agua estandarizada, consumo total y escasez por unidad de área*

Consumo Total de Agua (hm ³) = Total Agua Equivalente / CF (Promedio Mundial) ⁽¹⁾	Escasez = Consumo Total de Agua x CF Majes ⁽²⁾	Escasez por unidad de área (m ³ /ha) ⁽³⁾
1,44	14,23	948.59

Nota: ⁽¹⁾ El Consumo Total de Agua en metros cúbicos se obtuvo al dividir el volumen Total Proyecto Majes presente en la Tabla 9 entre el factor de caracterización promedio mundial. ⁽²⁾ El valor de la Escasez se obtuvo al multiplicar el Consumo Total por el factor de caracterización local de la zona de estudio (Majes) que cuenta con un valor de 9.90. ⁽³⁾ La escasez por unidad de área se obtuvo mediante la división entre el valor de la escasez entre el área de riego habilitada estimada en 15, 000 hectáreas. Fuente: propia basada en información del software SimaPro.

El valor total de escasez es de aproximadamente 14.23 millones de metros cúbicos de agua en la zona. Esto quiere decir que la zona de influencia del proyecto Majes ha dejado de disponer de este volumen de agua para el consumo humano directo. Para efectos de este estudio, la unidad funcional establecida relaciona la escasez total entre el área de cultivo para determinar el impacto hídrico por hectárea cultivada. Al realizar esta operación, se tiene que cada hectárea habilitada contribuyó aproximadamente con 948 metros cúbicos de agua a la escasez de agua en la zona de estudio.

Cabe mencionar que esta relación está sujeta a variaciones con las próximas ampliaciones en los terrenos de irrigación. Por ejemplo, si en la segunda etapa del proyecto Majes se logran habilitar 17, 000 hectáreas más de terreno, la escasez aportada por una hectárea de terreno disminuirá; sin embargo, ese análisis estará sujeto a una nueva evaluación de impacto hídrico en el caso de haber sido involucrada nueva infraestructura de riego y será necesario establecer nuevos parámetros de estudio que vayan de acuerdo con el nuevo alcance del proyecto.

De esta manera, los resultados obtenidos demuestran que el volumen de escasez depende en gran medida de dos factores claves: el área de terreno habilitada para cultivo y el factor de caracterización. Para el primer factor se disponen de relaciones directas que pueden brindar nuevos resultados de manera inmediata; sin embargo, el valor del factor de caracterización de la zona se mantendría sin variación por lo que, a raíz de esta observación, se han propuesto

maneras alternativas que permitan determinar un valor de factor de caracterización más adecuado con cada situación de estudio.

7.3 Comparación de métodos de estimación de factores de caracterización:

Debido a que el factor de caracterización está en función a un modelo global (modelo WaterGAP), esto implica que exista un margen de error considerable en cuanto a la precisión de los estudios de medición de huella de escasez hídrica modificada mediante el método AWARE. Para garantizar un resultado más exacto se han desarrollado métodos alternativos que toman en consideración factores locales como el caso de estudio realizado en Australia propuesto por Bontinck et al (2021), en el que se establecen parámetros locales en base a un sistema de información geográfico local de las cuencas y la compilación de datos meteorológicos. Esto permitió una recopilación de factores de caracterización mensuales y anuales más de acorde con las regiones determinadas de estudio, dando como resultado una estimación de la escasez menor en un orden del 35 por ciento en comparación al método AWARE tradicional debido a su mayor precisión en los datos obtenidos.

Otro método alternativo, propuesto por Kaewmai et al (2019), plantea que se debería hacer una jerarquización en base al requerimiento de uso de agua en la zona de estudio determinada. Esto permite establecer un orden prioritario de acuerdo a los requerimientos hídricos en la zona. Tras esto, se establece una relación con el modelo de WaterGAP, con lo que se obtienen factores de caracterización que van más de acorde con la realidad de consumo local. De esta manera se pueden determinar periodos en los que se pueden priorizar consumos de acuerdo a cada sector con el fin de disminuir los niveles de escasez hídrica en las zonas de análisis.

Por otro lado, Sanchez-Matos et al (2023), presenta una metodología basada en criterios establecidos por la delimitación de unidades hidrológicas (HU, por sus siglas en inglés), uso de datos hidrológicos provistos por entidades oficiales y propuesta de valores de factores de caracterización (CF) para agua subterránea. Bajo esta metodología, se logran obtener resultados más adecuados a la realidad de la costa árida peruana en donde se muestra, por ejemplo, un mayor nivel de escasez entre los meses de junio a octubre, coincidiendo con la disminución de las lluvias en las zonas andinas del país.

Asimismo, Andrade et al (2019), presentan una regionalización de los factores de caracterización (CF) en base a unidades estatales hidrográficas (SHU, por sus siglas en inglés)

y por regiones hidrográficas (HR, por sus siglas en inglés). Estos factores de caracterización fueron comparados con los índices de escasez propuestos por la Agencia Nacional de Aguas de Brasil (ANA, por sus siglas en portugués) y con los propuestos por WULCA, teniendo como resultado una mayor precisión entre los obtenidos por el estudio y los índices de escasez propuestos por ANA en regiones semi áridas de Brasil. La Tabla 11 muestra un resumen de los criterios generales para poder obtener los factores de caracterización mencionados:

Tabla 11

Criterios de evaluación para obtener valores de factores de caracterización

	Método AWARE (WULCA)	Caso Australiano (Bontick et al 2021)	Caso Tailandés (Kaewmai et al 2019)	Caso Peruano (Sanchez-Matos et al 2023)	Caso Brasileño (Andrade et al, 2019)
Criterio 1	Factor de caracterización por unidad de área (en una cuenca) relativo al promedio mundial.	Factor de caracterización basado en información de geografía y cuencas locales.	Factor de caracterización en base a la importancia de requerimiento hídrico en las zonas de estudio.	Factor de caracterización basado en unidades hidrológicas (HU) a nivel nacional.	Factor de caracterización basado en unidades hidrológicas (HU) y regiones hidrográficas (HR) a nivel nacional.
Criterio 2	El factor de caracterización está en función de la disponibilidad, consumo humano, consumo del ecosistema y el área de estudio.	El factor de caracterización está basado en función de la cuenca, uso doméstico, industrial y agrícola.	El factor de caracterización considera los tipos de consumo y los divide por prioridades de acuerdo a la zona de estudio.	El factor de caracterización es específico para agua subterránea y permite estimar su variación en el tiempo de acuerdo con las condiciones hidrológicas.	Factor de caracterización relacionado con índices de escasez provistos por ANA.
Criterio 3	Los valores de los factores de caracterización están predeterminados en regiones pre establecidas por WULCA a nivel global mediante el modelo de WaterGAP.	Los valores de los factores de caracterización están agrupados en valores mensuales y anuales para cada cuenca usando el método AWARE.	Los valores de los factores de caracterización están en función del valor promedio mundial (mediante el modelo de WaterGAP) y el consumo de agua jerarquizado en base a la importancia del sector en la región de estudio.	El factor de caracterización está basado en la información provista por entidades oficiales sobre agua subterránea e incluye un análisis para escenarios futuros afectados por el cambio climático.	El factor de caracterización se calcula para identificar las regiones con mayores niveles de escasez hídrica.

Nota: los criterios mostrados están en base a las investigaciones realizadas por el equipo de WULCA, Bontick, P. et al, Kaewmai, R et al, Sanchez-Matos et al y Andrade et al, que relacionan los factores de caracterización en base a criterios más adecuados a las realidades locales de estudio con el fin de

reducir el margen de error de las estimaciones de los factores de caracterización. Fuente: propia basada en información de WULCA, Bontick, P. et al (2021), Kaewmai, R. (2019), Sanchez-Matos y Andrade et al (2019).

En el caso del presente estudio, se pueden estimar nuevos factores de caracterización utilizando los criterios mostrados en la Tabla 11, que se adecúen mejor a la situación de la zona de estudio. De esta manera se podría optar por elegir una combinación de criterios que permitan obtener un valor de factor de caracterización que represente de manera más acertada la situación del consumo hídrico en la zona del valle de Majes. Así se obtendrían resultados con una mayor precisión a nivel local y regional (Arequipa), que es precisamente, una de las deficiencias en información en regiones de países en vías de desarrollo (Moraes et al., 2022); sin embargo, este nuevo análisis formaría parte de un estudio nuevo que va más allá del alcance de la presente investigación.

7.3 Indicadores de ecoeficiencia:

Por otro lado, se puede determinar la eficiencia del volumen de agua que se abastece al valle de Majes estableciendo relaciones entre el caudal requerido en base a los cultivos de la zona. Para realizar estas comparaciones, es necesario revisar los datos de costos de producción provistos por la Gerencia Regional de Agricultura del Gobierno Regional de Arequipa (2015). En el Anexo B se encuentra el resumen de los cultivos de la provincia de Caylloma, al cual pertenece el distrito de Majes, con sus valores de costos de producción, rendimientos por hectárea, requerimiento hídrico anual, precio de chacra y sus respectivos valores normalizados con los que se obtuvieron relaciones comparativas.

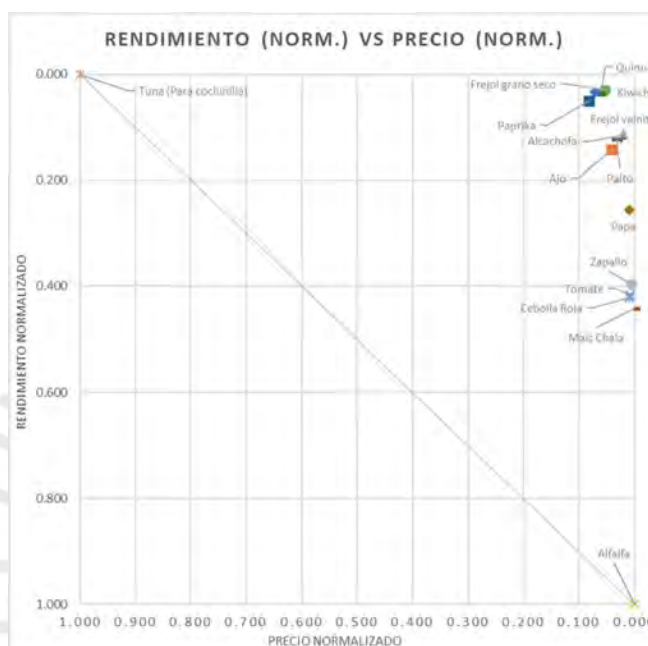
De acuerdo con los valores mostrados en el Anexo B, para garantizar la producción de los cultivos en la zona, se requiere un caudal aproximado de 15.67 metros cúbicos por segundo. Este valor puede ir variando durante el año dependiendo de las condiciones meteorológicas y de los requerimientos en las zonas de cultivo. Sin embargo, el proyecto de irrigación Majes garantiza, de acuerdo con los datos recopilados en campo, hasta 30 metros cúbicos por segundo; sin embargo, durante los años de funcionamiento se han requerido, en promedio, 14 metros cúbicos por segundo en promedio durante el año.

En cuanto a los indicadores de ecoeficiencia, se obtuvieron tres relaciones entre los rendimientos por hectárea, precios de venta en chacra y requerimiento hídrico por hectárea de cultivo en base al listado provisto por el Gobierno Regional de Arequipa. La primera de las

relaciones está representada en la Figura 33, que establece una relación entre los valores normalizados de rendimiento de cultivo por hectárea y los precios de chacra en la zona de estudio:

Figura 33

Comparación normalizada entre rendimientos de cultivo y precios en chacra en Majes



Nota: se muestran las etiquetas de los cultivos considerados principales en la zona de estudio. Los valores de rendimiento por hectárea y precio en chacra han sido normalizados en una escala del 0.000 al 1.000 para poder ser comparados. Elaboración propia mediante información provista por el Gobierno Regional de Arequipa (2015).

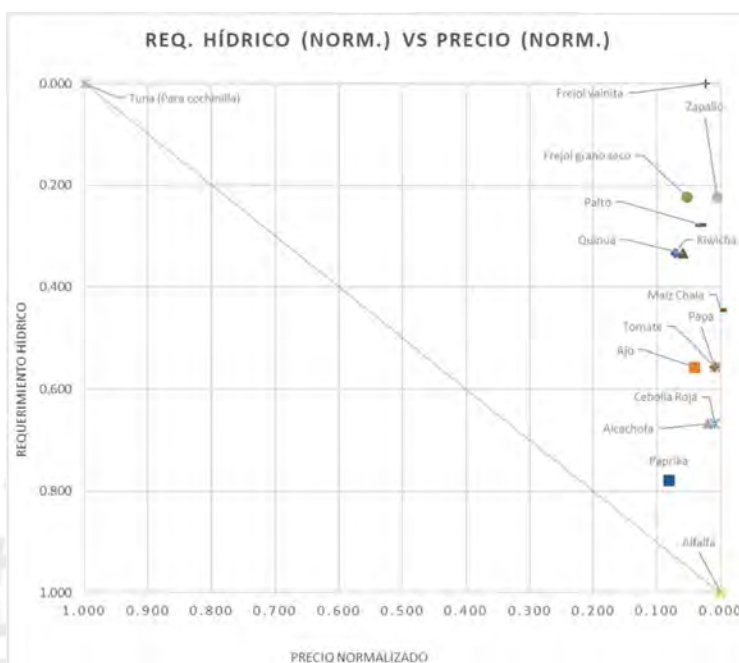
La Figura 33 muestra que los diferentes cultivos tienen diferente relación entre su rendimiento por hectárea normalizado y su precio en chacra normalizado. En los extremos se puede ver cómo la tuna para cochinilla tiene el rendimiento por hectárea más bajo; sin embargo, su precio en chacra es el más elevado. Por otro lado, la alfalfa cuenta con el mayor rendimiento de los cultivos, pero, en comparación con la tuna para cochinilla, su precio es mucho menor. Los demás cultivos muestran indicadores variados en los que se puede destacar el caso de la paprika puesto que cumple con la condición de tener una mayor cotización frente a un rendimiento relativamente mayor comparado a los demás cultivos.

La siguiente relación planteada establece un comparativo entre el requerimiento hídrico normalizado por hectárea y el precio de chacra de los cultivos señalados. Esta relación permite

analizar qué tanpreciado es el cultivo frente a la cantidad de agua requerida para que pueda cumplir con su periodo vegetativo. La Figura 34 muestra el comparativo de ambos valores normalizados:

Figura 34

Comparación normalizada entre requerimiento hídrico y precios en chacra en Majes



Nota: se muestran las etiquetas de los cultivos considerados principales en la zona de estudio. Los valores de requerimiento hídrico por hectárea y precio en chacra han sido normalizados en una escala del 0.000 al 1.000 para poder ser comparados. Elaboración propia mediante información provista por el Gobierno Regional de Arequipa (2015).

En la Figura anterior se muestran dos valores extremos: tuna para cochinilla y alfalfa. Al igual que en el caso previo, ambos cultivos se encuentran en extremos opuestos. La tuna para cochinilla, en este caso, requiere un menor volumen de agua por hectárea en comparación al resto de los cultivos y también es el cultivo con mayor precio de chacra. En el caso opuesto, la alfalfa es el cultivo que requiere mayor cantidad de agua y que está menos cotizado a comparación de los demás cultivos. Por otro lado, los demás cultivos mantienen un requerimiento hídrico variable mientras que presentan valores de precio de chacra normalizados entre el 0.0 y 0.1 únicamente.

La tercera relación planteada compara los valores normalizados de requerimiento hídrico y el rendimiento por hectárea de cada uno de los cultivos listados en el Anexo B. Ambos valores,

al igual que los casos anteriores, han sido normalizados para poder ser comparados en una misma escala. La Figura 35 muestra el gráfico comparativo de ambas cantidades:

Figura 35

Comparación normalizada entre requerimiento hídrico y rendimiento normalizado en Majes



Nota: se muestran las etiquetas de los cultivos considerados principales en la zona de estudio. Los valores de requerimiento hídrico por hectárea y rendimiento por hectárea han sido normalizados en una escala del 0.000 al 1.000 para poder ser comparados. Elaboración propia mediante información provista por el Gobierno Regional de Arequipa (2015).

La Figura 35 muestra la relación entre los requerimientos hídricos y los rendimientos normalizados. En este caso, al igual que en los casos anteriores, se tiene a la tuna para cochinilla y a la alfalfa ubicados en extremos opuestos del gráfico. Por un lado, la tuna para cochinilla se muestra como el cultivo que requiere un menor volumen de agua y que cuenta con un rendimiento menor en comparación a los demás cultivos. Por su parte, la alfalfa cumple con ser el cultivo que requiere más volumen de agua y que rinde más por hectárea. Los demás cultivos cumplen relaciones variadas entre las que destaca el caso del zapallo, dado que este cultivo tiene un rendimiento elevado en comparación a los demás cultivos y, a su vez, requiere un menor volumen de agua siendo solo superado (en este aspecto) por el frejol vainita y la tuna para cochinilla.

8. Comentarios y conclusiones

La huella de escasez hídrica medida mediante el método AWARE del proyecto de irrigación de Majes, representa un valor que permite estimar el impacto hídrico a raíz de la construcción de este conjunto de estructuras. Los valores obtenidos muestran un volumen importante de agua involucrado en la construcción de este proyecto de infraestructura. Estos resultados van de acorde al alcance de esta obra hidráulica y permiten representar los aportes a la escasez del agua en la región de estudio.

Es importante señalar que el presente estudio está limitado únicamente a las obras de concreto, concreto armado, remoción de tierras y equipos correspondientes a elementos hidráulicos en determinadas estructuras. Para esto se tomó en cuenta la fabricación, puesta en obra y aplicación de concreto, acero y tierra removida en base a ratios estimados de cantidades de materiales. Para asegurar el impacto total de cada uno de los proyectos, es necesario ahondar más en los inventarios detallados, así como también en los detalles constructivos y logísticos para ambos casos.

En cuanto al impacto ambiental asociado al uso agrícola, es necesario delimitar el objeto de estudio de tal manera que se puedan relacionar los términos presentes en este análisis. De esta manera se puede establecer una relación entre el caudal aportado por cada proyecto a las zonas de irrigación y los niveles de escasez generados por la construcción de la infraestructura hidráulica correspondiente a cada zona de estudio. Por otro lado, se pueden relacionar estos resultados con parámetros ligados a impactos geográficos dado que la construcción de este proyecto ha representado una alteración importante de la geografía local y regional.

De igual manera, resultaría pertinente realizar un estudio de impacto socioeconómico dado el gran alcance del proyecto, con la finalidad de establecer indicadores ambientales y sociales que permitan una mejor gestión de la construcción de este tipo de infraestructura. Así también se tendrían índices de desarrollo socioeconómico ligados a la agricultura en zonas en las que, previo a la construcción de estos proyectos, no existían zonas de agricultura masiva y tecnificada.

Con los resultados obtenidos se pueden establecer indicadores adaptativos que puedan escalar para este tipo de infraestructura tomando en cuenta valores promedios para proyectos que se

construyan en zonas similares a las estudiadas. Por ejemplo, en el caso de que se desarrolle un proyecto hidráulico en la costa norte peruana, se pueden comparar niveles de consumo de agua en base a los niveles de escasez generada por hectárea de terreno habilitada. Este método de evaluación puede ser aplicado también a otro tipo de infraestructura hidráulica como es el caso de las centrales hidroeléctricas, las cuales se muestran como futuros proyectos en las ampliaciones del proyecto de irrigación Majes en su segunda etapa. En este caso, por ejemplo, se propondría una relación de metro cúbico de escasez entre una unidad de producción energética.

Un sistema de indicadores estaría basado en la unidad funcional establecida en el presente estudio. Es decir, tener como referencia el valor $948.59 \text{ m}^3/\text{ha}$ en el planeamiento de construcción de futuros proyectos de irrigación en la costa sur. Si la nueva construcción de un proyecto se realizara en una zona distinta, únicamente se tendría que adecuar el valor del factor de caracterización en base a la distribución propuesta por WULCA. La finalidad de estos indicadores es la de controlar los niveles de escasez generados por nuevos proyectos de infraestructura; es decir, mantener por debajo los niveles de escasez en futuras construcciones mediante una mejora en los procesos implicados en la cadena de producción desarrollada en los Análisis de Ciclo de Vida.

El primer resultado, ligado a la huella hídrica clásica, brinda valores cuantitativos no comparables debido a que la zona de estudio cuenta con características hidrológicas únicas debido a la demanda y la disponibilidad local de agua. Esto; sin embargo, puede estar sujeto a consideraciones distintas si es que se toman en cuenta factores de caracterización para cada zona del proyecto o si, por ejemplo, se considera que el factor de caracterización corresponde a la fuente del agua mas no al destino. Esto corresponde con la precisión limitada propuesta en los factores de caracterización propuestos por Pfister (2010), que considera valores basados en relaciones con indicadores promedio mundiales, dejando de lado la precisión local.

La metodología AWARE permite conocer niveles de escasez originados a raíz de la construcción de este proyecto. De esta manera es posible comparar la situación de la industria de la construcción en distintas zonas del país. Esto resulta importante teniendo en cuenta que los niveles de estrés hídrico están en aumento en las zonas costeras del país debido al aumento poblacional y a la mayor demanda de agua para consumo directo e indirecto. Asimismo, conocer este nivel de impacto es fundamental para establecer metodologías de construcción

más sostenible en los próximos años teniendo como principal premisa el cuidado de los recursos hídricos.

En cuanto a los indicadores de ecoeficiencia presentados, se puede observar que existen cultivos más rentables que otros y que, además, requieren un menor volumen de agua para poder completar su periodo vegetativo. Por ejemplo, la tuna para cochinilla representa un cultivo altamente cotizado en el mercado y que requiere el menor volumen de agua en comparación a los demás cultivos. Por otro lado, la alfalfa es un cultivo cuyo precio en el mercado es mucho menor; sin embargo, posee un gran rendimiento de producción por hectárea. Por lo tanto, esta información permite determinar cuáles son los cultivos más convenientes en base a los distintos requerimientos del mercado y a las oportunidades propias de los recursos en las zonas de trabajo.

Dentro de los valores e indicadores obtenidos, uno que resalta y relaciona la información analizada y recopilada en campo, es el caudal requerido para cumplir con la demanda de los cultivos a lo largo del año. Este valor, obtenido luego de sumar cada caudal requerido por cultivo, es de aproximadamente 15.67 metros cúbicos por segundo y garantiza el cumplimiento del periodo vegetativo de todos los cultivos mencionados. Este caudal fue confirmado durante la visita al proyecto realizada durante el mes de noviembre del 2021, en la que los operadores indicaron que el requerimiento promedio de caudal de agua oscila entre 11 a 18 metros cúbicos por segundo, dependiendo de la situación del clima en el valle.

El presente estudio refleja la capacidad de la metodología AWARE para poder contrarrestar los elevados consumos de recursos debido a la construcción de la infraestructura. Esta metodología, apoyada en estudios de análisis de ciclo de vida, junto con los indicadores de ecoeficiencia, son herramientas que se presentan como opciones viables y efectivas relacionadas a la reducción del impacto ambiental en un país tan vulnerable frente al cambio climático como lo es el Perú.

9. Bibliografía

Akan, M. Ö. A., Dhavale, D. G., & Sarkis, J. (2017). *Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain*. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1195-1207.

Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., & Siebert, S. (2003). Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), 317-337.

Allan, J.A. (1998) Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits. *Ground Water*, 36, 545-546. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02825.x>

Andrade, E.P., de Araújo Nunes, A.B., de Freitas Alves, K. *et al.* Water scarcity in Brazil: part 1—regionalization of the AWARE model characterization factors. *Int J Life Cycle Assess* 25, 2342–2358 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01643-5>

Berdegúe, J., Reardon, T. & Escobar, G. (2000, 20 de marzo). *Empleo e Ingreso Rurales No Agrícolas en América Latina y el Caribe*. [Conferencia]. Development of the Rural Economy and Poverty Reduction in Latin America and the Caribbean, New Orleans, Estados Unidos de América. <https://web.worldbank.org/archive/website01066/WEB/IMAGES/EMPLEOEI.PDF>

Binnie & Partners Ingenieros Consultores. (1976). Derivación de aguas de la cuenca alta del río Mantaro a Lima – Estudio de Factibilidad – Informe Final (Volumen 6). Recuperado de <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/1651>

Bontinck, P.-A., Grant, T., Kaewmai, R., & Musikavong, C. (2021). Recalculating Australian water scarcity characterisation factors using the AWARE method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(8), 1687–1701. doi:10.1007/s11367-021-01952-8

Boulay, A. M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., ... & Ridoutt, B. (2017). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368-378.

Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y. (2004). *Water footprints of nations*. (Value of Water Research Report Series; No. 16). Unesco-IHE Institute for Water Education.

Chemistry World. (marzo de 2008). *The concrete conundrum*.
https://www.rsc.org/images/Construction_tcm18-114530.pdf

Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., & Klüppel, H.-J. (2006). The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2), 80–85. doi:10.1065/lca2006.02.002

Gerbens-Leenes, W., Berger, M., & Allan, J. (2021). *Water Footprint and Life Cycle Assessment: The Complementary Strengths of Analyzing Global Freshwater Appropriation and Resulting Local Impacts*. *Water*, 13(6), 803. <https://doi.org/10.3390/w13060803>

Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y., & Bosman, R. (2018). The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass. *Water resources and industry*, 19, 1-12.

Gestión. (17 de marzo de 2019). Macroconsult: Los proyectos de irrigación y la necesidad de destrabar. <https://gestion.pe/opinion/macroconsult-proyectos-irrigacion-necesidad-destrabar-261532-noticia/#:~:text=Existen%20cuatro%20proyectos%20de%20irrigaci%C3%B3n,y%20mejorar%C3%ADan%20otras%2069%20mil.>

Gobierno Regional de Arequipa – Costos de producción (2015). Gerencia Regional de Agricultura. Recuperado de <https://www.agroarequipa.gob.pe/index.php/agricol/costos-de-produccion>

Gobierno Regional Piura – Proyecto Especial de Irrigación e Hidroenergético Alto Piura. (2015). Expediente técnico actualizado – Componente I: “Construcción de la presa tronera sur y del túnel trasandino del proyecto especial de irrigación e hidroenergético del alto Piura” (Tomo I). Recuperado de peihap.gob.pe/documentos_up/ResumenEjecutivoExpTecEnEjecucion.pdf

Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM (2011). The water footprint assessment manual: setting the global standard. *Water Footprint Network*. Enschede, The Netherlands

Hoekstra, A.Y. & Hung, P.Q. (2002). Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Value of Water Research Report Series No. 11*, IHE, Delft, the Netherlands.

Holloway Houston Inc. (19 de febrero de 2018). *Importance of construction industry in the economy and use of construction equipments*. <https://www.hhilifting.com/importance-of-construction-industry-in-the-economy-and-use-of-construction-equipments/#:~:text=Construction%20is%20an%20important%20sector,as%20well%20as%20education%20sector.>

Huella Hidrica-Red de Ciclo de Vida (s.f.). Recuperado de <https://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/sobre-la-red-ciclo-de-vida/herramientas-de-gestion%20empleadas/huella-hidrica/>

ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.

ISO 14044:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.

ISO 14046:2014 Environmental management -- Water footprint -- Principles, requirements and guidelines

Kaewmai, R., Grant, T., Eady, S., Mungkalasiri, J., & Musikavong, C. (2019). Improving regional water scarcity footprint characterization factors of an available water remaining (AWARE) method. *Science of The Total Environment*, 681, 444–455.

Lyon, C., Saupe, E. E., Smith, C. J., Hill, D. J., Beckerman, A. P., Stringer, L. C., ... & Aze, T. (2022). *Climate change research and action must look beyond 2100*. *Global Change Biology*, 28(2), 349-361.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science advances*, 2(2), e1500323.

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (s.f.). *Clima de la sierra y la selva*. Sector agrario. Recuperado de <https://www.midagri.gob.pe/portal/53-sector-agrario/el-clima/370-clima-de-la-sierra-y-selva>

Moraes, A. G. D. L., Watkins, A. H., Brecheisen, Z., Bowling, L. C., Pinto Cáceres, J. P., Novoa, H. M., & Cherkauer, K. A. (2023). The fast-changing climate reality of Arequipa, Peru. *International Journal of Climatology*, 43(2), 979-995.

Núñez, M., Bouchard, C. R., Bulle, C., Boulay, A. M., & Margni, M. (2016). Critical analysis of life cycle impact assessment methods addressing consequences of freshwater use on ecosystems and recommendations for future method development. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(12), 1799-1815.

Obras de Irrigación – Optimización Distribución Presurizada. (s.f.). Recuperado de <https://siga.regionlambayeque.gob.pe/docs/imgfckeditor/Proyecto%20de%20Irrigacion%20Omos%20presentacion%20obras%20de%20riego.pdf>

Oxford Academics, Marsh & GuyCarpenter. (setiembre de 2021). *Future of construction: a global forecast for construction to 2030*. https://info.marsh.com/l/395202/2021-09-21/bzfrbg/395202/1632316334A3Hl3W1k/The_Future_of_Construction_ExecSum_71167_1856_FINAL_Sep22_.pdf

Petrakopoulou, F., Robinson, A., & Olmeda-Delgado, M. (2020). *Impact of climate change on fossil fuel power-plant efficiency and water use*. *Journal of Cleaner Production*, 122816. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122816

Pires dos Santos, C., Da Silva, S. & Cerqueira, C. (2015). *Water consumption in construction sites in the city of Recife/PE*. *EJGE*, 20, 1711-1726.

Pontificia Universidad Católica del Perú. (setiembre de 2017). *Observatorio laboral: Informe de Análisis Sectorial: Sector Construcción*. https://cdn01.pucp.education/btpucp/2019/07/25201725/l2_sector-construccion_vf_23-10-2017.pdf

Proyecto Especial Majes Sigwas-Autodema (enero, 2016). Arequipa. Recuperado de http://www.regionarequipa.gob.pe/Cms_Data/Contents/GobRegionalArequipaInv/Media/ParticipacionCiudadana.PresupuestoParticipativo/2017/EXPOSICIONES/sitacion-de-majes-siguas-avances-y-beneficios.pdf

Proyecto Especial Majes Sigwas-Autodema (mayo, 2017). Arequipa. Recuperado de <https://www.autodema.gob.pe/historia/>

Rees, W. E. (1992). Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 4(2), 121-130. <https://doi.org/10.1177/095624789200400212>

Ridoutt, B. G., & Pfister, S. (2010). A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Global Environmental Change*, 20(1), 113-120.

Sanchez-Matos, J., Andrade, E.P. & Vázquez-Rowe, I. Revising regionalized water scarcity characterization factors for selected watersheds along the hyper-arid Peruvian coast using the AWARE method. *Int J Life Cycle Assess* 28, 1447–1465 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02195-5>

Salmoral, G., Dumont, A., Aldaya, M. M., Rodríguez-Casado, R., Garrido, A., & Llamas, M. R. (2012). *Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir*. Fundación Marcelino Botín.

Salmoral, G., Zegarra, E., Vázquez-Rowe, I., González, F., del Castillo, L., Saravia, G.R., Graves, A., Rey, D., Knox, J.W., 2020. *Water-related challenges in nexus governance for sustainable development: insights from the city of Arequipa, Peru*. *Sci. Total Environ.* 747, 141114. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141114>.

Sedapar S.A. (2018). Diagnóstico hídrico rápido. Recuperado de: <https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2020/09/Diagnostico-Hidrico-Rapido.pdf>

Sociedad de Comercio Exterior del Perú. (24 de junio de 2022). *El sector construcción registró un crecimiento interanual del 4.9% en abril de 2022*. <https://www.comexperu.org.pe/articulo/el-sector-construccion-registro-un-crecimiento-interanual-del-49-en-abril-de-2022>

UNESCO. (2023). *Riesgo inminente de una crisis mundial del agua [Informe]*. Recuperado de: <https://www.unesco.org/es/articles/riesgo-inminente-de-una-crisis-mundial-del-agua-unesco/onu-agua>

Unión Andina de Cementos. (2013). *Tabla de Dosificaciones y Equivalencias*. Recuperado de <https://www.unacem.com.pe/wpcontent/uploads/2014/12/TblDOSIF.pdf>

Unión de Concreteras. (2018). *Memoria Integrada 2018*. Recuperado de <https://www.unacem.com.pe/wp-content/uploads/2014/12/TblDOSIF.pdf10>

Universidad Autónoma de Madrid (2019). *Estimación de la Huella Hídrica de una Promoción Residencial*. Recuperado de https://eventos.uam.es/_files/_event/_33229/_editorFiles/file/Informe_UAM-ViaCelere_WEB.pdf

Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Santillán-Saldívar, J., Quispe, I., & Bentín, M. (2017). Carbon footprint of pomegranate (*Punica granatum*) cultivation in a hyper-arid region in coastal Peru. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(4), 601-617.

Vázquez-Rowe, I., Torres-García, J. R., Cáceres, A. L., Larrea-Gallegos, G., Quispe, I., & Kahhat, R. (2017). Assessing the magnitude of potential environmental impacts related to

water and toxicity in the Peruvian hyper-arid coast: A case study for the cultivation of grapes for pisco production. *Science of the Total Environment*, 601, 532-542.

Zhang, G., Hoekstra, A. Y., & Mathews, R. E. (2013). Water Footprint Assessment (WFA) for better water governance and sustainable development, editorial. *Water resources and industry*, 1, 1-6.





ANEXOS



Anexo A

Tabla resumen con los valores de requerimiento hídrico, rendimiento y valor de mercado en chacra de los diferentes cultivos disponibles en la zona del valle de Majes

Cultivo	Superficie Cosechada (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (kg/ha)	Precio chacra (S/kg)	Requerimiento hídrico (m3/ha)	Periodo Vegetativo (días)	Caudal requerido (m3/s)
Kiwicha	264.00	1134.94	4299.02	5.55	9000	200	0.138
Ajo	305.00	5319.30	17440.33	3.25	11000	200	0.194
Alcachofa	720.00	10062.00	13975.00	1.64	12000	200	0.500
Alfalfa	7485.00	907200.00	121202.40	0.09	15000	365	3.560
Cebolla Roja	1943.00	99319.30	51116.47	0.78	12000	140	1.928
Frejol grano seco	150.00	555.95	3706.33	4.14	8000	150	0.093
Frejol vainita	184.00	2714.20	14751.09	1.88	6000	120	0.106
Maíz Chala	6059.00	325897.55	53787.35	0.13	10000	170	4.125
Palto	205.00	3088.00	15063.41	2.50	8500	365	0.055
Papa	1487.00	46284.90	31126.36	0.81	11000	130	1.456
Paprika	147.00	918.50	6248.30	6.35	13000	210	0.105
Quinoa	4510.00	18051.90	4002.64	4.64	9000	200	2.349
Tomate	269.00	13611.60	50600.74	0.73	11000	140	0.245
Tuna (Para cochinilla)	1338.15	173.96	130.00	76.34	6000	365	0.255
Zapallo	944.00	45386.30	48078.71	0.53	8000	155	0.564



Anexo B

Tabla resumen con los valores de requerimiento hídrico, rendimiento y valor de mercado en chacra normalizados de los diferentes cultivos disponibles en la zona del valle de Majes

Cultivo	Superficie Cosechada (ha)	Producción (ton)	Precio Normalizado (S/)	Rendimiento Normalizado (ton/ha)	Requerimiento hídrico normalizado (m3/ha)
Kiwicha	264.00	1134.94	0.072	0.034	0.333
Ajo	305.00	5319.30	0.041	0.143	0.556
Alcachofa	720.00	10062.00	0.020	0.114	0.667
Alfalfa	7485.00	907200.00	0.000	1.000	1.000
Cebolla Roja	1943.00	99319.30	0.009	0.421	0.667
Frejol grano seco	150.00	555.95	0.053	0.030	0.222
Frejol vainita	184.00	2714.20	0.023	0.121	0.000
Maíz Chala	6059.00	325897.55	0.001	0.443	0.444
Palto	205.00	3088.00	0.032	0.123	0.278
Papa	1487.00	46284.90	0.009	0.256	0.556
Paprika	147.00	918.50	0.082	0.051	0.778
Quinoa	4510.00	18051.90	0.060	0.032	0.333
Tomate	269.00	13611.60	0.008	0.417	0.556
Tuna (Para cochinilla)	1338.15	173.96	1.000	0.000	0.000
Zapallo	944.00	45386.30	0.006	0.396	0.222