

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**ANÁLISIS DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA DEL SISTEMA
CHANCAY-LAMBAYEQUE Y SU IMPACTO EN LA ECOEFICIENCIA
Y LA HUELLA HÍDRICA DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

Tesis para optar por el título de **INGENIERO CIVIL**, que presenta el bachiller:

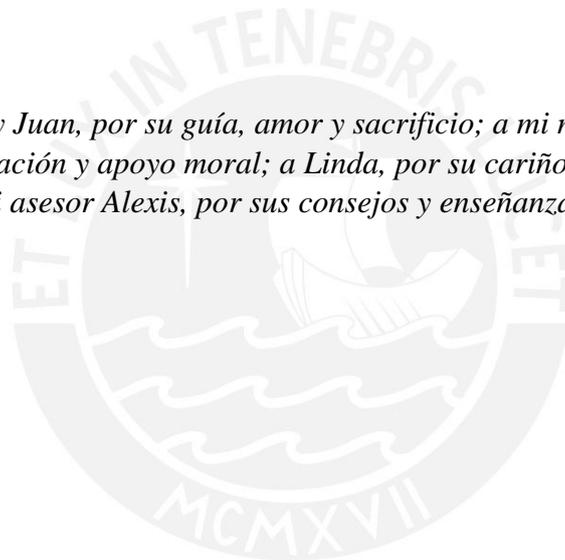
JUAN ALONSO DELGADO MANSILLA

Asesor:

Dr. FEDERICO ALEXIS DUEÑAS DÁVILA

Lima, septiembre de 2019

“A mis padres Ysabel y Juan, por su guía, amor y sacrificio; a mi madrina Luz y mi abuela Angélica, por su motivación y apoyo moral; a Linda, por su cariño, compañía y ayuda; y a mi asesor Alexis, por sus consejos y enseñanzas.”



Resumen

La presente tesis analiza la importancia de la infraestructura hidráulica menor y su impacto sobre la huella hídrica y la ecoeficiencia de la producción agrícola, enfocándose en el agua perteneciente al sistema de la cuenca Chancay-Lambayeque y los cultivos predominantes de dicha región, siendo estos la caña de azúcar, el arroz y el maíz amarillo duro. Para ello, se empieza por la presentación del caso donde se da a conocer la estructura del sistema, las diferentes comisiones de regantes que conforman la junta de usuarios y sus respectivas superficies bajo riego y volúmenes de agua asignada. Se prosigue con el cálculo de pérdidas de agua por distribución y aplicación generadas a causa de la infraestructura hidráulica para poder calcular la cantidad de agua neta utilizada para la producción de los cultivos señalados, definida en este estudio como huella hídrica. Los resultados obtenidos se comparan con el cálculo de la huella hídrica teórica hallada mediante simulaciones en el software CROPWAT 8.0, para determinar las diferencias entre ambas y sus posibles causas. Finalmente, se calculan indicadores económicos y se estima gráficamente la eficiencia ambiental entre comisiones, con el fin de conocer qué cultivos reportan mayor rentabilidad económica por su venta y en qué comisión se obtiene la mejor relación entre producto generado y recurso empleado para su obtención.

La importancia de esta investigación radica en que, siendo la agricultura una actividad económica tan importante para el país, y estando los recursos naturales relacionados a ella bajo un constante consumo y degradación que no hacen más que promover su escasez, es un deber llevar a cabo las prácticas agrícolas de la manera más eficiente posible, tanto en el ámbito ecológico como económico, con el fin de que su desarrollo y ejecución sea sostenible en el tiempo.

Los resultados obtenidos señalan que la infraestructura hidráulica menor juega un rol fundamental en cuanto a la conservación de los recursos naturales destinados a la agricultura y, por ende, su mejora y la implementación de nuevas tecnologías permitirán un aumento en la productividad en el uso del agua y de los suelos, haciendo más eficiente la producción de los cultivos estudiados.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Alcance.....	1
1.2. Justificación.....	1
1.3. Objetivos	2
2. Marco teórico.....	3
2.1. Agricultura	3
2.2. Tipos de agricultura.....	3
2.3. Tipos de sistemas de regadío.....	4
2.4. Eficiencia de riego.....	5
2.4.1. Eficiencia de conducción	6
2.4.2. Eficiencia de distribución	7
2.4.3. Eficiencia de aplicación	7
2.5. Recursos naturales.....	8
2.6. Recursos hídricos	8
2.6.1. Distribución de los recursos hídricos.....	9
2.6.2. Degradación y agotamiento de los recursos hídricos.....	10
2.6.3. Aumento de la disponibilidad de agua dulce	12
2.7. Huella de agua.....	14
2.8. Huella hídrica	18
2.9. Ambiente	20

2.10.	Ecoeficiencia y sostenibilidad	21
3.	Metodología.....	23
3.1.	Cálculo de la huella hídrica teórica	23
3.1.1.	Descripción de la herramienta	23
3.1.2.	Datos de entrada.....	25
3.1.3.	Modelo matemático	27
3.2.	Indicadores y estimación gráfica de ecoeficiencia.....	28
4.	Resultados.....	31
4.1.	Descripción del caso.....	31
4.1.1.	Cultivos en estudio.....	31
4.1.2.	Comisiones regantes y asignación de agua.....	32
4.1.3.	Infraestructura hidráulica	36
4.2.	Cálculo de pérdidas ocasionadas por la infraestructura	37
4.2.1.	Pérdidas por distribución	37
4.2.2.	Pérdidas por aplicación	42
4.2.3.	Pérdidas totales	45
4.3.	Estimación de las huellas hídricas teóricas	46
4.3.1.	Huella hídrica verde	46
4.3.2.	Huella hídrica azul	48
4.3.3.	Huella hídrica total.....	49
4.4.	Comparación entre la huella hídrica real y la teórica.....	52
4.5.	Ecoeficiencia de los cultivos	53

5. Discusión de resultados	58
5.1. Pérdidas de agua a causa de la infraestructura menor	58
5.2. Huella hídrica teórica y real de los cultivos analizados	59
5.3. Ecoeficiencia de producción de los cultivos analizados	61
6. Conclusiones y recomendaciones	63
6.1. Pérdidas de agua a causa de la infraestructura menor	63
6.2. Huella hídrica teórica de los cultivos analizados	64
6.3. Ecoeficiencia de producción de los cultivos analizados	65
7. Bibliografía.....	66



Índice de figuras y tablas

FIGURA 1. SISTEMA DE RIEGO SUPERFICIAL POR SURCOS	4
FIGURA 2. SISTEMAS DE RIEGO TECNIFICADO POR ASPERSIÓN Y GOTEO	5
FIGURA 3. ILUSTRACIÓN CON LOS DIFERENTES TIPOS DE PÉRDIDAS EN UN SISTEMA TRADICIONAL DE REGADÍO	6
FIGURA 4. FUENTES DE AGUA Y SU CICLO DE RENOVACIÓN	8
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA DULCE PRESENTE EN AGUAS SUPERFICIALES Y ATMÓSFERA	9
FIGURA 6. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN LA TIERRA, PROPUESTA POR IGOR SHIKLOMANOV EN SU LIBRO “WATER IN CRISIS: A GUIDE TO THE WORLD’S FRESH WATER RESOURCES”	10
FIGURA 7. REPRESA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PORCE II, UBICADA EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA EN COLOMBIA	13
FIGURA 8. DIAGRAMA METODOLÓGICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA HUELLA DE AGUA	14
FIGURA 9. CONCEPTOS QUE PRECEDEN Y QUE SIRVIERON COMO BASE PARA LA HUELLA DE AGUA	15
FIGURA 10. SUBDIVISIÓN ESPECÍFICA DE LA HUELLA DE AGUA EN EL CONTEXTO DE UN ACV	16
FIGURA 11. ESQUEMA SOBRE LA IMPORTANCIA DE LA INCLUSIÓN DE FACTORES RELACIONADOS AL AGUA EN LOS ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	17
FIGURA 12. HUELLA HÍDRICA Y SUS DIVERSOS COMPONENTES	18
FIGURA 13. COMPONENTES PARA UNA EVALUACIÓN METODOLÓGICA SOBRE EL AGUA CON BASE EN LOS ACV, COMO ES EL CASO DE LA HUELLA DE AGUA	19
FIGURA 14. MAPA CONCEPTUAL DEL AMBIENTE Y SUS COMPONENTES	20
FIGURA 15. RELACIÓN ENTRE ECOEFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD	22
FIGURA 16. INTERFAZ DEL SOFTWARE CLIMWAT 2.0, UTILIZADO PARA LA EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DEL PERÚ	25
FIGURA 17. MÓDULO DE CLIMA/ETO DEL SOFTWARE CROPWAT 8.0 CON DATOS EXTRAÍDOS DEL CLIMWAT 2.0, CORRESPONDIENTES A UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA UBICADA EN LAMBAYEQUE	26
FIGURA 18. MÓDULO DE CULTIVO DEL SOFTWARE CROPWAT 8.0 CON DATOS CORRESPONDIENTES A LA CAÑA DE AZÚCAR, PROVENIENTES DE UN ARCHIVO PREDETERMINADO INCLUIDO EN EL PROGRAMA	26
FIGURA 19. MÓDULO RAC DEL SOFTWARE CROPWAT 8.0 CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS TRAS LA SIMULACIÓN, A TRAVÉS DE LOS CUALES CALCULAREMOS LAS HUELLAS HÍDRICAS	26

FIGURA 20. CONCEPTO DE LA HUELLA HÍDRICA EXTENDIDA	28
FIGURA 21. MODELO DEL DIAGRAMA UTILIZADO PARA ESTIMAR LA ECOEFICIENCIA ENTRE COMISIONES DE REGANTES.....	30
FIGURA 22. DISTRIBUCIÓN DE LA SUPERFICIE CULTIVADA EN EL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE.....	31
FIGURA 23. MAPA GEOGRÁFICO DE LA DIVISIÓN SECTORIAL POR COMISIONES DE REGANTES PERTENECIENTES A LA JUNTA DE USUARIOS CHANCAY-LAMBAYEQUE	32
FIGURA 24. VOLUMEN DE AGUA ASIGNADA POR COMISIÓN EN MILLONES DE METROS CÚBICOS	34
FIGURA 25. SUPERFICIE BAJO RIEGO POR COMISIÓN EXPRESADO EN HECTÁREAS.....	34
FIGURA 26. DOTACIÓN DE AGUA POR COMISIONES.....	35
FIGURA 27. ESQUEMA GENERAL DEL PROYECTO ESPECIAL OLMOS TINAJONES.....	37
FIGURA 28. COMPOSICIÓN DEL VOLUMEN ASIGNADO POR COMISIÓN.....	40
FIGURA 29. ANÁLISIS DE BRECHAS ENTRE VOLUMEN ASIGNADO Y APLICADO POR COMISIÓN, EXPRESADO EN MILLONES DE METROS CÚBICOS.....	40
FIGURA 30. PORCENTAJE DE REVESTIMIENTO DE LOS CANALES POR COMISIÓN	41
FIGURA 31. LONGITUD TOTAL EN KILÓMETROS DE LOS CANALES POR COMISIÓN.....	41
FIGURA 32. COMPOSICIÓN DEL VOLUMEN TOTAL DE RIEGO POR TIPO DE CULTIVO	44
FIGURA 33. ANÁLISIS DE BRECHAS EXPRESADO EN MILLONES DE METROS CÚBICOS POR CADA UNO DE LOS TIPOS DE CULTIVO	44
FIGURA 34. COMPOSICIÓN DEL VOLUMEN TOTAL ASIGNADO POR TIPO DE CULTIVO.....	45
FIGURA 35. ANÁLISIS DE BRECHAS EXPRESADO EN MILLONES DE METROS CÚBICOS POR CADA UNO DE LOS TIPOS DE CULTIVO	45
FIGURA 36. HUELLA HÍDRICA VERDE POR CULTIVO EN METROS CÚBICOS POR TONELADA	47
FIGURA 37. HUELLA HÍDRICA VERDE POR CULTIVO EN METROS CÚBICOS POR HECTÁREA	47
FIGURA 38. HUELLA HÍDRICA AZUL POR CULTIVO EN METROS CÚBICOS POR TONELADA.....	48
FIGURA 39. HUELLA HÍDRICA AZUL POR CULTIVO EN METROS CÚBICOS POR HECTÁREA	48
FIGURA 40. HUELLA HÍDRICA TOTAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR.....	50
FIGURA 41. HUELLA HÍDRICA TOTAL DEL ARROZ	50
FIGURA 42. HUELLA HÍDRICA TOTAL DEL MAÍZ.....	50
FIGURA 43. HUELLA HÍDRICA TOTAL POR CULTIVO EN METROS CÚBICOS POR TONELADA	51
FIGURA 44. HUELLA HÍDRICA TOTAL POR CULTIVO EN METROS CÚBICOS POR HECTÁREA.....	51

FIGURA 45. COMPOSICIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA TOTAL POR CULTIVO	52
FIGURA 46. COMPARACIÓN ENTRE LA HUELLA HÍDRICA REAL Y LA TEÓRICA POR CULTIVO, EN METROS CÚBICOS POR TONELADA	53
FIGURA 47. PRODUCTIVIDAD APARENTE DEL AGUA POR CULTIVO EXPRESADA EN NUEVOS SOLES POR CADA METRO CÚBICO DE AGUA EMPLEADA	55
FIGURA 48. PRODUCTIVIDAD APARENTE DEL SUELO POR CULTIVO EXPRESADA EN NUEVOS SOLES POR CADA HECTÁREA DE SUPERFICIE CULTIVADA	55
FIGURA 49. GRÁFICO DE ECOEFICIENCIA ENTRE COMISIONES PARA EL CULTIVO DEL ARROZ	56
FIGURA 50. GRÁFICO DE ECOEFICIENCIA ENTRE COMISIONES PARA EL CULTIVO DEL MAÍZ	57
TABLA 1. DIVERSAS ÁREAS DE ESTUDIO CON APORTES, APLICACIONES E INVESTIGACIONES RELACIONADOS A LOS RECURSOS HÍDRICOS	9
TABLA 2. CÁLCULO DE LOS FACTORES DE CARACTERIZACIÓN PARA ESTIMAR LA HUELLA DE ESCASEZ DE AGUA A LO LARGO DEL TIEMPO	17
TABLA 3. TABLA COMPARATIVA DE VALORES DE AWP Y ALP PARA DISTINTOS CULTIVOS	29
TABLA 4. CUADRO RESUMEN CON DATOS SOBRE CADA UNA DE LAS COMISIONES EN ESTUDIO	33
TABLA 5. CUADRO RESUMEN CON DATOS SOBRE VOLÚMENES DE PRODUCCIÓN Y DE ASIGNACIÓN DE AGUA POR COMISIÓN	36
TABLA 6. TABLA RESUMEN CON VALORES SOBRE LA COMPOSICIÓN DE LOS CANALES A LO LARGO DE TODA SU EXTENSIÓN, CLASIFICADOS POR COMISIONES REGANTES	38
TABLA 7. TABLA RESUMEN CON VALORES PARCIALES Y TOTALES DE PÉRDIDAS POR DISTRIBUCIÓN EN CADA UNA DE LAS COMISIONES REGANTES	39
TABLA 8. RANGO DE EFICIENCIAS DE APLICACIÓN POR MÉTODO DE RIEGO	42
TABLA 9. TABLA RESUMEN CON VALORES PARCIALES Y TOTALES DE PÉRDIDAS POR APLICACIÓN EN CADA UNA DE LAS COMISIONES REGANTES POR CULTIVO	43
TABLA 10. TABLA RESUMEN CON LOS VALORES DE AWP Y ALP PARA CADA CULTIVO Y LOS DATOS NECESARIOS PARA SU CÁLCULO	54

1. Introducción

1.1. Alcance

La presente investigación consiste en determinar cómo la infraestructura hidráulica menor afecta en la ecoeficiencia de producción y en la huella hídrica de los cultivos más importantes del departamento de Lambayeque, a partir del cálculo de pérdidas de agua y de otros indicadores, con el fin de elaborar propuestas que promuevan la conservación de los recursos naturales relacionados a la agricultura sin afectar la producción de cultivos ni la rentabilidad del proceso.

La evaluación de la infraestructura de riego se llevará a cabo mediante un análisis de pérdidas, para conocer cómo esto afecta la huella hídrica real de producción de la caña de azúcar, el arroz y el maíz amarillo duro; la cual será comparada posteriormente con la huella hídrica teórica calculada mediante simulaciones en el software CROPWAT 8.0 para determinar cuáles son y a qué podrían deberse las principales diferencias en los resultados. La ecoeficiencia de producción se estimará en base a indicadores que relacionan el valor económico generado por la venta del producto final con la cantidad de recursos consumidos para su producción, y se complementará con un análisis gráfico entre comisiones para determinar cuál de ellas posee una mejor relación en ese aspecto.

1.2. Justificación

Para el año 2050 se espera un aumento del 77% en la producción agrícola, necesitando de un incremento del 10% en la extracción de agua para riego y del 11% en el área de suelos equipados para la irrigación, todo esto para países en vías de desarrollo (Bruinsma et al. 2012), como es el caso del Perú.

Considerando que la agricultura juega un rol fundamental como actividad económica en el país, como se apreció durante el 2018 al haber aportado más del 10% del crecimiento que tuvo el PBI (INEI, 2019), y que particularmente las regiones costeras como Lambayeque poseen el 86% de la agroexportación nacional; es necesario asegurar la preservación y el desarrollo sostenible de esta, velando por un correcto uso de nuestros recursos naturales.

El Perú es uno de los países que experimenta mayor estrés hídrico en Sudamérica (World Resources Institute, 2019), y el departamento de Lambayeque se encuentra ubicado en su costa desértica donde predomina la escasez de agua. Por tales razones, se hace necesario estudiar la productividad y eficiencia de los sistemas relacionados a la producción agrícola, entre los cuales se encuentra la infraestructura hidráulica, porque es de conocimiento científico que la crisis hídrica mundial depende más de la gobernanza que de la disponibilidad de recursos, dado que el porcentaje relativo de agua dulce aprovechable es más que suficiente para satisfacer la demanda creciente del mundo.

La ingeniería civil se preocupa de la gestión de los recursos naturales y es responsable de las repercusiones en diferentes ámbitos que deriven de las obras que se realicen bajo su influencia. En base a lo expuesto, este trabajo posee una justificación social, económica y ambiental, tratando de optimizar de manera técnica la conservación de recursos naturales sin afectar negativamente la producción de bienes ni la cantidad de empleos.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es determinar la ecoeficiencia de producción de los cultivos más importantes del departamento de Lambayeque, con base en la eficiencia de la infraestructura hidráulica menor, sabiendo que esta juega un factor clave en la conservación de los recursos. De esta manera se podrán plantear propuestas que permitan mejorar la productividad en el uso del agua y el suelo para la producción agrícola. Los objetivos específicos para llevar a cabo son los siguientes:

- Calcular las pérdidas totales de agua generadas por la infraestructura menor de manejo de agua, abarcando las ocasionadas por distribución y por aplicación.
- Calcular y comparar las huellas hídricas reales y teóricas de producción de cada uno de los cultivos analizados, obteniéndolas a partir del cálculo de pérdidas y de simulaciones en el software CROPWAT 8.0, respectivamente.
- Estimar la ecoeficiencia a través del cálculo de indicadores que relacionen el valor económico generado por el producto con respecto a la cantidad de recursos consumidos para su producción y determinar qué comisiones poseen una mejor relación en ese aspecto con respecto al promedio.

2. Marco teórico

2.1. Agricultura

El término “agricultura” proviene de los vocablos griegos “agri”, que significa “campo”, y “cultura”, que significa “cultivo”. Se define como la actividad dedicada al cultivo de la tierra e incluye todos los trabajos relacionados al tratamiento del suelo y a la plantación de vegetales. Suele estar destinada a la producción de alimentos y, por ende, forma parte de las actividades que brindan sustento y autosuficiencia a cualquier población que la lleve a cabo (FAO, 2018).

Como señala Fuentes (2019), citando el Informe del Banco Mundial: *Agricultura para el desarrollo* (2008), la agricultura es un instrumento fundamental para mantener el bienestar de un país, a través del desarrollo sostenible y la reducción de la pobreza. La finalidad es que la agricultura pueda garantizar el sustento alimentario, y al mismo tiempo, apoyar a la gestión efectiva de la tierra, el agua y los demás recursos naturales. Para considerarse como sostenible, debe satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras, garantizando también la rentabilidad, la salud del medio ambiente y la equidad social y económica (FAO, 2018). Para lograrlo es imprescindible mejorar la protección ambiental, la resiliencia de los sistemas y la eficiencia en el uso de recursos. Esto requiere de regímenes estrictos de seguridad alimentaria y de políticas agrícolas que colaboren con el cumplimiento de los requisitos mencionados.

2.2. Tipos de agricultura

La agricultura puede ser clasificada de manera general en función de su magnitud de producción y relación con el mercado, y a su dependencia del agua (Larrazabal, 2019). Con respecto a la primera clasificación, esta puede ser subdividida en agricultura de subsistencia, que consiste en la producción de la cantidad mínima necesaria para cubrir las necesidades del agricultor y su familia sin generar excedentes con los cuales comercializar; y en agricultura de mercado, caracterizada por grandes cantidades de producción mediante el uso de sistemas de riego tecnificados con el fin de obtener excedentes y comercializarlos. El estudio se centra en este último tipo de agricultura, debido a la abundante actividad económica que genera.

Por otro lado, si clasificamos a la agricultura por su dependencia del agua, podemos dividirla en agricultura de secano, que es la realizada sin el aporte de agua por parte del agricultor, obteniendo el recurso de la lluvia o de fuentes subterráneas; y agricultura de regadío, la cual se produce con el aporte de agua por parte del agricultor mediante sistemas de captación, conducción y distribución desde fuentes naturales. Esta última es la estudiada en el presente texto, debido a que parte de la investigación es determinar el rol que la infraestructura de riego juega en la eficiencia de la producción de cultivos.

2.3. Tipos de sistemas de regadío

Se distinguen dos grandes grupos de sistemas de riego usados en la agricultura, los cuales son los de flujo no controlado, como los riegos superficiales; y los de flujo controlado, conformados en su mayoría por métodos tecnificados puntuales (Arteaga et al. 2015).

Los más utilizados dentro del primer grupo son el riego por inundación, que consiste en inundar toda el área donde hay presencia de cultivos, siendo esta la forma más antigua de aplicar agua sin requerir de gran trabajo o inversión; y el riego por surcos, a través del cual el agua se distribuye por canales o surcos que se adaptan a cultivos sembrados formando hileras (*Figura 1*) y que requieren de un suelo parejo y sin desniveles para evitar la erosión de los surcos o el empozamiento del agua (Cadena, 2012). Ambos métodos poseen baja eficiencia y su uso no es del todo recomendable (DGIAR, 2015).

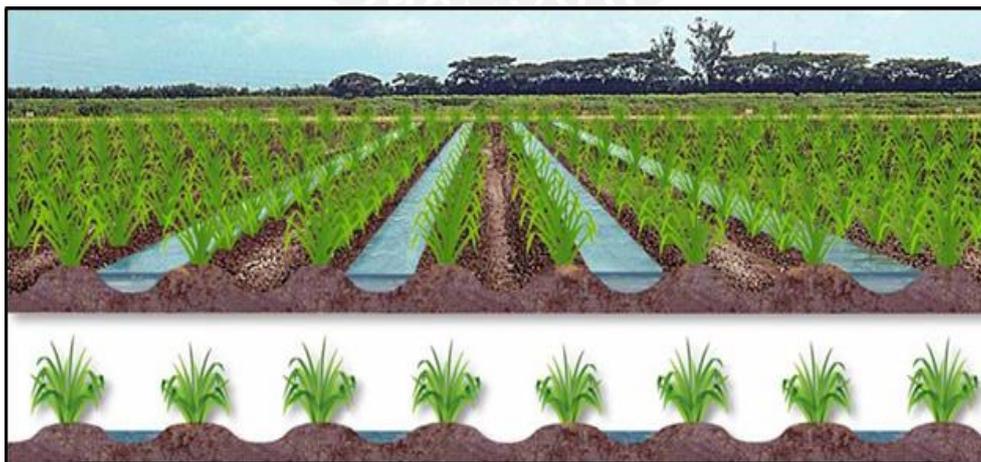


Figura 1. Sistema de riego superficial por surcos. Fuente: Centro de Investigación de la Caña de Azúcar en Colombia - Cenicaña, visible en <http://www.cenicana.org/riego-por-surcos>

En cuanto a los sistemas tecnificados (*Figura 2*), los más comunes son el riego por aspersión, que consiste en la aplicación de agua en forma de lluvia, necesitando de mecanismos para propulsarla; y el riego por goteo, que es el más eficiente de los sistemas,

porque el agua se aplica directamente a la planta en forma de gotas bien localizadas, en cantidades estrictamente necesarias y en los momentos oportunos (Franco, 2018). Ambos métodos poseen alta eficiencia siempre que el sistema esté bien diseñado y se encuentre bajo condiciones operativas adecuadas (DGIAR, 2015). El Proyecto Olmos ha implementado un sistema de riego por aspersión mediante el uso de pivotes, cubriendo más de 10mil hectáreas de cultivo en el departamento de Lambayeque, lo cual ha mejorado la eficiencia en el consumo de agua en más del 30% (Andina, 2016).



Figura 2. Sistemas de riego tecnificado por aspersión y goteo. Fuente: Red de Especialistas en Agricultura - Agriculturers, visible en <http://agriculturers.com/particularidades-del-riego-por-aspersion>

2.4. Eficiencia de riego

El concepto de eficiencia de riego no está formalmente definido, pero se entiende como la cantidad de agua bien aprovechada por los cultivos durante la irrigación de las tierras, del total de agua captada de cierta fuente; y se denota por la variable “E_f” (DGIAR, 2015). Conocerla es de vital importancia porque permite saber cuánto recurso hídrico se desperdicia durante el riego y así poder plantear las soluciones adecuadas para obtener resultados dentro de los límites aceptables.

La Dirección General de Infraestructura y Riego del Ministerio de Agricultura y Riego propone en su “Manual del Cálculo de Eficiencia para Sistemas de Riego” un método para calcular la eficiencia en base a valores de caudales y superficies. Para obtener un valor final resultante, se multiplican las eficiencias en cada componente del sistema, las cuales son la eficiencia de conducción (E_{fC}), la eficiencia de distribución (E_{fD}) y la eficiencia de aplicación (E_{fA}).

La *Figura 3* muestra los diferentes tipos de pérdidas existentes en un sistema tradicional de regadío, las cuales reducen su eficiencia en cada uno de sus componentes:

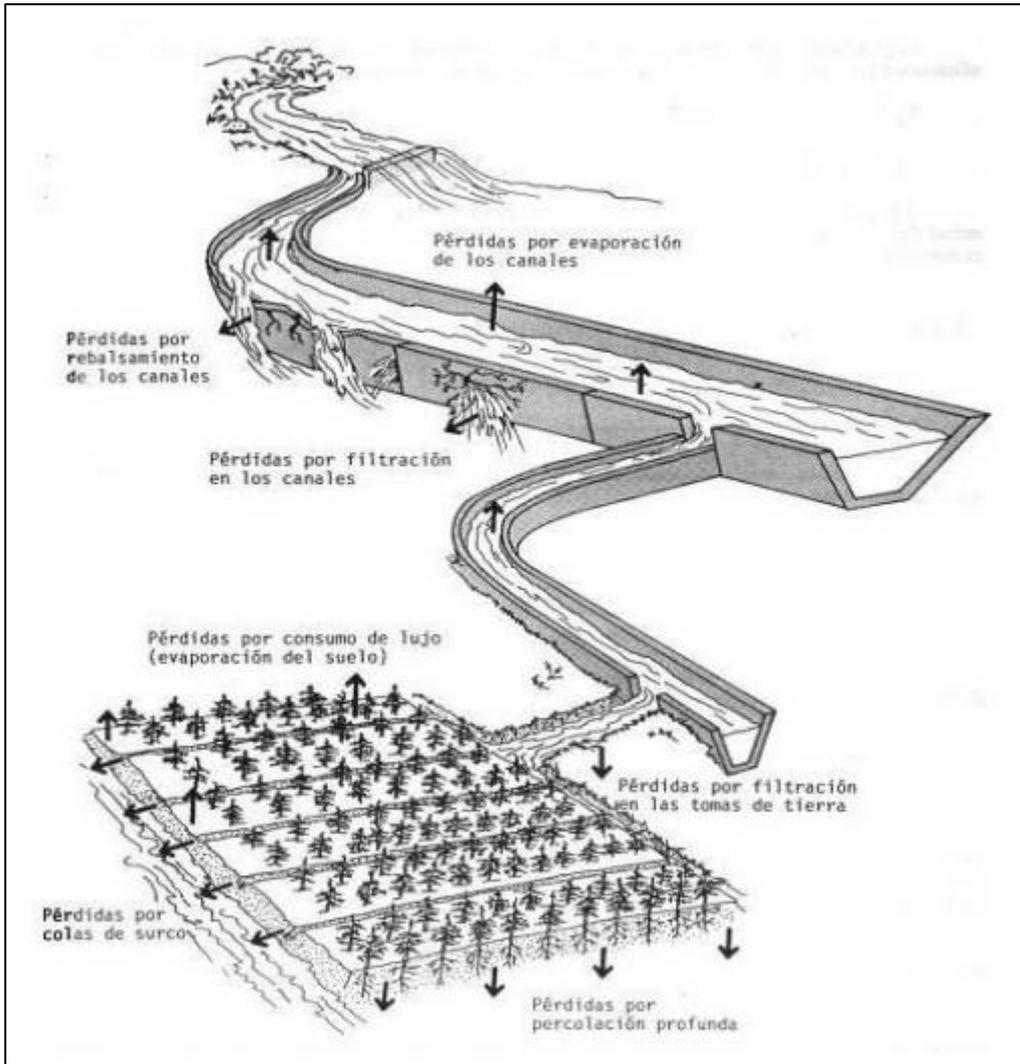


Figura 3. Ilustración con los diferentes tipos de pérdidas en un sistema tradicional de regadío. Fuente: Manual del Cálculo de la Eficiencia para Sistemas de Riego, MINAGRI - DGIAR (2015).

2.4.1. Eficiencia de conducción

La eficiencia de conducción (E_{fC}) permite evaluar la pérdida de agua en el canal principal (CP), desde la bocatoma hasta su punto más alejado. Si existiera la presencia de canales laterales (CL) que no pueden aislarse mediante compuertas, deben incluirse en el cálculo.

La fórmula para determinar este tipo de eficiencia es:

$$E_{fC} = \frac{Q_{final_{CP}} + \sum Q_{CL}}{Q_{inicial_{CP}}} * 100 \quad (1)$$

2.4.2. Eficiencia de distribución

La eficiencia de distribución (Ef_D) se obtiene de todos los canales de distribución (CD) de 1er, 2do y enésimo orden; que sirven para distribuir el agua hacia las parcelas o chacras. Mide la pérdida que se produce desde la toma lateral del canal principal hasta la entrega a los usuarios en una zona de riego. La fórmula de cálculo para cada canal de distribución es la siguiente:

$$Ef_{D/n} = \frac{Q_{final_{CD}} + \sum Q_{CL}}{Q_{inicial_{CD}}} * 100 \quad (2)$$

Por lo tanto, la eficiencia del sistema se calcula como:

$$Ef_D = \frac{\sum Ef_{D/n}}{\# \text{ total de CD}} \quad (3)$$

De no contar con información sobre los caudales para calcular esta eficiencia mediante las *Ecuaciones 2 y 3*, existen aproximaciones empíricas realizadas por entidades relacionadas al tema, sobre las pérdidas de agua generadas en los canales por el proceso de distribución; las cuales se utilizan en el apartado correspondiente al realizar los cálculos respectivos. De esta manera se puede hallar la eficiencia de distribución del sistema de manera indirecta.

2.4.3. Eficiencia de aplicación

Se define a la eficiencia de aplicación (Ef_A) como la cantidad de agua útil para el cultivo que queda en el suelo después de realizarse el riego, en relación al total de agua aplicada. El valor de la eficiencia de riego (E_R), que depende del método de irrigación utilizado, se verá afectado por el área (A) de la parcela donde se aplica, por lo que se establece una relación de proporcionalidad en la expresión para su cálculo. Se emplea la siguiente ecuación para obtener la eficiencia de aplicación a través de una ponderación:

$$Ef_A = \frac{A_1 * E_{R1} + 2 * E_{R2} + \dots + A_n * E_{Rn}}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (4)$$

2.5. Recursos naturales

El correcto uso de los recursos naturales es la base para varias dimensiones del desarrollo sustentable, tales como la gobernabilidad, salud humana, conservación de la biodiversidad y adaptación al cambio climático (FAO, 2018). Los más importantes para la agricultura son el agua y el suelo.

El agua es el insumo de mayor volumen y consumo en la producción de alimento a través de la agricultura, tanto en el campo como en la mayoría de los pasos de la cadena de valor. Es importante saber que debe mantenerse en un adecuado estado de conservación, de modo que cumpla con los requerimientos domésticos, de producción energética y de soporte de ecosistemas que dependen de ella (FAO, 2018). Por otra parte, el suelo es la base para la agricultura y la ONU lo define como “un área delineable de la superficie terrestre que comprende todos los atributos de la biósfera inmediatos a ella incluyendo los del clima, las formas del suelo, la hidrología superficial, la población de plantas y animales, el diseño de asentamientos humanos y el resultado físico de la actividad humana pasada y presente”.

2.6. Recursos hídricos

Los recursos hídricos son definidos por la UNESCO como los recursos relativos al agua, disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficiente, en un lugar y periodo de tiempo apropiados para satisfacer una demanda identificable (2017). La *Figura 4* muestra algunas de las fuentes existentes y su ciclo de renovación.

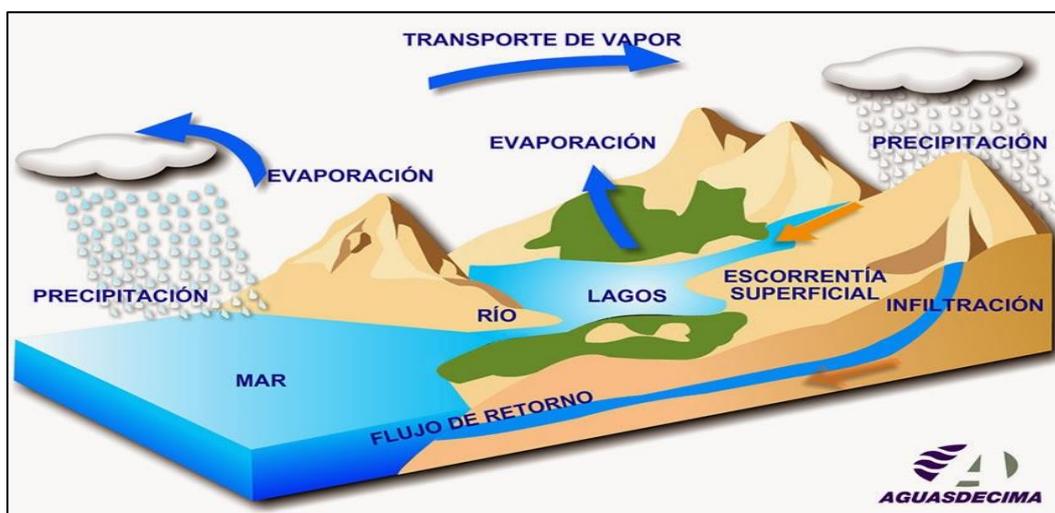


Figura 4. Fuentes de agua y su ciclo de renovación. Fuente: Empresa de Servicios Sanitarios de Valdivia - Aguasdecima. Visible en <https://www.aguasdecima.cl/tareas-escolares>

Estos recursos deben preservarse y utilizarse de manera racional, porque que son imprescindibles para el desarrollo de la vida y el desenvolvimiento de las actividades humanas (Effendi, 2016). Si bien son en su mayoría recursos renovables, la contaminación y sobreexplotación los coloca bajo un potencial riesgo. Por tales razones, la importancia de la correcta gestión de los recursos hídricos ha generado una gran cantidad de investigaciones en áreas como las apreciadas en la *Tabla 1*.

Tabla 2. Diversas áreas de estudio con aportes, aplicaciones e investigaciones relacionados a los recursos hídricos.

Área de estudio	Aporte y/o aplicación
Física	Estudia a profundidad el ciclo del agua.
Química	Enfocada en parámetros de calidad.
Geografía	Describe la disponibilidad espacial del recurso.
Hidrología	Determina la disponibilidad temporal.
Hidráulica	Estudia el comportamiento físico del agua.
Ecología	Enfocada en preservar ecosistemas frágiles que dependen del agua.
Administración	Establece normas para su uso por el bien común.
Defensa Civil	Controla eventos catastróficos ligados al agua.

Fuente: Elaboración propia, en base al Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos.

2.6.1. Distribución de los recursos hídricos

De acuerdo con el Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo (2017), del total de agua existente en el planeta, aproximadamente el 97.5% se encuentra en los mares y océanos, siendo esta agua salada; por lo tanto, el agua dulce disponible ocupa solo el 2.5%. De esta pequeña fracción, el 68.7% se encuentra en glaciares de los casquetes polares y las cumbres nevadas, el 30.1% está en acuíferos subterráneos, un 0.8% se encuentra en el permafrost y el 0.4% restante está disponible en aguas superficiales y en la atmósfera, como se muestra en la *Figura 5*.

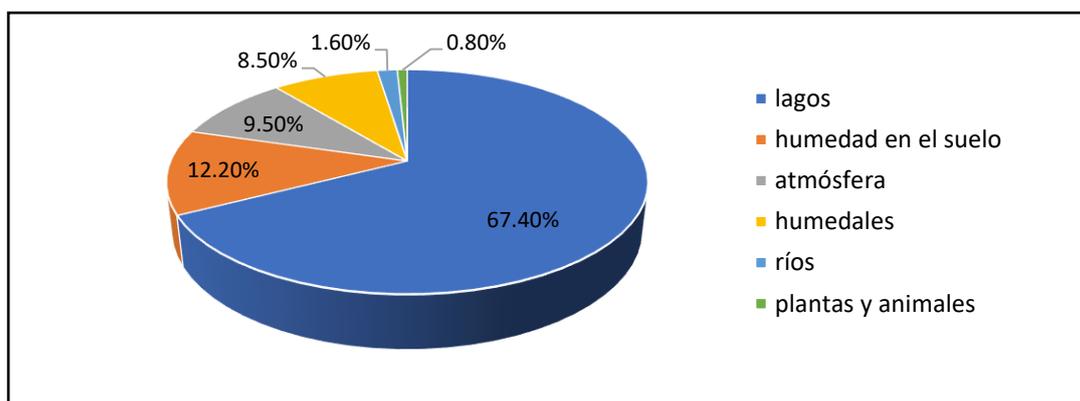


Figura 5. Distribución del agua dulce presente en aguas superficiales y atmósfera. Fuente: Elaboración propia.

Los valores presentados son difíciles de evaluar y no son constantes en el tiempo, pero como ya mencionamos, provienen de una fuente confiable con estimaciones serias. Sin embargo, debido a los efectos recientes del cambio climático, se producen fenómenos como el derretimiento de los casquetes polares y la evaporación del agua de los océanos, que podrían afectar dichos porcentajes.

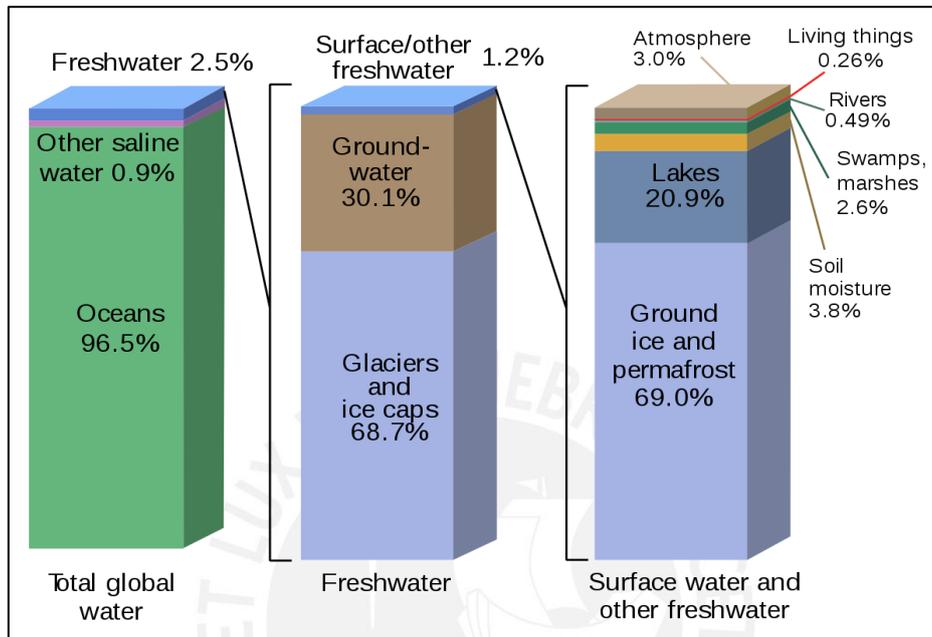


Figura 6. Distribución del agua en la Tierra, propuesta por Igor Shiklomanov en su libro "Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources". Fuente: Visible en <https://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>

Sabiendo cómo se encuentra disponible físicamente el agua en el planeta, y con la finalidad de profundizar en el concepto de su distribución; es importante mencionar el hecho de que se estima que alrededor del mundo, más de 600 millones de personas carecen de un acceso seguro al recurso hídrico para consumo doméstico por falta de tratamiento (UNICEF, 2015). Esto se debe en parte a la distribución irregular de las precipitaciones, tanto espacial como temporalmente (McMichael, 2014); pero también a la falta de sistemas de infraestructura de abastecimiento y mecanismos de gestión política que permitan el acceso al recurso a las poblaciones de áreas rurales (Massoud et al. 2010).

2.6.2. Degradación y agotamiento de los recursos hídricos

Las actividades humanas pueden afectar gravemente los recursos hídricos, acentuando el concepto de presión hídrica, que se refiere al indicador que mide el porcentaje de agua extraída con respecto a la disponibilidad natural media total (Bunge, 2010). Existen

diversos factores que reducen la disponibilidad de agua dulce para el uso y consumo humano, entre los cuales, los más conocidos son la contaminación, la sobreexplotación y el cambio climático.

Con respecto a la contaminación, es común en la agricultura y se sabe que los plaguicidas usados para las prácticas agrícolas constituyen la principal fuente de contaminación no puntual del agua subterránea debido a la lixiviación (Bedmar et al. 2015). También, se ha determinado que las actividades relacionadas al uso de suelos y agua, ligadas principalmente al cultivo de tierras, contribuyen con más de la mitad de la salinidad presente en los flujos de agua, con valores promedio del 56% (Larsen et al. 2013).

Por otro lado, se encuentra el problema de la sobreexplotación, tanto superficial como subterránea, que genera efectos devastadores sobre el medioambiente porque conlleva al agotamiento del recurso hídrico. Los casos del Mar de Aral y el Lago Chad, son ejemplos clásicos sobre la casi desaparición de grandes cuerpos de agua debido a su explotación para el riego de cultivos mediante la realización de trasvases o captaciones desmedidas. La sobreexplotación de agua subterráneas también es muy dañina debido a que de toda la disponible a nivel mundial, solo menos del 6% es renovable (Gleeson et al. 2016). Además, su agotamiento no es tan evidente como el de lagos o ríos, ya que existen menos pruebas visuales y los efectos de la extracción excesiva tardan más en ser apreciables. Una de las mayores desventajas es que las intervenciones para prevenir o revertir situaciones desfavorables generalmente poseen costos elevados.

Finalmente, el cambio climático es un factor muy importante para tener en cuenta en la actualidad, sobre todo en la agricultura que es un ámbito que depende mucho de las condiciones medioambientales. Las principales variaciones en el clima que se han observado en la última década se concentran en la magnitud y distribución de las precipitaciones, en aumentos promedio de temperatura y una mayor probabilidad de eventos extremos como inundaciones, sequías, olas de frío y calor, entre otros (Pachauri et al. 2014). Esto ya ha provocado alteraciones en la distribución y fenología de muchas especies animales y vegetales, debido a que las nuevas condiciones climáticas pueden limitar el crecimiento o el establecimiento de los cultivos y sus rendimientos (Altieri et al. 2009).

2.6.3. Aumento de la disponibilidad de agua dulce

Asegurar la disponibilidad de agua de buena calidad a toda la población es una prioridad universal, porque los recursos hídricos deben garantizarse como parte de los derechos humanos de todos los individuos en el mundo, sin importar su religión, raza, educación o nivel de ingresos (Nieto, 2011). Se requiere de grandes esfuerzos para poder satisfacer la demanda de agua continua y cada vez más grande, sin mencionar que se debe compensar la variabilidad natural y mejorar la calidad y cantidad de agua disponible. Por tales motivos, siempre se buscan nuevos métodos o alternativas para aumentar la disponibilidad de agua dulce para el uso y consumo humano.

La captación de agua de lluvia es una práctica conocida y aplicada hace miles de años en muchas partes del mundo, debido a que es una manera de conseguir agua de calidad aceptable para la ingesta humana cuando no hay otras fuentes. Es una gran alternativa porque para su colecta solo se requiere un sistema de captación, que cuenta con la gran ventaja del ahorro de energía, ya que se evita el proceso de extracción, distribución y bombeo (Rojas-Valencia et al. 2012). Su mayor desventaja es que la disponibilidad de agua se limita a las temporadas de precipitaciones altas y varía entre distintas regiones.

La recarga de acuíferos es otra práctica habitual para aumentar la disponibilidad de agua. La explotación de estos tiene que ser controlada, debido a que la reposición de los acuíferos es muy lenta y un bombeo excesivo podría conducir a su agotamiento. Estudios recientes señalan que la mejor manera de aprovechar estas fuentes sin afectar su sostenibilidad ni el derecho de terceros, bajo un contexto de balance hidrológico, es mediante la explotación única de los volúmenes de recarga vertical, la cual está definida como la fracción de precipitación que alcanza el nivel freático (Ponce et al. 2018).

Con respecto a métodos que se apoyen en la implementación de infraestructura, tenemos la construcción de represas y embalses (*Figura 8*), utilizadas para almacenar agua para el riego de cultivos o el abastecimiento de agua potable, reuniendo el recurso en los periodos de abundancia para ser utilizado en los meses de menor flujo natural. Además, puede aprovecharse su infraestructura para la generación de energía eléctrica y para el control de inundaciones (Bedoya et al. 2015). El trasvase de cuencas también es una alternativa muy útil para ayudar a mitigar los problemas de escasez de agua en algunas zonas, y ya se está aplicando en varios sectores de la costa peruana (Álvarez et al. 2014). Sin

embargo, es importante mantener bajo control el impacto humano y ambiental que este tipo de proyectos genera.



Figura 7. Represa de la Central Hidroeléctrica Porce II, ubicada en el departamento de Antioquia en Colombia. Fuente: <https://conconcreto.com/central-hidroelectrica-porce-ii/>

Por último, en cuanto a métodos relacionados a las aguas con calidad no apta para el consumo humano, está la reutilización de aguas servidas que, a pesar de no ser una práctica muy popular en el país, ofrecería muchos beneficios de ser implementada porque está demostrado que se puede utilizar para el riego de cultivos y la refrigeración industrial, favoreciendo el aseguramiento de la sostenibilidad ambiental al proteger las aguas subterráneas y producir mayor cantidad de bienes agrícolas (WHO, 2006). Incluso, dependiendo de los avances tecnológicos en el ámbito del tratamiento de aguas, podría llegar a utilizarse para completar el abastecimiento de agua potable. Por otro lado, se encuentra la desalinización del agua de mar, siendo este el método más costoso y, por ende, menos usado; aunque los avances tecnológicos están permitiendo abaratar los procesos requeridos (Subramani et al. 2015). El agua desalinizada tiene aplicaciones en la industria y su utilización también debería ser considerada como una alternativa a futuro en el país.

2.7. Huella de agua

La huella de agua es un concepto relativamente nuevo, pero sumamente importante en la actualidad. El Foro Económico Mundial indica a través de su 11avo Reporte de Riesgos Globales, que la crisis del agua se encuentra entre los diez riesgos más relevantes para la humanidad, debido a que sus efectos se reflejan sobre las tres esferas del desarrollo sustentable, las cuales son el aspecto social, el económico y el ambiental (World Economic Forum, 2016). Además, se sabe que la irrigación es la actividad humana dominante que conlleva al estrés hídrico, generando consecuencias ambientales en todo tipo de niveles; y que específicamente la agricultura, es la responsable del 85% del consumo global de agua y del 70% de su extracción aproximadamente (Bruinsma et al. 2012). Por tales motivos, a nivel mundial existía una demanda creciente de herramientas que permitan mejorar la gestión del agua, a través de la cuantificación de impactos generados por las actividades sobre el recurso hídrico.

Como respuesta a dicha problemática, en el 2014 se publicó la norma internacional ISO 14046, la cual contiene todos los principios, requisitos y directrices relacionados a la huella de agua; resaltándola como una opción metodológica para evaluar los impactos potenciales que algunos productos, servicios u organizaciones ocasionan sobre el agua, tanto en cantidad como en calidad, desde un enfoque de ciclo de vida; tal y como lo muestra la Figura 8.

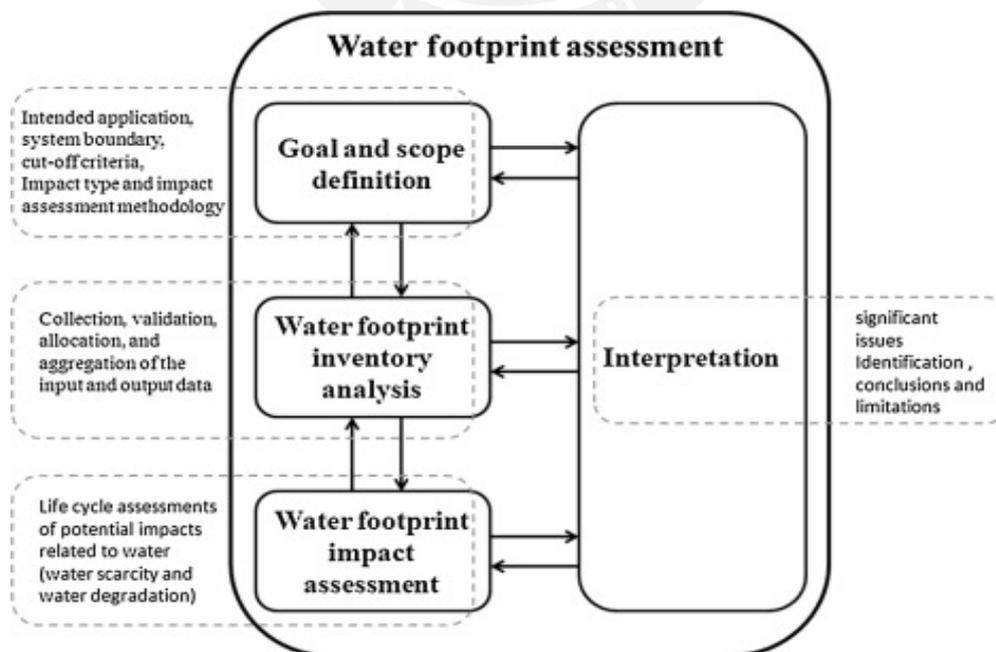


Figura 8. Diagrama metodológico para la Evaluación de la Huella de Agua. Fuente: Comprehensive water footprint assessment of the dairy industry chain based on ISO 14046 (Xue et al. 2018).

Dicha norma define la huella de agua como la métrica con la que se cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua, considerando todas las etapas del ciclo de vida, desde la adquisición de los materiales hasta el fin de vida de un producto o servicio (ISO 14046, 2014). Un estudio típico de esta huella debería contener cuatro fases interrelacionadas, siendo estas la definición del objetivo y el alcance, el análisis del inventario, la evaluación del impacto y la interpretación de los resultados.

Esta metodología es una de las más recientes y completas para realizar un análisis integral de impactos ambientales relacionados al consumo del agua, pero sienta sus bases sobre algunos conceptos y metodologías previamente desarrollados para evaluar la demanda de recursos hídricos y la presión que las actividades humanas ejercen sobre el medio ambiente (Figura 9), como la “huella ecológica” (Rees, 1992), el “agua virtual” (Allan, 1998), y la que se analizará con mayor profundidad y utilizará durante la presente investigación, la “huella hídrica” (Hoekstra, 2003).

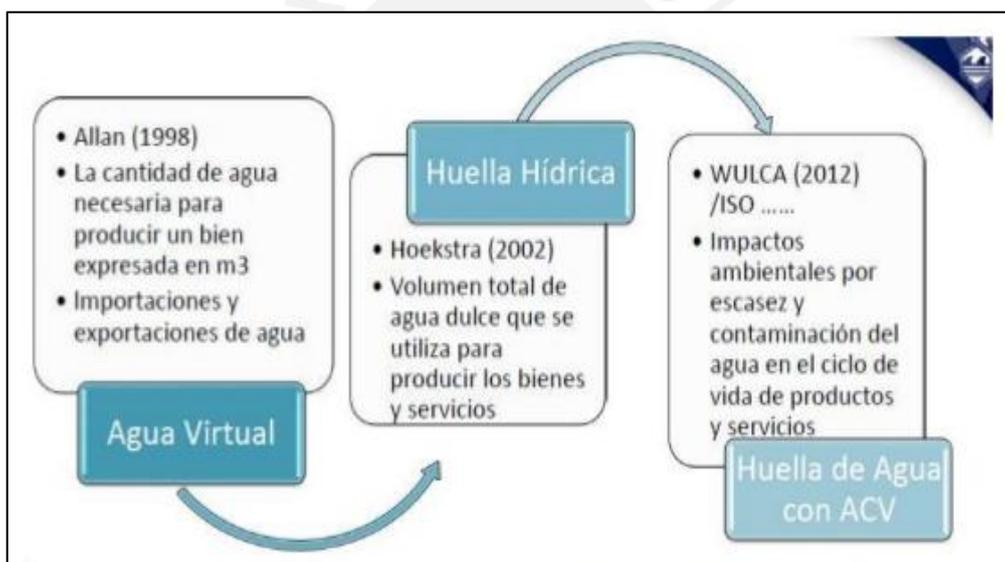


Figura 9. Conceptos que preceden y que sirvieron como base para la huella de agua. Fuente: Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe (2016).

Uno de las metodologías derivadas de la huella de agua, que es usada para determinar la magnitud del impacto sobre la disponibilidad de agua o sus efectos potenciales sobre la salud humana y los ecosistemas, es la “huella de escasez de agua”, que también parte de las bases establecidas en el contexto de los ACV (Bayart et al. 2010; Kounina et al. 2013) y se enfoca en el desarrollo de un indicador genérico basado en la escasez, que sea calculable en base a los consumos de agua y que sirva como punto de partida para

diferentes tipos de análisis. La línea metodológica que se encuentra por encima de este concepto específico se muestra en la Figura 10.

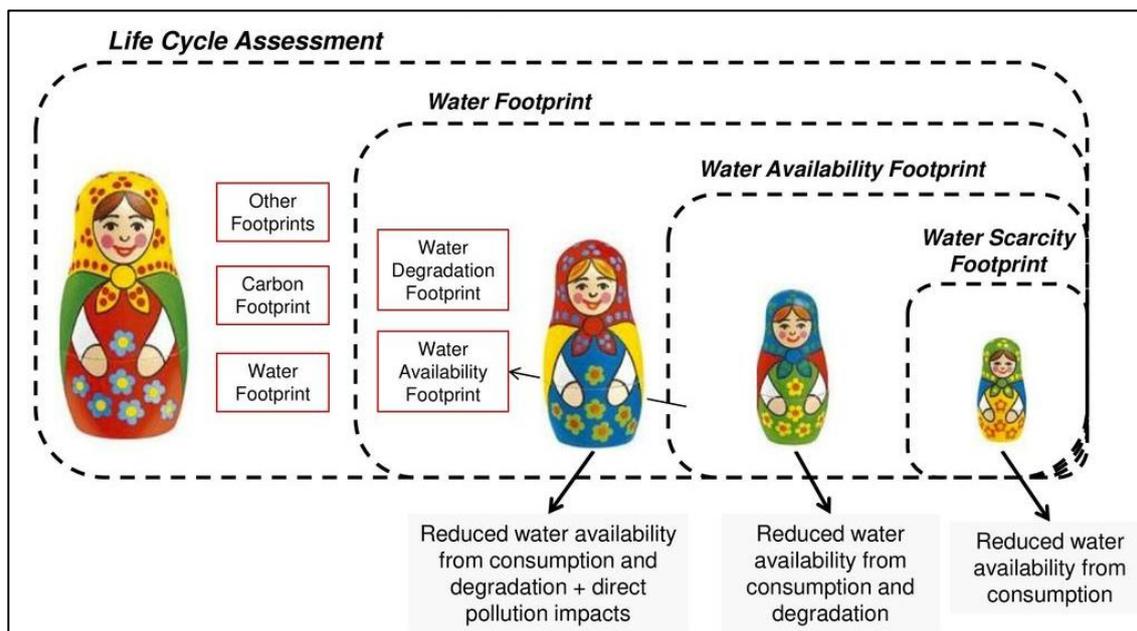


Figura 15. Subdivisión específica de la huella de agua en el contexto de un análisis de ciclo de vida. Fuente: Anne-Marie Boulay, WULCA (2017)

El desarrollo de la metodología anteriormente mencionada, emprendido por el grupo de trabajo del Uso del Agua en la Evaluación de Ciclo del Vida (WULCA, por sus siglas en inglés), comenzó al identificarse la pregunta clave desde la perspectiva de un ACV respecto a los impactos potenciales del consumo de agua, siendo esta: “¿cuál es el potencial de privar a un usuario de agua dulce, al consumir el agua dulce de esta región?” (Boulay et al. 2015). A partir de dicha cuestión, se procedió con la búsqueda de la expresión matemática que calcule el indicador que responda a dicha pregunta.

Se tomaron en cuenta expresiones que relacionaban las extracciones (Frischknecht et al. 2009; Pfister et al. 2009), los consumos (Hoekstra et al. 2012; Berger et al. 2014) y la demanda de agua (Boulay et al. 2015), con respecto a la cantidad total de agua disponible; sin embargo, ninguna resultaba convincente porque expresaban ratios que no consideraban la cantidad de agua analizada, que podía ser muy abundante o muy reducida, haciendo que resultados iguales tuvieran significados muy distintos dependiendo de su contexto específico.

La Tabla 2 muestra las diferentes posturas que se adoptaron a lo largo del tiempo para el cálculo del factor de caracterización, utilizado como base para hallar la huella de escasez

de agua y como punto intermedio en un análisis sobre los efectos del consumo de recursos hídricos sobre la salud humana y los ecosistemas (Figura 11).

Tabla 4. Cálculo de los factores de caracterización para estimar la huella de escasez de agua a lo largo del tiempo.

Nombre	Estructura principal	Descripción (significado de sus siglas en inglés)	Año
WTA	$\frac{\text{Cantidad de agua extraída}}{\text{Cantidad de agua disponible}}$	Water-to-availability	2006
CTA	$\frac{\text{Cantidad de agua consumida}}{\text{Cantidad de agua disponible}}$	Consumption-to-availability	2011
DTA	$\frac{\text{Demanda de agua}}{\text{Cantidad de agua disponible}}$	Demand-to-availability	2013
AMD	Agua disponible - Demanda de agua	Availability-minus-demand	2015

Fuente: Water Use LCA Methodology (Boulay et al. 2017).

Por tal razón, se llegó al acuerdo de que la mejor expresión para calcularlo debía estar basada en el método AWARE (Available Water REMaining, desarrollado por Boulay et al. 2016), resumiéndose como la resta entre el agua disponible y la demanda de agua, a la cual llamarían “AMD” del inglés “availability minus demand”. Es importante aclarar que se entiende como agua disponible a la diferencia entre la precipitación efectiva y la evapotranspiración en cierto entorno geográfico, es decir, a todo el volumen de agua que es aprovechable para el uso humano en un lugar determinado; mientras que la demanda de agua se refiere al volumen necesario para satisfacer todas las necesidades de la comunidad o sociedad en cuestión. Este indicador resultó cubrir los vacíos existentes en la teoría y tanto el método AWARE, como el factor de caracterización AMD, quedaron como los recomendados para la implementación en los análisis de ciclo de vida relacionados al uso del agua según la UNEP-SETAC Life Cycle Initiative en el 2016.

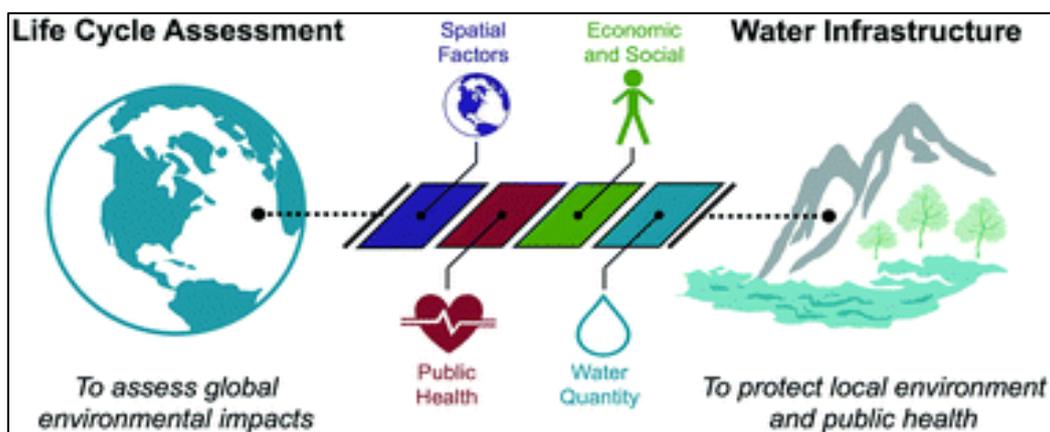


Figura 16. Esquema sobre la importancia de la inclusión factores relacionados al agua en los análisis de ciclo de vida. Fuente: Life Cycle Assessment of urban water infrastructure (Byrne et al. 2017). Visible en <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/>

2.8. Huella hídrica

La huella hídrica definida por Hoekstra a través de la Water Footprint Network tiene como objetivo ser un indicador del uso de agua dulce que no solo se enfoca en el uso directo, por el consumidor o productor, sino también en el uso indirecto (Hoekstra, 2017). Se usa para la evaluación integral de la apropiación de los recursos de agua dulce y puede aplicarse para estimar volúmenes consuntivos en diferentes niveles, como en procesos de producción, servicios ofrecidos por empresas, consumos individuales o por comunidades, etc. La huella hídrica de un producto es el volumen de agua dulce utilizado para su producción a lo largo de toda la cadena de suministro y se debe especificar el marco temporal y geográfico utilizado para el análisis (Aldaya, 2015).

Esta huella se subdivide en tres componentes las cuales son la huella azul, la huella verde y la huella gris (Figura 12). La primera se refiere al consumo de agua dulce, tanto superficial como subterránea, a lo largo de la cadena de suministro, definiendo la palabra “consumo” como la pérdida de agua disponible en los cuerpos de agua presentes en la zona delimitada de estudio, que por lo general suele delimitarse en el rango de cuencas. Las pérdidas ocurren cuando el agua se incorpora al producto, se evapora o regresa a una cuenca distinta de la inicial. La huella verde se refiere al consumo de agua proveniente de fuentes verdes, como el agua de lluvias que no se convierte en escorrentía. Por último, la huella gris se define como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar y diluir la carga de contaminantes hasta obtener una concentración aceptable que se encuentre dentro de los estándares de calidad establecidos (SABMiller and WWF, 2009).

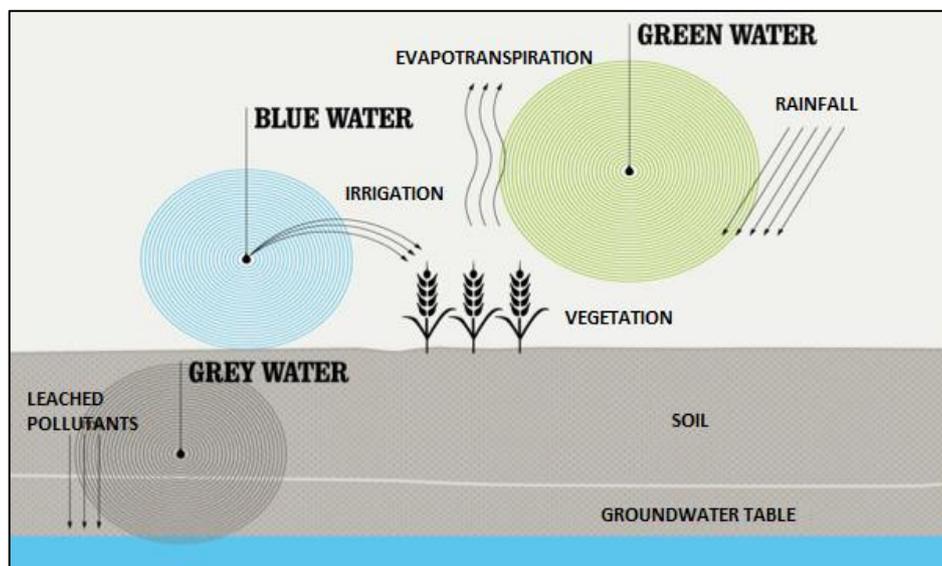


Figura 12. Huella hídrica y sus diversos componentes. Fuente: Water Footprint Network, visible en www.waterfootprint.org

La huella hídrica empleada como indicador del uso de agua difiere de las medidas clásicas de “retiros de agua” en tres aspectos específicos, siendo estos, el no considerar los volúmenes de agua azul que se devuelven al área delimitada de estudio; no restringirse solo al uso de agua azul, sino tomar en cuenta también al agua verde y gris; y no limitarse a los usos directos, sino también a los usos indirectos. Por ello, la huella hídrica ofrece mejores perspectivas sobre cómo un consumidor o el proceso de producción de un insumo se relaciona con los sistemas de agua dulce (CADIS, 2016).

Es importante mencionar que, si bien el volumen de consumo de agua puede considerarse como un impacto ambiental, la huella hídrica no es suficiente para determinar la severidad de dicho impacto, ya que ello dependería de la vulnerabilidad del sistema o de la cantidad de usuarios o contaminadores envueltos (Water Footprint Network, 2011). Como ya se mencionó anteriormente, para determinar todas las implicancias ambientales se debe usar la perspectiva de los análisis de ciclos de vida; y los consumos de agua conforman solo el primer eslabón de la cadena como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Componentes para una evaluación metodológica sobre el agua con base en los análisis de ciclo de vida, como es el caso de la huella de agua. Fuente: visible en <http://www.veoliawatertechnologies.ie/sustainability/water-footprint/>

La huella hídrica y la huella de agua son herramientas que persiguen un objetivo similar, el cual es conocer el consumo de agua asociado a un proceso y las consecuencias que dicho consumo trae consigo. Cada enfoque tiene un distinto campo de aplicación y la elección de uno sobre otro dependerá del objetivo del estudio. Por ejemplo, si se quiere determinar solamente el consumo de agua asociado a un proceso de producción determinado y poder tomar decisiones respecto a la asignación de los recursos hídricos para satisfacer la demanda directa e indirecta, puede que resulte más adecuada la metodología de la Water Footprint Network (Hoekstra, 2003). Mientras que, si el objetivo del estudio es determinar el impacto que se produce sobre la disponibilidad de agua o el daño potencial sobre la salud humano y los ecosistemas, el enfoque más apropiado sería el de la huella de agua (ISO 14046, 2014).

El alcance de la presente investigación no contempla la realización de un análisis del ciclo de vida de la producción agrícola, debido a que el estudio solo se enfoca en el primer eslabón de la cadena de producción y los datos disponibles son los referentes a los volúmenes de agua asignados para el riego de los cultivos. Por tales motivos, no es necesario la aplicación de la metodología de la huella de agua, y utilizar el concepto de huella hídrica bastaría para los fines prácticos que se pretenden alcanzar. La aplicación de la metodología elegida se limita al cálculo de los consumos de agua proveniente de la cuenca Chancay-Lambayeque para la producción agrícola de la caña, el arroz y el maíz; y su comparación con la huella hídrica teórica calculada mediante el software CROPWAT para determinar las causas de las diferencias existentes entre los valores reales y teóricos, complementado los resultados con un análisis de la ecoeficiencia a través de indicadores calculados para cada cultivo en estudio.

2.9. Ambiente

Es el entorno vital compuesto por factores naturales, sociales, culturales, económicos y estéticos, que interactúan entre sí con el individuo y con la comunidad, determinando su forma, carácter, relación y supervivencia (Conesa et al. 2010). En general, se puede decir que el ambiente comprende dos medios: el medio natural y el medio humano. El primero se forma a partir de procesos naturales que no requieren de la intervención humana (Ferrandis et al. 2006); mientras que el segundo, engloba estructuras, condiciones sociales, económicas y políticas (Conesa et al. 2010). Cada medio se subdivide en sistemas esenciales para guardar el equilibrio en el ambiente, y cada sistema está integrado por diversos componentes. La *Figura 14* muestra un esquema propuesto por Villegas (2018), que abarca todo lo anteriormente mencionado:

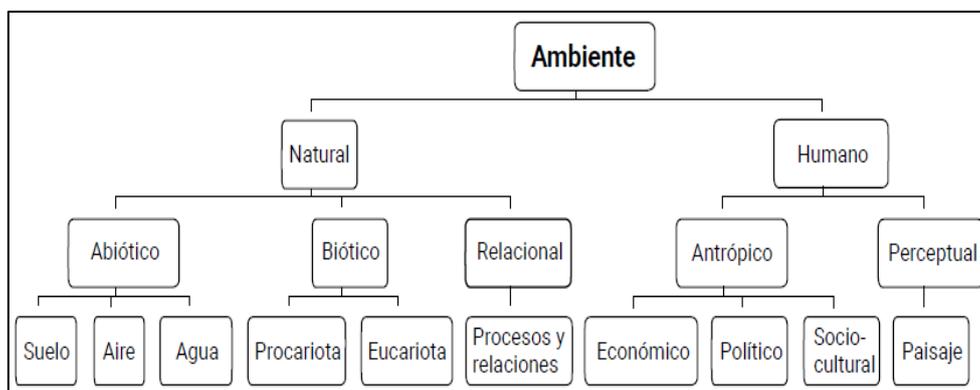


Figura 14. Mapa conceptual del Ambiente y sus componentes. **Fuente:** Metodología para la Evaluación de Impacto Ambiental de Proyecto de Infraestructura en Colombia (Villegas et al. 2018).

La presente investigación se enfocó en los componentes finales derivados del sistema abiótico con respecto al medio natural, específicamente en el agua, que es la de mayor incidencia en la agricultura; y en los componentes derivados del sistema antrópico referentes al medio humano, puntualmente en el aspecto económico que está intrínsecamente relacionado con los fines de la producción agrícola.

2.10. Ecoeficiencia y sostenibilidad

La ecoeficiencia es una de las principales herramientas para la transformación hacia el desarrollo sostenible, combinando la eficiencia ecológica y económica. Una definición brindada por el CEMDS (1992) dicta que esta se basa en el concepto de crear más bienes y servicios haciendo uso de menos recursos y generando menos desperdicios y contaminación. Además, la ISO 14045 de Gestión Ambiental de la Eco-Eficiencia (2013) que contiene los principios, requisitos y directrices para su evaluación; la define como el aspecto de la sostenibilidad que relaciona el desempeño ambiental del sistema con el valor del producto generado. La ecoeficiencia se apoya principalmente en dos pilares: reducir la sobreexplotación de los recursos naturales y disminuir la contaminación asociada a los procesos productivos. Esto se puede resumir en que la ecoeficiencia busca un incremento de la productividad de los recursos naturales, así como la reducción de los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos (Leal, 2005).

Debido a que este concepto se ha convertido en la base para las correctas gestiones en la actualidad, muchas empresas e incluso estados han empezado a aplicarlo a sus sistemas de producción. Tiene sentido estimar la ecoeficiencia a través de las dimensiones que la componen, siendo estas la economía y la ecología, para relacionar el valor de un producto con la influencia que este tiene sobre el medio ambiente. Por ello, el CEMDS estableció una expresión que sirva como base para su cálculo, la cual mostramos a continuación:

$$e = \frac{\text{Valor del producto}}{\text{Influencia ambiental}} \quad (5)$$

El valor del producto o servicio puede ser representado por la cantidad de bienes producidos o entregados, así como por las ventas netas obtenidas por la comercialización de estos. Por otro lado, la influencia ambiental puede corresponder al consumo de energía, de materiales, de agua, entre otros; o a las emisiones de gases de efecto invernadero,

substancias tóxicas, etc. Los indicadores obtenidos se expresan en las unidades relevantes para cada caso, y solo podrán ser comparados entre sí con otros indicadores calculados de la misma forma, que provengan de industrias similares o sectores específicos.

En esta investigación se calcularon indicadores económicos basados en el concepto de huella hídrica extendida para determinar la rentabilidad de producción de cada uno de los cultivos analizados. Este tipo de indicadores ya ha sido utilizado previamente en estudios relacionados a la producción agrícola (Salmoral et al. 2012), en donde se calcularon índices que tienen como numerador el valor económico obtenido por la venta del producto y, como denominador, el consumo de agua para la producción de cultivos. Además, se utilizó un método gráfico para estimar la ecoeficiencia de producción entre comisiones al relacionar la cantidad de bienes producidos con el volumen de agua consumido para su producción, formando pares ordenados que serán comparados para determinar en cuál de ellas existe la mejor relación, donde lo ideal es obtener la mayor cantidad de producto utilizando la menor cantidad de recurso posible.

La ecoeficiencia puede ser útil para estimar la sostenibilidad (Figura 15), que es definida de manera simple como “el desarrollo que asegura las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades” (Brundtland, 1987). En la actualidad, este es un concepto de vital importancia en muchísimos ámbitos, y se debe implementar con gran énfasis en la agricultura, al ser esta una actividad fundamental para el desarrollo de un país; sabiendo que al ritmo en el que nos encontramos, no será capaz de suplir la demanda existente en un futuro cercano, a menos que hagamos algo al respecto (Viñas, 2012).

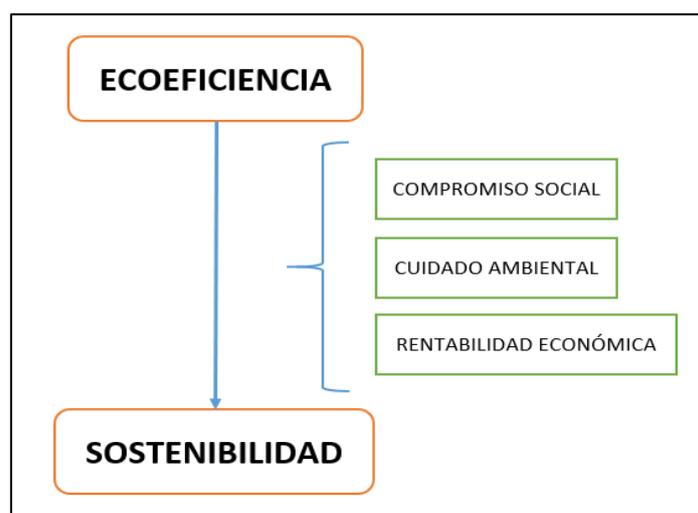


Figura 15. Relación entre ecoeficiencia y sostenibilidad. Fuente: <https://sites.google.com/site/estrategiasdesustentabilidad/>

3. Metodología

3.1. Cálculo de la huella hídrica teórica

Para el cálculo de las huellas hídricas se empleó el software CROPWAT 8.0 (FAO, 2019), el cual es un programa que utiliza modelos simplificados del desarrollo de cultivos para la estimación de los requerimientos de agua en base a datos sobre el suelo, el clima y las características propias del cultivo. El uso de este software se complementó con la base de datos CLIMWAT 2.0 (FAO, 2019), que reúne información meteorológica sobre diversas estaciones climáticas alrededor del mundo; proporcionando datos promedio mensuales sobre precipitación, velocidad del viento, temperaturas mínimas y máximas, horas de insolación y humedad. Existen varios estudios previos donde se realiza el cálculo de la huella hídrica de cultivos por este medio, como es el caso de Renderos (2014) y Bolaños (2011), siguiendo los lineamientos metodológicos de la Water Footprint Network.

Se trabajó bajo la función RAC (Requerimiento de Agua del Cultivo) del CROPWAT 8.0, la cual es una opción que utiliza un modelo que calcula la evapotranspiración del cultivo en condiciones de crecimiento ideal desde la siembra hasta la cosecha. Esto quiere decir que durante todo ese periodo de tiempo el desarrollo del cultivo no se ve limitado por la falta de agua, ya sea por lluvia o por irrigación. En base a lo mencionado, el software calcula los siguientes parámetros:

- El requerimiento de agua del cultivo a lo largo de todo su desarrollo bajo las circunstancias particulares de su entorno.
- La precipitación efectiva que recibe el cultivo durante el mismo periodo de tiempo anteriormente mencionado.
- Los requerimientos de irrigación para evitar cualquier tipo de limitación durante el desarrollo del cultivo.

3.1.1. Descripción de la herramienta

Como se dijo anteriormente, los programas a usar son el CROPWAT 8.0 y el CLIMWAT 2.0, ambos bajo las directrices de la FAO. Con respecto al primero, utilizamos solo cinco de sus módulos, de los cuales cuatro son para definir datos de entrada, mientras que el quinto otorga los datos de salida. Los módulos mencionados son los siguientes:

- **Clima/ET_o:** trabaja con los parámetros medios mensuales de temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C), humedad (%), velocidad del viento (km/día) e insolación (horas). Utiliza los datos proporcionados para el cálculo de la radiación (MJ/m²/día) y la evapotranspiración de referencia (mm/día), mediante la aplicación del método de Penman-Monteith. Los datos a introducir en este módulo son extraídos del CLIMWAT 2.0, específicamente de las estaciones seleccionadas para la zona de estudio.
- **Precipitación:** requiere valores de precipitación (mm) que pueden ser diarios, decadiarios o mensuales, los cuales también son extraídos de las estaciones específicas seleccionadas haciendo uso del CLIMWAT 2.0. El software luego calcula la precipitación efectiva con el método desarrollado por la USCS (United State Soil Conservation Service).
- **Cultivo:** necesita el ingreso de valores específicos para cada cultivo, los cuales son el K_c (adimensional), la duración de cada una de las etapas de desarrollo (días), la profundidad de las raíces (m), el agotamiento crítico (fracción), la respuesta del rendimiento (fracción) y opcionalmente, la altura del cultivo (m). También se debe ingresar la fecha de siembra para que el software tenga una referencia sobre qué datos climáticos utilizar. El software posee archivos predeterminados para varios cultivos, entre los cuales usamos los de la caña de azúcar, el arroz y el maíz; cambiando solo las respectivas fechas de siembra para que concuerden con las utilizadas en la zona de estudio.
- **Suelo:** trabaja con los parámetros de humedad del suelo disponible total (mm/m), la tasa máxima de infiltración de la precipitación (mm/día), profundidad radicular máxima (cm), agotamiento inicial de la humedad de suelo (%) y la humedad de suelo inicialmente disponible (mm/m). Para el caso específico del arroz, debido a que su riego es por inundación, el programa requiere también de datos sobre la porosidad drenable (%), el agotamiento crítico para grietas del fangueo (fracción), la tasa máxima de percolación después del fangueo (mm/día), la disponibilidad de agua a la siembra (mm) y la altura máxima de la lámina de agua (mm).
- **Requerimiento de Agua del Cultivo (RAC):** este módulo es el que proporciona los datos de salida, los cuales son la evapotranspiración del cultivo (mm), la precipitación efectiva (mm) y los requerimientos de riego (mm); que

posteriormente utilizaremos para el cálculo de las respectivas huellas hídricas. Los valores están calculados para periodos de diez días, es decir, en un régimen decadiario; siendo la unidad de referencia final la de mm/dec.

3.1.2. Datos de entrada

Los datos de entrada utilizados para el cálculo de las huellas hídricas a través del software, son los siguientes:

- Clima/ET₀: datos extraídos de la estación #45 del Perú, ubicada en el departamento de Lambayeque a una altura de 27 msnm, latitud 6.68°S y longitud 79.88°W. Corresponde a la base de datos del software CLIMWAT 2.0.
- Precipitación: datos extraídos de la estación #45 del Perú, ubicada en el departamento de Lambayeque a una altura de 27 msnm, latitud 6.68°S y longitud 79.88°W. Corresponde a la base de datos del software CLIMWAT 2.0.
- Cultivo: archivos predeterminados en el software CROPWAT 8.0, para los cultivos de la caña de azúcar, el arroz y el maíz; donde se ajustó únicamente las fechas de siembra a las correspondientes utilizadas en la producción agrícola del departamento de Lambayeque.
- Suelo: archivo predeterminado en el software CROPWAT 8.0, para el tipo de suelo rojo franco-arenoso, que es el que más se asemeja al de la zona de estudio.

La Figura 16 muestra la interfaz de software CLIMWAT 2.0.

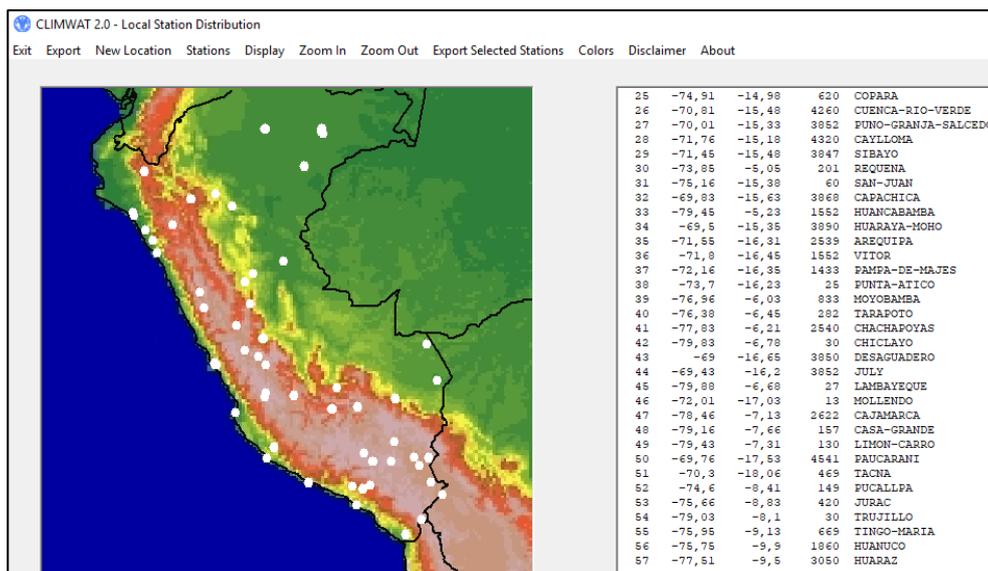


Figura 16. Interfaz del software CLIMWAT, utilizado para la extracción de información climática de estaciones meteorológicas del Perú. Fuente: Software CLIMWAT 2.0.

Las Figuras 17, 18, y 19, muestran la interfaz del software CROPWAT 8.0 y algunos de los módulos que utilizamos para el cálculo de las huellas hídricas:

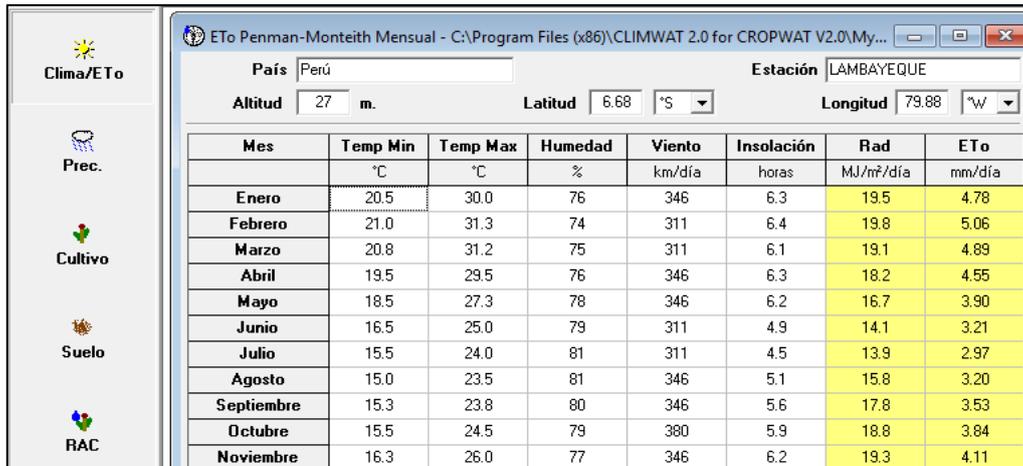


Figura 17. Módulo de Clima/ET₀ del software CROPWAT con datos extraídos del software CLIMWAT, correspondientes a la estación meteorológica Lambayeque. Fuente: Software CROPWAT 8.0.

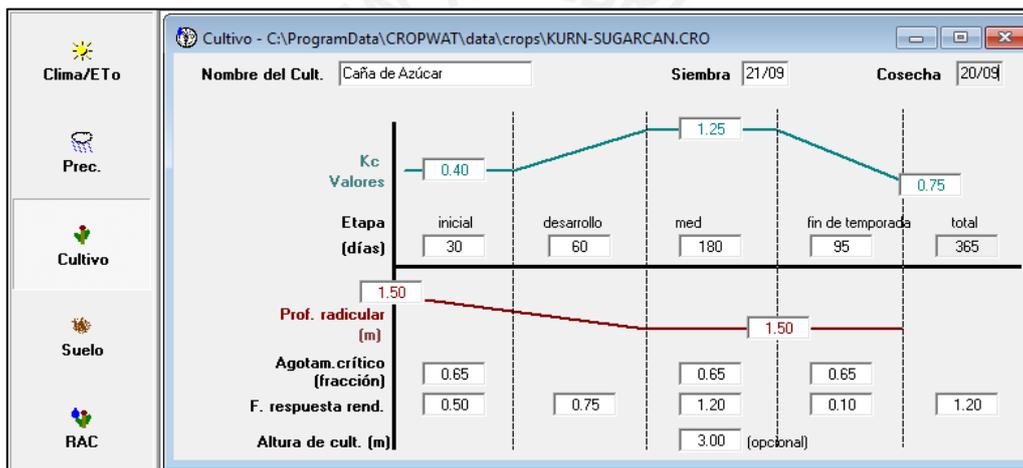


Figura 18. Módulo de Cultivo del software CROPWAT con datos correspondientes a la caña de azúcar, provenientes de un archivo predeterminado del programa. Fuente: Software CROPWAT 8.0.



Figura 19. Módulo RAC del software CROPWAT con los resultados obtenidos tras la simulación, a través de los cuales calcularemos las huellas hídricas. Fuente: Software CROPWAT 8.0.

3.1.3. Modelo matemático

El cálculo de las huellas hídricas se llevó a cabo mediante la siguiente ecuación:

$$HH_i = \frac{RAC_i}{Y} \quad (7)$$

Donde HH representa la magnitud de la huella hídrica para un cultivo específico expresada en unidades de volumen sobre masa, e “i” puede tomar el valor de “verde” o “azul”. RAC es el requerimiento de agua del cultivo, ya sea verde o azul, y su unidad es de volumen entre área. Finalmente, Y representa el rendimiento del cultivo en unidades de masa sobre área.

Para calcular el RAC, se deben sumar los valores de la evapotranspiración real del cultivo ET_c , desde el día de siembra hasta el día de cosecha ($d=1 \rightarrow d=n$), tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$RAC_i = 10 * \sum_{d=1}^{d=n} ET_{c,i} \quad (8)$$

Donde ET_c está expresado en milímetros sobre días y el factor “10” se utiliza para convertir dichas unidades a metros cúbicos sobre hectáreas, correspondientes al RAC. Los valores de ET_c son obtenidos directamente del software, que lo calcula automáticamente de la multiplicación entre el coeficiente de cultivo K_c respectivo y la evapotranspiración de referencia ET_o , calculada a través del método Penman-Monteith.

Por último, se debe establecer la diferencia entre la evapotranspiración verde del cultivo ET_{verde} y la evapotranspiración azul del cultivo ET_{azul} . La componente verde corresponde al valor mínimo entre la evapotranspiración del cultivo y la precipitación efectiva. La componente azul corresponde al valor máximo entre cero y la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo y la precipitación efectiva. Lo mencionado se encuentra expresado de manera más simple en las ecuaciones mostradas a continuación:

$$ET_{verde} = \min(ET_c, P_{ef}) \quad (9)$$

$$ET_{azul} = \max(ET_c - P_{ef}, 0) \quad (10)$$

3.2. Indicadores y estimación gráfica de ecoeficiencia

El aspecto económico juega un rol fundamental al momento de hablar sobre la eficiencia de algún proceso, ya que, para los fines prácticos de la sociedad actual, todo se resume a saber si la inversión a través del consumo de ciertos recursos resulta rentable con respecto al valor del producto generado. Este tema es de vital importancia en la producción agrícola, porque como mencionamos en el apartado respectivo, esta desempeña un papel crucial en la economía de un país, proporcionando no solo alimentos y materias primas, sino también oportunidades de empleo a una parte importante de la población.

Existen algunos lineamientos que relacionan el consumo de recursos, como lo son el agua y la tierra, con su valor económico. Uno de las más frecuentes en el ámbito de la agricultura es el de la huella hídrica extendida, que pretende realizar una valoración económica del agua con el fin de conocer si su consumo resulta en una correcta inversión. Un estudio realizado por Salmoral et al. (2012), presenta las ideas generales para el desarrollo del concepto mencionada, tal y como se muestra en la *Figura 20*:

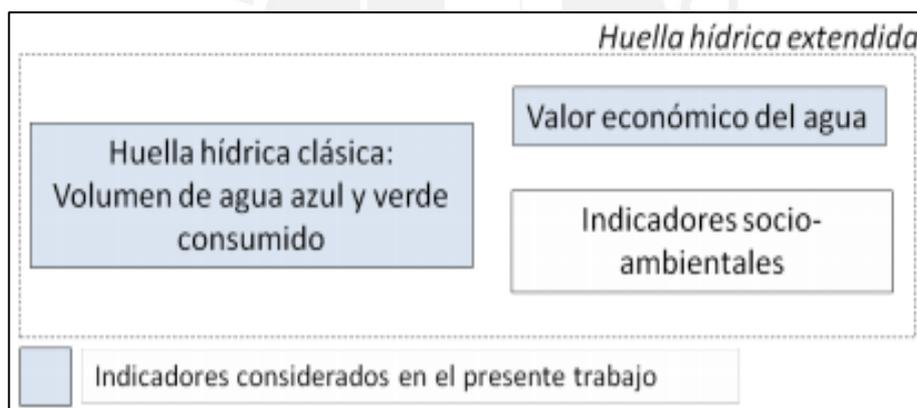


Figura 20. Concepto de la huella hídrica extendida. Fuente: Salmoral et al. 2012.

Para la presente investigación se utilizaron las ideas propuestas por Salmoral con base en la huella hídrica extendida, realizando una valoración económica para los recursos del agua y del suelo, siendo estos los de mayor incidencia en la agricultura. Posteriormente se procedió a relacionar la valoración con el consumo de estos, mediante indicadores económicos que representen el valor monetario obtenido por unidad de recurso consumido.

Los indicadores elegidos fueron la Productividad Aparente del Agua y la Productividad Aparente del Suelo (AWP y ALP respectivamente, por sus siglas en inglés), que han sido utilizados previamente en estudios similares (Salmoral et al. 2012).

La Productividad Aparente del Agua (AWP) se utilizó para estimar el valor de la producción agrícola en nuevos soles por unidad de agua consumida. Para su cálculo se usó la siguiente expresión:

$$AWP_i = \frac{P_{m,i}}{HH_{A,i}} \quad (11)$$

Donde P_m es el precio de mercado del producto cultivado en nuevos soles por tonelada, y HH_A representa la huella hídrica azul en metros cúbicos por tonelada; siendo “i” una variable que puede tomar el valor de cualquier cultivo analizado, como lo son la caña de azúcar, el arroz o el maíz.

Por otro lado, la Productividad Aparente del Suelo (ALP) se usó para estimar el valor económico generado por hectárea de tierra cultivada. Se calculó de la siguiente forma:

$$ALP_i = P_{m,i} \times Y_i \quad (12)$$

Donde P_m es nuevamente el precio de mercado del producto cultivado en nuevos soles por tonelada, y Y es el rendimiento del cultivo en toneladas por hectárea cultivada; siendo “i” una variable que representa el cultivo sobre el cuál se están calculando los indicadores.

La *Tabla 3* muestra un ejemplo del uso de los indicadores de ecoeficiencia descritos anteriormente, para la comparación entre cultivos, extraído de una investigación sobre la huella hídrica extendida (Salmoral et al. 2012).

Tabla 3. Tabla comparativa de valores de AWP y ALP para distintos cultivos.

Grupo cultivo	Superficie (ha)	Consumo agua (Mm3)			AWP (€/m3)	ALP (€/ha)
		Verde	Azul	Total		
Alfalfa	225	0.1	1.1	1.2	1.93	9139
Algodón	7278	7.2	37.5	44.7	0.19	968
Frutales	999	1.4	4.2	5.6	2.35	9934
Girasol	2229	23.5	3.1	26.6	0.32	441
Olivar	19923	176.5	32.1	208.6	1.44	2315
Patata	95	0.0	0.5	0.5	1.21	6070
TOTAL	30749	208.7	78.5	287.2	7.44	28867

Fuente: Análisis de la Huella Hídrica Extendida para la Cuenca del Guadalquivir (Salmoral et al. 2012).

Por otro lado, siguiendo el concepto de ecoeficiencia y la fórmula establecida en el marco teórico, se relacionará el valor de la producción con la influencia ambiental ocasionada por esta. Para ello, se usará la producción neta de un cultivo específico para representar el valor, y el volumen neto de agua consumida para su producción para representar el impacto sobre el ambiente.

Primero, se normalizarán los valores calculados de producción y agua consumida para cada comisión entre el rango de 0 a 1, con el fin de poder compararlas entre sí. Luego, se establecerán pares ordenados por comisión que representan la relación anteriormente mencionada. Finalmente, se graficarán estos pares ordenados de manera que se pueda determinar gráficamente qué comisiones poseen una mejor relación entre insumo y recurso, tal y como se muestra en la *Figura 21*; donde todos los pares ordenados ubicados por encima de la diagonal son más ecoeficientes debido a que poseen una alta producción con un bajo consumo de agua, mientras que para los que están debajo de la diagonal sucede todo lo contrario. Este método empírico será aplicado para los cultivos del arroz y el maíz, ya que tendremos una mayor cantidad de valores plasmados en el gráfico y, por lo tanto, una mejor muestra para poder derivar conclusiones al respecto.

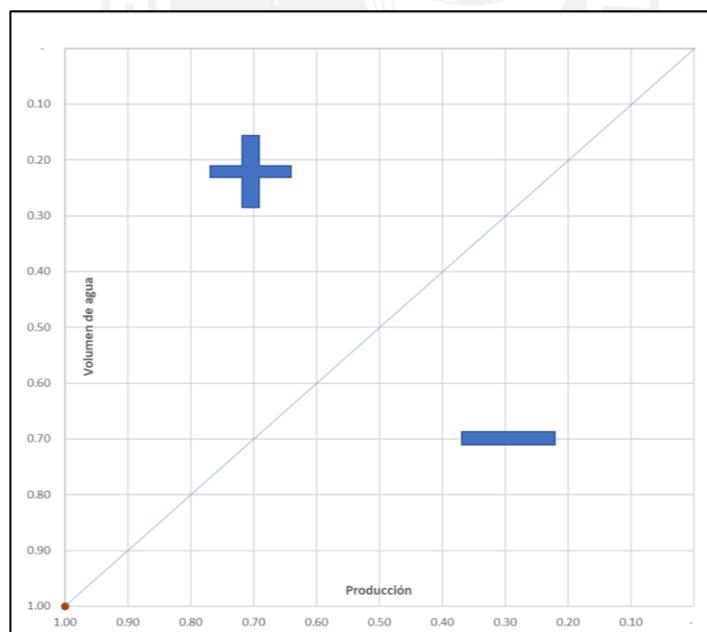


Figura 31. Modelo del diagrama utilizado para estimar la ecoeficiencia entre comisiones. Fuente: Elaboración propia.

Complementando la información obtenida del gráfico con los indicadores económicos, podremos deducir cuáles son los cultivos más rentables en términos económicos y ecológicos para ciertas comisiones.

4. Resultados

4.1. Descripción del caso

Como se mencionó previamente, el departamento de Lambayeque es uno de los más importantes del país en cuanto a la producción de recursos agrícolas, tanto para consumo nacional como para exportación. Por tales razones, se debe llevar a cabo estas prácticas de la manera más ecoeficiente posible, identificando primero los puntos débiles del sistema agrícola en los que deberíamos trabajar para lograr el objetivo planteado.

Para ello, se analizó la influencia de la infraestructura hidráulica menor y su rol en el sistema, además de realizar el cálculo de la huella hídrica y la estimación de la ecoeficiencia de producción de cada uno de los cultivos seleccionados.

4.1.1. Cultivos en estudio

Entre los cultivos de mayor importancia producidos en el departamento de Lambayeque encontramos a la caña de azúcar, el arroz y el maíz amarillo duro; cuya siembra, de acuerdo con el Anuario Agrícola 2017 (MINAGRI), cubre aproximadamente el 67% de la superficie total cultivada del departamento, como se muestra en el *Figura 22*.

Por lo anteriormente mencionado, nos enfocamos en dichos cultivos para el estudio; además de resultar práctico en nuestro caso debido a que disponemos de gran cantidad de información técnica sobre ellos.

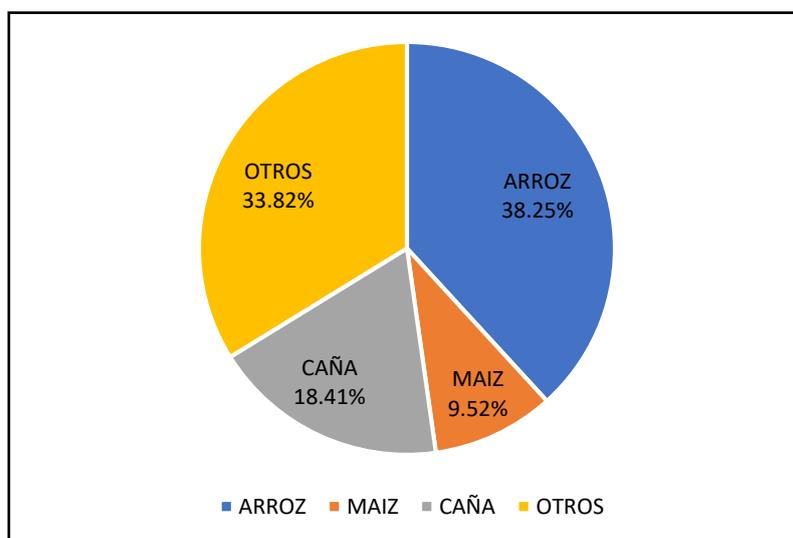


Figura 22. Distribución de la superficie cultivada en el departamento de Lambayeque. Fuente: Anuario Agrícola 2017 - MINAGRI.

Con base a información obtenida de la Encuesta Nacional de Intenciones de Siembra 2017 (MINAGRI, 2017), se sabe que en las parcelas que componen las comisiones naturales se siembra en promedio aproximadamente un 55% de arroz, un 15% de maíz amarillo duro y un 30% de varios otros cultivos; mientras que, en las parcelas correspondientes a las empresas agroindustriales se siembra un 100% de caña de azúcar. Es importante mencionar que la proporción anteriormente señalada varía un poco dependiendo de cada comisión analizada, lo cual permitirá que se puedan realizar comparaciones cuantitativas entre ellas.

La asignación del agua de la cuenca es administrada por el ANA y varía para cada una de las comisiones, ya que se toman en cuenta factores como la superficie total a regar y el uso que se le dará al recurso hídrico. Se trabajó suponiendo que la distribución del agua asignada es relativamente proporcional al área sembrada de cada cultivo, aunque al igual que en la superficie de siembra, existirán pequeñas variaciones en la proporción dependiendo de cada comisión. A continuación, la *Tabla 4* muestra los valores correspondientes para cada comisión durante el año 2017, que fueron usados como base para los cálculos posteriores:

Tabla 4. Cuadro resumen con datos sobre cada una de las comisiones en estudio.

COMISION DE REGANTES	N° USUARIOS	N° PREDIOS	SUPERF. BAJO RIEGO (ha)	VOLUMEN ASIGNADO (m3)	DOTACIÓN (m3/ha)
SASAPE	2,405	3,088	5,041.56	20,280,240.00	4,022.61
MOCHUMI	1,831	2,292	4,107.48	34,464,960.00	8,390.77
MUY FINCA	3,339	4,098	10,784.92	50,263,200.00	4,660.51
TUCUME	912	1,114	1,677.57	11,426,400.00	6,811.27
MORROPE	5,244	8,330	12,345.52	31,527,360.00	2,553.75
LA RAMADA	96	109	314.23	5,727,283.00	18,226.40
CHONGOYAPE	1,865	2,276	10,064.02	64,742,889.60	6,433.11
FERREÑAFE	4,267	5,082	18,135.57	109,825,200.00	6,055.79
CAPOTE	577	903	3,877.79	29,833,228.80	7,693.35
LAMBAYEQUE	1,864	2,550	7,447.19	52,563,600.00	7,058.18
CHICLAYO	1,733	2,374	7,424.54	43,512,508.80	5,860.63
REQUE	726	923	2,027.85	6,935,760.00	3,420.26
MONSEFU	3,742	4,277	6,446.28	25,251,868.80	3,917.28
ETEN	493	622	617.62	2,112,480.00	3,420.38
PITIPO	723	951	3,706.72	23,518,080.00	6,344.72
E.A. PUCALA	1	4	5,997.00	22,233,225.00	3,707.39
E.A. POMALCA	1	6	11,153.00	77,202,542.00	6,922.13
E.A. TUMAN	1	4	7,900.00	36,349,689.00	4,601.23
TOTAL	29,820	39,003	119,068.85	647,770,515.00	-

Fuente: Propia, en base a información de documentos oficiales de la Junta de Usuarios Chancay-Lambayeque 2017.

De las Figuras 24 y 25, se puede determinar a simple vista que la asignación de agua y la superficie total bajo riego de cada comisión poseen una tendencia similar, lo cual corrobora una distribución coherente del recurso.

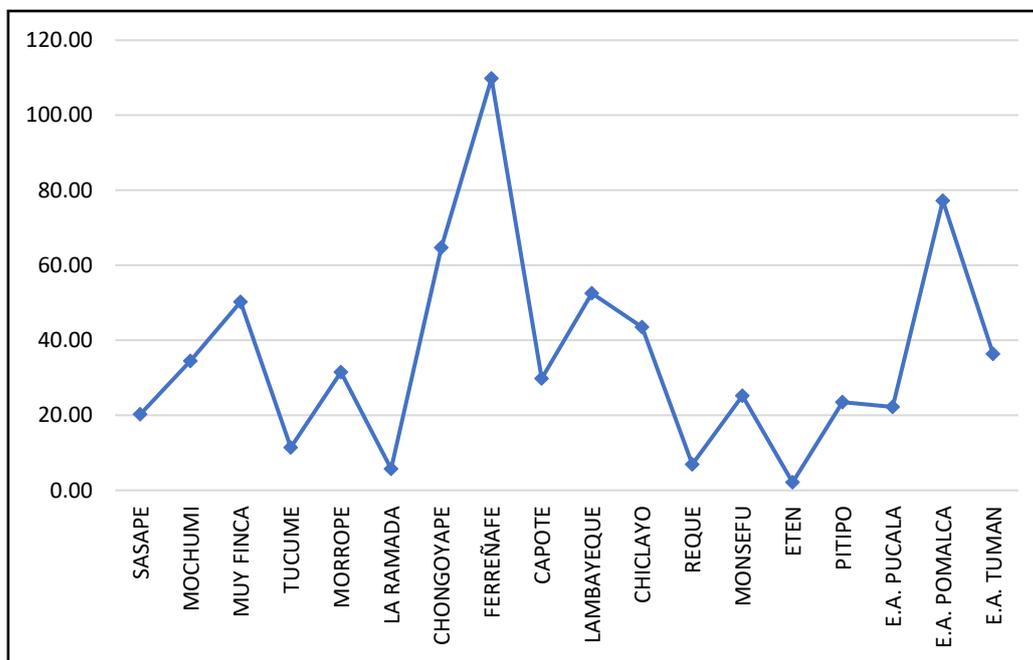


Figura 24. Volumen de agua asignada por comisión en millones de metros cúbicos. Fuente: Elaboración propia, en base a datos obtenidos de la Junta de Usuarios del Valle Chancay-Lambayeque.

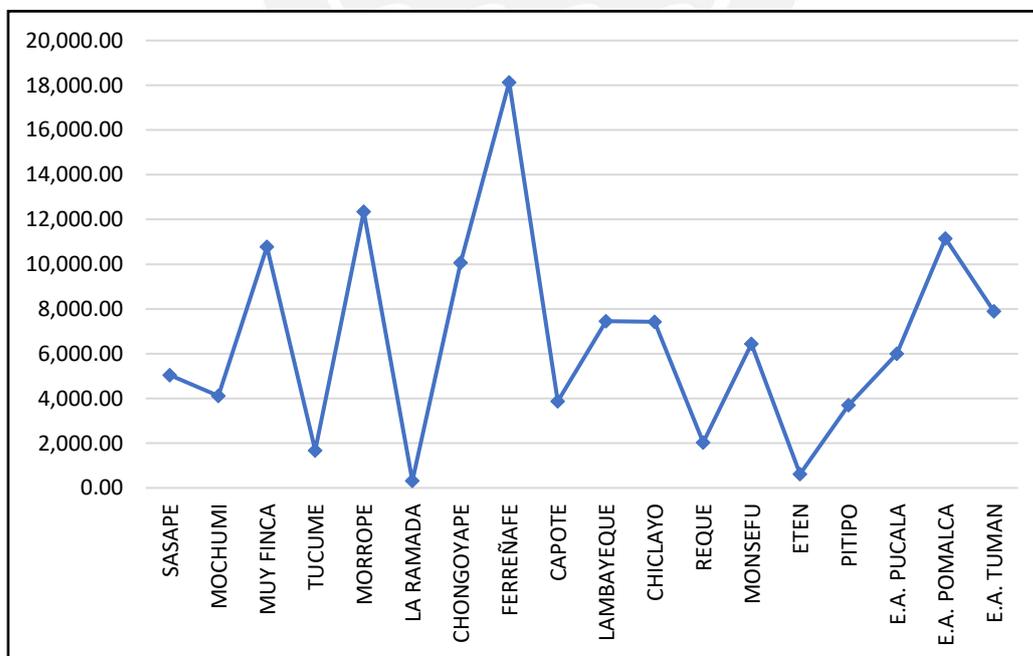


Figura 25. Superficie bajo riego por comisión expresado en hectáreas. Fuente: Elaboración propia, en base a datos obtenidos de la Junta de Usuarios del Valle Chancay-Lambayeque.

Sin embargo, al analizar esta proporción mediante las dotaciones, se aprecia en la *Figura 26* que los valores para cada comisión se mantienen relativamente dentro de lo esperado con un promedio aproximado de 5,500 m³/ha, a excepción de la comisión de La Ramada, la cual posee una dotación de más de 18,000 m³/ha.

Al ser este un valor muy alto en comparación con los demás, se profundizó en la determinación de las razones que podrían generar semejantes números con el fin de conocer si existían pérdidas de carácter significativo relacionadas a la infraestructura. Luego de recolectar un poco de información, se determinó que la asignación de agua es desproporcionada debido a que esta comisión es la única que no se encuentra regulada por la junta y, por ende, posee una gran cantidad de usuarios y predios que no figuran en los datos y que no fueron contabilizados para los cálculos respectivos; además de que en ella existen varias tomas de agua ilegales que afectan a los volúmenes asignados.

A pesar de que esto afecta ligeramente la exactitud de los resultados obtenidos, se decidió continuar sin realizar ajustes, ya que el volumen de agua asignado para dicha comisión representa menos del 1% del agua disponible total y no atenta de manera significativa teniendo en cuenta los fines prácticos de la investigación.

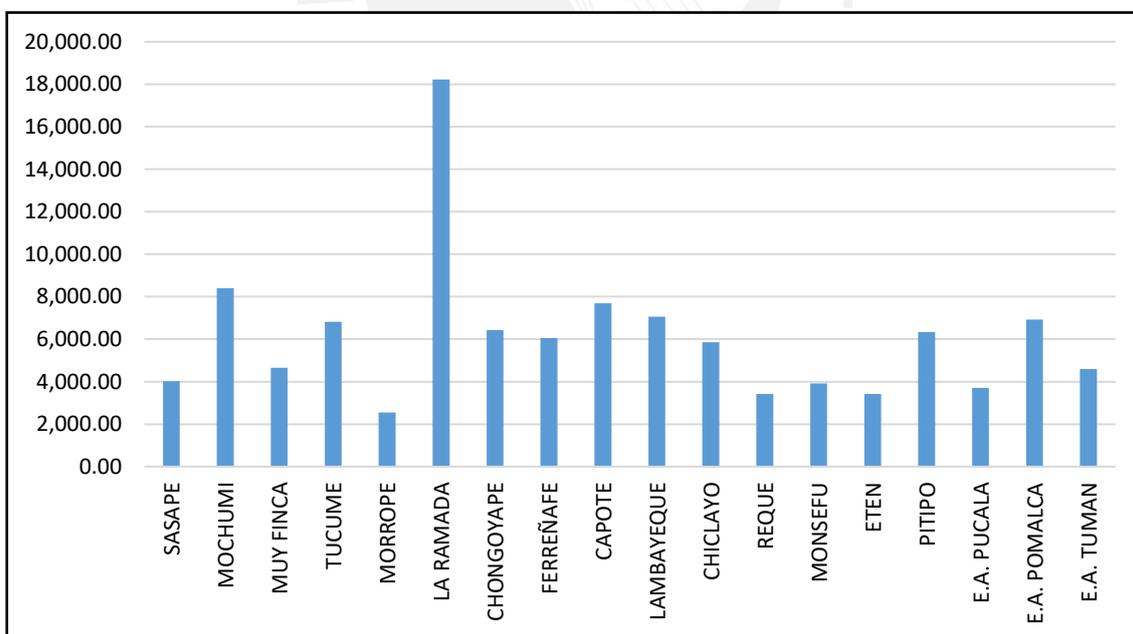


Figura 26. Dotación de agua por comisiones. Fuente: Elaboración propia, en base a datos obtenidos de la Junta de Usuarios del Valle Chancay-Lambayeque.

A continuación, con el fin de calcular los volúmenes de producción de cada cultivo, se deben conocer sus rendimientos promedio en la región de Lambayeque. Dichos rendimientos fueron extraídos de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2017 (INEI, 2017)

y se usaron para obtener las toneladas producidas por hectárea, tras multiplicarlos por la superficie sembrada respectiva de cada cultivo analizado. Los valores con los volúmenes finales de producción y de agua asignada por comisión se muestran en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Cuadro resumen con volúmenes de producción y de asignación de agua por comisión.

COMISION DE REGANTES	PROD. CAÑA (ton)	PROD. ARROZ (ton)	PROD. MAÍZ (ton)	VOL. ASIG. CAÑA (m3)	VOL. ASIG. ARROZ (m3)	VOL. ASIG. MAÍZ (m3)
SASAPE		23,826	6,418		11,965,342	3,853,246
MOCHUMI		18,096	3,302		18,955,728	4,135,795
MUY FINCA		48,377	11,561		28,147,392	8,042,112
TUCUME		6,719	1,236		5,713,200	1,256,904
MORROPE		51,422	16,543		16,394,227	6,305,472
LA RAMADA		1,258	379		2,863,642	1,030,911
CHONGOYAPE		45,143	10,789		36,256,018	10,358,862
FERREÑAFE		81,349	20,656		61,502,112	18,670,284
CAPOTE		16,773	2,598		16,109,944	2,983,323
LAMBAYEQUE		34,002	7,484		29,961,252	7,884,540
CHICLAYO		32,114	5,969		23,496,755	5,221,501
REQUE		8,122	1,495		3,467,880	762,934
MONSEFU		28,915	8,638		14,141,047	5,050,374
ETEN		2,820	579		1,204,114	295,747
PITIPO		16,627	3,974		13,170,125	3,762,893
E.A. PUCALA	442,424			22,233,225		
E.A. POMALCA	663,513			77,202,542		
E.A. TUMAN	565,338			36,349,689		
TOTAL	1,671,275	415,561	101,622	135,785,456	283,348,776	79,614,897

Fuente: Elaboración propia, en base a los cálculos realizados en el apartado.

4.1.3. Infraestructura hidráulica

Las actividades de captación, almacenamiento y conducción principal del agua de la cuenca son llevadas a cabo por el Proyecto Especial Olmos Tinajones, mientras que la distribución final hacia las parcelas se realiza mediante canales de distribución y demás, considerados como infraestructura menor. Lo mencionado se aprecia en la *Figura 27*.

Con respecto a la infraestructura mayor, el sistema empieza con unos túneles que dirigen el agua de los ríos Conchano y Chotano para ser captada por la bocatoma Raca Rumi, la cual tiene una capacidad de captación de 75 m³/s. El agua es posteriormente llevada a través de un canal alimentador hacia el reservorio de Tinajones, que tiene una capacidad de almacenamiento de 320 MMC. Finalmente, un canal de derivación conduce dicha agua hasta el Repartidor La Puntilla, donde será dispuesta para la irrigación de los diversos sectores del Valle Chancay-Lambayeque.

La distribución final se realiza mediante el sistema hidráulico menor, que se delimita en función de las comisiones de regantes previamente mencionadas, y está compuesto por una serie de canales que cumplen con la función de repartir el agua hacia los diferentes sectores. Desde aquí empezó el análisis de la infraestructura, debido a que es el punto de partida para la repartición del volumen asignado y su posterior uso para el riego, incorporándose finalmente a uno de los productos agrícolas estudiados.

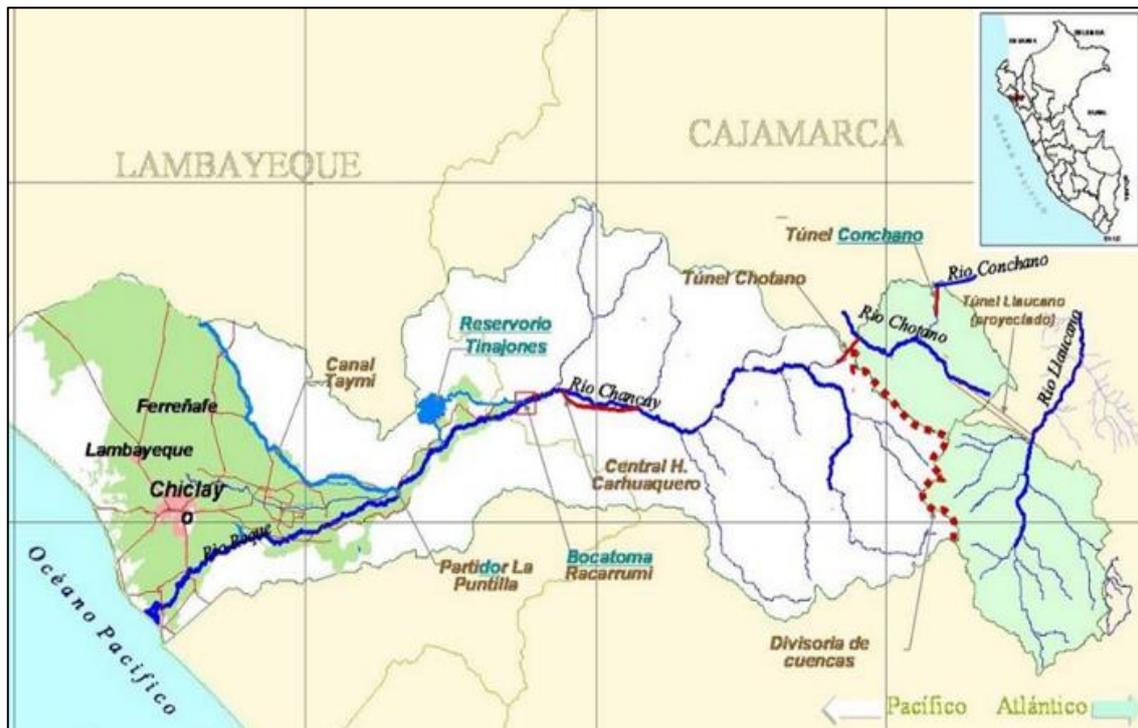


Figura 27. Esquema general del Proyecto Especial Olmos Tinajones. Fuente: <http://www.peot.gob.pe>

4.2. Cálculo de pérdidas ocasionadas por la infraestructura

4.2.1. Pérdidas por distribución

El consumo indirecto del recurso hídrico empieza desde su distribución hacia las parcelas, a través de canales de tierra que propician la pérdida innecesaria de agua por infiltración, además de otros factores como evaporación, desbordes o pérdidas por rupturas puntuales.

De acuerdo con estimaciones empíricas realizadas por el Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos, la Comisión Nacional de Riego de Chile y el Ministerio de Agricultura y Riego del Perú, la pérdida de agua por distribución se puede establecer entre el rango de 20% a 30%, dependiendo de la calidad del suelo y la extensión de los canales; reduciéndose hasta entre un 5% a 10% si el canal se encuentra revestido.

Con respecto a la presente investigación, la *Tabla 6* muestra información cuantitativa oficial sobre la infraestructura menor en cada una de las comisiones de regantes, obtenida a partir de una base de datos proporcionada por la Junta de Usuarios Chancay-Lambayeque, actualizada hasta el año 2017:

Tabla 6. Tabla resumen con valores sobre la composición de los canales a lo largo de toda su extensión, clasificados por comisiones de regantes.

COMISION DE REGANTES	# DE CANALES	LONGITUD REVESTIDA	LONGITUD NO REVESTIDA	FRACCIÓN REVESTIDA	SUBTOTAL (km)
SASAPE	156	5.81	203.17	0.0278	208.97
MOCHUMI	199	17.20	194.53	0.0812	211.73
MUY FINCA	99	14.24	308.92	0.0441	323.17
TUCUME	116	17.77	80.06	0.1817	97.84
MORROPE	229	9.10	373.60	0.0238	382.71
LA RAMADA	9	0.00	16.33	0.0000	16.33
CHONGOYAPE	88	24.06	153.58	0.1354	177.64
FERREÑAFE	283	57.83	365.76	0.1365	423.59
CAPOTE	102	16.66	143.82	0.1038	160.47
LAMBAYEQUE	186	5.85	308.65	0.0186	314.50
CHICLAYO	101	35.17	203.11	0.1476	238.28
REQUE	37	6.72	64.55	0.0943	71.27
MONSEFU	105	5.27	176.93	0.0289	182.20
ETEN	49	0.00	32.47	0.0000	32.47
PITIPO	87	19.19	89.19	0.1771	108.39
E.A. PUCALA	42	26.67	36.36	0.4232	63.03
E.A. POMALCA	38	2.98	111.78	0.0260	114.76
E.A. TUMAN	NT	NT	NT	0.0971	NT
TOTAL	1926	264.51	2,862.82	-	3,127.33

Fuente: Elaboración propia, en base a información de la Junta de Usuarios del Valle Chancay-

Sabiendo que es posible que exista una gran cantidad de diferencias en las características físicas de los diversos canales, y que la presencia de estas afectaría de manera distinta su eficiencia en la conducción del agua; con el fin de simplificar los cálculos se decidió asumir los porcentajes de pérdidas menos conservadores, rescatados de la literatura existente, para todos los canales considerados en el estudio. Los valores asumidos fueron de 30% para las zonas no revestidas y de 10% para los tramos revestidos. Con respecto al caso de la Empresa Agroindustrial Tután, sobre la cual lamentablemente no contamos con información detallada, consideramos un valor promedio para la fracción revestida con el fin de poder realizar los posteriores cálculos.

Utilizando esta información para el cálculo de las pérdidas y complementándola con los datos que se tienen sobre los volúmenes asignados para cada comisión, se obtuvieron los resultados mostrados en la *Tabla 7*:

Tabla 7. Tabla resumen con los valores parciales y totales de las pérdidas por distribución en cada una de las comisiones de regantes.

COMISIÓN DE REGANTES	FACTOR PÉRDIDA (DISTRIB.)	PÉRDIDA CAÑA (m3)	PÉRDIDA ARROZ (m3)	PÉRDIDA MAÍZ (m3)	VOLUMEN APLICADO CAÑA (m3)	VOLUMEN APLICADO ARROZ (m3)	VOLUMEN APLICADO MAÍZ (m3)
SASAPE	0.294		3,523,115	1,134,562		8,442,227	2,718,683
MOCHUMI	0.284		5,378,748	1,173,545		13,576,980	2,962,250
MUY FINCA	0.291		8,196,108	2,341,745		19,951,284	5,700,367
TUCUME	0.264		1,506,389	331,406		4,206,811	925,498
MORROPE	0.295		4,840,286	1,861,649		11,553,941	4,443,823
LA RAMADA	0.300		859,092	309,273		2,004,549	721,638
CHONGOYAPE	0.273		9,894,867	2,827,105		26,361,152	7,531,758
FERREÑAFE	0.273		16,771,395	5,091,316		44,730,717	13,578,968
CAPOTE	0.279		4,498,585	833,071		11,611,359	2,150,252
LAMBAYEQUE	0.296		8,876,971	2,336,045		21,084,281	5,548,495
CHICLAYO	0.270		6,355,469	1,412,326		17,141,286	3,809,175
REQUE	0.281		974,994	214,499		2,492,886	548,435
MONSEFU	0.294		4,160,464	1,485,880		9,980,583	3,564,494
ETEN	0.300		361,234	88,724		842,880	207,023
PITIPO	0.265		3,484,624	995,607		9,685,501	2,767,286
E.A. PUCALA	0.215	4,788,290			17,444,935		
E.A. POMALCA	0.295	22,759,426			54,443,116		
E.A. TUMAN	0.281	10,199,356			26,150,333		
TOTAL		37,747,072	79,682,341	22,436,753	98,038,384	203,666,435	57,178,144

Fuente: Elaboración propia, en base al cálculo de pérdidas por distribución realizado en este apartado.

El volumen aplicado es la resta entre el volumen asignado y las pérdidas generadas por la conducción y distribución del agua a través de los canales, y equivale a la cantidad de agua que llega a ser aplicada a los cultivos por irrigación. Sin embargo, esta no es la cantidad de agua que termina por incorporarse, tal y como se verá en el apartado correspondiente.

Se rescata de las *Figuras 28 y 29*, que el porcentaje de pérdidas es bastante similar entre todas las comisiones, siendo este del 28.1% en promedio, restringiendo así el volumen de agua aplicado hacia los cultivos a casi las tres cuartas partes del total asignado. Esto representa una pérdida de 150 millones de metros cúbicos de agua al año, lo que podría

traducirse en el riego de otras 28 mil hectáreas de superficie cultivada bajo la dotación promedio actual.

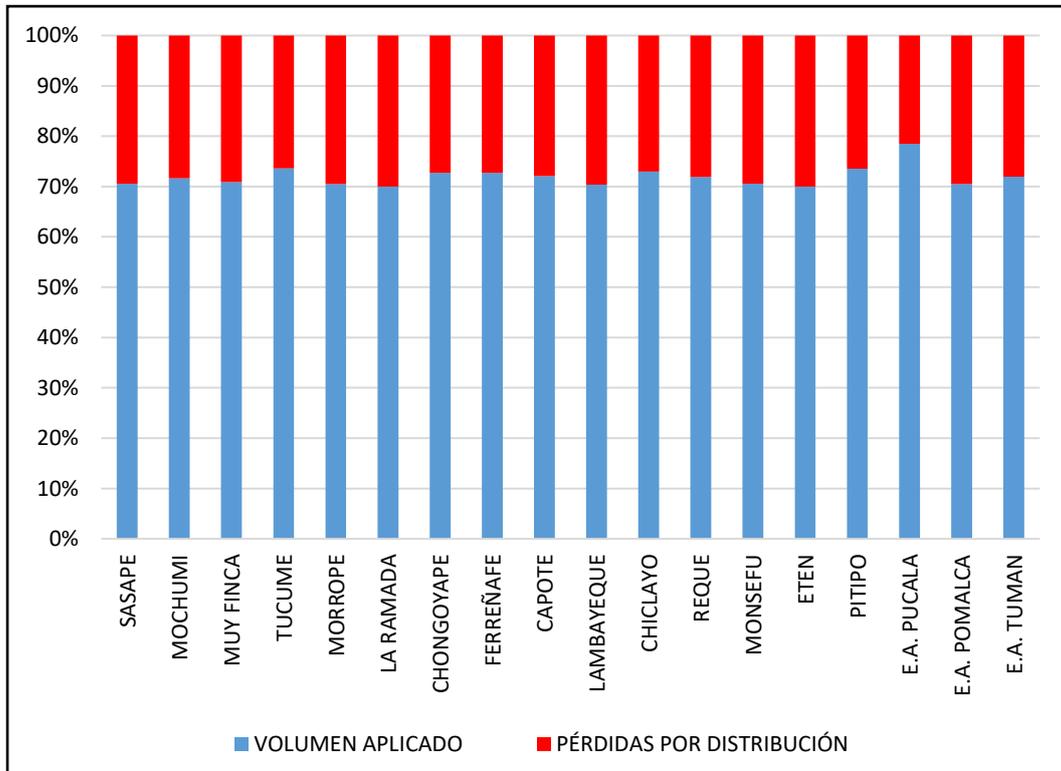


Figura 28. Composición del volumen asignado por comisión. Fuente: Elaboración propia, en base al cálculo de pérdidas por distribución.

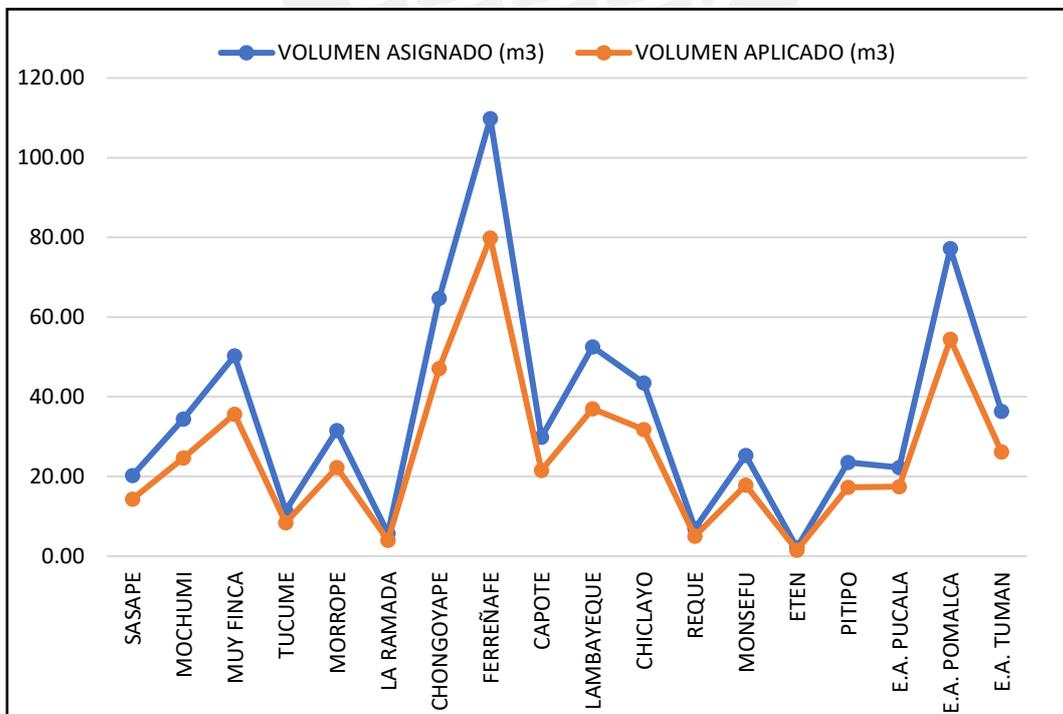


Figura 29. Análisis de brechas entre volumen asignado y aplicado por comisión, expresado en millones de metros cúbicos. Fuente: Elaboración propia, en base al cálculo de pérdidas por distribución.

Estas pérdidas se generan principalmente por infiltración y fugas puntuales; sin embargo, son relativamente fáciles de disminuir mediante la toma de medidas como el revestimiento de los canales. Si se lograra revestir al menos la mayor parte de la extensión de los canales principales de cada una de las comisiones, las pérdidas podrían reducirse fácilmente a un 15%. Lamentablemente, la fracción revestida de los canales es en promedio menor al 10% como se aprecia en las Figuras 30 y 31.

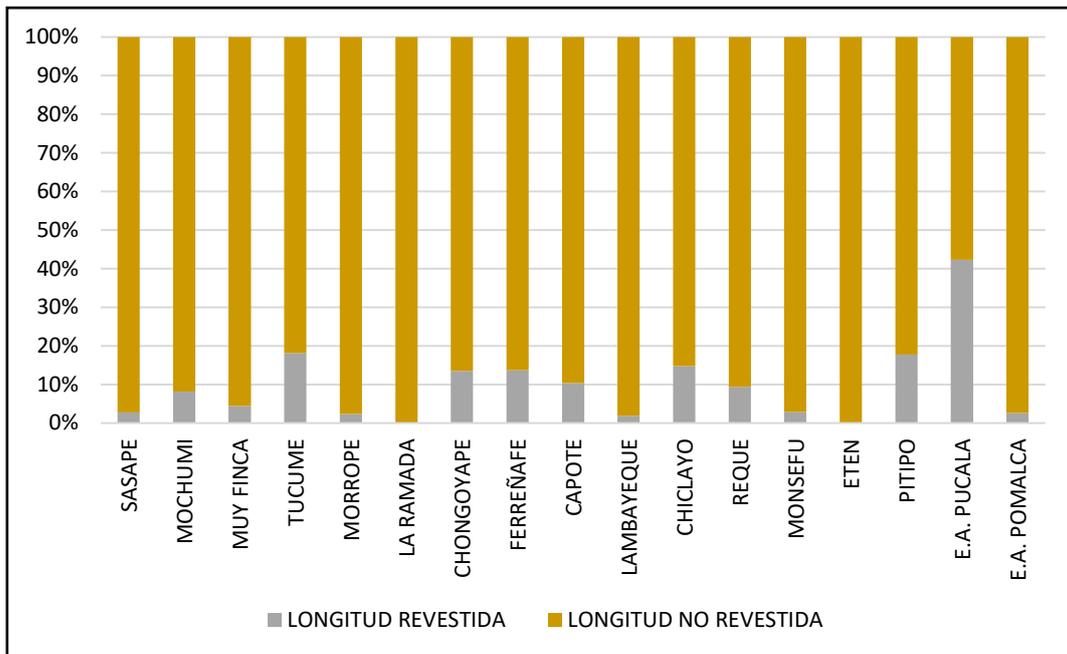


Figura 30. Porcentaje de revestimiento de los canales por comisión. Fuente: Elaboración propia, en base a datos obtenidos de la Junta de Usuarios del Valle Chancay-Lambayeque.

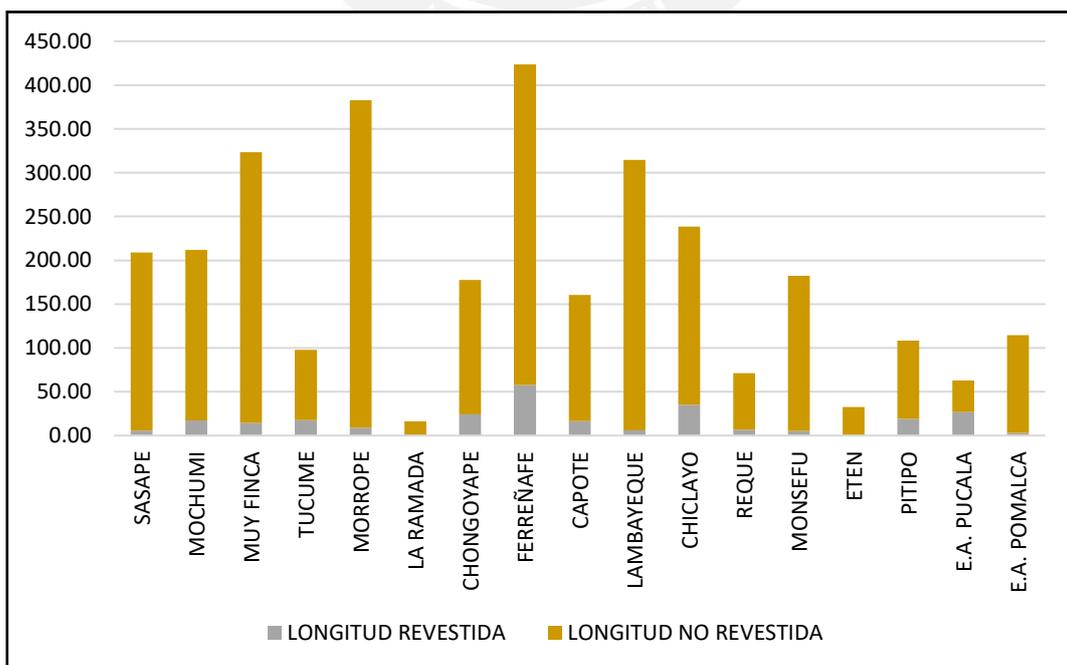


Figura 31. Longitud total en kilómetros de los canales por comisión. Fuente: Elaboración propia, en base a datos obtenidos de la Junta de Usuarios del Valle Chancay-Lambayeque.

4.2.2. Pérdidas por aplicación

De todo el volumen de agua aplicado a los cultivos, la gran mayoría se pierde por percolación profunda y evaporación, debido a que el área de riego es considerablemente más amplia que el área efectiva aprovechada por las raíces, además de que estas últimas poseen un límite de absorción. Por tales motivos, para poder determinar las pérdidas por aplicación, se utilizaron referencias literarias de valores empíricos sobre la eficiencia de los diferentes métodos de riego empleados en los cultivos estudiados.

Como se mencionó en el apartado del marco teórico, la eficiencia de riego de cada método puede variar de acuerdo con el manejo y control de este, el tipo de suelo, entre otros factores; pero en general se mantiene dentro de cierto rango. La *Tabla 8*, muestra algunos valores aproximados:

Tabla 8. Rango de eficiencias de aplicación por método de riego.

Método de Riego	Rango de Eficiencia de Aplicación (%)
SUPERFICIAL	
Riego tradicional o tendido	10 - 30
Riego por bordes	40 - 80
Riego por surcos	40 - 85
TECNIFICADO	
Riego por aspersión	50 - 90
Riego por goteo	65 - 95

Fuente: Manual del Cálculo de Eficiencia para Sistemas de Riego - MINAGRI 2015.

Es importante mencionar que en el ambiente práctico no todas las parcelas utilizan el mismo método de riego para el mismo cultivo, porque recientemente en algunas se están implementando modalidades tecnificadas con el fin de ahorrar el recurso hídrico y mejorar la eficiencia de producción. Un caso de gran significancia en el departamento de Lambayeque sería el del Proyecto Olmos, el cual ha implementado un tipo de riego tecnificado por pivotes en un área de más de 10mil hectáreas que cubre cultivos como la caña de azúcar, el banano orgánico, maíz, arroz, alfalfa, entre otros. Según los especialistas, para el caso específico del arroz, se ha mejorado la eficiencia de riego hasta en un 50% en dicha zona (Agencia de Noticias Andina, 2016).

Por tales razones, debemos ajustar los valores de eficiencia de aplicación para cada uno de los cultivos, de modo que sean lo más representativos posibles. Luego de realizar las aproximaciones respectivas se asumió de manera conservadora un valor de eficiencia de riego del 45% para el caso del arroz, del 70% para el caso del maíz, y del 80% para la caña de azúcar; valor relativamente alto en esta última, pero justificado, debido a que se cultiva casi en su totalidad con fines agroindustriales y por ende se encuentra bajo sistemas de riego de alta eficiencia para que su producción sea lo más rentable posible.

Tras realizar los cálculos y determinar la cantidad de agua perdida por riego en cada una de las comisiones, se obtuvieron los valores mostrados en la *Tabla 9*:

Tabla 9. Tabla resumen con los valores parciales y totales de las pérdidas por aplicación en cada una de las comisiones de regantes y por cada tipo de cultivo.

FACTOR PÉRDIDA (APLIC.)	0.20	0.55	0.30			
COMISIÓN DE REGANTES	PÉRDIDA CAÑA (m3)	PÉRDIDA ARROZ (m3)	PÉRDIDA MAÍZ (m3)	VOLUMEN NETO CAÑA (m3)	VOLUMEN NETO ARROZ (m3)	VOLUMEN NETO MAÍZ (m3)
SASAPE		4,643,225	815,605		3,799,002	1,903,078
MOCHUMI		7,467,339	888,675		6,109,641	2,073,575
MUY FINCA		10,973,206	1,710,110		8,978,078	3,990,257
TUCUME		2,313,746	277,650		1,893,065	647,849
MORROPE		6,354,667	1,333,147		5,199,273	3,110,676
LA RAMADA		1,102,502	216,491		902,047	505,146
CHONGOYAPE		14,498,633	2,259,527		11,862,518	5,272,230
FERREÑAFE		24,601,895	4,073,690		20,128,823	9,505,277
CAPOTE		6,386,247	645,075		5,225,111	1,505,176
LAMBAYEQUE		11,596,354	1,664,548		9,487,926	3,883,946
CHICLAYO		9,427,707	1,142,752		7,713,579	2,666,422
REQUE		1,371,088	164,531		1,121,799	383,905
MONSEFU		5,489,320	1,069,348		4,491,262	2,495,146
ETEN		463,584	62,107		379,296	144,916
PITIPO		5,327,025	830,186		4,358,475	1,937,100
E.A. PUCALA	3,488,987			13,955,948		
E.A. POMALCA	10,888,623			43,554,493		
E.A. TUMAN	5,230,067			20,920,266		
TOTAL	19,607,677	112,016,539	17,153,443	78,430,707	91,649,896	40,024,701

Fuente: Elaboración propia, en base al cálculo de pérdidas por aplicación realizado en este apartado.

Como se mencionó anteriormente, este tipo de pérdidas dependen principalmente del método de riego utilizado para cada cultivo. Por tal motivo, la comparación entre resultados ya no se realiza entre comisiones, sino por tipo de cultivo, porque asumimos que las prácticas agrícolas y los factores naturales son iguales en todas las parcelas.

Podemos ver en las Figuras 32 y 33, que el arroz es el cultivo con mayores pérdidas, además de ser el más abundante. Su producción, en términos de consumo de recursos, no es óptima; y quizá sea más rentable sustituir el cultivo por otro más eficiente.

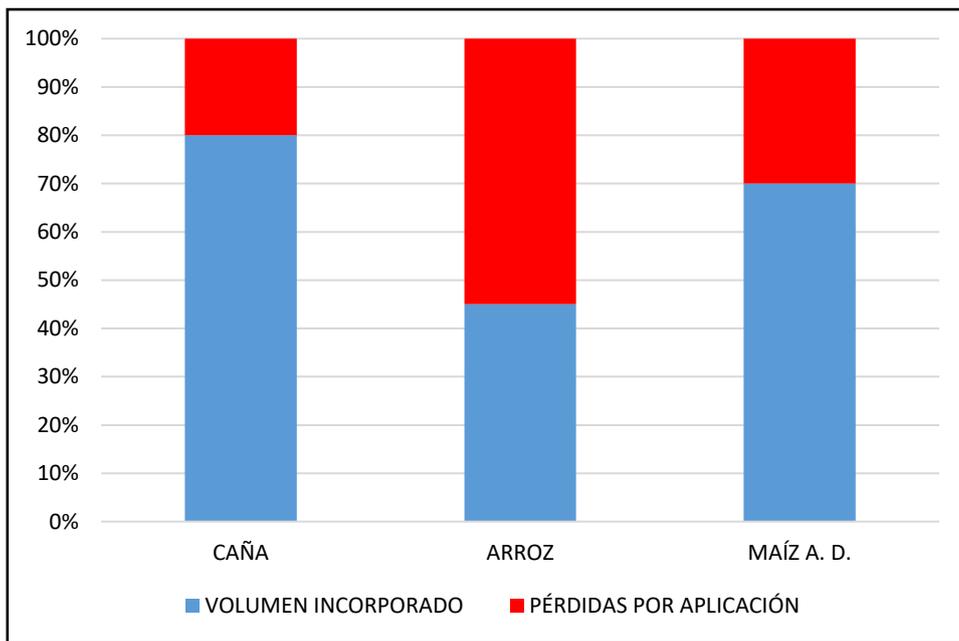


Figura 53. Composición del volumen total de riego por tipo de cultivo. Fuente: Elaboración propia, en base al cálculo de pérdidas por aplicación.

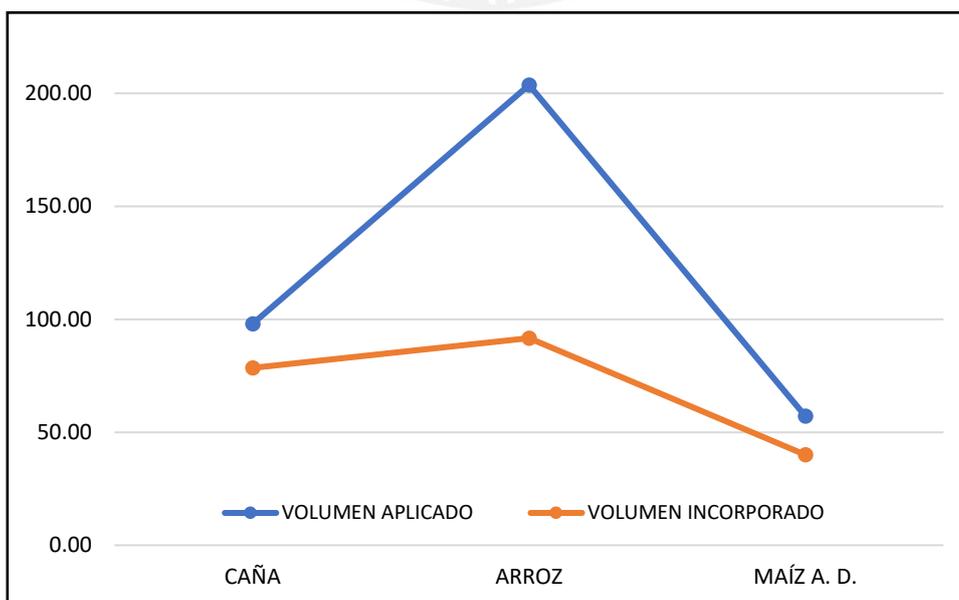


Figura 33. Análisis de brechas expresado en millones de metros cúbicos por tipo de cultivo. Fuente: Elaboración propia, en base al cálculo de pérdidas por aplicación.

4.2.3. Pérdidas totales

Tras calcular las pérdidas por distribución y aplicación y conocer el volumen neto de agua aprovechado por los cultivos, se puede restar de los volúmenes inicialmente asignados para determinar las pérdidas totales. Las Figuras 34 y 35, muestran que la pérdida total es del 57.9% del agua destinada al riego de los tres cultivos en estudio. Entre todos, el arroz es el menos eficiente y en gran medida, debido a que por ser también el más abundante, acumula la mayor parte de las pérdidas por distribución.

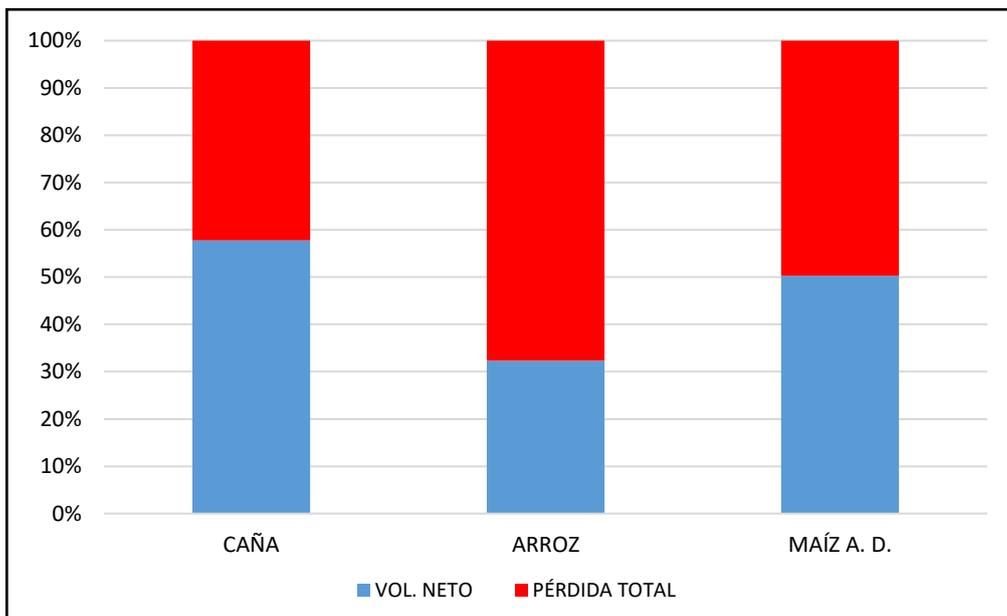


Figura 34. Composición del volumen total asignado por tipo de cultivo. Fuente: Elaboración propia, en base al cálculo de pérdidas totales.

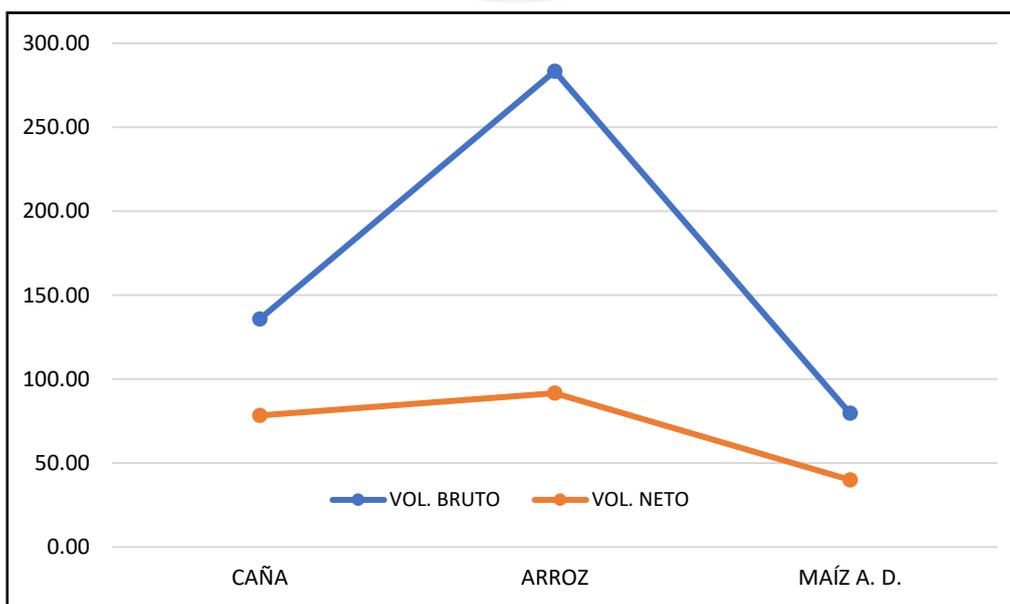


Figura 35. Análisis de brechas expresado en millones de metros cúbicos por tipo de cultivo. Fuente: Elaboración propia, en base al cálculo de pérdidas totales.

4.3. Estimación de las huellas hídricas teóricas

A continuación, se procedió con el cálculo de las huellas hídricas teóricas con el fin de poder compararlas con los volúmenes netos calculados en el apartado anterior, y así poder establecer conclusiones sobre a qué se deben las diferencias existentes. A través del uso del software CROPWAT 8.0 se pudo determinar los requerimientos hídricos de los cultivos bajo un contexto lo más cercano posible al ámbito real agrícola del departamento de Lambayeque, tal y como se mencionó en el apartado metodológico correspondiente.

4.3.1. Huella hídrica verde

La huella hídrica verde, de acuerdo con la definición señalada en el marco teórico, es la magnitud de la precipitación total que es aprovechada por el cultivo a lo largo de su desarrollo, y se calculó como el valor mínimo entre la precipitación efectiva y la evapotranspiración del cultivo. Al ser Lambayeque un departamento con muy bajo nivel de precipitaciones, los valores acumulados de lluvia durante toda la etapa de crecimiento de los cultivos son ampliamente inferiores a los valores calculados de evapotranspiración, por lo que la huella hídrica verde será siempre la precipitación efectiva.

Los valores de precipitación mensual fueron obtenidos mediante el software CLIMWAT, que compila una serie de datos de diversas estaciones climáticas alrededor del mundo, utilizando para este caso una ubicada en la provincia de Chiclayo en el departamento de Lambayeque. Sabiendo también la fecha de siembra recomendada de cada cultivo para esta región y la duración de su desarrollo, además de las características del suelo para poder determinar cuánta de la precipitación total es convertida en escorrentía y cuánta es incorporada al producto, se pudo estimar la huella hídrica verde usando el software.

La unidad estándar para representar la huella hídrica es de metros cúbicos de agua consumida, ya sea verde o azul, por tonelada de producto generado; la cual es la recomendada en el manual metodológico para el cálculo de la huella hídrica (Hoekstra et al. 2011) cuando se aplica este método para el estudio de cultivos. Sin embargo, también se muestran los resultados en unidades de metros cúbicos de agua consumida por hectárea de superficie cultivada, con el fin de que la comparación entre cultivos sea más completa y enriquecedora al poder realizarse desde diferentes perspectivas.

A continuación, se muestran las Figuras 36 y 37 con los valores individuales de huella hídrica verde para cada uno de los cultivos analizados:

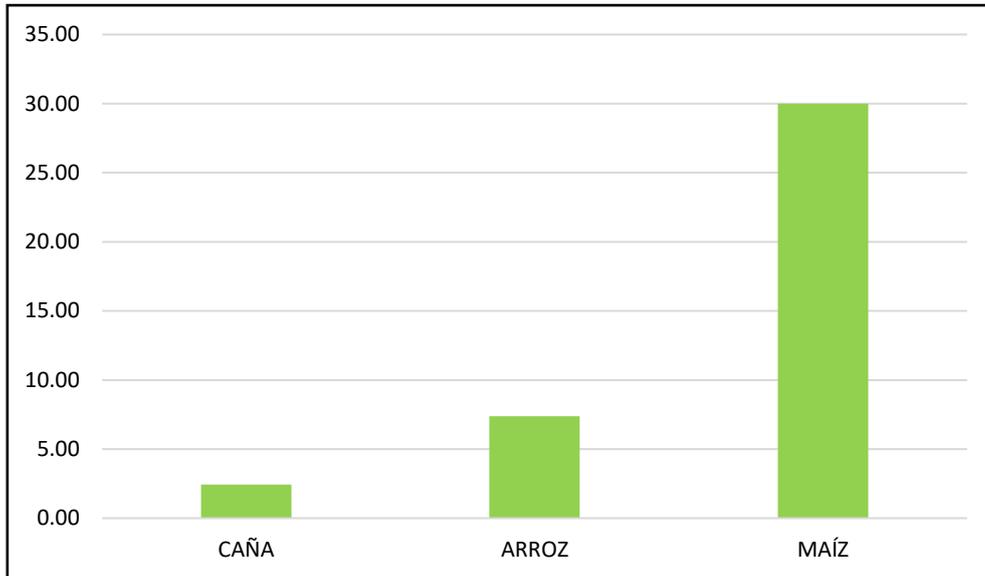


Figura 36. Huella hídrica verde por cultivo en metros cúbicos por tonelada. Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados de las simulaciones realizadas con el software CROPWAT 8.0.

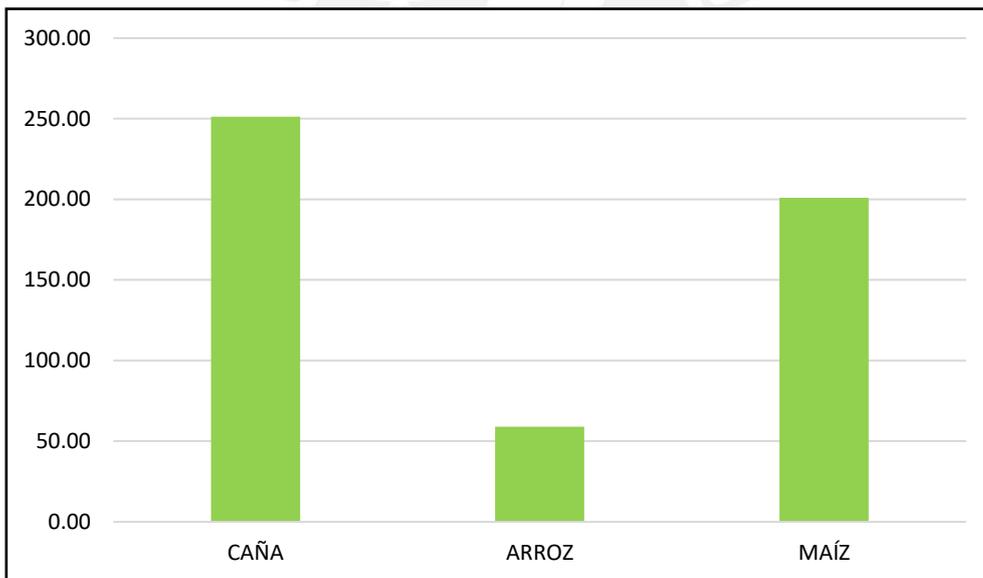


Figura 64. Huella hídrica verde por cultivo en metros cúbicos por hectárea. Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados de las simulaciones realizadas con el software CROPWAT 8.0.

Como se puede apreciar, la relación entre los resultados individuales por cultivo varía en gran manera dependiendo de las unidades en los que se representen, debido a que entra en juego el concepto de rendimiento de producción de cada cultivo. A pesar de lo mencionado, la huella hídrica verde no es de gran significancia para sacar conclusiones, porque como veremos más adelante, representa una fracción mínima de la huella hídrica total de cada cultivo.

4.3.2. Huella hídrica azul

La huella hídrica azul es por definición el volumen total de agua de riego que se incorporó al producto. Se estimó en base a las simulaciones realizadas con el software CROPWAT 8.0, siendo la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo y la cantidad de esta que fue suplida por las precipitaciones.

Las Figuras 38 y 39, presentan los valores individuales por cultivo de la huella hídrica azul en las dos unidades previamente establecidas:

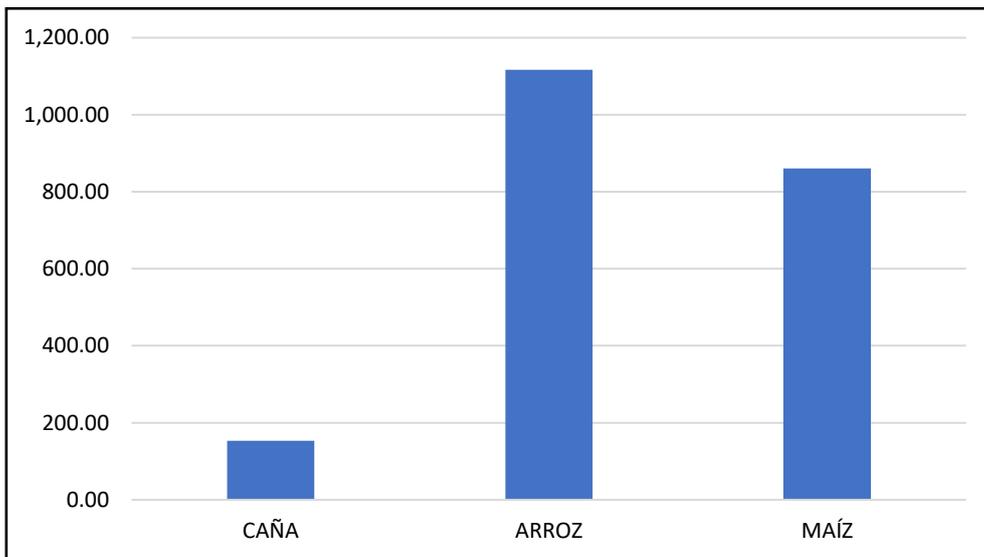


Figura 38. Huella hídrica azul por cultivo en metros cúbicos por tonelada. Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados de las simulaciones realizadas con el software CROPWAT 8.0.

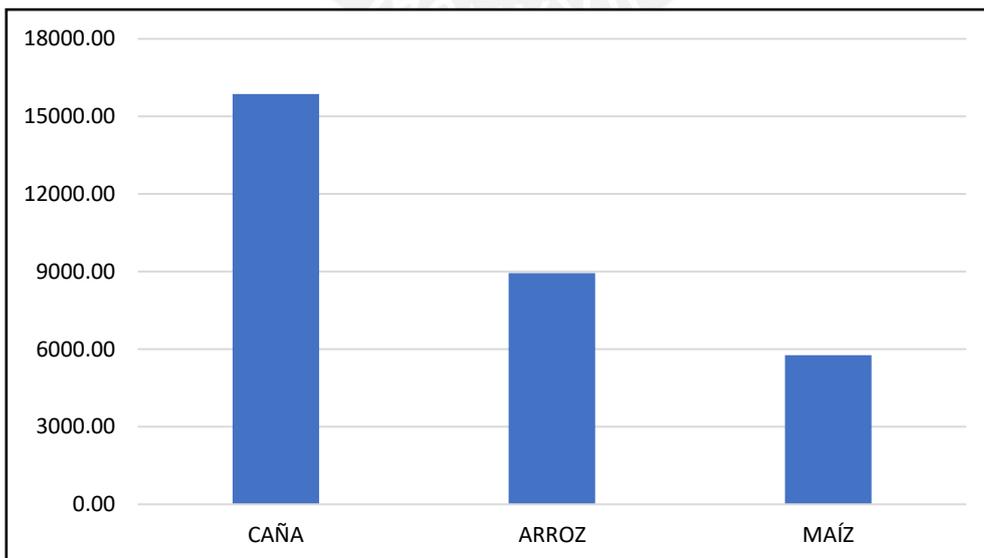


Figura 39. Huella hídrica azul por cultivo en metros cúbicos por hectárea. Fuente: Elaboración propia, en base a los resultados de las simulaciones realizadas con el software CROPWAT 8.0.

Se aprecia que esta vez el arroz posee la huella hídrica más grande bajo las unidades convencionales. Es importante mencionar que el software considera para su caso específico, que la producción requiere de una fase de preparación del suelo para un correcto riego posterior por inundación. En dicha fase de preparación se utilizan cerca de 370 metros cúbicos de agua por tonelada de arroz, incrementando bastante la huella hídrica. Se entiende que es una fase necesaria para el correcto desarrollo del cultivo y para obtener los rendimientos teóricos esperados; sin embargo, no se considerará en los apartados posteriores debido a que es una práctica específica de algunas modalidades de riego que no siempre son utilizadas en la realidad.

En cuanto a los volúmenes de agua bajo la misma unidad de superficie, donde ya no entra en consideración el concepto de rendimiento de los cultivos, se aprecia que la caña es la que más agua consume. Como ya se mencionó varias veces, el análisis se complementará posteriormente con el punto de vista económico, con el fin de conocer si está bien compensado el consumo de recursos en la producción de arroz y caña, por ejemplo, o si es mejor sustituirlos por cultivos con una producción más eficiente.

Es importante aclarar que el software solo calcula la cantidad de agua requerida por el cultivo, más no el total bruto de agua utilizada, que depende de la eficiencia de riego y de las pérdidas por distribución. Se debe tener eso en cuenta para realizar los ajustes necesarios cuando sea pertinente, al realizar los cálculos posteriores de indicadores económicos.

4.3.3. Huella hídrica total

Finalmente, agrupando la huella verde y la azul, se calculó la huella hídrica total, que representa el volumen de agua que se incorporó al producto durante todo su proceso de desarrollo. De acuerdo con la definición de huella hídrica, esta también posee una componente gris; sin embargo, no se calculó debido a los fines prácticos del estudio.

El software calcula los valores decadiarios de evapotranspiración del cultivo y de los requerimientos de riego, conociendo la precipitación existente que supe cierta parte de la demanda. Gracias a esto, se puede elaborar gráficos completos que muestren las tendencias de las huellas para cada uno de los cultivos, facilitando nuestra comprensión sobre las mismas. Estos gráficos serán mostrados en las unidades convencionales de la metodología, metros cúbicos de agua consumida por tonelada de cultivo producido.

A continuación, se muestran las Figuras 40, 41 y 42, con los resultados finales:

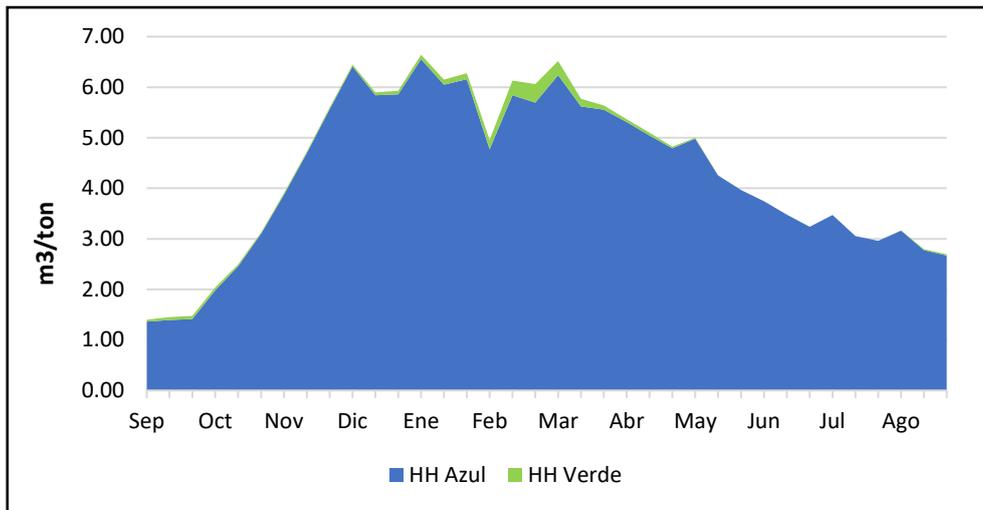


Figura 40. Huella hídrica total de la caña de azúcar. Fuente: Propia, extraído de CROPWAT 8.0.

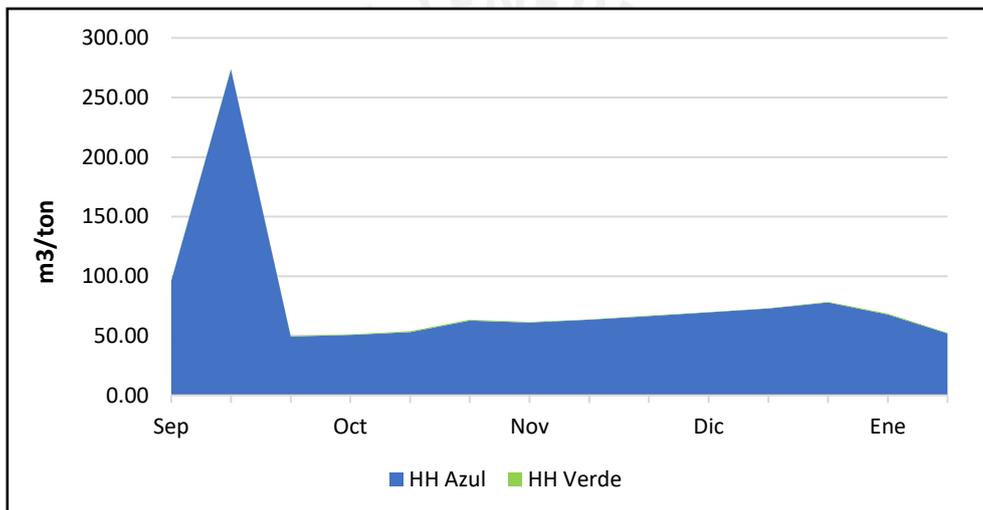


Figura 41. Huella hídrica total del arroz. Fuente: Propia, extraído de CROPWAT 8.0.

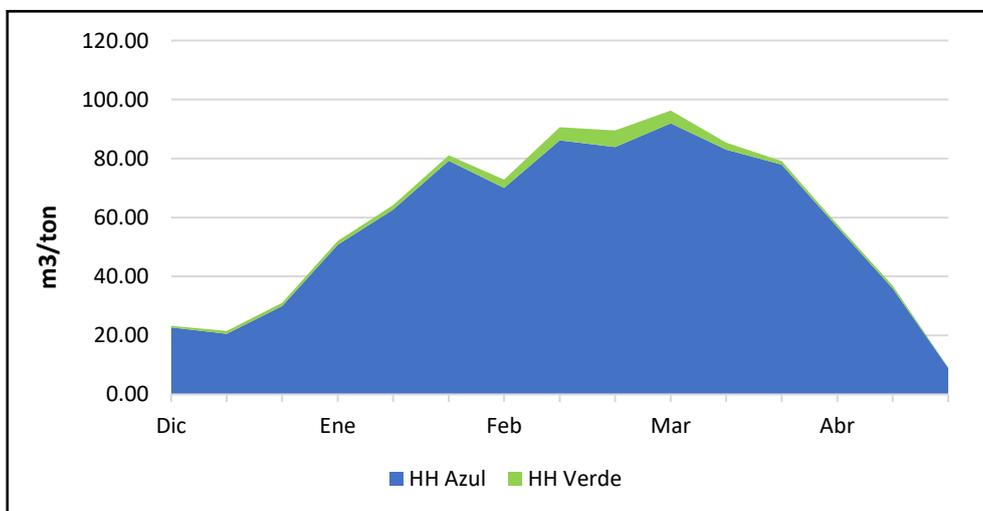


Figura 75. Huella hídrica total del maíz. Fuente: Propia, extraído de CROPWAT 8.0.

Se rescata que la huella hídrica verde es una componente muy pequeña del total en todos los cultivos; y que, para el caso del arroz, es casi nula debido a que suele sembrarse en periodos del año con poca precipitación. Para este mismo cultivo, también se aprecia con mayor claridad la etapa de preparación de suelo, antes de la siembra, en la que se consume una importante cantidad de agua que eleva en gran porcentaje su huella total final.

Las Figuras 43 y 44, muestran una comparación entre los cultivos a nivel de huella hídrica total en las dos unidades respectivas:

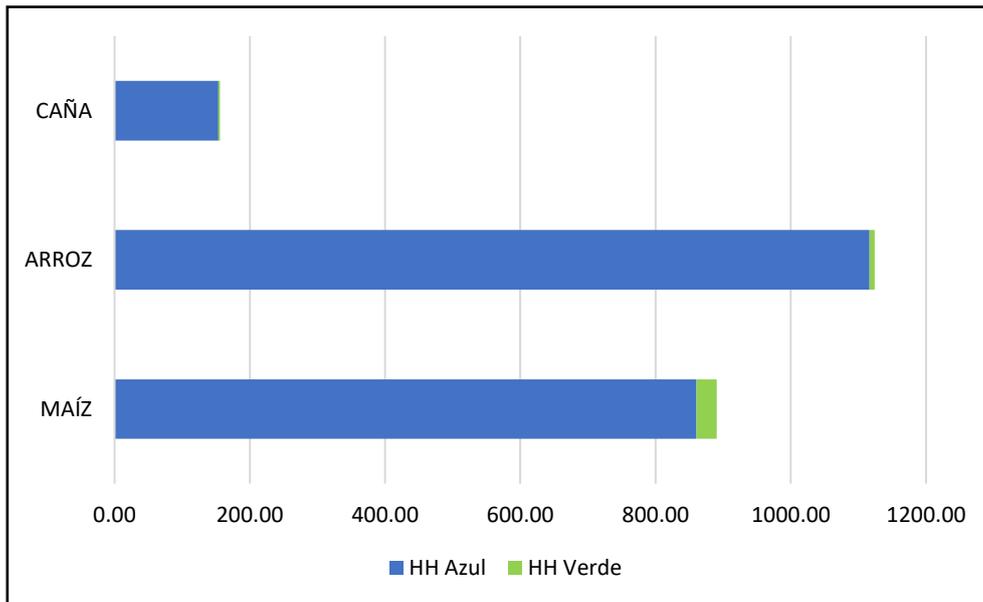


Figura 43. Huella hídrica total por cultivo en metros cúbicos por tonelada. Fuente: Propia.

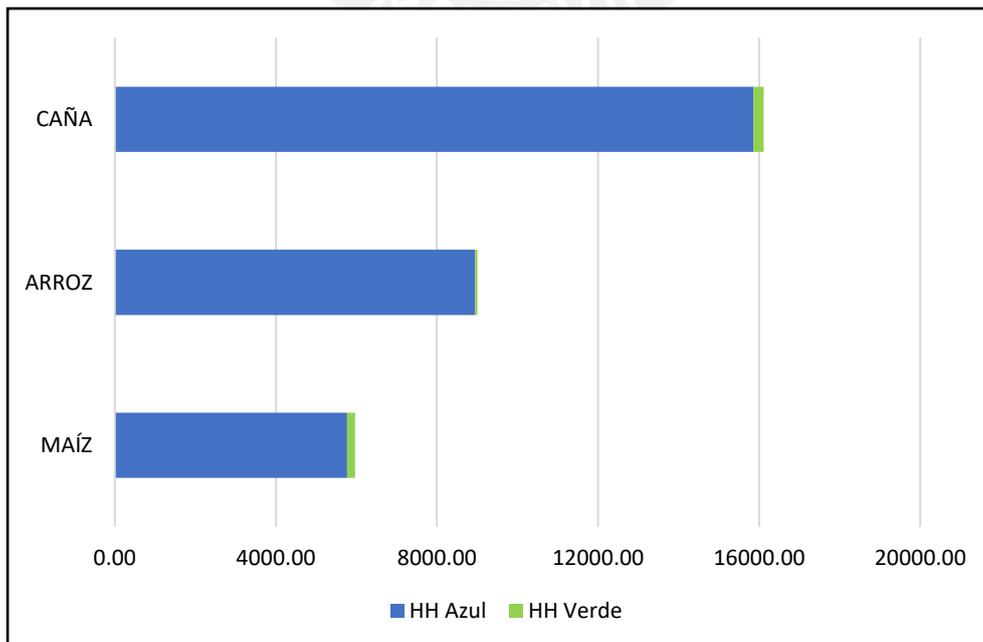


Figura 44. Huella hídrica total por cultivo en metros cúbicos por hectárea. Fuente: Propia.

En la *Figura 45* se puede ver claramente que la huella hídrica verde, sin importar la unidad en la que se exprese, representa en promedio solamente el 1.86% de la huella hídrica total, debido a los bajos niveles de precipitación en la zona de estudio. Este es un factor que disminuye la eficiencia de producción porque nos obliga a consumir más agua a través del riego. Esto será discutido con mayor profundidad en la sección correspondiente a la discusión de resultados.

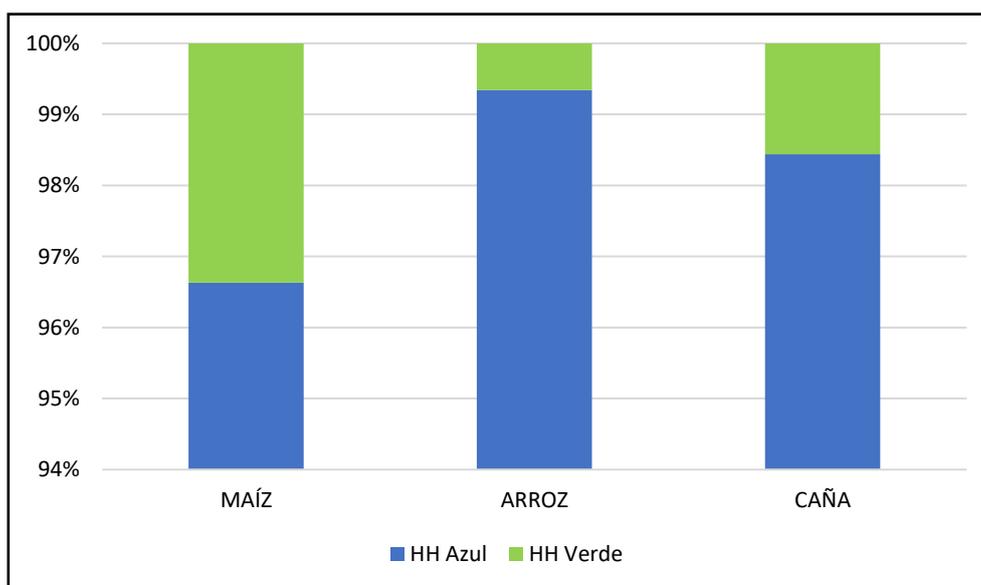


Figura 45. Composición de la huella hídrica total por cultivo. **Fuente:** Elaboración propia, en base a los resultados de la simulación en el software CROPWAT 8.0.

4.4. Comparación entre la huella hídrica real y la teórica

En vista de que ya se conocen los volúmenes reales incorporados a los cultivos, se puede convertir esta información en una “huella hídrica real” al dividirla entre los volúmenes de producción para obtener un valor expresado en metros cúbicos de agua consumida por tonelada de producto generado.

Esta huella hídrica real promedio entre todas las comisiones y para cada cultivo, puede compararse con la huella hídrica teórica, ya que representan lo mismo y están expresadas en unidades iguales. La *Figura 46* muestra la brecha existente entre huellas y se puede apreciar que los valores reales son menores a los calculados por simulación, lo que sugiere que se utiliza menos agua de la que teóricamente se necesita.

Los volúmenes tan bajos de agua pueden deberse principalmente a tres factores. El primero sería que el cálculo de pérdidas fue demasiado conservador y se asumieron porcentajes de pérdida demasiado altos, aunque de acuerdo a la literatura y mediciones

empíricas, no deberían estar muy lejos de los valores verdaderos. El segundo factor es que los datos con los que se trabajó solo muestran los volúmenes que fueron facturados tras ser reconocidos por los usuarios, pero que en realidad solo representan una fracción del agua total consumida, mientras que la diferencia podría ser catalogada como “robo”. El tercer factor tiene que ver con el concepto de riego deficitario, ya que en la realidad a veces es beneficioso priorizar el rendimiento del recurso, al rendimiento del cultivo. Se profundizará esta alternativa en el apartado correspondiente.

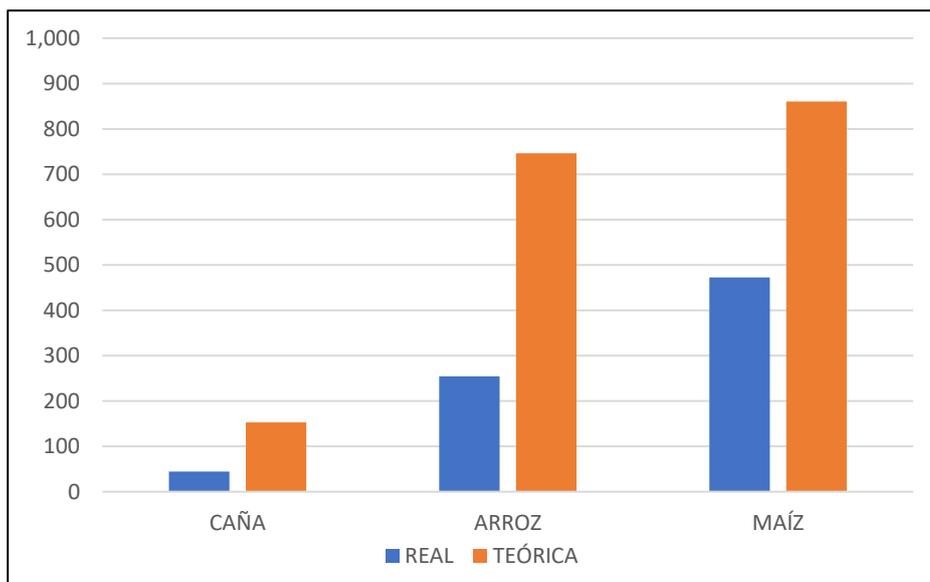


Figura 46. Comparación entre la huella hídrica real y la teórica por cultivo, en metros cúbicos por tonelada. Fuente: Elaboración propia, en base a los cálculos realizados.

4.5. Ecoeficiencia de los cultivos

Se utilizaron los indicadores de ecoeficiencia respectivos para conocer si los recursos naturales, como el agua y el suelo en este caso, están siendo aprovechados de manera óptima para la producción agrícola. Se calcularon de la manera mencionada en el respectivo apartado metodológico, en base a las huellas hídricas reales estimadas y a los rendimientos promedios de los diversos cultivos estudiados; haciendo posible también una comparación entre los mismos y facilitando la obtención de conclusiones.

Los rendimientos promedios de cada cultivo fueron obtenidos de la Encuesta Nacional Agrícola 2017, realizada por el Ministerio de Agricultura y Riego en base a la información obtenida de las diversas Gerencias y Direcciones Regionales de Agricultura de cada

departamento del Perú. Para este estudio, nos enfocamos en los valores promedio anuales para el departamento de Lambayeque.

Debido a que se asumió que los rendimientos son los mismos en cada una de las parcelas, solo se pudo obtener un valor para cada indicador de ecoeficiencia en cada uno de los cultivos. A continuación, se muestra la *Tabla 10* con todos los datos necesarios para el cálculo de los indicadores, y los valores finales de estos para cada uno de los cultivos analizados en la presente investigación:

Tabla 22. Tabla resumen con los valores de AWP y ALP para cada cultivo y los datos necesarios para su cálculo.

	CAÑA	ARROZ	MAÍZ A. D.
RENDIMIENTO (ton/ha)	103.44	8.01	6.70
VALOR MERC. (S/. / ton)	78.40	1,295.90	919.30
HH AZUL REAL (m3/ton)	45.00	254.00	473.00
HH AZUL REAL (m3/ha)	4,654.80	2,034.54	3,169.10
AWP (S/. / m3)	1.742	5.102	1.944
ALP (S/. / ha)	8,109.70	10,380.16	6,159.31

Fuente: Elaboración propia, con datos extraídos de la Encuesta Nacional Agrícola 2017.

Al comparar los valores de AWP, como se muestra en la *Figura 47*, se aprecia que el arroz posee la mejor relación en cuanto al dinero obtenido por su comercialización con respecto al agua consumida para su producción. Esto indicaría que es el más económicamente eficiente en términos de compensación por el recurso hídrico y que, a pesar de tener métodos de riego poco eficaces, su valor de mercado compensa en cierta manera el abundante consumo de agua. Sin embargo, este análisis solo considera el factor económico mas no el ambiental, por lo que siempre se debe tratar de complementar con otros tipos análisis como el que realizaremos gráficamente entre comisiones más adelante.

Con respecto a los valores de ALP, se rescata de la *Figura 48*, que el arroz también es el cultivo con mayor eficiencia económica en cuanto a su superficie. Esto significa que genera la mayor cantidad de ingresos por hectárea en comparación con los demás cultivos y, por lo tanto, una parcela de arroz posee mayor valor comercial que una de caña de azúcar o maíz amarillo duro. Sin embargo, al igual que en el caso anterior, dicho resultado debe complementarse con los posibles impactos ambientales relacionados al consumo de agua.

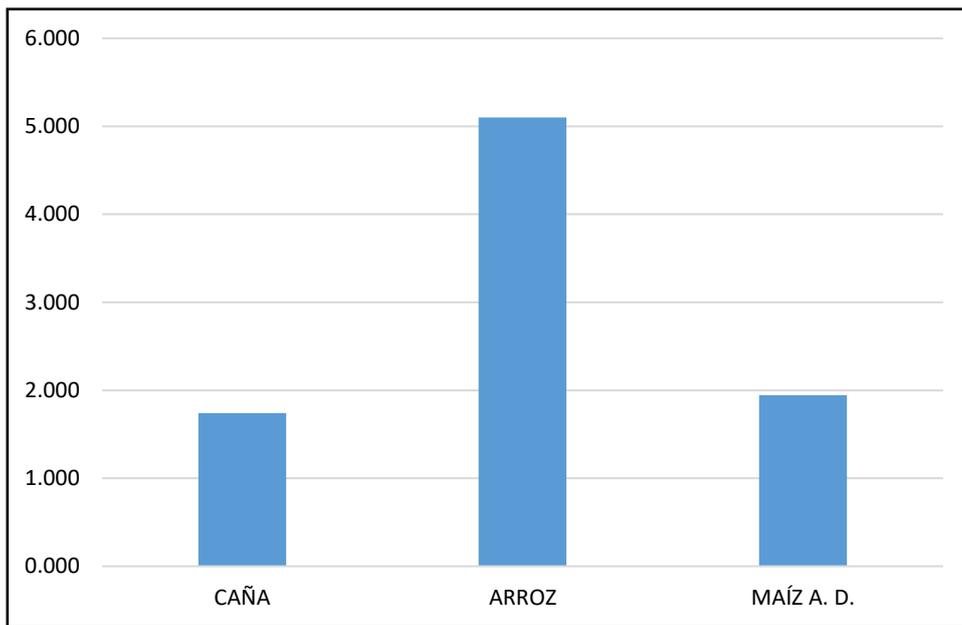


Figura 47. Productividad Aparente del Agua por cultivo expresada en nuevos soles por cada metro cúbico de agua empleada. Fuente: Elaboración propia, en base a los cálculos realizados.

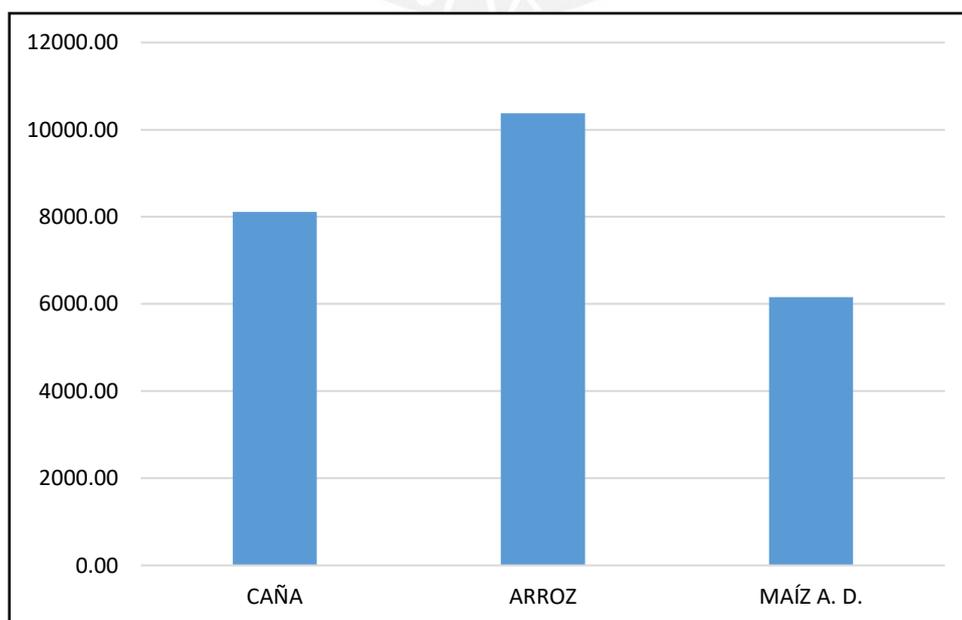


Figura 48. Productividad Aparente del Suelo por cultivo expresada en nuevos soles por cada hectárea de superficie cultivada. Fuente: Elaboración propia, en base a los cálculos realizados.

Por otro lado, estimaremos y compararemos la ecoeficiencia entre comisiones para conocer en cuál de ellas es más rentable la producción de cierto cultivo en términos del empleo del mínimo volumen de agua para llevarlo a cabo. Se determinará la ecoeficiencia a través del método gráfico expuesto en el apartado correspondiente y se complementarán los resultados obtenidos con las características específicas de cada comisión para poder determinar cuáles son o podrían ser los factores más importantes que afecten la ecoeficiencia de la producción agrícola. Las *Figura 49* muestra los resultados para el caso del arroz.

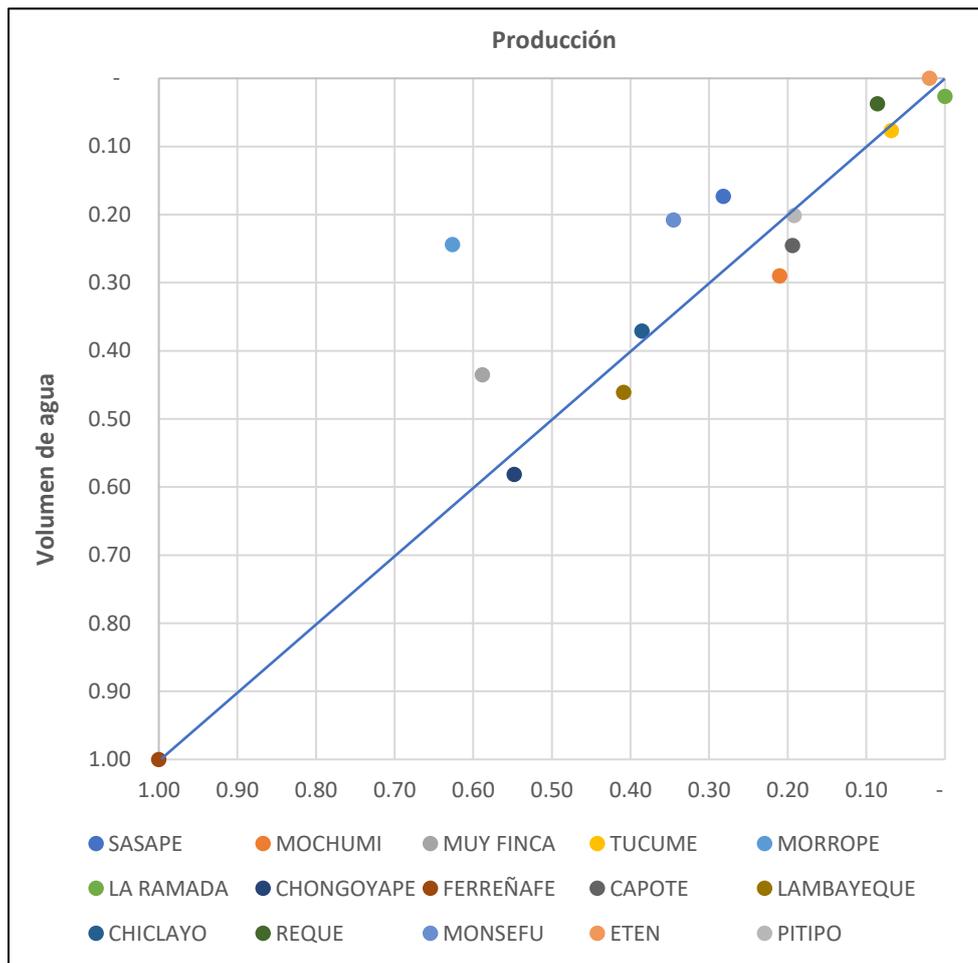


Figura 49. Gráfico de ecoeficiencia entre comisiones para el cultivo del arroz. **Fuente:** Elaboración propia, en base a los resultados obtenidos en los apartados anteriores.

Se observa que la comisión más ecoeficiente con diferencia es la de Morrope ya que, en comparación con el resto, utiliza mucha menos agua para lograr los volúmenes de producción promedios. En el lado opuesto, la comisión menos ecoeficiente es la de Mochumi, porque es la que se encuentra más alejada de la línea que representa la

tendencia de proporcionalidad. A pesar de esto, no posee un valor muy atípico y podría considerarse dentro del rango esperado.

Con respecto al maíz, la Figura 50 muestra los resultados obtenidos.

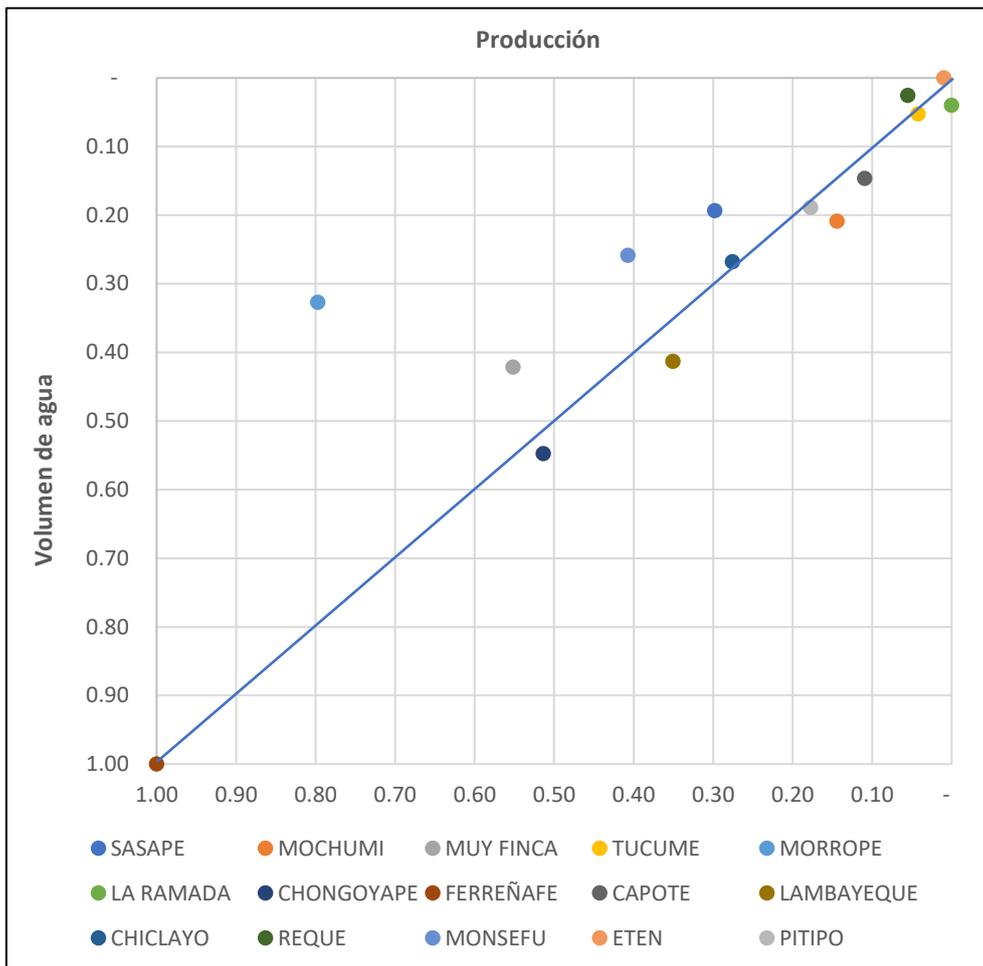


Figura 50. Gráfico de ecoeficiencia entre comisiones para el cultivo del maíz. **Fuente:** Elaboración propia, en base a los resultados obtenidos en los apartados anteriores.

De la misma forma, se observa que la comisión más ecoeficiente es la de Morrope, mientras que las demás se mantienen cercanas al promedio. En la discusión de resultados se comentarán las posibles causas o características que permiten que esta comisión posea los valores más destacados entre todas.

Es importante resaltar que el análisis gráfico no se realizó para el cultivo de la caña, debido a que solo se cuenta con tres comisiones dentro de la muestra y los resultados podrían no ser muy representativos.

5. Discusión de resultados

5.1. Pérdidas de agua a causa de la infraestructura menor

Corominas expresa el caso de la eficiencia hidráulica de regadío en Almería, donde con una eficiencia promedio de riego de 89% entre los métodos de gravedad y goteo, las pérdidas totales se distribuían en un 55% para los sistemas dedicados a la distribución, como lo son los canales, tuberías y acequias; y en un 45% para lo relacionado a la aplicación de agua a los cultivos, como las pérdidas en las redes de riego y en la misma parcela (Corominas, 2001). Si se compara con los resultados obtenidos del presente estudio, específicamente con la caña de azúcar y el maíz amarillo duro que son los cultivos que poseen la eficiencia de riego más cercana al ejemplo propuesto con un valor del 80% y 70% respectivamente, observamos que los resultados son cercanos porque entre ambos cultivos se pierden en total 97 millones de metros cúbicos de agua, de los cuales 60 millones, que equivalen al 62%, corresponden a pérdidas en la red de distribución; mientras que los otros 37 millones, que representan el 38% restante, son ocasionados por la aplicación del recurso hídrico a las parcelas.

En cuanto al porcentaje que representan las pérdidas totales, Corominas señala que el total de agua perdida en su investigación es de 19.4%, mientras que, en el presente caso, es de 57.9%. Esta diferencia se debe principalmente a los métodos de riego específicos empleados para los cultivos analizados. En el estudio citado se consideran casi en su totalidad cultivos de invernadero e industriales, ya que el Campo de Dalías es una comarca española donde desde la década de los 60s se ha desarrollado la agricultura intensiva bajo plástico más importante del planeta y los cultivos se riegan casi en su totalidad por goteo con el fin de preservar los recursos hídricos de la zona que provienen en su mayoría de acuíferos (IFAPA, 2014).

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la implementación de mejoras en la infraestructura menor para incrementar la eficiencia en el uso del agua, como la sustitución de las redes de distribución de canales abiertos por redes presurizadas bajo demanda o la implementación de sistemas de riego por goteo en las parcelas, vienen acompañadas de mayores requerimientos energéticos que derivan en la elevación de los costes de operación y mantenimiento hasta en un 400% (Rodríguez-Díaz et al. 2011), además de mayores impactos ambientales relacionados al consumo energético y la

contaminación. Por tales motivos, se deben tener en cuenta todos los factores involucrados con el fin de realizar inversiones que sean beneficiosas en todos los aspectos, aunque este tema ya no es parte del alcance de la investigación.

El mejoramiento de la infraestructura hidráulica es vital para la agricultura y esto se encuentra respaldado por investigaciones previas que avalan que un mejor manejo del agua a través de su infraestructura juega un rol fundamental en la mitigación de impactos negativos sobre el medioambiente, debido a que aumenta la productividad del agua, reduce su consumo y también su contaminación (Gordon et al. 2010). Por último, es importante mencionar que hay autores que sostienen que cualquier estrategia para la reducción de la pobreza debe incluir elementos como el aseguramiento del acceso al agua a través de políticas e inversión en infraestructura de almacenamiento y distribución, incentivar a la gente a hacer un mejor uso del agua, mejorar la gobernanza de los recursos hídricos y ayudar a la población con la diversificación de sus medios de vida o sustento (Namara et al. 2010).

5.2. Huella hídrica teórica y real de los cultivos analizados

Existen varios precedentes con respecto al cálculo de la huella hídrica teórica a través del uso de software CROPWAT, siendo el más importante el de Mekonnen y Hoesktra, quienes calcularon las huellas hídricas promedio a nivel mundial para varios cultivos, obteniendo valores en metros cúbicos por tonelada de 196, 1487 y 1028 para la caña de azúcar, el arroz y el maíz respectivamente (Mekonnen et al. 2011). Estos valores son cercanos a los calculados en el presente estudio, los cuales son de 156, 1124 y 891 metros cúbicos por tonelada producida de cultivo en el mismo orden anteriormente mencionado; y las variaciones entre las investigaciones se deben principalmente a las diferencias en los rendimientos considerados, los ciclos de cultivo, los factores climáticos, entre otros aspectos; que implican cambios en la evapotranspiración que es la que determina los requerimientos hídricos finales.

Sin embargo, es importante señalar que la principal diferencia se da en la composición de la huella teórica total, ya que, al dividirla en sus componentes verde y azul, se aprecia que en la investigación citada la huella verde conforma en promedio el 80% del total entre los tres cultivos analizados, mientras que, en nuestro caso, solo representa el 2% de la huella total. Esto es fácil de justificar debido a que la huella verde depende del volumen de

precipitaciones para suplir parte del requerimiento hídrico del cultivo, pero en el departamento de Lambayeque las precipitaciones son casi nulas, por lo que casi toda la necesidad de agua debe ser suplida mediante riego. Por otro lado, al ser la caña de azúcar y el maíz, cultivos abundantes en muchas zonas tropicales y subtropicales alrededor del mundo, se encuentran en gran cantidad bajo la modalidad de la agricultura de secano, donde solo se utiliza el agua de lluvia para su riego, aumentando los promedios mundiales de la huella hídrica verde.

Otra comparación puede realizarse con el estudio de Bolaños en Honduras, donde se calculó la huella hídrica de 15 cultivos entre los cuales se encontraban los analizados en el presente texto, obteniendo valores de 210, 2587 y 1725 metros cúbicos por tonelada de producto para la caña de azúcar, el arroz y el maíz, respectivamente (Bolaños, 2011). El aporte de la huella verde es en promedio del 65% y, para el caso del arroz y el maíz, los valores de huella hídrica exceden aproximadamente en un 70% a los promedios mundiales; debido a que Honduras es un país tropical con altas temperaturas y, por ende, grandes volúmenes de evapotranspiración que aumentan la demanda de agua por parte de los cultivos.

Por otro lado, centrándonos sobre la huella hídrica real que resultó ser bastante menor que la teórica, es importante aclarar que el software CROPWAT determina los requerimientos hídricos para un desarrollo óptimo del cultivo, aunque el riego en la realidad sea realizado con cierto déficit. Este concepto lleva por nombre riego deficitario y se aplica mayormente en las regiones donde los recursos hídricos son limitados, debido a que puede ser más beneficioso maximizar la productividad del agua en lugar de maximizar la cosecha por unidad de tierra (Fereret et al. 2007). Es una estrategia de optimización que consiste en irrigar los cultivos solo durante las fases sensibles a la sequía, aunque esto genere estrés en la planta y, por lo tanto, pérdida consecuente de producción. A pesar de lo mencionado, esta técnica maximiza la productividad del agua de riego, la cual es el principal factor limitador (Geerts et al. 2009).

Otro factor importante que acentúa la diferencia entre huellas, es el robo. Abelardo de la Torre, jefe de la Autoridad Nacional del Agua, señala que en el Perú solo un 30% del agua asignada para irrigación agrícola es realmente utilizada, mientras que lo demás se pierde principalmente debido a infraestructura hidráulica precaria y una cultura social y ambiental primitiva que deriva en robos o tomas ilegales (ANA, 2017). Habiendo

calculado en este estudio un porcentaje promedio de pérdidas del 57.9%, podemos asumir que las pérdidas generadas por robos son aproximadamente un 12.1%.

Como mencionan Trivelli, Escobal y Revesz, si bien las juntas de usuarios y comisiones de riego reportan beneficios teóricos en cuanto a la programación y asignación de agua entre los diferentes sectores y cultivos, se sabe que en la práctica, la distribución de agua no es equitativa. Existen grupos de poder que se ubican en la cabeza de los canales y consumen mayor cantidad de agua de la que pagaron, así como también lo hacen otros agricultores como una forma de adelantarse a la escasez; además de que hay quienes roban agua y no son acusados, y si lo son, no reciben sanciones severas por parte de las juntas de usuarios que desincentiven este tipo de accionar (Trivelli et al. 2006).

5.3. Ecoeficiencia de producción de los cultivos analizados

Analizando los indicadores económicos calculados, se concluye que el cultivo más rentable en cuanto al uso del agua es el maíz, mientras que el más rentable con respecto al uso del suelo, es el arroz. Sin embargo, los resultados no se pueden tomar por separado, porque como sostiene Bossio, la clave para un efectivo uso de los recursos en la agricultura es entender que el ciclo del agua y el manejo del suelo se encuentran inextricablemente ligados y, por ende, los aumentos en la productividad agrícola del agua solo pueden ser obtenidos en conjunto con mejoras en el manejo del uso de los suelos (Bossio et al. 2010).

Desde dicha perspectiva, se puede rescatar que el cultivo mejor balanceado es el arroz, porque además de ser el más ecoeficiente en el uso de los suelos, posee un gran margen de mejora en cuanto al uso de agua, porque su eficiencia de riego promedio es considerablemente más baja que la de los otros cultivos. Si se establecieran sistemas alta eficiencia para su riego, el arroz se convertiría en el cultivo más rentable de la región, debido a que generaría la mayor cantidad de ingresos económicos con respecto a la cantidad de recursos consumidos.

Un estudio realizado por Benavides y Jara muestra que se pueden obtener eficiencias de hasta 3.11 metros cúbicos de agua consumida por kilogramo de arroz producido, teniendo este un rendimiento de 6.49 toneladas por hectárea, y solo considerando el agua consumida para el riego por aspersión, mas no la pérdida durante su distribución (Benavides et al. 2014). En el presente caso, se sabe que la eficiencia del arroz cultivado

en Lambayeque es de 3.24 metros cúbicos de agua por tonelada producida, incluso con el bajo rendimiento de los sistemas de infraestructura de manejo de agua. Si fuera posible mejorar los sistemas de distribución y riego sin afectar la producción, los valores de eficiencia serían aún mejores que los del estudio citado.

Si bien los indicadores de AWP y ALP solo se enfocan en el valor de mercado de los productos y su relación con el consumo de agua generado, ignorando otro tipo de afecciones sobre el medio ambiente como la contaminación, repercusión sobre la salud de los humanos y los ecosistemas, etc.; pueden utilizarse como referencia para la estimación de la ecoeficiencia, ya que cumplen con la definición de relacionar el valor del producto con su influencia ambiental, que en este caso es el consumo de recursos. Además, es bueno tener una perspectiva económica del asunto porque hay estudios que corroboran la relación intrínseca que existe entre la agricultura, los recursos naturales y la economía; argumentando que el acceso a una fuente de agua confiable y sostenible mejora la producción de los cultivos, intensifica las oportunidades de empleo y estabiliza los ingresos y el consumo (De Fraiture et al. 2010).

Con respecto al gráfico utilizado para determinar cuáles son las comisiones con la mejor relación entre el volumen de producción y el volumen de agua utilizado para lograrlo, es decir las comisiones más ecoeficientes, tenemos para los casos del arroz y el maíz, que la comisión con mejores valores fue la de Morrope. Esta comisión posee una relación entre volumen de producción y volumen de agua de 2.57 y 2.52 en comparación con el resto, que poseen un promedio de 1.25 y 1.21 para el arroz y el maíz, respectivamente. Esto quiere decir que de acuerdo a los datos con los que se trabajó, produce el doble de las demás comisiones con la misma cantidad de agua, lo cual es coherente con la información de la *Tabla 4*, donde se aprecia que posee la menor dotación. Sin embargo, en la misma tabla se muestra que la comisión de Morrope es la que posee la mayor cantidad de usuarios y de predios bajo riego, por lo que la incidencia de los factores mencionados anteriormente, relacionados a los robos y a la deficiencia en el control, es mucho mayor y podría alterar significativamente los resultados obtenidos. Con respecto al resto de comisiones, todas se encuentran dentro del margen promedio y se puede afirmar conservadoramente que toda la región posee aproximadamente la misma relación en cuanto a su producción y los recursos utilizados.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Pérdidas de agua a causa de la infraestructura menor

Las pérdidas ocasionadas por la infraestructura de distribución, conformada por canales de derivación, canales laterales y acequias, fueron de un 28% en promedio entre todas las comisiones. Los valores más altos en porcentaje pertenecen a las comisiones de La Ramada y Eten, siendo estos de un 30% al no poseer ningún tramo revestido, aunque son también las comisiones más pequeñas y que tienen menor asignación de agua; mientras que el porcentaje más bajo de pérdidas lo posee la Empresa Agroindustrial Pucalá, con un valor de 21.5%, al tener un 42.3% de su longitud total revestida. Si lo analizamos en cuanto a volúmenes, la que mayores pérdidas de agua presenta es la comisión de Ferreñafe, la cual a pesar de tener un porcentaje más bajo que el promedio, posee pérdidas que ascienden casi hasta los 22 millones de metros cúbicos, por ser la comisión más extensa y con mayor asignación de agua, teniendo destinados cerca de 110 millones de metros cúbicos para el riego de todas las parcelas que la conforman.

Con respecto a las pérdidas generadas por la infraestructura de aplicación, ya no fueron clasificadas por comisiones sino por cultivos, al estar relacionadas a la eficiencia de riego que varía dependiendo del método utilizado para cada uno. Los porcentajes de pérdida fueron de 20%, 55% y 30% para la caña de azúcar, el arroz y el maíz, respectivamente. En volúmenes, el arroz es ampliamente el que más pérdidas genera, no solo por su baja eficiencia de riego, sino también por ser el cultivo más abundante, es decir, el que posee la mayor superficie cultivada. De los 203 millones de metros cúbicos que se utilizaron para su riego, se perdieron 112 millones. Al considerar las pérdidas globales, abarcando las generadas por distribución y por aplicación, los porcentajes ascienden a 42.2%, 67.7% y 49.7% para cada cultivo en el mismo orden anteriormente especificado, resultando en una pérdida igual al 57.87% del agua total asignada.

Se recomienda realizar mejoras en los sistemas de distribución para aumentar su eficiencia, a través del revestimiento de canales y la reparación de las fugas puntuales existentes, porque son soluciones simples, efectivas y que no representan mayores complicaciones aparte de la inversión económica. Además, sería bueno evaluar la viabilidad de la implementación de métodos más sofisticados y eficientes para el riego del arroz, enfocándose en los principios del riego deficitario y en no aumentar

desmedidamente el consumo energético, como mencionamos en apartados anteriores, debido a que esto desembocaría en mayores costos de operación y mantenimiento que podrían hacer que la inversión no sea rentable en ningún sentido. Por último, es necesario implementar políticas más eficientes relacionadas al control y formalización de las tomas de agua, además de aplicar sanciones más severas a quienes incumplen las condiciones, para así poder reducir en gran medida el porcentaje de pérdidas por robo e informalidad. Si se lograra optimizar los métodos de riego, invertir en la mejora de la infraestructura de distribución y concientizar a los agricultores para promover una cultura de respeto y honestidad, sería factible reducir el porcentaje de pérdidas al 50% del agua total asignada.

6.2. Huella hídrica teórica de los cultivos analizados

La huella hídrica total de los cultivos estudiados en metros cúbicos por tonelada de producto generado es de 156, 1124 y 891 para la caña de azúcar, el arroz y el maíz respectivamente; representando la componente verde un 1.6%, 0.7% y 3.4% para cada caso, siendo el resto de agua requerida proporcionada a través del riego. El cultivo con mayor huella es visiblemente el arroz, ya que requiere de grandes volúmenes de agua para la preparación del suelo y para el riego por inundación, que es propenso a las pérdidas por evaporación y percolación profunda. La caña de azúcar es el cultivo con menor huella hídrica, pero esto se debe a que posee valores de rendimiento muy altos, por lo que el consumo de agua también debe evaluarse con respecto a la superficie cultivada y no solo teniendo en cuenta los volúmenes de producción para tener una visión más amplia de lo que realmente representan los resultados. Si analizamos los cultivos en base a la cantidad de agua requerida por hectárea de superficie cultivada, vemos que la caña de azúcar es la que más agua consume, al necesitar casi 16 mil metros cúbicos; mientras que el arroz y el maíz solo requieren cerca de 9 mil y 6 mil metros cúbicos de agua respectivamente.

Al ser tan bajo el porcentaje de agua de lluvia incorporada, las mejoras deberían realizarse en función del mejor aprovechamiento de agua a través de los métodos de riego, sobre todo en el caso de la caña de azúcar y del arroz, ya que el primero es el cultivo que más agua utiliza por hectárea, y el segundo es el cultivo más abundante y con la menor eficiencia de riego. También es recomendable que la siembra de los cultivos se de en el momento preciso del año, de modo que a lo largo de todo su periodo de desarrollo no se

vean visiblemente afectados por condiciones climáticas desfavorables que aumenten la demanda evaporativa y, por ende, los requerimientos de riego.

6.3. Ecoeficiencia de producción de los cultivos analizados

Se concluye de los resultados que el cultivo más eficiente económicamente en cuanto al uso del agua es el arroz, al recaudar 5.10 soles por metro cúbico de agua consumida, mientras que la caña de azúcar posee el valor más bajo, generando solo 1.74 soles por metro cúbico. Por otro lado, el más eficiente económicamente con respecto al uso de los suelos también es el arroz, porque recauda 10,380.16 soles por hectárea cultivada, siendo el maíz el menos ecoeficiente al solo generar 6,159.31 soles por hectárea. En base a estos resultados se podría pensar que el arroz es el cultivo más rentable dentro de la región, pero es necesario recordar que los indicadores económicos utilizados como referencia de la ecoeficiencia solo consideran como impacto ambiental el consumo de agua, pero dejan de lado otro tipo de factores relacionados específicamente con el cultivo de arroz como su alto grado de contaminación por emisiones de CH₄, o que está siendo cultivado en una región costera donde existen altos niveles de estrés hídrico y donde el agua posee un valor más importante de lo normal. El alcance del presente estudio es reducido desde este punto de vista y no contempla un análisis a profundidad sobre la totalidad de impactos ambientales, pero es necesario mencionar que esto es de vital importancia para obtener conclusiones significativas en este ámbito.

Con respecto a lo que se encuentra dentro del alcance de la investigación, sería recomendable intentar de industrializar cierta parte de la producción de arroz, tal y como se hace con la caña de azúcar, con el fin de mejorar los procesos de riego y utilización de suelos para mejorar la eficiencia de su producción y alcanzar la máxima productividad posible en el uso del agua, tratando de no generar mayores grados de impacto ambiental relacionados al consumo energético como se mencionó anteriormente.

Por último, en lo referente a la comparación entre comisiones se puede observar que la única que destaca por sobre las demás es la de Morrope, pero por las razones explicadas previamente, es la más vulnerable a verse afectada por temas de robos o falta de control que propicien que los datos con los que se trabajó no sean precisos. Por ende, se puede concluir que todas las comisiones de la región poseen aproximadamente la misma eficiencia en el uso de sus recursos y que muchas de ellas tienen cierto margen de mejora.

7. Bibliografía

- Abarca, C. (2012). Guía práctica para realizar el Estudio de Impacto Ambiental en una obra civil ejemplarizado en una obra Hidráulica. *Universidad San Francisco de Quito*.
- Abelardo de la Torre, Jefe de la Autoridad Nacional del Agua (2017) <https://agraria.pe/noticias/80-del-agua-en-peru-se-destina-a-la-agricultura-urge-13448>
- Aldaya, M. (2015). *Introducción al cálculo de la huella hídrica según Water Footprint Network: La huella hídrica como instrumento para la planificación hidrológica y reducción de conflictos*. Seminario Nacional del Observatorio del Agua, Madrid.
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). *World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision* (Vol. 12, No. 3). FAO, Rome: ESA Working paper.
- Allan, J. A. (1998). Virtual water: a strategic resource. *Ground water*, 36(4), 545-547.
- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2009). Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas. *LEISA revista de agroecología*, 14, 5-8.
- Álvarez, E., Boisán, M., Cabo, M., Chaves, E., & Pozo, V. (2014). Los Túneles Pucará y Transandino del proyecto de trasvase Majes Siguan II, Arequipa, Perú. *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, (233), 18-24.
- Andina (2016). Riego tecnificado mejora productividad de 10,000 hectáreas en proyecto Olmos <https://andina.pe/agencia/noticia-riego-tecnificado-mejora-productividad-10000-hectareas-proyecto-olmos/>
- Ángel, E. (2010). *Métodos cuantitativos para la toma de decisiones ambientales*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- Anuario Estadístico de Producción Agrícola (2017). Ministerio de Agricultura y Riego del Perú.
- Arteaga, S.; Fierro, G. (2015). Valoración de la infraestructura de riego aplicado a cuambo, Parroquia Salinas, Cantón Ibarra, Provincia de Imbabura.
- Bai, Xue., Ren, X., Khanna, N. Z., Zhou, N., & Hu, M. (2018). Comprehensive water footprint assessment of the dairy industry chain based on ISO 14046: a case study in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 369-375.
- Banco Mundial (2008). *Informe sobre el desarrollo mundial 2008: Agricultura para el desarrollo* (No. 338.9 B3Y 2008.). Washington, D.C. <http://econ.worldbank.org/wbsite/external/extdec/extsearch>

- Bayart, J. B., Bulle, C., Deschênes, L., Margni, M., Pfister, S., Vince, F., & Koehler, A. (2010). A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(5), 439-453.
- Bedmar, F., Gianelli, V., Angelini, H., & Vigilianchino, L. (2015). Riesgo de contaminación del agua subterránea con plaguicidas en la cuenca del arroyo El Cardalito, Argentina. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 41(1), 70-82.
- Bedoya, V. H., & López-Lezama, J. M. (2015). Modelo para el Control de Inundaciones durante el Fenómeno de " La Niña" Utilizando un embalse Hidroeléctrico. *Información tecnológica*, 26(2), 89-100.
- Benavides, C., Ángel, V., Jara, V., & Edgar, I. (2014). Comparación de tres sistemas de riego para la producción de arroz con tres densidades de siembra en Zamorano.
- Benavides, M. (2014). Eficiencia técnica-económica y riesgo en la producción del cultivo de arroz.
- Bolaños, M. E. (2011). Determinación de la huella hídrica y comercio de agua virtual de los principales productos agrícolas de Honduras. *Zamorano, Honduras*.
- Bossio, D., Geheb, K., & Critchley, W. (2010). Managing water by managing land: addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods. *Agricultural Water Management*, 97(4), 536-542.
- Boulay, A. M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Klemmayer, I., Lathuilliere, M., ... & Ridoutt, B. (2014). Building consensus on a generic water scarcity indicator for LCA-based water footprint: preliminary results from WULCA. In *Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA Food 2014), San Francisco, California, USA, 8-10 October 2014* (pp. 142-149). American Center for Life Cycle Assessment.
- Boulay, A. M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., ... & Ridoutt, B. (2018). 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.
- Boulay, A. M., Motoshita, M., Pfister, S., Bulle, C., Muñoz, I., Franceschini, H., & Margni, M. (2015). Analysis of water use impact assessment methods (part A): evaluation of modeling choices based on a quantitative comparison of scarcity and human health indicators. *The international journal of life cycle assessment*, 20 (1), 139-160.
- Brundland, G. H. (1987). Informe de la comisión mundial sobre el medio ambiente y el desarrollo (Comisión Brundland): Nuestro futuro común. *New York: Comisión Brundland*.

- Bunge, V. (2010). La presión hídrica en las cuencas de México. *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización*. México: INE, 88-91.
- Cadena, V. (2012). Hablemos de riego. *Creadores gráficos*. Quito-Ecuador, 43.
- Conesa Fernández, V., Ros Garro, V., Conesa Ripoll, V., & Conesa Ripoll, L. A. (2010). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Mundi-prensa.
- De Fraiture, C., Molden, D., & Wichelns, D. (2010). Investing in water for food, ecosystems, and livelihoods: An overview of the comprehensive assessment of water management in agriculture. *Agricultural Water Management*, 97(4), 495-501.
- Effendi, H. (2016). River water quality preliminary rapid assessment using pollution index. *Procedia Environmental Sciences*, 33, 562-567.
- Escobal, J., Revesz, B., & Trivelli, C. (2006). Pequeña Agricultura Comercial: dinámica y retos en el Perú.
- Fereres, E., Soriano, M.A., (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use *J. Exp. Bot.* 58, 147-158
- Ferrandis, P. (2006). El medio natural como receptor de impactos ambientales. *La evaluación del impacto ambiental de proyectos y actividades agroforestales*, 632.
- Fierro Guerrero, G. D. R., Valladolid, A., & Nepalí, S. (2015). *Valoración de la infraestructura de riego aplicado a Cuambo, parroquia Salinas, cantón Ibarra, provincia de Imbabura*(Bachelor's thesis).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *Principios para una agricultura sostenible*. [online] Available at: <http://www.fao.org/sustainability/background/principles/es/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *Recursos naturales: Tierra y Agua*. [online] Available at: <http://www.fao.org/land-water/es/>
- Franco, Alexandra V. (2018). *Evaluación de la eficiencia del método de riego por goteo* (Bachelor's thesis).
- Frérot, A. (2011). *Water: Towards a Culture of Responsibility*. UPNE.
- Fries, N., & Hellweg, S. (2014). LCA of land-based freight transportation: facilitating practical application and including accidents in LCIA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(3), 546-557.

- Frischknecht, R., Steiner, R., & Jungbluth, N. (2009). The Ecological Scarcity Method–Eco-Factors 2006-A method for impact assessment in LCA (Methode der ökologischen Knappheit–Ökofaktoren 2006-Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen).
- Fuentes, M. V. (2018). Abordar la sustentabilidad desde las ciencias agrícolas. *Revista de Ciencias Sociales*, (159).
- Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural water management*, 96(9), 1275-1284.
- Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E., & Cardenas, M. B. (2016). The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience*, 9(2), 161.
- Gordon, L. J., Finlayson, C. M., & Falkenmark, M. (2010). Managing water in agriculture for food production and other ecosystem services. *Agricultural Water Management*, 97(4), 512-519.
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2006). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. In *Integrated assessment of water resources and global change* (pp. 35-48). Springer, Dordrecht.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual. *Setting the global standard*, 1, 224.
- Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E., & Richter, B. D. (2012). Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. *PLoS One*, 7(2), e32688.
- ISO 14045:2012 Environmental management — Eco-efficiency assessment of product systems — Principles, requirements and guidelines (2012)
- ISO 14046:2014 Environmental management — Water footprint — Principles, requirements and guidelines (2014)
- IV Censo Nacional Agropecuario* (2012). Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- Kounina, A., Margni, M., Bayart, J. B., Boulay, A. M., Berger, M., Bulle, C., ... & Núñez, M. (2013). Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3), 707-721.
- Larrazabal, M (2019). Tipos de Agricultura ¿Cuáles Son y Cómo se Clasifican? <https://www.bialarblog.com/tipos-de-agricultura-cuales-como-clasifican/>
- Larsen, M. C., Hamilton, P. A., & Werkheiser, W. H. (2013). Water quality status and trends in the United States. *Monitoring Water Quality, Elsevier, NC, EE. UU*, 19-57.

- Leal, J. (2005). *Ecoeficiencia: marco de análisis, indicadores y experiencias*. CEPAL.
- Manual del Cálculo de la Eficiencia para Sistema de Riego* (2015). Dirección General de Infraestructura Agraria y Riego – Ministerio de Agricultura y Riego del Perú.
- Masip, J. C. (2001). La infraestructura hidráulica de regadío en Almería. In *El sector agrario y agroalimentario de Almería ante el siglo XXI: evolución y perspectiva de nuestra agricultura en el año 2000: producción integrada: incidencia de las nuevas normativas de residuos de plaguicidas sobre la horticultura almeriense* (pp. 13-31). Instituto de Estudios Almerienses.
- Massoud, M. A., Al-Abady, A., Jurdi, M., & Nuwayhid, I. (2010). The challenges of sustainable access to safe drinking water in rural areas of developing countries: case of Zawtar El-Charkieh, Southern Lebanon. *Journal of Environmental Health*, 72(10).
- McMichael, C. E. (2014). Freshwater. *The Encyclopedia of Earth*.
- Motoshita, M., Ono, Y., Pfister, S., Boulay, A. M., Berger, M., Nansai, K., ... & Inaba, A. (2018). Consistent characterisation factors at midpoint and endpoint relevant to agricultural water scarcity arising from freshwater consumption. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(12), 2276-2287.
- Namara, R. E., Hanjra, M. A., Castillo, G. E., Ravnborg, H. M., Smith, L., & Van Koppen, B. (2010). Agricultural water management and poverty linkages. *Agricultural water management*, 97(4), 520-527.
- Nieto, N. (2011). La gestión del agua: tensiones globales y latinoamericanas. *Política y cultura*, (36), 157-176.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... & Dubash, N. K. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 151). Ipcc.
- Pfister, S., & Bayer, P. (2014). Monthly water stress: spatially and temporally explicit consumptive water footprint of global crop production. *Journal of Cleaner Production*, 73, 52-62.
- Pfister, S., Boulay, A. M., Berger, M., Hadjikakou, M., Motoshita, M., Hess, T., ... & Manzardo, A. (2017). Understanding the LCA and ISO water footprint: A response to Hoekstra (2016). "A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA". *Ecological Indicators*, 72, 352-359.
- Pfister, S., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental science & technology*, 43(11), 4098-4104.

Ponce, V. M., Silva, J. A., & Villarroya, J. P. (2018) ¿Cuánta agua puede ser bombeada de un acuífero? Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Argentina.

Producto Bruto Interno de los Departamentos del Perú, según Actividades Económicas (2019). Instituto Nacional de Estadística e Informática.

Rees, W. E. (1992). Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leave out. *Environment and urbanization*, 4(2), 121-130.

Renderos, R. (2014) *Huella Hídrica del Cultivo de Caña de Azúcar*.

Rojas-Valencia, M. N., Gallardo-Bolaños, J. R., & Martínez-Coto, A. (2012). Implementación y caracterización de un sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 15(1), 16-23.

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.

Subramani, A., & Jacangelo, J. G. (2015). Emerging desalination technologies for water treatment: a critical review. *Water research*, 75, 164-187.

Trivelli, C., Escobal & J., Revesz, B. (2006). Pequeña Agricultura Comercial: dinámica y retos en el Perú.

UNESCO. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, 2017. <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/>

United Nations International Children's Emergency Fund. (2018). *Agua, saneamiento e higiene*. https://www.unicef.org/spanish/wash/index_31600.html/

Villegas, M. I., Cadavid, L., & Awad, G. (2018). Metodología para evaluación de impacto ambiental de proyectos de infraestructura en Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 28(2), 121-156.

Viñas, J. M. S. (2012). Los retos de la agricultura para alimentar al mundo en 2050. *Tiempo de paz*, 106, 37-48.

WEF, F. E. M. (2016). Global risks 2016. World Economic Forum.

World Health Organization (2006). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Vol 1. Policy and regulatory aspects and Vol 2. Wastewater uses in agriculture.

WWF & SABMiller. (2009). Water Footprinting: Identifying and addressing water risks in the value chain. *Water Footprint Network*.