

# **Guía para la estimación de la huella de agua en edificaciones del sector construcción costarricense en la etapa de diseño.**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN**  
**CONSTANCIA DE PRESENTACIÓN PÚBLICA DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**Desarrollo de una guía para la estimación de la huella de agua en edificaciones del sector construcción costarricense en la etapa de diseño.**

Llevado a cabo por el estudiante:

Brenes Aguilar Santiago

Carné: 2017191479

Proyecto de Graduación presentado públicamente ante el Tribunal Evaluador el jueves 30 de noviembre de 2023 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

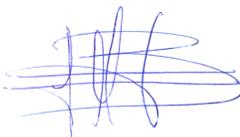
En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

MILTON ANTONIO SANDOVAL QUIROS (FIRMA) Firmado digitalmente por MILTON ANTONIO SANDOVAL QUIROS (FIRMA) Fecha: 2023.11.30 11:24:29 -06'00'

Ing. Milton Sandoval Quirós, MAE  
Representante Director de la Escuela

BRAULIO ENRIQUE UMAÑA QUIROS (FIRMA) Firmado digitalmente por BRAULIO ENRIQUE UMAÑA QUIROS (FIRMA) Fecha: 2023.11.30 15:05:57 -06'00'

Ing. Braulio Umaña Quirós, MSc.  
Profesor Guía

 Firmado digitalmente por MARIO ALBERTO VARGAS BRENES (FIRMA) Fecha: 2023.12.06 08:33:47 -06'00'

Ing. Mario Vargas Brenes  
Profesor Lector

SOFIA DE LOS ANGELES PICADO VALVERDE (FIRMA) Firmado digitalmente por SOFIA DE LOS ANGELES PICADO VALVERDE (FIRMA) Fecha: 2023.11.30 15:06:57 -06'00'

Ing. Sofía Picado Valverde  
Profesora Observadora

# Abstract

This document establishes an application methodology for estimating the water footprint in the Costa Rican construction sector in buildings during their design stage, based on the guidelines of the ISO 14046 standard.

The generated methodology includes the definition of the objective and scope of the study, the life cycle inventory and the inventory of the elementary water flows associated with the different stages of the life cycle of a construction. Additionally, a tool is presented as a basis for the collection and logical arrangement of the available data.

The impact categories were recommended and developed with their respective associated evaluation methods in the evaluation of the water footprint in buildings in the Costa Rican construction sector. This is a first recommendation regarding which impact categories to evaluate and which methods to use, which can be considered when evaluating the water footprint of buildings in the Costa Rican construction sector.

After completing the data logging tool, the scarcity of water footprint databases for the construction materials used in Costa Rica becomes evident, along with the lack of regulation in assessing this environmental parameter by a regulatory body. Additionally, there is a need to incorporate computer programs that facilitate the comprehensive assessment of water footprint for all stages of the life cycle of a construction project in Costa Rica. Currently, the country has access to software; however, these are paid and quite expensive, making their investment less attractive, except for mainly academic purposes.

**Keywords:** Water footprint, Sustainable construction, environmental impacts, sustainability, design.

# Resumen

En el presente documento se establece una metodología de aplicación para la estimación de la huella de agua en el sector construcción costarricense en edificaciones durante su etapa de diseño, basada en los lineamientos de la norma ISO 14046.

La metodología generada incluye la definición del objetivo y alcance del estudio, el inventario de ciclo de vida y el inventario de los flujos elementales de agua asociados a las diferentes etapas del ciclo de vida de una construcción. Adicionalmente se presenta una herramienta como base para la recolección y el acomodo lógico de los datos disponibles.

Se recomendaron y desarrollaron las categorías de impacto con sus respectivos métodos de evaluación asociados en la evaluación de la huella de agua en edificaciones del sector construcción costarricense. Esta es una primera recomendación respecto a qué categorías de impacto evaluar y qué métodos utilizar, los cuales pueden ser considerados al momento de evaluar la huella de agua en edificaciones del sector construcción costarricense.

Finalizada la herramienta de registro de datos se evidencia la escasez de bases de datos de huella de agua en los materiales constructivos utilizados en Costa Rica y la falta de regulación en la evaluación de este parámetro ambiental por parte de un ente regulador. Además de la necesidad de incorporar programas computacionales que faciliten la evaluación integral de la huella de agua para todas las etapas del ciclo de vida de una construcción en Costa Rica. En la actualidad el país cuenta con acceso a softwares, sin embargo, estos son de paga y son bastante onerosos, por lo que su inversión no resulta del todo atractiva, más allá que para fines académicos mayormente.

**Palabras clave:** Huella de agua, Construcción sostenible, impactos ambientales, sostenibilidad, diseño.

# **Guía para la estimación de la huella de agua en edificaciones del sector construcción costarricense en la etapa de diseño**

SANTIAGO BRENES AGUILAR

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Octubre del 2023

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

<b>PREFACIO .....</b>	<b>1</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>8</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>71</b>
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>87</b>
<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>111</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>116</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>118</b>
<b>LIMITACIONES .....</b>	<b>121</b>
<b>APÉNDICES .....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>131</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>133</b>

# Prefacio

La huella de agua es un concepto que aparece oficialmente por primera vez en la norma ISO 14046:2015 y que, según la literatura consultada, viene evolucionando desde su “primera versión” como huella ecológica presentada por Rees & Wackernagel (1996) y su “segunda versión” como Agua Virtual (Allan, 1998). Seguido de estos primeros conceptos relacionados con los impactos del agua, se encuentran las publicaciones de Hoekstra de los años 2002 y 2011 (A. Hoekstra et al., 2011; A. Y. Hoekstra & Hung, 2002), en las cuales se habla del concepto de “huella hídrica”, sus tipos y su sustentabilidad.

Actualmente, el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) se encuentra trabajando en el Proyecto-Plan Piloto para la implementación de la Huella de Agua en el sector construcción como parte de su portafolio de proyectos de sostenibilidad y responsabilidad social. Al momento de realizar esta investigación, el proyecto aún se encuentra en una fase de desarrollo de estrategias en el posicionamiento de la Huella de Agua en el sector de ingeniería y arquitectura de Costa Rica (Carazo, 2022).

La finalidad de la estimación de huella de agua es obtener los impactos relacionados con el agua, los cuales se pueden representar por uno o más parámetros que cuantifiquen los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto, proceso u organización relacionados con el agua. La evaluación integral de la huella de agua identifica la cantidad de consumo de agua y los cambios en la calidad del agua, lo que en el caso de la construcción se traduce como, la identificación de las fases de ciclo de vida que más agua consumen y los cambios que esta sufre durante su uso (INTE ISO 14046, 2015).

En una construcción permite determinar los procesos y materiales que más agua consumen durante su ciclo de vida, según las características de la estructura.

Es debido a esto que este proyecto se

encuentra directamente relacionado con la construcción sostenible, tema que se incluye en la misión y visión de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica y, además, en el objetivo general y los objetivos específicos 1, 2, 5 y 6, igualmente de esta Escuela

(Escuela de Ingeniería en Construcción, 2022).

Asimismo, la huella de agua se encuentra directamente relacionada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la ONU, en sus objetivos 6 (Agua limpia y saneamiento), 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y 12 (Producción y consumos responsables) (ONU, 2022).

La implementación de la huella de agua en procesos, productos o empresas del sector construcción puede resultar llamativa a los clientes interesados en conocer los consumos y los impactos del agua que se utilizó durante la construcción y la que se utilizará durante su uso. Además del compromiso que estas asumen con el ambiente, es posible conseguir reconocimientos distinguidos en las obras llevadas a cabo bajo esta evaluación. Esto les permitiría mejorar su posicionamiento en el mercado, lo cual se puede ver reflejado en importantes incentivos económicos.

En la actualidad Costa Rica no posee ninguna política pública que inste a las empresas del sector construcción a realizar evaluaciones de la huella de agua en sus proyectos, sin embargo, existe una directriz del MINAE acerca de la construcción sostenible. Esta es la Directriz N°050-MINAE, en la que se promueve la aplicación de prácticas de construcción sostenible en los edificios de toda la Administración Pública, tanto en aquellos que se vayan a construir como en los edificios existentes que se vayan a ampliar, rehabilitar o remodelar, entre otros (MINAE).

Este proyecto busca satisfacer algunas de las necesidades presentadas por el sector

construcción costarricense en la implementación de la huella agua a sus procesos y productos. El aporte de este proyecto se encuentra principalmente en la investigación acerca de los conceptos básicos de huella de agua a la fecha, la realización de una metodología que se apegue a la norma vigente y finalmente, una herramienta que integre todos los pasos de la metodología propuesta.

Agradezco primeramente a mis padres Hernán y Carolina, por su amor y apoyo incondicional durante todos estos años, por enseñarme cómo afrontar las dificultades y cómo sobreponerme a ellas. A mis hermanos Samuel y Saúl, por siempre sacar lo mejor de mí y demostrarme cómo debe ser un líder. A mi novia Diana, quien ha estado a mi lado en las buenas y en las malas, apoyándome y levantándome, siempre sacando lo mejor de mí.

A mi profesor guía, Braulio Umaña Quirós, por brindarme la oportunidad de desarrollar un proyecto poco convencional y apoyarme en la elaboración de este. Al Ing. Mario Vargas Brenes, quien en conjunto con el profesor guía, se encargó de brindarme una correcta instrucción acerca de la elaboración del proyecto. Un agradecimiento especial a la Ing. Melissa Díaz, quien aportó activamente en la toma de decisiones de este proyecto y, me transfirió importante información para poder culminar el trabajo.

Finalmente, agradezco al profesorado y a la comunidad TEC, que de una u otra manera fueron parte importante de mi formación profesional y humana. Especial agradecimiento a mis compañeros Alejandro, Rachel, Suguey e Iván, por enseñarme que la vida universitaria es una etapa de mucho más que solo cursos, la mejor de las suertes en sus desarrollos personales.

# Resumen ejecutivo

La finalidad de esta investigación fue desarrollar una guía para la estimación de la huella de agua en el sector de la construcción costarricense, siendo este un tema poco desarrollado en el país. Actualmente, el agua no solo es considerada una crisis ambiental, sino también una crisis económica. Además de esto, la crisis del agua se declaró como uno de los diez riesgos más relevantes para la humanidad en el 11° Reporte de Riesgos Globales, con respecto a la probabilidad de ocurrencia e impacto que podría generar (CADIS & COSUDE, 2016).

Esta investigación formaba parte de un Proyecto-Plan Piloto del CFIA, destinado a la implementación de la Huella de Agua en el sector de la construcción como parte de su portafolio de proyectos de sostenibilidad y responsabilidad social. Se buscó proporcionar los instrumentos necesarios al sector de la construcción para considerar la Huella de Agua en sus obras, como una guía a seguir y una herramienta para el acomodo lógico de las principales variables establecidas según la metodología.

La huella de agua se encuentra directamente relacionada con la construcción sostenible, un tema incluido en la misión y visión de la Escuela de Ingeniería en Construcción (Escuela de Ingeniería en Construcción, 2022). Además, este tema estaba alineado con el objetivo general y los objetivos específicos 1, 2, 5 y 6 de la Escuela de Ingeniería en Construcción (Escuela de Ingeniería en Construcción, 2022).

Asimismo, la huella de agua contribuía a los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la ONU, específicamente en los objetivos 6 (Agua limpia y saneamiento), 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y 12 (Producción y consumo responsables) (ONU, 2022).

Para desarrollar esta herramienta, se plantearon tres objetivos. El primero consistió en realizar un análisis del estado del arte de la estimación de la huella de agua en Costa Rica, lo que permitió conocer los conceptos básicos de la huella de agua. Esto se logró mediante la

investigación y aplicación de la norma INTE ISO 14046 (INTE ISO 14046, 2015), que rige como norma a nivel nacional e internacional, además de investigar acerca de experiencias registradas sobre la huella de agua en la construcción.

Para el segundo objetivo, se generó una metodología para el registro de datos que permite estimar la huella de agua en edificaciones en su etapa de diseño. Se identificaron las variables indispensables para la estimación de huella de agua en edificaciones en cumplimiento de la norma INTE ISO 14046:2015. Se establecieron los pasos específicos a seguir para la estimación de la huella de agua mediante una secuencia lógica y se identificó la relación entre las actividades por realizar. Además, se establecieron los datos y requisitos de calidad necesarios en una estimación de huella de agua y se sugirió un límite de corte que determina desde qué condición una variable deja de ser significativa y puede ser despreciada, según los comentarios de la Ing. Melissa Díaz (Díaz, 2023).

En lo que corresponde al tercer objetivo, con base en la información recolectada y la metodología propuesta, se generó una herramienta para el registro de datos para la estimación de la huella de agua en edificaciones en su etapa de diseño. En este objetivo se buscó que la herramienta generada se pudiera estandarizar y que fuera de fácil entendimiento. La finalidad de la herramienta fue reforzar y contribuir al proyecto-plan piloto para la implementación de la huella de agua en el sector de la construcción del CFIA en búsqueda de facilitar el camino a futuros interesados en el tema.

Como resultados de la investigación, se obtuvo un glosario de los conceptos más importantes relacionados con el agua, la huella de agua, el Análisis de Ciclo de Vida, los sistemas del producto, los procesos, las organizaciones, los datos y la calidad de estos. Se definieron los diferentes tipos de agua que existen y los dos enfoques para evaluar impactos por el uso del agua, recomendando utilizar el uso

consuntivo y degradativo. Se obtuvo un cuadro resumen de las metodologías que evalúan el agua a nivel volumétrico, de impactos y daños, y un registro de las experiencias acerca de la gestión del agua en el sector de la construcción a nivel mundial.

La metodología seleccionada correspondía a la planteada en la norma INTE ISO 14046:2015, que requería cuatro fases para realizar una evaluación de la huella de agua de una construcción, aunque esta investigación contempló solamente las tres primeras.

Según la información recopilada, la unidad funcional más utilizada en estudios de huella de agua aplicados a la construcción era el área en metros cuadrados construidos ( $m^2_{\text{construido}}$ ), por lo que se estableció como la unidad funcional a utilizar en la guía del presente trabajo. Las evaluaciones estudiadas mostraron que el criterio de corte a utilizar más recomendado y empleado para la construcción era el criterio de corte de masa, establecido en un 5% según la recomendación brindada por la Ing. Melissa Díaz. Aunado a esto, se establecieron y desarrollaron los límites del sistema a construcciones desarrolladas principalmente en Costa Rica.

Para el inventario de la huella de agua se determinó que este dependía de una cuantificación de los flujos de agua en el sistema, donde debían existir profesionales encargados de llevar la contabilización de estos flujos. Además, era importante la presencia de un especialista en huella de agua que estableciera los requisitos y la calidad de los datos, para su posterior evaluación mediante los métodos de evaluación de impactos ambientales relacionados con el recurso hídrico y recomendados en este documento.

En cuanto a la fase de Evaluación del Inventario de Ciclo de Vida, se establecieron 4 categorías de impacto: Escasez, Disponibilidad, Ecotoxicidad en agua dulce y Eutrofización en agua dulce. Para estas se designaron 4 métodos de evaluación de impacto, siguiendo el mismo orden.

Una vez establecido el alcance, el objetivo y los métodos de evaluación, además de haber registrado la data del inventario de ciclo de vida, se procedió a establecer los pasos específicos por seguir para la estimación de la huella de agua en edificaciones y la relación entre los mismos. En esta fase se encontró la

identificación de oportunidades para reducir la huella de agua.

La investigación mostró la necesidad de programas computacionales de pago para evaluar la huella de agua debido a la masiva cantidad de información requerida para evaluar el impacto de cada uno de los materiales del inventario de huella de agua.

A pesar de esto, se mencionó que la aplicación de la evaluación de huella de agua se podía realizar sin necesidad de programas computacionales, al momento de realizar esta investigación Costa Rica no posee ninguna base de datos con información de los productos empleados en el país y tampoco existe una base de datos de acceso libre.

Finalmente, se desarrolló una herramienta como resultado de toda la investigación realizada y la metodología propuesta. Esta herramienta incorporaba todos los aspectos necesarios para realizar una evaluación de la huella de agua en edificaciones para el sector de la construcción.

Esta herramienta se desarrolló en una hoja de Excel, programada con respuestas preseleccionadas en los aspectos cualitativos y cuantitativos de llenado específico. Se planteó de esta forma debido a que en la estimación de la huella de agua no existen parámetros estandarizados, sino parámetros específicos para cada evaluación.

Se estableció en el paso 1 de la herramienta la definición del alcance y el objetivo de la evaluación que se realizaría, incluyendo las aplicaciones previstas, límites del sistema y técnicas de recolección de datos.

El paso 2 consiste en la realización del inventario de huella de agua, donde se acomodaban lógicamente los datos para los materiales utilizados, la definición de esos materiales, la unidad de medición y las cantidades empleadas.

En el paso 3 se cuantifican los flujos de agua, especificando los volúmenes de agua utilizados en tres tipos de agua: agua residual, agua perdida y agua tratada.

En cuanto a las conclusiones de la investigación, se determinó que la única norma que regía la huella de agua en Costa Rica y en el mundo era la norma ISO INTE 14046:2015. No se hallaron evaluaciones de huella de agua en la construcción costarricense de acceso libre, únicamente una evaluación realizada a la Torre

Este del Hospital Calderón Guardia, la cual era de acceso privado.

Los estudios encontrados mostraron que la fase del ciclo de vida de una edificación que más impacto generaba era la fase de uso, por lo que se recomendaba enfocarse más en esta fase. Además de esto, el material que más impacto aporta a una edificación es el acero, por lo que se recomienda minimizar el uso de acero.

Se destacó la gran confusión que existe entre la huella de agua y la huella hídrica a nivel mundial, ya que se encontraron diversos artículos que decían evaluar la huella de agua cuando en realidad evaluaban la huella hídrica. También se mencionó que la aplicación de ambos conceptos en una edificación resultaba en mejores resultados y un mejor panorama de los consumos e impactos del recurso hídrico.

De igual forma, se logró generar una metodología que emplea las variables indispensables en la estimación de la huella de

agua en edificaciones, destacando la importancia de contratar un profesional especializado en la materia para llevar a cabo la evaluación. En esta metodología se determinó la secuencia lógica de pasos a seguir para evaluar la huella de agua, los cuales se derivaban de las especificaciones técnicas de la norma ISO INTE 14046:2015.

Finalmente, se concluyó que para realizar evaluaciones de huella de agua en el sector de la construcción costarricense es necesario utilizar programas computacionales y bases de datos robustas, que son de pago. Se recomendó iniciar por la creación de una base de datos nacional que incluyera datos disponibles de los principales materiales de la construcción, como el acero, el cemento, el agua empleada para construir, la madera, entre otros. Este enfoque representa un paso crucial hacia un futuro donde los impactos al recurso hídrico sean incorporados como un requisito indispensable en la construcción de edificaciones.

# Introducción

El Cambio Climático (CC) es uno de los mayores desafíos que tiene actualmente la raza humana y que debe ser enfrentado por toda la población desde todos los ángulos posibles. Alteraciones en las precipitaciones y en el clima, sumado al aumento del nivel del mar, entre otros derivados del CC, ayudan diariamente a aumentar la tensión económica, política y humanitaria; afectando el desarrollo a nivel mundial (INVU, 2022).

Con el fin de colaborar en la mitigación de estos fenómenos, el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) está procurando la implementación de buenas prácticas en materia de construcción sostenible. Precisamente, la construcción sostenible consiste en crear, planificar y desarrollar de forma responsable en el ambiente, optimizando y respetando los recursos naturales existentes bajo principios ecológicos (INVU, 2022).

El consumo excesivo de agua, la degradación de los recursos naturales y el impacto del cambio climático amenazan con reducir la disponibilidad de agua en algunas regiones del mundo para el año 2050, especialmente en los países en vías de desarrollo, advierte un estudio de la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (ONU, 2015).

A raíz de esto se crea el concepto de huella de agua, el cual fue mencionado oficialmente por primera vez en la norma ISO 14046 (2015). Este concepto implica la medición de la cantidad total de impactos al recurso hídrico producidos por el uso directo e indirecto del agua en productos o procesos, para todas sus fases de Ciclo de Vida (Farell, 2013).

Esto significa que, desde el punto de vista de la construcción, el sector aporta huella de agua a los ecosistemas por medio de sus materiales constructivos, la gasolina necesaria para el transporte, el agua que se utiliza en la construcción misma y durante su fase de uso, entre otros. En la actualidad Costa Rica presenta un consumo de agua potable hasta 3,2 veces mayor que el promedio centroamericano

(INTECO, 2018). Por lo que este tema, aparte de apreciarse como una problemática nacional, se puede tomar como una oportunidad de mejora para el país en materia de reducción de impactos ambientales relacionados con el agua y construcción sostenible, con edificaciones cada vez más amigables y conscientes del recurso hídrico.

El propósito general de esta investigación consistió en realizar una guía para la evaluación de la huella de agua en el sector construcción costarricense en la etapa de diseño, esto en búsqueda de informar a los principales actores del sector y empezar a implementarla en los proyectos venideros. La guía se basó en la metodología presentada por la norma ISO 14046, la cual especifica los principios y las directrices relacionados con la evaluación de la huella de agua de productos, procesos y organizaciones basada en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (INTE ISO 14046, 2015).

Una vez se analiza la huella de agua, es posible determinar cuáles fases del ciclo de vida de una construcción aportan más impacto al ambiente lo que facilita la generación de propuestas de mejora para esas fases en específico. Atacando primeramente las fases más críticas, para posteriormente enfocarse en el resto de las fases del ciclo de vida.

Este es un tema relativamente nuevo en el país y es que actualmente solo se tiene conocimiento de una fuente de información de acceso privado, que evalúe la huella de agua en la construcción de Costa Rica. Esta fuente corresponde a un informe realizado por un grupo de profesionales reunidos por el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) como parte de un Plano Piloto para la Implementación del indicador Huella de Agua en el sector Construcción de Costa Rica (Carazo, 2022). Este plan piloto busca promover soluciones más sostenibles de ingeniería y arquitectura en procura de la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos y el cuidado del medio

ambiente, evaluando los impactos generados (Jones et al., 2021).

A continuación, se mencionan los tres objetivos específicos de este proyecto.

Como primer (1) objetivo específico, se realizó un análisis del estado del arte de la estimación de huella de agua en la construcción costarricense. Este proceso inició con una revisión de información disponible mediante literatura y entrevistas con profesionales acerca de los conceptos básicos que deben contemplarse para su implementación. Además, se indagó sobre cuáles son las normas que rigen la huella de agua a nivel mundial y a nivel nacional, y cómo estas han sido aplicadas en diferentes proyectos de construcción alrededor del mundo. Esto en beneficio de enriquecer al lector sobre la información básica que debe manejar una vez se defina la aplicación de la huella de agua a sus proyectos, sea esta una persona física o jurídica relacionada con la construcción.

Con base en la información recolectada se procede a generar una metodología para el registro de datos que permitan la estimación de huella de agua en edificaciones en su etapa de diseño (2). Esta metodología se apega a los lineamientos de la norma ISO 14046 y busca identificar las variables indispensables para la estimación de la huella de agua en la construcción, además de establecer una serie de pasos específicos a seguir. Al mismo tiempo, esta muestra por medio de diagramas de flujo la relación que existe entre las actividades que se deben realizar y define una secuencia lógica para la estimación de la huella de agua. En la metodología se detallan los datos que se requieren para su aplicación y los requisitos que estos deben cumplir para una correcta evaluación.

Finalmente, se facilita una herramienta para el registro de datos para la estimación de huella de agua en edificaciones en su etapa de diseño (3), esta herramienta busca estandarizar un registro de las variables previamente mencionadas, de forma tal que los responsables de aplicar la huella de agua en un proyecto de construcción se dediquen a simplemente completar un formulario con las características del proyecto. Esta herramienta es de fácil entendimiento e incluye ejemplos de la información que se debe incluir en el formulario. Con esta herramienta se pretende aportar al

proyecto-plan piloto para la implementación de la huella de agua en el sector construcción del CFIA.

# Antecedentes

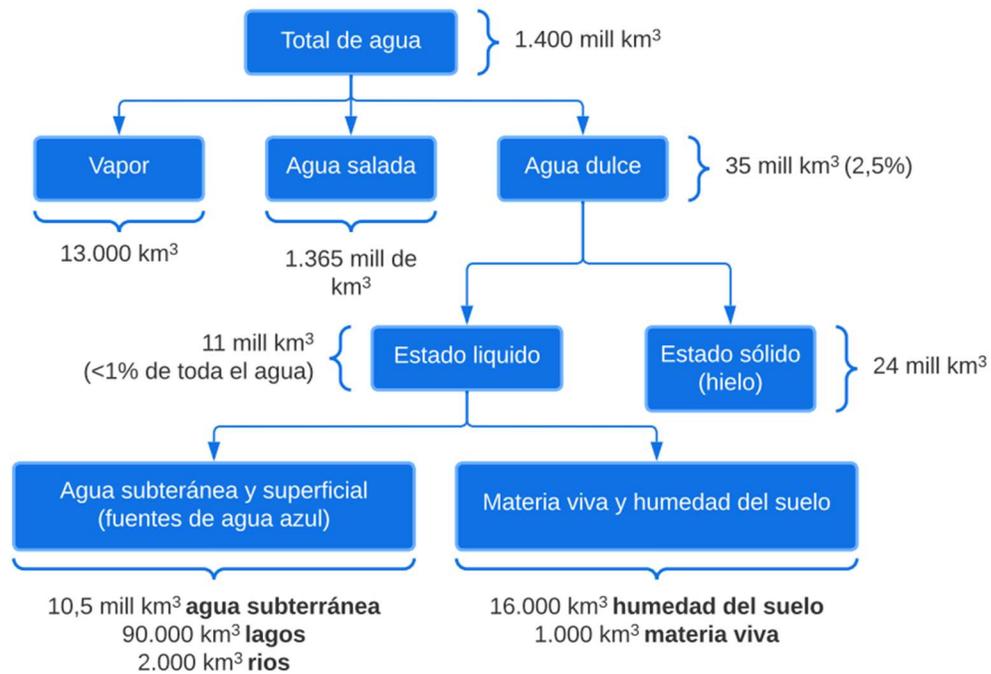
En la presente sección se describirá la realidad actual acerca del uso y la disponibilidad del agua, con el fin de concientizar acerca del adecuado aprovechamiento del recurso hídrico. Posterior a esto se introducirá el tema de huella de agua y su evolución a través del tiempo hasta llegar a ser lo que es hoy. De igual forma se mencionan los retos que este representa en materia de la conservación y aprovechamiento del agua.

## Uso y disponibilidad del agua

El recurso hídrico es esencial para el sostenimiento de la vida en la Tierra y para el desarrollo de toda actividad social y económica (Hanasaki et al., 2013)). La disponibilidad promedio anual de este recurso en el mundo es de aproximadamente 1.400 millones de  $\text{km}^3$ , el 97.5% de este volumen corresponde a agua en forma gaseosa (vapor) ( $13.000 \text{ km}^3$ ) y agua salada ( $1.365$  millones de  $\text{km}^3$ ).

El restante 2.5%, es decir, 35 millones de  $\text{km}^3$ , es agua dulce. De este porcentaje solamente el 0,78% ( $11$  millones de  $\text{km}^3$ ) se encuentra en estado líquido. En la siguiente figura se detallan mejor los volúmenes de la hidrosfera (Fondo para la comunicación y la educación ambiental, 2017).

## HIDROSFERA - VOLÚMENES



**Figura 1.** Volúmenes de la hidrosfera.

**Fuente:** Adaptado de (A. M. Boulay & Pfister, 2013).

Los datos de la Figura 1 demuestran que, si bien es cierto, existe un volumen importante de agua en la Tierra, el porcentaje al que tiene acceso la población mundial es mínimo. De hecho, se espera que la demanda global de este recurso aumente significativamente y con una proporción mayor en los países en vías de desarrollo, como lo es Costa Rica, esto según el Programa de Evaluación del Agua de las Naciones Unidas (WWAP, 2014).

A. Ertug Ercin y Arjen Y. Hoekstra (2013) realizaron una evaluación del consumo de agua a nivel mundial, estos estructuraron 4 escenarios a través de dos ejes, los cuales representan dos dimensiones claves de la incertidumbre para el año 2050: globalización versus autosuficiencia regional y el desarrollo impulsado por la economía versus el desarrollo impulsado por los objetivos sociales y medioambientales (Ercin & Hoekstra, 2013).



**Figura 2.** Los 4 escenarios definidos en el estudio.  
**Fuente:** Adaptado de (Ercin & Hoekstra, 2013).

Los cuatro escenarios presentados en la Figura 2 corresponden a: mercado global (S1), mercados regionales (S2), sostenibilidad global (S3) y sostenibilidad regional (S4). Las variables que se establecieron en este estudio fueron la demografía, la economía, la tecnología, las reservas de agua, la infraestructura, el clima, el comportamiento social, las políticas, el ambiente y la gobernanza.

En el estudio realizado por A. Ertug Ercin y Arjen Y. Hoekstra (2013), se destaca el hecho de que el consumo de agua podría sufrir un aumento de entre el 30% y el 175% para el año 2050, respecto al año 2000. Aún más importante es el hecho de que la actividad que presentó mayores incrementos en los cuatro escenarios fue la actividad industrial, la cual presenta aumentos de hasta el 600%, igualmente para el año 2050 respecto al año 2000.

Estos demostraron mediante sus resultados que es posible reducir el consumo de agua a niveles sostenibles aún con poblaciones en aumento, siempre y cuando se cambien los patrones de consumo y otros impulsores. Además, destacan el crecimiento demográfico como una de las principales causas de que la presión sobre los recursos de agua dulce vaya en aumento (Ercin & Hoekstra, 2013).

Se ha proyectado que para el año 2050 la población mundial aumente en un 33% (un tercio) desde el 2000, principalmente en los países en vías de desarrollo (WWAP, 2014). Lo cual a su vez significa un aumento de la demanda de agua para uso doméstico, industrial y agrícola, las proyecciones de la población global para cada uno de estos escenarios se encuentran en la Figura 3 (Ercin & Hoekstra, 2013).

Population projections.

Region code	Region	S1-2050	S2-2050	S3-2050	S4-2050
1	USA	357,007,000	452,394,000	357,007,000	403,100,000
2	CAN	38,845,000	48,791,000	38,845,000	43,641,000
3	WEU	385,569,000	487,475,000	385,569,000	434,634,000
4	JPK	119,338,000	151,811,000	119,338,000	134,930,000
5	ANZ	32,903,000	41,515,000	32,903,000	37,063,000
6	EEU	93,422,000	122,034,000	93,422,000	107,097,000
7	FSU	239,902,000	320,767,000	239,902,000	278,366,000
8	MDE	403,048,000	525,568,000	403,048,000	461,667,000
9	CAM	225,896,000	304,142,000	225,896,000	262,882,000
10	SAM	419,973,000	564,683,000	419,973,000	488,073,000
11	SAS	1,990,834,000	2,660,586,000	1,990,834,000	2,308,540,000
12	SEA	655,577,000	872,810,000	655,577,000	759,206,000
13	CHI	1,130,211,000	1,479,309,000	1,130,211,000	1,295,603,000
14	NAF	200,112,000	265,577,000	200,112,000	231,496,000
15	SSA	1,731,742,000	2,204,177,000	1,731,742,000	1,960,102,000
16	RoW	81,243,000	98,602,000	81,243,000	89,589,000
17	World	8,105,622,000	10,600,241,000	8,105,622,000	9,295,989,000

**Figura 3.** Proyecciones de la población global para cada escenario.

**Fuente:** Extraído de (Ercin & Hoekstra, 2013).

En la actualidad, la reducción de residuos y un mejor aprovechamiento de los recursos están siendo parte del cambio que se desea hacer en los diferentes sectores, incluyendo el sector construcción. Según la Revista 264 del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (2016), entre un 30% y un 40% del agua y la electricidad que se consume en el mundo corresponde al sector construcción.

Además de esto, debido a la ausencia de sistemas de gestión de desechos sólidos provoca que el sector genere el cuádruple de desechos que, en los países del primer mundo, donde en estos se generan en promedio 20 kilogramos de basura por metro cuadrado de construcción, mientras que en nuestro país se puede llegar a sumas de hasta 115 kilogramos por metro cuadrado (CFIA, 2016).

En cuanto al consumo del recurso hídrico en la industria y la construcción, este aumentó en un 157% entre 1973 y el 2010, según el Informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo (WWDR, 2014).

Las preocupaciones acerca de una crisis del agua ya no son solamente desde el punto de vista ambiental, sino que también económico. Tanta es la preocupación alrededor del tema que en el 11° Reporte de Riesgos Globales publicado por el Foro Económico Mundial (2016), se indicó la crisis del agua como uno de los diez riesgos más relevantes para la humanidad, esto con respecto a la probabilidad de ocurrencia y el impacto que podría generar (CADIS & COSUDE, 2016).

## Marco Jurídico y Legal del agua en Costa Rica

El marco legal que rige la actividad de la DA (Dirección de Agua) está principalmente sustentada en la Ley de Agua No. 276 publicada en el periódico oficial La Gaceta el 26 de agosto de 1942, en ella se establecen las funciones y competencias de la institución. El marco normativo vinculado a los recursos hídricos en Costa Rica es relativamente complejo, se

encuentra compuesto por una serie de leyes y competencias a varias instituciones y al mismo tiempo elimina los vacíos legales.

Algunas de las leyes, decretos y reglamentos que rigen el recurso hídrico se muestran a continuación con su respectivo vínculo:

## Acuerdos

- [Acuerdo 60-2012 Estudios Hidrogeológicos](#)
- [Permisos de Obras Menores](#)

## Circulares

- [Circulares 2017](#)
- [Circulares 2016](#)
- [Circulares 2015](#)

## Reglamentos

- [Manual de Dotaciones Agua](#)
- [Manual Dotaciones La Gaceta N° R-0327-2021-MINAE](#)
- [Guía de recomendación de obras de calibración de concesiones](#)
- [Reglamento Org-DireccionAgua. DM-607-2010](#)

## Leyes

- [Ley de Aguas N°276](#)
- [Ley Constitutiva del AYA Ley N°2726](#)
- [Ley de Condominios N°7933](#)
- [Ley 9590 Ley de Patrimonio Natural toma de agua](#)
- [Ley Forestal N°7575](#)
- [Ley Orgánica del Ambiente N°7554](#)

## Resoluciones

- [Resolución CAV Inversión del canon de vertidos R-0210-2020 Gaceta 231 Alcance 244 17 09 2020](#)

## Decretos

- [Decreto Interés Público Tratamiento Aguas DE-32133](#)
- [DE N°43242-MINAE Reglamento caudal ambiental](#)

reglamentos que otorgan

- [Decreto Reglamento Cosecha de lluvia DE 43100-MINAE](#)
- [Decreto Evaluación y Clasificación Calidad Agua Superficial DE-33903](#)
- [Decreto Vertido y Reúso DE-33601](#)
- [DE 42015-MAG-MINAE-S-MIVHA Reglamento Aguas Subterránea](#)

La lista completa puede encontrarse en la página oficial de la [Dirección de Agua del MINAE](#).

## Política Nacional de Agua Potable

La Política Nacional para el Subsector de Agua Potable de Costa Rica 2017-2030, define los ejes, objetivos, alcances y lineamientos que corresponden al Estado en la prestación del servicio de abastecimiento de agua potable para la población del país, considerando que es un deber del Estado proteger la salud y procurar el mayor bienestar de los ciudadanos.

Esta política tiene como fin procurar el acceso al agua potable por medio de la protección del recurso hídrico, y el fortalecimiento de las capacidades de los actores relacionados con la prestación del servicio, para contribuir a la salud, bienestar y desarrollo del país (AyA, 2017). A pesar de esto, esta política no trata ningún tema relacionado con la huella de agua.

## Agua en el sector construcción costarricense

Costa Rica es un país rico en agua, sin embargo, el agua no siempre está donde se necesita, ni en el tiempo, ni en el espacio (CCC, 2019). En la edición 230 de la revista construcción de la Cámara Costarricense de la Construcción (CCC) se menciona que la demanda de agua en el país se está incrementando debido a estándares de vida más elevados, crecientes tasas de urbanización y la expansión de actividades productivas como la

agricultura para exportación, la construcción y el turismo.

A pesar de que lo anterior podría parecer una buena noticia, la realidad desde el punto de vista del recurso hídrico es otra, debido a que esto solo logra ponerles más presión a los problemas relacionados con el suministro de agua, falta de infraestructura, mala gestión e inseguridad jurídica, quienes literalmente ahogan el desarrollo social y económico del país (CCC, 2019).

Sin duda alguna el agua es un propulsor del desarrollo socio económico del país, sin embargo, si este no es gestionado adecuadamente se convierte en un obstáculo para el propio desarrollo socio económico, como así lo mencionó el presidente de la Cámara Costarricense de la Construcción (Acón, 2019).

Un tema muy importante que destaca la CCC es el actual desconocimiento en materia ambiental y de preservación del recurso hídrico en cuanto a la disponibilidad de agua. Tampoco

se dispone de ningún indicador sobre el balance hídrico acerca de algún proceso o producto que permita a los jerarcas de las diferentes instituciones, conocer en forma global, confiable y oportuna, la situación real en cuanto a la disponibilidad o potencial de agua con que se cuenta para efectos de planificar de forma sectorial los planes de inversión y el otorgamiento de permisos para no sobreexplotar (CCC, 2019).

A nivel país resulta evidente la gran demanda existente por la disponibilidad y accesibilidad del recurso hídrico para las actividades productivas que dinamizan la economía del país. En forma combinada, todos los tipos de usos (excluyendo el consumo humano) representan aproximadamente el 78% del agua concesionada, mientras que para el abastecimiento humano se utiliza el 22% (AyA, 2017) en la Figura 4 se logra apreciar mejor el aprovechamiento del recurso hídrico en Costa Rica por actividad.

Actividad	Aprovechamiento
Consumo humano	22 %
Agropecuario	21 %
Agroindustrial	19 %
Industrial	13 %
Comercial	0 %
Riego	10 %
Turismo	8 %

**Figura 4.** Aprovechamiento del recurso hídrico en Costa Rica, 2015.  
**Fuente:** Extraído de (AyA, 2017).

## Regulación del recurso hídrico en Costa Rica

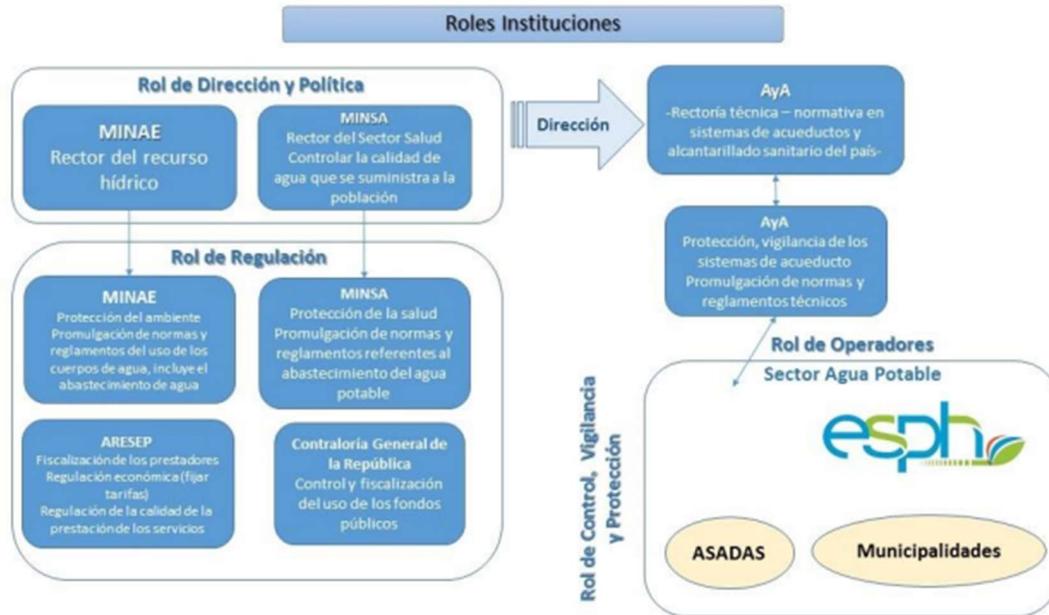
Se entiende por regulación del recurso hídrico como la capacidad de establecer normas dirigidas a reglar el funcionamiento de los sistemas de acueductos, en nuestro país esta es ejercida a través de cuatro entidades (AyA, 2017):

1. Acueductos y Alcantarillados (AyA): Promulgación de normas y reglamentos técnicos referentes a sistemas de agua potable y saneamiento.

2. Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE): Promulgación de reglamentos y normas atinentes al uso y aprovechamiento del recurso hídrico, así como en temas de calidad de aguas residuales.
3. Ministerio de Salud (MINSAL): Regulación de normas de calidad de agua.
4. Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP): Regulación económica (aprobación tarifaria), así como en cuanto a la calidad de

prestación de los servicios públicos de agua potable.

Para aclarar los roles institucionales de los entes mencionados anteriormente, se puede consultar la Figura 5:



**Figura 5.** Roles institucionales de los entes encargados de la regulación del recurso hídrico. **Fuente:** Extraído de (AyA, 2017).

En cuanto a la prestación directa del servicio, según la Procuraduría General de la República, en su Dictamen C-236-2008 del 7 de Julio de 2009, declara que todos los entes prestatarios de servicio público diversos a los que se mencionan a continuación están impedidos para administrar recursos públicos (AyA, 2017):

1. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA).
2. Asociaciones Administradoras de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados (ASADAS).
3. Empresa de Servicios Públicos de Heredia Sociedad Anónimas (ESPH S.A)
4. Municipalidades.

En cuanto a la cobertura que ofrece cada uno de estos entes, se presenta la figura 6:

Ente operador	Población cubierta	
<b>AyA</b>	2 259 194	46,7 %
<b>Municipalidades</b>	674 570	14,0 %
<b>ESPH</b>	225 695	4,7 %
<b>ASADAS</b>	1 406 495	29,1 %
<b>Otras formas de abastecimiento</b>	267 798	5,5 %
<b>Total población</b>	<b>4 833 752</b>	

**Figura 6.** Población con cobertura de Servicios Intradomiciliarias, 2015. **Fuente:** Extraído de (AyA, 2017).

# La construcción en Costa Rica

El sector construcción fue el más afectado durante la pandemia del COVID-19, esto se debe a que la pandemia trajo consigo una

crisis económica que afectó diversos sectores, entre ellos los hoteles y restaurantes, transporte y almacenamiento, y el comercio (Valverde, 2021). En la Figura 7 se aprecia la variación porcentual en la cantidad de empresas por sector en el 2020 respecto al 2019.



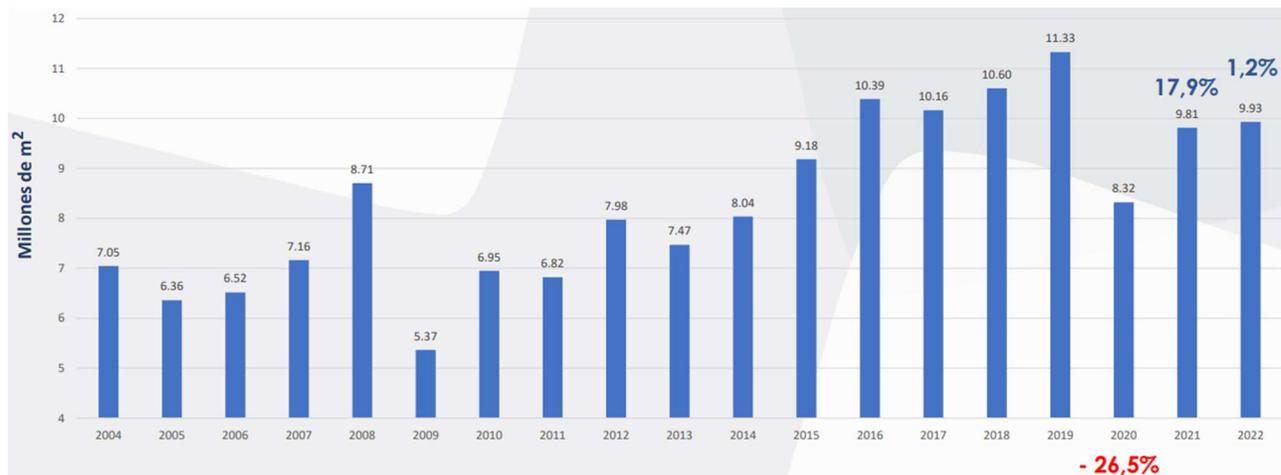
**Figura 7.** Variación porcentual en la cantidad de empresas en el 2020 respecto al 2019, según actividad. **Fuente:** Extraído desde (Valverde, 2021)

Como se puede observar, la cantidad de empresas del sector construcción tuvo una variación del -6,8% para el año 2020 respecto al 2019, este porcentaje corresponde al golpe que afectó a 2.262 compañías. Este sector resultó con más cierres que el sector de hoteles y restaurantes, en donde los cierres representaron un -6,7% de las empresas (1553 compañías).

Si la variación del sector se analiza desde los permisos de construcción tramitados ante el CFIA, también se presentó una disminución

importante, habiéndose tramitado 11,33 mill de m<sup>2</sup> de construcción para el 2019, y para el 2020 tan solo 8,32 mill de m<sup>2</sup>.

Esto representa una variación negativa cercana al 26%, si bien es cierto para el 2021 se presentó un aumento del 17,9% (9,81 mill de m<sup>2</sup> tramitados), el nivel de tramitación no alcanza los registros de los años previos a la pandemia. Para el cierre del 2022, el aumento respecto al año 2021 fue del 1,2% (9,93 mill de m<sup>2</sup> tramitados).



**Figura 8.** Área de construcción tramitada ante el CFIA en metros cuadrados anualizados. **Fuente:** Extraído desde (CFIA, 2022).

En términos de área de construcción tramitada por tipo de edificación, en la Figura 8 se puede observar que la mayor cantidad de metros cuadrados tramitados durante el 2021 corresponden al sector vivienda, el cual representó el 51,3% del total tramitado, donde vivienda unifamiliar representó el 46,8%, mientras que el restante 4,5% correspondió a condominios. El siguiente tipo de edificación con mayor cantidad de metros cuadrados tramitados

corresponde al sector comercio, que representó el 20,1% del total tramitado.

El resto porcentaje fue ocupado por el sector industria con un 13,5%, el sector oficinas con un 7% y finalmente "otros" que representó el 8,1%.

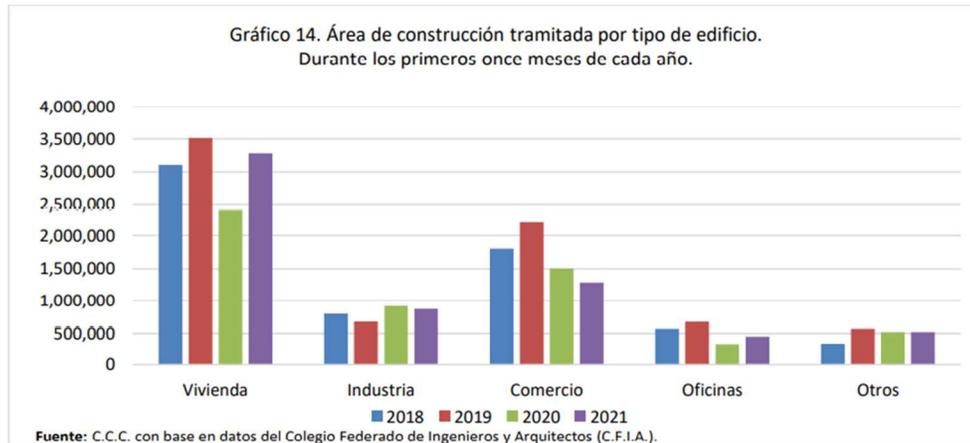
Distribución por tipo de edificación del área de construcción tramitada ante el C.F.I.A.			
Durante 2021			
Categoría	Participación	Subcategoría	Participación
VIVIENDA	51.3%	Vivienda unifamiliar	46.8%
		Condominios	4.5%
COMERCIO	20.1%	Edificios comerciales	19.4%
		Hoteles	0.7%
INDUSTRIA	13.5%	Bodegas	13.5%
		Edificios industriales	0.1%
OFICINAS	7.0%	Oficinas comerciales	6.9%
		Oficinas institucionales	0.1%
		Edificios educacionales	2.2%
OTROS	8.1%	Salud	4.4%
		Sitios de reunión pública	1.6%
TOTAL	100,00%	TOTAL	100,00%

**Figura 9.** Distribución por tipo de edificación del área de construcción tramitada ante el CFIA.

**Fuente:** Extraído desde (CCC, 2021) con base en los datos del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA).

En términos de variación en el área de construcción tramitada por tipo de edificio, se observa en la Figura 9 que solamente los sectores vivienda y oficinas mostraron crecimiento, contrario a esto, se observa una

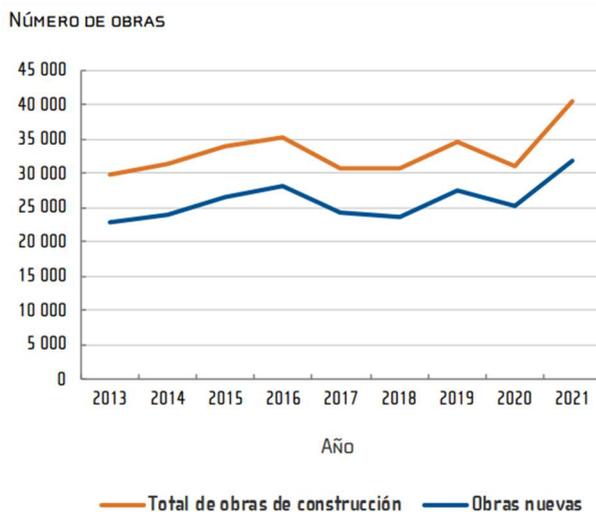
desaceleración en los sectores comercio, industria y "otros" (ver Figura 10).



**Figura 10.** Área de construcción tramitada por tipo de edificio, durante los primeros once meses de cada año.

**Fuente:** Extraído desde (CCC, 2021).

Respecto al número de obras tramitadas ante las municipalidades, según los datos del INEC, la cantidad de obras en construcción para el 2021 también habrían experimentado un incremento importante, en este caso si se superó a su homólogo del año 2019, lo cual significa que, en al menos este aspecto, el sector construcción ha logrado valores por encima a los anteriores a la pandemia (ver Figura 11).



**Figura 11.** Total, de obras de construcción y obras nuevas 2013-2021.

**Fuente:** Extraído desde (INEC, 2022).

## Edificaciones

Es importante establecer el término que se entenderá por edificación en el presente trabajo, por lo que se utilizará este para definir y describir a todas aquellas construcciones realizadas artificialmente por el ser humano con diversos, pero específicos propósitos. Las edificaciones son obras que diseña, planifica y ejecuta el ser humano en diferentes espacios de resguardo. Las edificaciones más comunes y difundidas son los edificios habitacionales, aunque también entran en este grupo otras edificaciones tales como los templos, los monumentos, los comercios, las construcciones de ingeniería, entre otros (Bembibre, 2009).

Las edificaciones requieren de un complejo sistema de planificación, diseño y ejecución, necesitándose invertir cierta cantidad de tiempo, capital y material en su realización (cantidades que varían de acuerdo con la complejidad de la edificación).

## Tipología constructiva seleccionada

Para este proyecto se decide utilizar el Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva, donde el Órgano de Normalización Técnica (ONT, 2021), en esta se detalla un listado de diferentes tipologías constructivas, sin embargo, el estudio se encuentra dirigido a las dos tipologías constructivas para viviendas de

concreto VC01 y VC02. En la Tabla 1 se detallan las características para cada una de estas tipologías, las cuáles presentan importantes similitudes entre sí.

<b>Tabla 1. Tipologías constructivas de la ONT seleccionadas.</b>		
Característica	VC01	VC02
Vida útil	50 años	55 años
Estructura	Mampostería integral, prefabricado.	Concreto, mampostería integral, prefabricado o perfiles metálicos.
Paredes	Externas de bloques de concreto, baldosas prefabricadas con repello quemado, internas de fibrocemento a un forro o prefabricadas, pintura acrílica económica. Alturas de 2,40 m a 2,50 m.	Bloques de concreto, fibrocemento o baldosas prefabricadas, internas con paneles de yeso, cemento y fibra de vidrio o similar a un forro, repello quemado o afinado y pintura acrílica o de aceite económica, fachaleta en algunas áreas. Alturas de 2,40 m a 3,00 m.
Cubierta	Cerchas de perfiles metálicos, techos de láminas onduladas de hierro galvanizado N°28 con o sin canoas.	Cerchas de perfiles metálicos, techos de láminas onduladas de hierro galvanizado N°28, canoas y bajantes de hierro galvanizado o PVC.
Cielos	Con cielos, en algunos casos puede no presentar este componente.	Paneles de yeso, cemento y fibra de vidrio, tablilla PVC, láminas de fibrocemento o similar
Entrepisos	Viguetas prefabricadas o coladas en sitio o láminas de fibrocemento	Viguetas prefabricadas o coladas en sitio o láminas de fibrocemento.
Pisos	Cerámica económica, en algunos casos pueden presentar concreto afinado.	Terrazo, cerámica económica o mosaico.
Baños	Un cuarto de baño tipo económico.	Un cuarto de baño tipo normal.
Otros	Puerta principal y posterior en madera laminada, cerrajería económica, ventanas con marcos de madera, algunas veces de aluminio. Cocina tipo económica, pila posterior. Diseño con fachada sencilla, puede incluir corredor. Instalación electromecánica básica. Vivienda de una o dos plantas. Área promedio de 42,00 m <sup>2</sup> a 90,00 m <sup>2</sup> .	Puerta principal y posterior de tablero en caobilla o similar, puertas internas de madera laminada, cerrajería económica, ventanas con marcos de madera o aluminio. Una cocina tipo económica, pila posterior. Diseño con fachada sencilla. Espacio para corredor opcional y cochera para un vehículo. Instalación electromecánica básica. Vivienda de una o dos plantas. Área promedio de 80,00 m <sup>2</sup> a 110,00 m <sup>2</sup> .

**Fuente:** Extraído de (ONT, 2021).

Esta selección se realizó de esta forma debido a que el tipo de edificación más común en Costa Rica es precisamente la vivienda unifamiliar, se seleccionan solo dos tipologías constructivas, sin embargo, la metodología de aplicación es abierta para cualquier tipología.

## Desarrollo sostenible

Los conceptos de construcción sostenible y desarrollo sostenible están estrechamente ligados, al punto que la construcción sostenible debe ser considerada como la manera que tiene el sector construcción de aportar al desarrollo sostenible.

Es debido que es importante comprender la noción de desarrollo sostenible, su origen, su necesidad y su esencia. El desarrollo sostenible implica el cumplimiento de las necesidades

básicas de todos y la garantía para todos de tener la oportunidad de satisfacer sus aspiraciones para una vida mejor (Soriano, 2012).

En el informe de Brundtland (1987), se declara que la satisfacción de las necesidades y aspiraciones de las personas es el principal objetivo del desarrollo. Sin embargo, todos los países del mundo tienen cubiertas las necesidades de comida, ropa, vivienda y trabajo y además tienen aspiraciones legítimas para mejorar su calidad de vida.

La propia inteligencia humana está permitiendo generar un nivel de actividad enorme cuyos impactos están produciendo efectos significativos y rápidos sobre el clima, con lo que se está generando un riesgo para su propia supervivencia.

Es por esta razón que se considera necesario introducir cambios en los modelos de producción y consumo que garanticen la seguridad, el bienestar y la propia supervivencia. A causa de esto es necesario equilibrar tres dimensiones básicas que están sólidamente interrelacionadas (Organización de las Naciones Unidas, 1987):

- El desarrollo económico: Capacidad de proporcionar bienes y servicios necesarios para satisfacer las necesidades humanas, especialmente de los más desfavorecidos.
- El equilibrio ambiental: Necesario para no poner en riesgo los ecosistemas del planeta.
- El progreso social: La mejora del bienestar y el nivel de vida de una población cada vez más numerosa.

Robert Kórad, director general de Estrategia de la Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea, mencionó que “el uso de los recursos naturales utilizados para satisfacer la producción es simplemente insostenible”.

Es por esta razón que el equilibrio de estas tres dimensiones resulta esencial para garantizar el desarrollo sostenible, ya que el desarrollo económico permitirá abastecer a una población cada vez mayor mejorando su nivel de vida, sin embargo, el deterioro ambiental limita las posibilidades de desarrollo económico y tiene efectos directos sobre la salud y el bienestar de las personas. En la Figura 12 se observa la relación entre

las tres dimensiones esenciales para el desarrollo sostenible.



**Figura 12.** Las tres dimensiones esenciales para el desarrollo sostenible.

**Fuente:** Extraído de (Soriano, 2012).

En el Acuerdo de París (2015), se estableció que el objetivo de la estrategia para el Desarrollo Sostenible es generar, determinar y elaborar medidas que permitan mejorar continuamente la calidad de vida para las generaciones actuales y futuras, esto mediante la creación de comunidades sostenibles capaces de gestionar los recursos de forma eficiente para aprovechar el potencial de innovación ecológica y social que ofrece la economía, garantizando así, la prosperidad, la protección del medio ambiente y la cohesión social.

Para lograr este objetivo se establecieron una serie de objetivos, entre ellos:

- Limitar el calentamiento mundial a mucho menos del 2°C por encima de los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1,5°C.
- Enviar una señal clara a todas las partes interesadas, los inversores, las empresas, la sociedad civil y los responsables políticos en el sentido de que la transición mundial a unas energías limpias ya está aquí para quedarse y que los recursos utilizados deben alejarse paulatinamente de los combustibles fósiles.
- Prevé un mecanismo dinámico para hacer balance y reforzar la ambición con el paso del tiempo. A partir de 2023, las Partes se reunirán cada cinco años para hacer un balance y valorar los progresos realizados.

- Establecer un marco de mayor transparencia y rendición de cuentas, incluida la presentación bienal, por todas las partes, de los inventarios sobre gases de efecto invernadero y la información necesaria para poder hacer un seguimiento de sus progresos.

Este acuerdo muestra cómo ha cambiado el mundo desde que comenzaron las negociaciones climáticas en 1990 y cómo seguirán cambiando a medida que nos acercamos al año 2030. La huella de agua también desempeña un papel fundamental en los impactos ambientales generados por la actividad humana. Estos impactos dependen del nivel de actividad, la población humana y el desarrollo tecnológico. Para evitar superar un nivel de impacto considerado tolerable, es crucial considerar la importancia de la huella de agua (Soriano, 2012).

Esto implica moderar el crecimiento de la población, desarrollar técnicas cada vez más eficientes en la utilización de recursos naturales y aprovechar los recursos de flujo del planeta que tienen un origen solar, como la radiación solar o el viento. La gestión adecuada de la huella de agua se vuelve esencial para garantizar la sostenibilidad y minimizar los impactos negativos en el medio ambiente (Soriano, 2012).

El desarrollo sostenible es una preocupación de los organismos internacionales y de los gobiernos, sin embargo, son las empresas las que, con sus actividades, materializan el modelo de desarrollo sostenible a través de la creación de valor, el desempeño medioambiental y la responsabilidad social corporativa.

Según la guía del GRI (Global Reporting Initiative, 2018), el desempeño medioambiental de una empresa incluye diferentes aspectos tales como los consumos de energía, agua y recursos naturales, las emisiones atmosféricas de gases de efecto invernadero y de otros contaminantes, la generación de residuos o el vertido de aguas.

El desempeño medioambiental correcto no debe ser un impedimento para el desarrollo empresarial, sino debe ser visto como una oportunidad para mejorar la eficiencia a través de la innovación y como una ventaja competitiva, si la empresa logra poner en valor su gestión ambiental a través de una política de comunicación veraz y proactiva.

Respecto a la responsabilidad social corporativa que es considerada una de las dimensiones del desarrollo sostenible la Comisión de las Comunidades Europeas (2001) la define como “la integración voluntaria, por parte de las empresas, de objetivos sociales y medioambientales en sus operaciones comerciales y en sus relaciones con el resto de los actores implicados”.

De igual forma la UE publicó una estrategia renovada sobre responsabilidad social corporativa donde figura una nueva definición de la RSC, como la responsabilidad de las empresas por sus impactos en la sociedad.

Los dos objetivos de esta nueva estrategia son crear valor compartido para los accionistas, grupos interesados y sociedad en general e identificar, prevenir y mitigar sus posibles impactos adversos.

- Aumentar la visibilidad de la RSC y difusión de buenas prácticas.
- Mejorar los niveles de confianza en las empresas.
- Mejorar los procesos de auto regulación.
- Aumentar el conocimiento de la RSC por parte del mercado.
- Mejorar la comunicación de las empresas en información social y ambiental.
- Mayor integración de la RSC en las áreas de educación, formación e investigación.
- Destacar la importancia de las políticas de los estados y regiones europeas en materia de RSC.
- Mejorar la alineación del enfoque europeo.

Si bien es cierto estas prácticas se encuentran adaptadas a la realidad europea, sirven de guía y apoyo para el crecimiento de la región latinoamericana y Costa Rica.

## Construcción sostenible

Según el World Green Building Council (WGBC), un edificio sostenible o verde, es uno que, en su diseño, construcción u operación, reduce o elimina los impactos negativos y crea impactos positivos, en nuestro clima y ambiente. Los edificios sostenibles ayudan a preservar los recursos naturales y mejorar nuestra salud,

productividad y calidad de vida (World Green Building Construction, 2013).

En un estudio realizado por Mc Graw Construction, en colaboración con el Consejo Mundial de Construcción Verde (WGBC, por sus siglas en inglés), muestra que la cantidad de edificios “verdes”, se duplican cada tres años. Por ejemplo, en el 2008 a nivel mundial se registró un 13% de actividad relativa a la edificación sostenible; para el 2012, ese porcentaje aumentó al 28% y para el 2015, se esperaba que superara el 50% (Quirós, 2014).

El creciente dinamismo en cuanto a la construcción sostenible también es palpable en Costa Rica, la proliferación de “comisiones de construcción sostenible” es reflejo del interés de profesionales en el tema. La instauración del Consejo de Construcción Verde en Costa Rica (GBC-CR) ha proporcionado una excelente plataforma para unificar esfuerzos locales y elevar el mercado nacional al contexto de una gestión integral con aceptación y reconocimiento mundial (Quirós, 2014).

La edificación sostenible busca responder a los retos ambientales y socioeconómicos que enfrenta la sociedad, aportando soluciones integrales e innovadoras a través de la gestión del sector de la construcción. Quirós (2014) destaca que es importante mencionar que no se trata únicamente de construir “edificios verdes” sino, más bien, de incorporar principios universales de diseño, construcción, operación, readecuación y fin de vida de proyectos nuevos o espacios ya intervenidos, de todo tamaño. Como lo pueden ser la eficiencia energética, el uso responsable de los recursos naturales, la calidad

Costa Rica se ha aproximado a los indicadores en forma progresiva, en un primer intento se logró un proceso de construcción de indicadores ambientales a nivel nacional, esto con apoyo del Banco Mundial y otros organismos internacionales, con el objetivo de conformar un Sistema de Indicadores de Desarrollo Sostenible (SIDES).

Este sistema fue implementado por el Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica MIDEPLAN y cuenta con indicadores dentro de la dimensión social, económica y ambiental (Quiroga, 2007).

Los objetivos del Sistema de Indicadores sobre Desarrollo Sostenible son:

ambiental interior, el diseño integrado, la sostenibilidad social y la tecnología e innovación.

Mucho se ha avanzado desde el origen de esta historia a partir de finales de los años ochenta, cuando comenzaron los trabajos pioneros de SCOPE, que, como organización de científicos ambientales independientes, se dedicaron a desarrollar marcos conceptuales, analíticos e instrumentales en el tema de indicadores ambientales, generando propuestas novedosas y valiosas que acompañaron a lo largo de su existencia el esfuerzo emprendido por la CDS a partir de 1996.

De igual forma es importante destacar que los científicos asociados a SCOPE jugaron un rol muy importante en la toma de conciencia de los países, principalmente los más desarrollados, y los organismos multilaterales sobre la urgencia y la dificultad formal de avanzar en el desarrollo de los indicadores ambientales y de desarrollo sostenible (Quiroga, 2007).

El programa de trabajo de indicadores de la CDS es una ambiciosa iniciativa que busca una cooperación internacional que comprende principalmente a gobiernos y a expertos en varios países del mundo. Entre los países participantes de este programa se han obtenido resultados muy disímiles, como era de esperar, esto debido a las condiciones objetivas tanto técnicas como financieras en las distintas realidades nacionales.

Los resultados obtenidos han demostrado avances y dificultades un poco mayores a las esperadas, es innegable que esta iniciativa ha inspirado a varios países y, los ha incentivado a comprometer recursos y energía, que quizá de otra forma hubiesen empezado más tarde (Quiroga, 2007).

- Contribuir a la difusión de información que permita ampliar y profundizar el análisis del desarrollo nacional por parte de los diferentes actores sociales.
- Servir de enlace entre productores y usuarios de información.
- Avanzar en la elaboración de indicadores agregados sobre desarrollo sostenible.

Si bien es cierto, la construcción se encuentra relacionada con asuntos de edificios y ciudades, el sector construcción es más que eso, este comprende una amplia serie de agentes que, con su intervención en el proceso, determinan la manera en que el fenómeno de la construcción

Respetar o incumplir los principios y criterios del desarrollo sostenible.

Debido a la complejidad del sector resulta especialmente difícil que el proceso de construcción en su conjunto se desarrolle cumpliendo con los criterios del desarrollo sostenible. Por el contrario, resulta sencillo que se den comportamientos no responsables cuyos resultados no conduzcan a una construcción sostenible (Soriano, 2012).

En el 2004, el documento “Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo y Comité Económico y Social Europeo y Comité de las Regiones” estableció que todos los actores implicados en la construcción sostenible (propietarios, ingenieros, arquitectos, constructores, proveedores de materiales, gobierno, etc.) integran consideraciones funcionales, económicas, ambientales y de calidad para producir y renovar los edificios, así como su entorno de como que estos sean (Vargas, 2017):

- Atractivos, durables, funcionales, accesibles, confortables y saludables para vivir en ellos y utilizarlos. Eficientes con relación al uso de recursos: consumo de energía, materiales y agua.
- Favorecedores en el uso de energías renovables, necesitando poca energía exterior para su adecuado funcionamiento haciendo un uso adecuado de la lluvia y de las aguas subterráneas y gestionando adecuadamente las aguas residuales, utilizando materiales amigables con el medio ambiente que puedan ser fácilmente reciclados o reutilizados, que no contengan productos peligrosos y que puedan ser depositados con seguridad.
- Respetuosos con su vecindad, con la cultura local y el patrimonio.
- Competitivos económicamente, especialmente cuando se toma en consideración el largo ciclo de vida asociado a los edificios, hecho que implica a aspectos tales como costos de mantenimiento, durabilidad y precios de reventa de los edificios.

## **Evaluación de la Sostenibilidad en edificaciones**

Con la incorporación de la “Construcción Sostenible” como concepto al sector, nace la necesidad de generar o de utilizar herramientas y métodos para evaluar el desempeño ambiental, económico y social de la edificación y su espacio urbano (Vargas, 2017).

Esto con el fin de estimar el buen o mal desempeño de un edificio con relación a los criterios previamente mencionados, convirtiéndose entonces en importantes instrumentos para poder determinar de manera objetiva el nivel de rendimiento global que se tiene de una edificación desde el punto de vista de la sostenibilidad (Vargas, 2017).

Según la Sociedad Pública de Gestión Ambiental del País Vasco o IHOBE en su guía “¿Cómo Evaluar la sostenibilidad en la edificación?” (2010), actualmente las distintas metodologías, herramientas, y sistemas disponibles identificados en la evaluación de la sostenibilidad se pueden clasificar en tres grandes grupos:

1. Estándares en edificaciones sostenibles.
2. Herramientas (software) de evaluación.
3. Sistemas de evaluación de la sostenibilidad.

## **Estándares de sostenibilidad en edificaciones**

IHOBE (2010) menciona que desde mediados de los años 80, han surgido y se han desarrollado diversas iniciativas más directas y enfocadas en los usuarios finales en comparación con los sistemas de evaluación. Estas iniciativas generalmente son impulsadas por los promotores o los propios usuarios finales de los edificios, con el objetivo de habitar construcciones más respetuosas con el medio ambiente.

Estas iniciativas tienen sus raíces principalmente en países europeos (como Alemania y el Reino Unido) y en países anglosajones, y en las últimas décadas se han expandido hacia otros países desarrollados.

Estas iniciativas relacionadas con la construcción y la sostenibilidad se pueden agrupar según los diferentes aspectos ambientales en los que actúan, tales como la adaptación al entorno, el consumo de energía, las emisiones de gases y el consumo de materiales.

En ocasiones, estos movimientos, inicialmente sin regulación y de naturaleza generalista, han dado lugar a la creación de estándares que permiten determinar y comunicar al público en general las características ambientales positivas de un determinado edificio, y si este puede considerarse como una "edificación sostenible" (IHOBE, 2010).

Los principales estándares actuales se centran en el aspecto energético, abordando el consumo de energía y la reducción de las emisiones asociadas. Los estándares que mencionaremos a continuación son de aplicación voluntaria:

- PASSIVHAUS (también conocido como viviendas pasivas)
- LOW-ENERGY (BAJO CONSUMO ENERGÉTICO), que incluye variantes de consumo energético cero y edificaciones "energy-plus"
- EDIFICIOS CERO EMISIONES (movimiento ZERO CARBON)

## Herramientas (software) de evaluación

Estas son programas informáticos que permiten evaluar en profundidad distintas características de un edificio, ya sean de carácter genérico (relacionadas con los impactos ambientales de la edificación), o específicas (como el comportamiento energético). Al ser herramientas informáticas, estas simplifican en gran manera los cálculos, que de manera ordinaria sería impensable contemplar en un proyecto normal. A pesar de esto, muchos de los sistemas de evaluación (los cuales se desarrollarán posteriormente), pueden solicitar como entrada de datos valores que en ocasiones solo pueden ser analizados gracias a herramientas como los que se expondrán a continuación (IHOBE, 2010).

Entre los dos tipos de herramientas que actualmente se encuentran más extendidas y que abarcan la mayor parte del mercado de programas relacionados de forma directa o indirectamente con la evaluación de la sostenibilidad, se encuentran:

- Las herramientas de evaluación ambiental basadas en el Análisis de Ciclo de Vida.
- Las herramientas de evaluación centradas en comportamiento energético de los edificios.

## Herramientas de evaluación ambiental basadas en el análisis de ciclo de vida

Para la realización del "análisis de ciclo de vida" (ACV) es recomendable realizar un inventario por partes, distinguiendo entre los tres niveles que conforman el edificio, los cuales son: los materiales, los componentes y el propio edificio. La realización de este ACV requiere de una enorme cantidad de información, de la cual previsiblemente sólo podrá disponerse en las fases finales de la redacción de un proyecto (proyecto de ejecución) (IHOBE, 2010).

Por lo que contemplar la variable ambiental desde el comienzo del proceso de diseño de un edificio y el desconocimiento mismo de la composición final que tendrá el edificio, hace necesario el uso de herramientas o programas informáticos diseñados para asistir al proyectista, con el fin de que la inclusión de la variable ambiental en una etapa temprana resulte factible.

Algunas de estas herramientas permiten la inclusión de datos básicos (superficies, sistemas básicos), lo que brinda un asesoramiento en la fase inicial del proyecto. Además de esto, estas herramientas permiten simular, a partir de estos datos, cuál será el comportamiento ambiental esperado del edificio a lo largo de todo su ciclo de vida.

Es importante mencionar que estas herramientas no tienen vocación de ser certificables, ni existe una clasificación de edificios, ya que se encuentran principalmente enfocadas en los impactos ambientales de la edificación. Las herramientas más conocidas a nivel mundial se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Herramientas de evaluación ambiental basadas en el Análisis de Ciclo de Vida.

Denominación	Institución	País	Página Web
ATHENA	ATHENA Institute	Canadá	<a href="http://www.athenasmi.org/">http://www.athenasmi.org/</a>
BEES	NIST, el Instituto de Estándares y Tecnología de EEUU	EEUU	<a href="http://www.bfrl.nist.gov/oe/software/bee">http://www.bfrl.nist.gov/oe/software/bee</a>
ECO-QUANTUM	IVAM Research and Consultancy on Sustainability	Holanda	<a href="http://www.ivam.uva.nl./index.php?id=59">http://www.ivam.uva.nl./index.php?id=59</a>
ENVEST	BRE group	Reino Unido	<a href="http://investv2.bre.co.uk/">http://investv2.bre.co.uk/</a>
LISA	BPH- Australia	Australia	<a href="http://www.lisa.au.com/">http://www.lisa.au.com/</a>

Fuente: Extraído de (IHOBE, 2010).

## Sistemas de evaluación de la sostenibilidad para edificaciones

Los sistemas de evaluación de la sostenibilidad para edificaciones han presentado un crecimiento exponencial durante las últimas dos décadas desde el nacimiento del BREEAM del Reino Unido en 1992.

Dichos sistemas no solamente han incrementado en cantidad, sino, que también han mejorado su calidad. Algunos de los sistemas de evaluación de la sostenibilidad en el mundo se detallan en la Tabla 3:

**Tabla 3.** Principales Sistemas de Evaluación de Sostenibilidad a nivel mundial.

Denominación	Institución	País	Página Web
BREEAM	BRE Trust	Reino Unido	<a href="http://www.breeam.org/">http://www.breeam.org/</a>
LEED	U.S. GBC (Green Building Council)	EEUU	<a href="http://www.usgbc.org/LEED/">http://www.usgbc.org/LEED/</a>
Verde	GBC España	España	<a href="http://www.gbce.es/herramientas/informa">http://www.gbce.es/herramientas/informa</a>
Protocollo ITACA	Istituto per l'Innovazione e Trasparenza degli Appalti e la compatibilità ambientale		<a href="http://www.itaca.org/">http://www.itaca.org/</a>
DGNB	(DGNB) Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen	Alemania	<a href="http://www.dgnb.de/">http://www.dgnb.de/</a>
Casbee	Japan GreenBuild Council (JaGBC) / Japan Sustainable Building Consortium (JSBC)	Japón	<a href="http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/">http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/</a>
Minergie	Minergie Building Agency	Suiza	<a href="http://www.minergie.com/">http://www.minergie.com/</a>
Green Globes	BOMA Canada; The Green Building Initiative (GBI)	Canada/USA	<a href="http://www.greenglobes.com/">http://www.greenglobes.com/</a>
HQE	Association pour la Haute Qualité Environnementale	Francia	<a href="http://www.assohqe.org/">http://www.assohqe.org/</a>
Green Star	Green Building Council of Australia (GBCA)	Australia	<a href="http://www.gbca.org.au/">http://www.gbca.org.au/</a>
SB Tool	iiSBE (International Initiative for a Sustainable Building Environment)	Internacional	<a href="http://iisbe.org/">http://iisbe.org/</a>

Fuente: Extraído desde (IHOBE, 2010).

Los estándares exigen unos requisitos mínimos de comportamiento, sin embargo, estos nos establecen una jerarquía entre distintos proyectos o edificaciones que cumplen con estos requisitos. Es debido a esto, que por lo general las herramientas resultan insuficientes para generar esa aspiración del sector edificación por llegar a mayores niveles de comportamiento ambiental.

Es entonces, cuando los sistemas de evaluación aportan el factor de “mejora continua” sobre la fase de que cada vez los modelos y sistemas constructivos deberán cumplir unos requisitos y condicionantes más sostenibles que sus precedentes.

Estos sistemas de evaluación, además, suponen un modo de mostrar de manera sencilla y visual a los usuarios o propietarios finales de una edificación, las razones que convierten a un edificio más sostenible que otro, mediante una comparación en igualdad de términos entre los mismos (IHOBE, 2010).

Es importante mencionar que no todos los sistemas de evaluación funcionan de la misma manera, ni pueden ser certificables por un único organismo independiente o por el propio organismo regulador del sistema. Por ello, se distinguen tres tipos o etapas de sistemas principales:

- Sistemas de evaluación
- Sistemas de clasificación
- Sistemas de certificación

En la Figura 13 se observa el rango de jerarquía para cada uno de estos sistemas:



**Figura 13. Representación gráfica de los sistemas de evaluación. Fuente: (IHOBE, 2010).**

## **Sistemas de evaluación de la sostenibilidad**

Estos son un conjunto de métodos generales y protocolos, generalmente apoyados en análisis de ciclo de vida para valorar el comportamiento ambiental de un edificio y/o de sus subsistemas. Inicialmente el primer estadio de estos sistemas se enfocó en la variable, pero con el paso del tiempo, la mayor parte de ellos han adoptado criterios que encajan también dentro de las variables económicas y sociales.

Una de las ventajas que presentan estos sistemas son la obtención de una puntuación global correspondiente a una edificación en función del cumplimiento de una serie de indicadores de sostenibilidad predeterminados, mas no necesariamente clasificados por aspectos ambientales.

## **Sistemas de clasificación de la sostenibilidad**

Los sistemas de clasificación tienen como objetivo el valorar la sostenibilidad de una edificación en cuanto su sostenibilidad tanto para los subsistemas que lo componen, como para el edificio completo; o bien, ofreciendo los

resultados parciales por áreas o ámbitos de actuación distintos.

Para ello se establecen unos niveles de ponderación que permiten interrelacionar los distintos aspectos ambientales para finalmente componer una puntuación global y los cuales se basan en ofrecer un doble sistema de medición. Estas puntuaciones globales presentan una gradación que permite asignar un nivel específico a la edificación (generalmente entre 4 y 7 niveles).

## Sistemas de certificación de la sostenibilidad

Estos sistemas son los más complejos de todos los anteriores, debido a que requiere de la verificación de un asesor cualificado, y que lleva un aparejado sistema en el mercado de la edificación. El hecho de certificar un edificio mediante un sistema determinado supone un coste económico importante y que no todas las edificaciones pueden permitirse. El más conocido de estos sistemas es el LEED, que tiene certificadores prácticamente en todo el mundo (Vargas, 2017).



**Figura 14.** Proceso hacia certificación de los sistemas de evaluación.

**Fuente:** (IHOBE, 2010).

Normalmente se les conoce como “sistemas de evaluación”, independientemente de tratarse de sistemas de clasificación o de sus posibilidades de ser “sistemas de certificación.

Debido a que estos sistemas de evaluación son normalmente aplicados en países desarrollados, existe el reto de adaptar estos a la realidad de los países vías de desarrollo, como lo es el caso de Costa Rica. Por lo que si se planea implementar estos sistemas en países subdesarrollados se deben de tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Si bien muchos de los sistemas se centran en el aspecto ambiental, en estos países, debería también cobrar peso la variable social y la económica.

- Deben establecerse distintos niveles de complejidad, de tal manera que no se exijan aspectos muy rígidos o técnicamente exigentes a un nivel inferior, y que posteriormente vayan incrementándose, en aras de la sostenibilidad.
- Cada sistema debe ser adecuado a los parámetros específicos de cada país, teniendo en cuenta lo que es legislativamente exigible y lo que constituye un añadido a favor de la sostenibilidad, la adaptación a los modos de construir del país, al organigrama de los agentes intervinientes en la edificación, etc. Además, hay que considerar que los principales sistemas tienen su origen en países industrializados, por lo que para poder ser empleados en países en desarrollo deberán ser adaptados.
- La mayor parte de los sistemas suponen que la sostenibilidad comienza una vez superada los requisitos obligados por la normativa, olvidando que, en estos países con un menor desarrollo, la legislación en materia de construcción no se encuentra tan avanzada.

Además de estas limitaciones en países en vías de desarrollo, IHOBE (2010) menciona que existe una serie de problemas que enfrentan los sistemas de evaluación de edificios a modo global:

- El tiempo que lleva realizar la evaluación y el posterior proceso de certificación.
- En ocasiones es difícil considerar de manera aislada aspectos que puedan ser aplicables a un único edificio, ya que puede ser más adecuado hacer referencia a una urbanización, barrio o proyecto de desarrollo.
- En la mayor parte de los sistemas falta incorporar el análisis del riesgo y la estimación del coste a la variable ambiental, que es crucial para que la propiedad analice si le compensará adoptar dichas medidas.
- La información que es recopilada sobre los edificios no suele ser fácilmente visible en los informes finales y no es

fácilmente entendible por todos los agentes del sector.

El panorama actual de los métodos de evaluación ambiental es muy extenso, ya que habitualmente cada país ha generado un sistema de evaluación de los edificios en él construidos, por lo que nos encontramos con una gran oferta de sistemas, muchos de ellos con vocación de universalidad. Sin embargo, existen algunos sistemas que únicamente tienen por meta un uso local, adecuando sus características a las especificaciones del lugar y convertirlo en un sistema de referencia únicamente válido para un entorno próximo (IHOBE, 2010).

Actualmente, son múltiples y variadas las herramientas que existen en el mercado, cubriendo cada una de ellas diferentes tipologías edificatorias, aspectos ambientales, etc. Es por esta razón que resulta difícil establecer una comparativa válida entre los resultados aportados por un sistema de evaluación y los aportados por cualquier otro.

Debido a esto, en la actualidad existe la necesidad de un lenguaje común de valoración de la sostenibilidad, que logre atender todas las condiciones mencionadas anteriormente y de momento, el consenso sigue manteniéndose muy lejano.

Otra de las características con las que crecieron casi todos los sistemas de evaluación es que se diseñaron para la valoración de nuevas edificaciones, dando poco o ningún margen a las ya existentes, como consecuencia lógica del hecho de que la mayor parte de las acciones que afectan a los impactos durante la fase de uso de las edificaciones son adaptadas durante la fase de diseño (Vargas, 2017).

A pesar de esto, este planteamiento queda invalidado cuando se observa el volumen de viviendas edificadas es muy superior al de viviendas en construcción, radicando en estas primeras un importante potencial de mejora. No obstante, a pesar de todas estas dificultades, no se puede descartar el uso de estas herramientas ni de los sistemas de indicadores para la evaluación del desempeño sostenible de las unidades de vivienda a nivel global y mucho menos a nivel específico (IHOBE, 2010).

Es importante rescatar que según (Robles, 2014), la certificación no es lo que hace sostenibles a las edificaciones; el secreto se encuentra en hacerlas certificables, es la

implementación de las metodologías de diseño y construcción que promueve el sistema aplicado, teniendo en cuenta las consideraciones referentes a la zona en donde se construirá y utilizando los códigos, reglamentos y leyes existentes.

## Huella de agua

El concepto de “Huella” implica la medición de la cantidad total de impactos al ambiente producidas directa o indirectamente por productos o procesos en todas las etapas de su ciclo de vida. De esta manera es posible calcular la huella ecológica, huella de carbono o huella de agua al llevar a cabo un inventario de emisiones. Una vez conocido el tamaño de la huella, es posible implementar una estrategia para reducirla (Farell, 2013).

La huella de agua es un concepto que se menciona formalmente por primera vez en la norma internacional ISO 14046:2015 que tiene por nombre “Gestión Ambiental – Huella de agua – Principios, requisitos y directrices” (INTE ISO 14046, 2015), la cual se encuentra basada en las normas ISO 14040 (ISO 14040, 2006) e ISO 14044 (ISO 14044, 2006) sobre Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Esta fue creada en pro de regular el consumo del recurso hídrico y concientizar a la población acerca de este.

El agua es un recurso muy complejo, y es que, a diferencia de otros recursos como la tierra, el cual es un recurso estático, el agua pertenece a un sistema dinámico que integra diversos cambios de fase, con enormes variaciones temporales y espaciales, así como en calidad rigen completamente el valor de los ecosistemas. Hablar de volúmenes de agua o disponibilidad de agua promedio anual sin considerar dichas variaciones, tiene poco significado para medir la escasez de agua y los impactos ocasionados al ambiente y a la salud humana al utilizar el recurso (Farell, 2013).

Como el agua forma parte de todos los seres vivos y de muchos compuestos que no lo son, una vez que se produce una cosecha (por ejemplo), parte del agua que se consumió en su crecimiento queda “atrapada” en los granos, de igual forma sucede con las reses o con los pollos. Esta agua no “desaparece” de la contabilidad del ciclo hidrológico como tal, sino que “cambia de

color”, deja de ser parte de los recursos físicamente disponibles.

Al transportarse el grano, res o el pollo, se lleva una porción de agua, de manera que, al pensar en alguno de estos, debemos pensar en el agua que se extrajo de su región de origen en él. Además de esto, también se debe considerar el agua que participa en todos los procesos de transporte de algún producto, al igual que el agua que fue incluida en la manufactura de los productos mismos. (Guerrero & Schifter, 2012).

Esto sucede del mismo modo con la construcción, donde para construir una edificación de cualquier tipo se requiere de agua para su construcción, dígase para generar el concreto, curarlo o la cantidad de agua misma para construir otros elementos. De igual forma, la gran mayoría de los materiales de construcción son trasladados al sitio, por ende, también se debe contabilizar el agua que participa en estos procesos de transporte.

Para calcular la huella de agua se utiliza la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Las aplicaciones del ACV a la fecha, permiten una comparación total de los impactos ambientales de productos y servicios en cada una de sus fases de ciclo de vida. Cuando la huella de agua se evalúa con el ACV y se ajusta con el índice de estrés hídrico, es posible integrar el volumen total de agua utilizada, los impactos ambientales provocados por su uso, así como la escasez de agua que provoca el sistema evaluado (Farell, 2013).

A la fecha, los avances en el ACV logran reportar los impactos ambientales potenciales asociados a un producto o proceso de manera clara y objetiva en sus indicadores en cuanto al inventario de materiales y energía. Existen categorías de impacto que evalúan la eutrofización, acidificación y ecotoxicidad

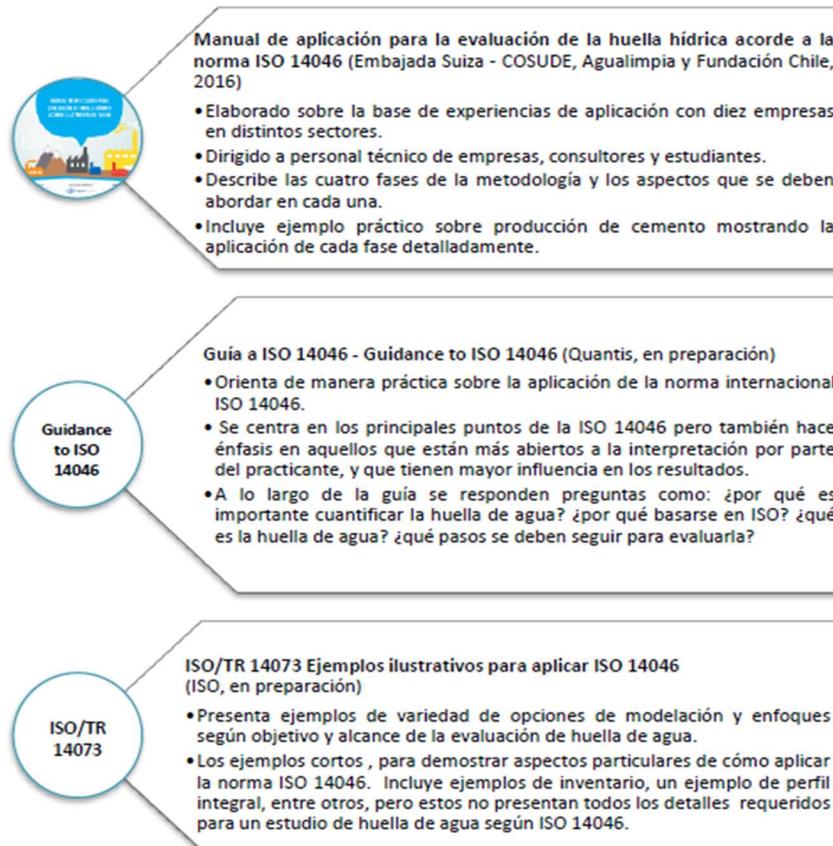
acuática. Sin embargo, no existe ninguna categoría que logre evaluar los impactos ambientales asociados al “uso del agua”.

Es debido a lo anterior, que resulta complicado el analizar toda el agua que ingresa a un sistema de construcción, debido a que, por ejemplo, durante la curación del concreto se necesita de agua para garantizar las condiciones óptimas de humedad y temperatura necesarias para que el concreto desarrolle la resistencia deseada. De este volumen de agua, existe un porcentaje que se vuelve parte del concreto y otra que regresa al ambiente en forma de vapor.

Por su parte la norma ISO 14046 define huella de agua como la métrica o métricas con las que se cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua (sub cláusula 3.3.1) y considera todas las etapas del ciclo de vida, desde la adquisición de las materias primas hasta el fin de vida de un producto, servicio u organización (sub cláusula 4.2) (INTE ISO 14046, 2015).

La huella de agua también puede calcularse como parte de un ACV completo y formar parte de una de las métricas de impacto potencial evaluadas en la huella ambiental; algunas otras huellas ambientales pueden ser la huella de carbono y la huella de uso de suelo.

Actualmente existen tres documentos recomendados por CADIS y COSUDE, los cuales son el Manual de aplicación para la evaluación de la huella de agua acorde a la norma ISO 14046 elaborado por Fundación Chile, Agualimpia y Embajada Suiza – COSUDE (2016); y la Guía ISO14046 desarrollado por Quantis; así como el documento técnico que fue publicado por la ISO (ISO 14073) sobre ejemplos ilustrativos. En la Figura 15 se muestra una breve descripción de dichas guías.



**Figura 15.** Guías para el desarrollo de evaluaciones de huella de agua.

**Fuente:** Extraído de (CADIS & COSUDE, 2016).

## El agua neutral

El concepto de agua neutral (A. Hoekstra, 2008; Ndebele, 2002) implica reducir la huella de agua de una actividad, lo más razonablemente posible y compensar la huella remanente, es decir, los impactos provocados por el uso del agua. Esto no significa reducir a cero el consumo de agua sino evitar las externalidades económicas, sociales y ambientales en el uso del recurso.

Una de las formas para reducir la huella de agua radica en el uso de tecnología ahorradora de agua o tecnificar los distritos de riego; para compensar la huella remanente se debe invertir en proyectos que promuevan el uso sostenible y equitativo del agua. Este concepto aún se encuentra en desarrollo, pues lo primero que se debe realizar es una metodología

estandarizada que mida (o estime) la huella de agua en estos términos (impactos), para después poder compararla y reducirla.

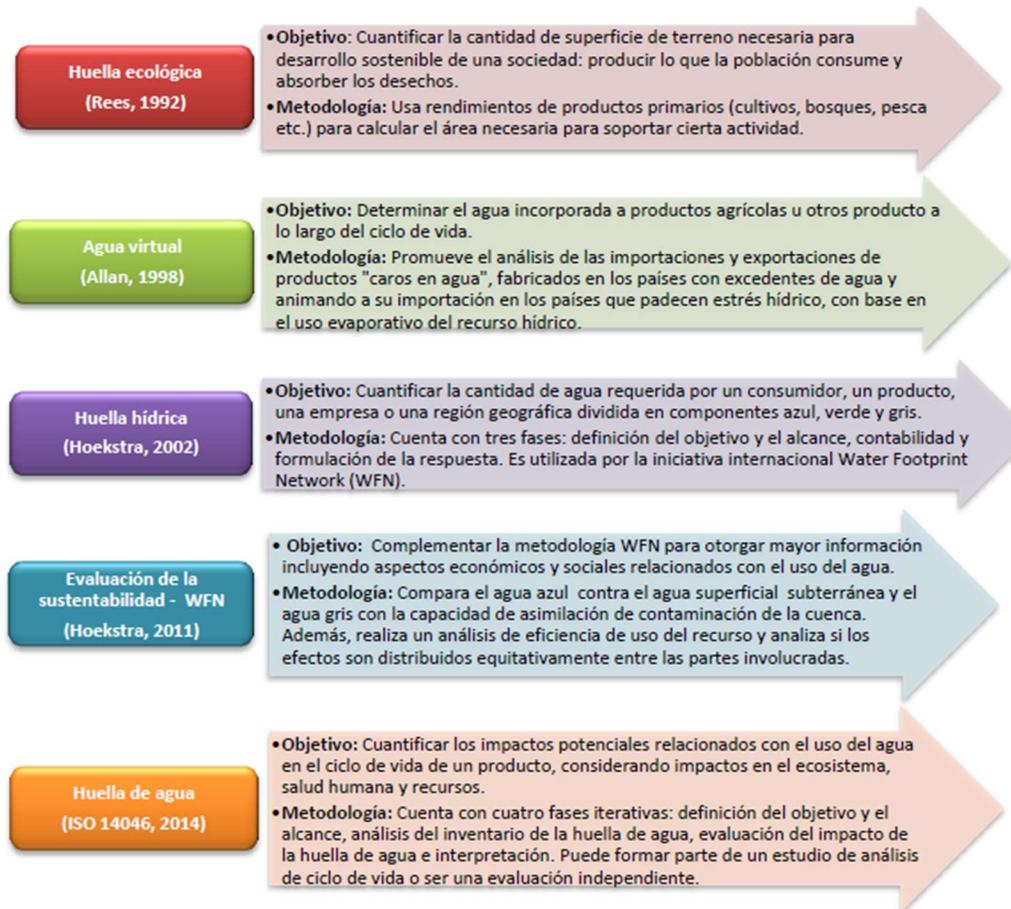
Por lo que el sector construcción debería apuntar inicialmente a la implementación de la huella de agua, donde se obtengan datos y resultados que permitan desarrollar posteriormente un mejoramiento en el uso del recurso hídrico, al punto de conseguir un consumo de agua neutral (o lo más cercano a ello) en la construcción.

## Historia y evolución de la cuantificación de la huella de agua en América Latina

La huella de agua es un concepto que ha evolucionado a través del tiempo y el cuál se ha basado en distintos conceptos relacionados con

la gestión del recurso hídrico. Algunos de los conceptos y metodologías para evaluar la demanda de recursos y la presión sobre el ambiente que generan las actividades humanas incluyen la “huella ecológica” (Rees, 1992), el “agua virtual” (Allan, 1998) y la “huella hídrica” (A. Y. Hoekstra, 2003).

En la Figura 16 se muestra una breve descripción de algunas metodologías que anteceden el desarrollo de la metodología de cuantificación de la huella de agua de acuerdo con ISO 14046.



**Figura 16.** Evolución del concepto de huella de agua.

**Fuente:** (CADIS & COSUDE, 2016).

Actualmente se ignora el conocimiento que existe a nivel mundial sobre la relación entre el consumo y contaminación del agua a lo largo de las cadenas de valor, por lo que el cómo está estructurado el manejo del agua en las sociedades de un mundo cuyos países están altamente interconectados, particularmente desde un punto de vista comercial, es escaso (Golcher, 2013).

La cuantificación de la huella hídrica a través de la metodología desarrollada por la Red de la Huella Hídrica (WFN, por sus siglas en

inglés), como de la huella de agua desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) es una práctica relativamente reciente en América Latina.

A pesar de que en diversos estudios previos se analizó la huella hídrica de productos provenientes de la región, los primeros estudios de los que se obtuvieron registros enfocados en productos o poblaciones de América Latina realizados localmente, comenzaron en el año 2011.

En el documento realizado por (CADIS & COSUDE, 2016) se realiza un análisis de la zona latinoamericana y se mencionan recomendaciones para una coherencia regional respecto al tema de Huella de Agua (ISO 14046), se presentó el tipo de metodología adoptada y los productos o servicios evaluados para Costa Rica y los demás países de la región, los cuales se detallan en la Figura 17.

 Costa Rica	WFN
	Producto: Arroz.
	ISO 14046
	Producto: Bebidas, café. Complejo productivo: planta empacadora de banano.

**Figura 17.** Extracto de la tabla "Sistemas analizados por país y metodología usada".

**Fuente:** Extraído de (CADIS & COSUDE, 2016).

Como se muestra en esta figura, los únicos estudios que evalúan la huella de agua en el contexto nacional se encuentran relacionados con las bebidas, el café, todos relacionados con productos, y respecto a un sistema productivo, se encuentra un estudio realizado por la egresada del Tecnológico de Costa Rica, Ana Lorena Vallejo Chaverri en el 2015 enfocado en las plantas empacadoras de banano. Más recientemente se encuentra un estudio de la igualmente egresada del Tecnológico de Costa Rica, Melissa María Díaz Segura en el 2016, enfocado en el desempeño ambiental de un edificio de residencias estudiantiles en las etapas de producción de materias primas, construcción y ocupación.

En la exploración de (CADIS & COSUDE, 2016) se permite entrever la ausencia de investigaciones en el sector construcción costarricense, e incluso a nivel latinoamericano. Las únicas investigaciones relacionadas con la construcción son las del sector cementero y de una forma un poco más indirecta se encuentran los sectores eléctrico y petrolero. Sin embargo, estas se encuentran aterrizadas a realidades distintas a la de Costa Rica y no son investigaciones que contemplen un proceso constructivo como tal.

## Enfoques metodológicos ISO 14046 y WFN

Si se desea conocer el consumo de agua asociado a diversas unidades de análisis y las consecuencias que ese consumo tiene aparejadas, normalmente se piensa en los dos principales enfoques metodológicos que cumplen este fin mismo fin. Se trata de los enfoques metodológicos de huella de agua ISO 14046 y WFN.

La nueva norma ISO se fundamenta en la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que también está estandarizada por la ISO 14040 y 14044. Esta norma establece los principios, requisitos y directrices para llevar a cabo una evaluación precisa de la Huella de Agua de productos, procesos y organizaciones mediante el análisis de su ciclo de vida. A diferencia de la metodología WFN, la norma ISO no se limita a medir el volumen de agua consumida, sino que también evalúa los posibles impactos ambientales asociados a dicho consumo mediante diversos indicadores relacionados con el agua. La norma ISO 14046 se enfoca en la sostenibilidad de un producto al emplear un enfoque ambiental integral. Por otro lado, la metodología WFN se centra en el análisis del uso del agua dulce desde la perspectiva de la sostenibilidad, eficiencia y equidad (EsAgua, 2017).

Con base en esta información, la propuesta de metodología se rige bajo el enfoque de la huella de agua, debido a en esta investigación se busca analizar los impactos ambientales por disponibilidad asociados a consumos del recurso hídrico en el sector construcción costarricense. Además, que como se indica en este mismo documento, la metodología a aplicar en Costa Rica es precisamente esta.

## ¿Por qué realizar estudios de huella de agua?

Una de las principales motivaciones para realizar estudios de huella de agua es reducir los impactos al medio y por eso es necesario no perder de vista la esencia del ACV; es decir, que existen otras categorías de impacto ambiental como, por ejemplo, el cambio climático, las

cuales pueden jugar un papel importante en la huella ambiental de los productos y por tanto es importante tenerlas en consideración durante la toma de decisiones.

La huella de agua se encuentra asociada a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (ONU, 2022) al 2030, específicamente en el objetivo 6 (agua limpia y saneamiento), y de manera transversal con los objetivos 3 (salud y bienestar) y 12 (producción y consumo sustentable).

También está alineada con los últimos informes globales de riesgo del Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés) que sitúan la crisis del agua entre los tres principales riesgos que mayor impacto podrían causar sobre los sistemas y países en la próxima década (WEF, 2022).

Por lo que, si el sector construcción desea convertirse en una industria amigable con el ambiente, la implementación de la huella de agua debe ser una prioridad.

## El Análisis de Ciclo de Vida y el Agua

La definición de la ISO (International Standards Organization), en su norma ISO 14044-2006 (ISO 14044, 2006), determina que el

análisis de ciclo de vida (ACV) es: “una técnica para estimar los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados con un producto, a través de: la compilación de un inventario de entradas y salidas relevantes de un sistema producto, la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados con estas entradas y salidas, y la interpretación de los resultados de inventario y de las etapas de evaluación del impacto en relación con los objetivos del estudio”.

El ACV evalúa los impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o servicio desde la extracción de materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final. Sin embargo, para el presente trabajo solo se analizará la construcción desde un punto de vista “de la cuna a la puerta”, por lo que únicamente serán tomados en cuenta la extracción de materia prima y la producción del inmueble, dejando de lado etapas del producto como uso, mantenimiento, demolición y reciclado de escombros.

Los impactos considerados en la huella de agua son: radiación por ionización, impactos por ecotoxicidad, escasez de agua, acidificación del agua, eutrofización del agua y la contaminación termal.

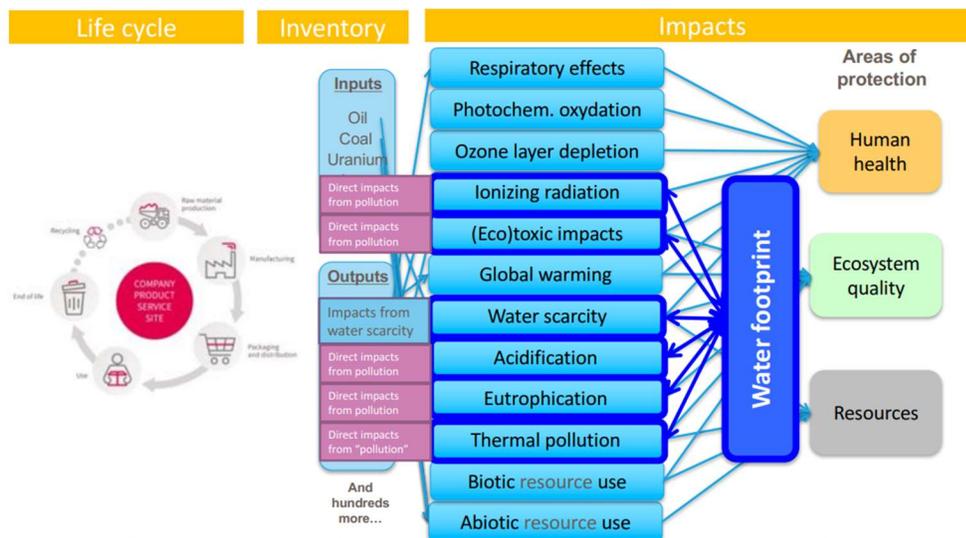


Figura 18. Impactos ambientales considerados en la huella de agua.

**Fuente:** Extraído de (Humbert, 2017).

Existen cuatro fases requeridas para hacer un estudio de ACV de acuerdo con la norma ISO 14044. Estas cuatro fases son:

1. Definición del objetivo y del alcance del ACV.
2. Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV).

3. Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida (EICV).
4. Interpretación

Estas fases se complementan como se muestra en la Figura 19:



**Figura 19.** Metodología del Análisis de Ciclo de Vida.

**Fuente:** Extraído de (Farell, 2013).

Según (Schnoor, 2009), el ACV es una herramienta ampliamente aceptada y aplicada en la gestión ambiental para medir las intervenciones ambientales causadas por diversos productos, desde la cuna a la tumba. Al momento de evaluar el desempeño ambiental de un producto por medio del ACV, se hace énfasis en los materiales y energía consumida y sobre todo en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Actualmente, el recurso hídrico no cuenta con un análisis completo debido a los volúmenes de agua utilizados en las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto o proceso se detallan durante la etapa del inventario, más no existen métodos ni modelos que caractericen y evalúen los impactos provocados por el uso del agua (Kounina et al., 2012).

Por su parte, la EICV (Evaluación de Impacto en el Ciclo de Vida) tiene por objetivo el caracterizar las emisiones de sustancias que se producen en el ciclo de vida de un producto, de acuerdo con sus impactos potenciales sobre el

medio ambiente. Cuando las sustancias son liberadas al ambiente, pueden causar daños a los recursos, a la salud humana y/o a los ecosistemas. Estos daños potenciales son cuantificados utilizando factores de caracterización. Para cada categoría de impacto, la EICV aplica factores específicos de caracterización a cada sustancia (Farell, 2013). Un factor de caracterización de equivalencia, derivado de un modelo de caracterización que se aplica para convertir los resultados asignados del inventario de ciclo de vida a una unidad común del indicador de la categoría:

$$impacto_{categ} = \sum_i \sum_x FC_{x,i} * m_{x,i} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

- $impacto_{categ}$ : Medida de una categoría de impacto (por ejemplo: ecotoxicidad)

- $FC_{x,i}$ : Factor de caracterización de la sustancia “x”, liberada para el comportamiento i (aire, agua, suelo).
- $m_{x,i}$ : Masa de la emisión “x” para el comportamiento i.

Nota: La suma es válida para las sustancias y los comportamientos.

## Ciclo de vida de una construcción

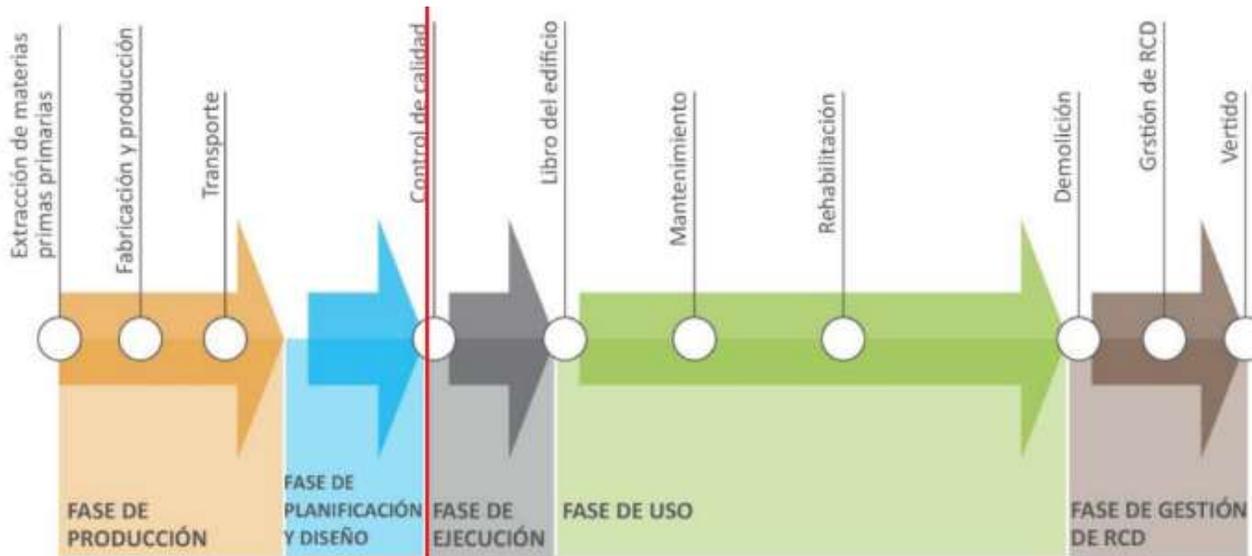


Figura 20. Diagrama del ciclo de vida de una edificación.

Fuente: Extraído de (Fundación CONAMA et al., 2018).

## La huella de agua en el sector construcción

Actualmente existe una gran cantidad de estudios de huella de agua en el mundo, para diferentes productos y procesos, llevados a cabo por diferentes empresas, organizaciones o entes responsables. Dentro de estas evaluaciones no fue posible identificar alguna de acceso libre y que estuviese enfocada al sector construcción costarricense, sin embargo, si se encontraron algunos documentos de interés relacionados con la contabilización del agua en la construcción.

A continuación, se detallan las evaluaciones de huella de agua halladas para el sector construcción costarricense y global:

El ciclo de vida de una construcción, a modo general, incluye diferentes etapas, las cuales van desde la extracción de materias primas hasta la demolición de la estructura. Estas etapas se aprecian en la Figura 20, para el presente proyecto únicamente serán tomadas en cuenta las fases de producción y planificación y diseño, la línea roja muestra el alcance del estudio:

### Huella de agua: Estudio de Caso de Torre Este del Hospital Calderón Guardia

Este es uno de los dos únicos trabajos relacionados con la estimación de la huella de agua en el sector construcción costarricense, sin embargo, corresponden a publicaciones privadas, que aún no se pueden encontrar libres de acceso al público.

El estudio se lleva a cabo como parte de los ejercicios de evaluación dentro de la capacitación en Huella de Agua (ISO 14046:2015) ofrecida por el Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable (CADIS). Esta capacitación está dirigida a profesionales involucrados en el desarrollo del proyecto Plan piloto de medición de Huella de Agua en el sector

construcción, el cual forma parte de la cartera de proyectos de la Junta Directiva General del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA) (Jones et al., 2021).

Este informe realiza una medición de la huella de agua en la torre este del Hospital Calderón Guardia de Costa Rica, desde el origen de los materiales hasta su colocación en el sitio de construcción y además los impactos asociados al proceso constructivo.

Los datos primarios se obtuvieron directamente de la empresa constructora encargada del proyecto, mientras que los secundarios se obtuvieron a partir de la base de datos de Ecoinvent 3.6.

Los impactos sobre el recurso hídrico se evaluaron mediante el método AWARE, entre los resultados del estudio se destaca que la etapa de materia prima de los materiales de construcción empleados es la que posee un mayor impacto (alrededor de un 99%) atribuido principalmente a la cantidad de acero utilizado (Jones et al., 2021).

#### Huella de agua de casa de bambú con sistema de captación de agua de lluvia

Este documento fue utilizado como parte de los ejercicios de evaluación de la capacitación en huella de agua impartida por el Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sostenible (CADIS).

Este reporte considera y compara una cabaña de bambú convencional contra una con un sistema de captación de agua de lluvia. Los datos primarios se obtuvieron directamente de empresas que se dedican a la construcción de cabañas, mientras que los datos secundarios se obtuvieron igualmente a partir de Ecoinvent 3,0.

Los impactos sobre los recursos hídricos fueron evaluados mediante el método AWARE. Los resultados mostraron que el consumo de agua es más elevado en la etapa de uso y mantenimiento para ambas cabañas, promediando un aporte del 68,33% del aporte total para cada etapa e indicador.

De igual forma se obtuvo que la cabaña con el sistema de captación de agua de lluvia mostró una reducción del 19% del consumo anual en las viviendas, respecto a la cabaña convencional (sin captación de aguas llovidas) (Sacayán & Martínez, 2021).

#### Análisis del ciclo de vida de un edificio residencial en Colombia

Este documento comprende el ACV de un edificio residencial construido en vertical, el análisis se realizó desde la fase de producción de los materiales de construcción, transporte, la construcción, el uso y hasta su disposición final.

El ACV que se realizó para este edificio residencial, arrojó que la etapa de uso es donde se presentan el 97% del total de los impactos ambientales del edificio, esto debido a que es la etapa donde más se consume energía y agua, lo cual se encuentra asociado a hábitos del consumo (González et al., 2019).

Los impactos presentados por este edificio residencial en Colombia fueron comparados con edificaciones de otros como países como España, Corea del Sur e Italia. El edificio residencial de Colombia presenta un mayor impacto en comparación con sus homólogos, y esto se debe a varias razones. Una es que en Colombia se recicla por exigencia apenas el 25%, a diferencia de los países europeos donde se exige para el año 2020 la recuperación del 70% en peso de todos los residuos. Colombia, además emplea tecnologías distintas y condiciones climáticas, donde la última resulta ser la más significativa (González et al., 2019).

Es importante resaltar que este estudio tomó en cuenta no solo la huella de agua, sino también otros aspectos ambientales relevantes como el potencial de calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono y el agotamiento de recursos no biológicos. Como conclusión, se recomienda mejorar la eficiencia de los procesos de producción de materiales, ya que los recursos naturales como el agua y el suelo son los más afectados. Además, se mencionan las emisiones relacionadas con el transporte y la producción de energía, que contribuyen al fenómeno del cambio climático (González et al., 2019).

#### Assessment of water Footprint for civil construction projects (Evaluación de Huella de Agua para obras de construcción civil)

Este documento presenta una evaluación de la huella de agua de un proyecto de construcción de viviendas en Suecia, este estudio se centra en la evaluación de la huella de agua

de tres fases de construcción: preparación del sitio, construcción y demolición.

La metodología aplicada corresponde a la metodología desarrollada por el Water Footprint Network y el Análisis de Ciclo de vida (ACV). Los resultados obtenidos de los dos métodos utilizados son muy diferentes, ya que incluyen aspectos diferentes y es por esta razón que no son directamente comparables.

La evaluación mostró que a la hora de analizar qué materiales podrían tener un alto riesgo, es importante fijarse en el uso o consumo de agua por kilo, así como en la huella hídrica total. Algunos materiales se caracterizan por un alto uso de agua por kilogramo, pero aquellos con un bajo uso de agua por kilo aún pueden contribuir más a la huella de agua, ya que estos requieren de enormes cantidades de agua durante su producción (Wärmark, 2015).

El estudio de caso arrojó, además, resultados que concuerdan con otros estudios de huella de agua realizados en materiales de construcción. Las conclusiones de los resultados son que el acero es el material con el que hay que tener cuidado cuando se trata de agua, ya que es un gran consumidor y, a menudo, se importa de todo el mundo. Existiendo fábricas donde se llegan a cifras de 8 millones de litros de agua para la refrigeración por hora, que es tanta agua como la que necesita una ciudad de tamaño mediano (Wärmark, 2015).

Finalmente, este estudio concluye que la evaluación de la huella de agua es una herramienta útil para identificar áreas de mejora en la construcción sostenible de viviendas, a pesar de esto hay que reconocer las limitaciones del análisis de la huella de agua. No debe utilizarse como base única para la selección de materiales, ya que existen otros problemas que pueden agravarse a medida que disminuye el uso de agua.

Preferiblemente, un análisis de la huella de agua debería ir acompañado de otros análisis, como el abastecimiento responsable y el impacto climático. También se debe considerar si es el método apropiado y más efectivo para reducir el impacto del uso del agua antes de realizar un estudio (Wärmark, 2015).

Estimating the water Footprint of a housing development (Estimación de la Huella de agua en el desarrollo de proyectos de viviendas)

El documento describe el primer estudio de huella hídrica en España, y este fue aplicado en los proyectos de construcción residencial de Vía Célere, una compañía inmobiliaria en España. Su objetivo inicial fue identificar y analizar los diferentes enfoques metodológicos encontrados en la literatura.

Para la estimación de la huella hídrica se recopilaron datos detallados para tipo de flujo a partir del análisis de 5.900 órdenes de compra y 3.500 facturas de proveedores. Se utilizó la metodología del Water Footprint Network y Análisis de Ciclo de Vida para determinar el volumen total de agua incorporado por los diferentes materiales utilizados en el proceso de construcción.

En este se identificaron 32 materiales clave con un peso total superior a las 33.500 ton, sin embargo, solamente se analizaron 11, los cuales representan el 99,38% del total del peso. El agua total consumida por la urbanización asciende a 88.500 m<sup>3</sup>, donde el 93,1% de estos provino de un consumo indirecto, el 3,4% del consumo de los proveedores de servicios y materiales y el 3,5% restante corresponde al consumo directo del proyecto.

Los resultados finales muestran que aproximadamente se utilizaron 5,7 m<sup>3</sup> de agua por m<sup>2</sup> de construcción para el enfoque de la WFN. Para el caso de la huella hídrica se presentaron los siguientes rendimientos: HH azul 4,6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup><sub>construidos</sub>, HH verde 18,1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup><sub>construidos</sub> y para la HH gris 203,9 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup><sub>construidos</sub>.

Se lograron identificar oportunidades para reducir la huella de agua en cada fase, esto mediante la incorporación de tecnologías de bajo consumo de agua, la reutilización de agua de lluvia y la optimización del proceso de construcción (Universidad Autónoma de Madrid, 2019).

Sustainable Water Consumption in a Building Industry: A Review Focusing on Building Water Footprint

Este presenta una investigación dirigida hacia la construcción sostenible, la revisión aplicó dos enfoques de huella hídrica ampliamente adoptados como lo son el Water Footprint Network (WFN) y la ISO 14046 para Análisis de Ciclo de Vida, con una finalidad en la construcción.

En este estudio se presentó una evaluación de las huellas hídricas de los materiales de construcción comunes con vislumbres de los puntos críticos de consumo de agua dulce a lo largo de sus cadenas de suministro. Además, avanza en la evaluación de las huellas hídricas relacionadas a la fase de uso mediante aplicaciones del mundo real de la industria de la construcción.

Se discutió la importancia de un análisis integral de la huella hídrica que cubra el ciclo de vida completo de edificio, la inclusión de impactos ambientales relacionados con los análisis y la influencia según el tipo de edificio, diseño estructural y/o variables específicas.

En última instancia, la revisión dedicó un segmento para establecer una visión futurista del asunto que presenta el consumo sostenible de agua dulce, los intereses económicos y de desarrollo, los desafíos que enfrenta la industria, la priorización y el compromiso de los usos de agua dulce de la industria de la construcción.

Algunos de los puntos tratados en la visión futurista consisten en que actualmente las 25 principales economías en desarrollo se encuentran sufriendo por falta de acceso básico al agua o por un mayor estrés hídrico de referencia y lo seguirán sufriendo si los proyectos intensivos de desarrollo de infraestructura no gestionan mejor el recurso.

Comenta que la huella hídrica es un tema que se debe colocar en primer lugar de las prácticas de gestión sostenible, esto en pro de fortalecer los Objetivos de Desarrollo Sostenible que se pretenden alcanzar para el 2030. La inclusión de estas prácticas al sector construcción es decisivo debido a su importante contribución a la carga ambiental global (Nallaperuma et al., 2022).

De igual forma plantea algunos desafíos que se deben cumplir para la transición aspirante a la gestión sostenible del agua:

1. El bajo nivel de desarrollo y transferencia de nuevas tecnologías
2. Documentación y comunicación deficientes
3. Renuencia a utilizar materiales de construcción innovadores e investigación
4. Desarrollos orientados a la industria desfavorecida.

## Evaluating Water Footprint of Building Construction in India

En este estudio se trata la evaluación de la huella hídrica enfocada al contexto de la India, el cual es un país que viene presentando un importante crecimiento de la población y un aumento de la urbanización, lo que significa una mayor demanda de este recurso finito, lo que genera cada vez más escasez y estrés hídrico.

El documento se centró únicamente en la fase de uso, a causa de que esta es la que presenta mayores consumos de agua. Debido a esto, pasan por alto la huella hídrica indirecta y virtual que encuentra presente en los materiales de construcción y la construcción como tal.

El estudio seleccionó un edificio residencial en Pune, India, y lo comparó con la literatura existente para evaluar la huella de agua de la construcción (CWF, por sus siglas en inglés), expresada como volumen de agua por unidad de superficie construida.

Este arrojó datos interesantes, donde el CWF varía significativamente según la altura del edificio, su sistema estructural y más particularmente, el tipo de cimentación.

Algunos de los resultados asociados a las cimentaciones muestran que un diseño con cimientos poco profundos podría rondar un CWF de  $11.000\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{construido}}$  y para cimentaciones profundas ronda el orden de  $18.000\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{construido}}$ , mientras que los edificios residenciales de gran altura con cimentaciones profundas similares presentaban un CWF de hasta  $26.000\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{construido}}$ .

Finalmente se obtuvo que la huella de agua promedio general para la construcción de edificios residenciales en la India fue de  $21.000\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{construido}}$  (Cboudburi & Bardhan, 2014).

## **Métodos de Evaluación de Impacto Ambiental y el Agua**

Según la norma ISO 14044 (2006), la EICV está compuesta de los siguientes tres elementos mandatorios (ISO 14044, 2006):

1. Selección de categorías de impacto, indicadores de categorías y modelos de categorías.
2. Clasificación donde se realiza la asignación de los resultados del inventario a categorías de impacto, es decir, los datos del inventario son agrupados en un número de categorías de impacto.
3. Caracterización que es el cálculo de los indicadores de categorías, es decir el análisis y estimación de la magnitud de los impactos, sobre la salud de los ecosistemas, la salud humana y la reducción de recursos para cada una de las categorías de impacto.

El indicador resultante para las categorías de impacto en su conjunto representa el perfil ambiental para el proceso. Por otra parte, existen cuatro elementos opcionales que pueden ser utilizados dependiendo del objetivo y alcance del estudio (Farell, 2013).

1. Normalización. Es el cálculo de la magnitud del indicador de la categoría relativa a un valor de referencia. Todos los impactos (contribución de un sistema producto a una categoría de impacto) están relacionados a una situación de referencia.
2. Agrupación. Es la agrupación y jerarquización de los indicadores.
3. Ponderación. Su objetivo es priorizar y posiblemente la agregación de los resultados del indicador a categorías de impacto. Es una comparación cuantitativa de la seriedad de los diferentes impactos potenciales de un sistema producto, en general, con el objetivo de obtener un índice simple del desempeño ambiental.
4. Análisis de datos. Se entiende como confiabilidad de los resultados del ACV.

Las categorías de ciclo de vida son clases que representan los problemas o preocupaciones ambientales a los cuales se deben asignar los resultados del inventario de ciclo de vida (Norris, 2003). Las categorías de impacto se encuentran englobadas en dos tipos:

1. Categorías de agotamiento de recursos: Incluyen el agotamiento de los recursos abióticos, bióticos, uso de suelo y uso de agua.
2. Categorías de contaminación, que incluyen calentamiento global, toxicología humana y ecotoxicología, formación de ozono, acidificación, eutrofización, etc.

Para cada uno de estos modelos se debe de calcular un valor que indica el impacto ambiental del proceso, llamado indicador (UNEP, 2003). Es importante destacar que el modelo para cada indicador de las categorías debe (siempre que sea posible) ser válido técnica y científicamente, usando un mecanismo ambiental distinto e identificable, y/o a través de una observación empírica reproducible (Farell, 2013).

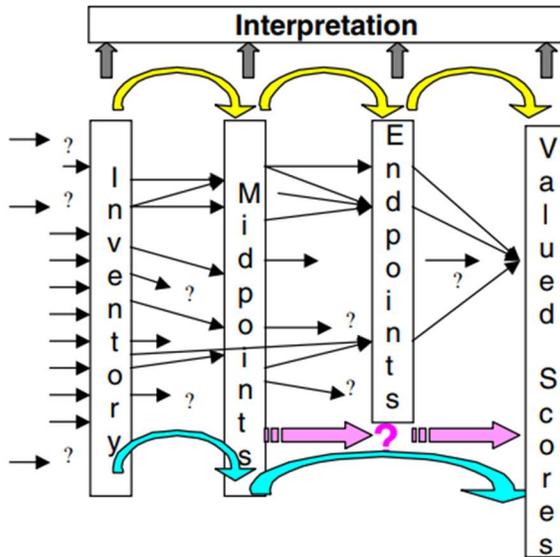
En la medición de impactos se presentan dos diferentes rutas a seguir: a) evaluación de los puntos intermedios y b) evaluación de los puntos finales. Una de las diferencias clave entre estas es la forma en que se toma en cuenta la relevancia medioambiental de los indicadores de categoría. En el enfoque de puntos medios la relevancia medioambiental presentada se encuentra en la relación cualitativa, estadística y en revisiones de artículos, estos obtienen categorías de impacto intermedias como por ejemplo la eutrofización, acidificación o el cambio climático (Norris, 2003).

En el enfoque de puntos finales, no hay necesidad de lidiar con la relevancia medioambiental de los indicadores de categoría separadamente, esto se debe a que los indicadores son escogidos en un nivel final de forma que estos son más fáciles de interpretar para los profesionales que deben tomar decisiones. Estos representan los daños que los impactos ambientales ocasionan en la salud humana, en los ecosistemas y la disponibilidad de recursos en los puntos finales de los procesos ambientales, generando categorías finales o de daños (Bare et al., 2000).

De manera general, las categorías de punto medio tienen un mayor uso en estudios de huella de agua de la región. Dentro de estas, las categorías de ecotoxicidad en agua dulce, escasez y disponibilidad son las más usadas. Las categorías de eutrofización en agua dulce, acidificación y radiación se emplean en menor grado. Las categorías de ecotoxicidad marina y

eutrofización marina no se analizan en este estudio, sin embargo, la norma ISO 14046 establece que los tipos de recursos de agua, incluyendo el agua de mar, deberían tenerse en cuenta según sea apropiado para la caracterización (INTE ISO 14046, 2015).

Por lo tanto, si se busca analizar el impacto en agua marina, podrá emplearse la metodología ISO 14046. Como resultado se presentan una serie de diferentes tipos de resultados, representados en la Figura 21:



**Figura 21.** Representación gráfica de algunas diferencias básicas entre el enfoque de puntos medios y el de puntos finales.

**Fuente:** Extraído de (Norris, 2003).

**Nota:** Las flechas pequeñas mostradas en el modelo añaden información en un marco de trabajo causa-efecto. Los signos de interrogación muestran información que estaba disponible pero no pudo ser llevada más allá en el modelo. En algunos casos se incluyeron emisiones sin medir, tipos de emisiones no consideradas y sustancias donde el modelo enfoque de puntos finales aún tiene que estar establecido (ejemplo: efectos de la neurotoxicidad en la salud humana).

Para cada categoría de impacto existen cuatro elementos propuestos por la ISO 14044 (ISO 14044, 2006):

1. Identificación de las categorías
2. Definición del indicador para cada categoría de impacto dada.
3. Adecuada identificación de los resultados del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) que pueden ser asignados a las categorías de impacto, tomando en cuenta el indicador elegido y la categoría de impacto identificada.
4. Identificación del modelo y los factores de caracterización.

Existe una serie de métodos de EICV y si bien ninguno ha desarrollado una categoría de impacto directa al agua, estas consideran el recurso hídrico de alguna forma en sus modelos.

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los métodos considerados en la investigación realizada por Farell (2013):

Método	Origen	Categorías de Impacto	Sustancias Cubiertas	Integración del Agua al Método	Comentarios
Escasez Ecológica	Suiza	7 categorías con enfoque "distancia al objetivo"	400	Categoría de uso del agua	Ponderación subjetiva de consumo de agua no compatible con ISO 14044
EDIP 2003	Dinamarca	19 categorías intermedias aire, agua y suelo	500	Categoría de ecotoxicidad acuática crónica con indicador intuitivo (m <sup>3</sup> )	Alta incertidumbre y no considera sustancias persistentes al ambiente
ReCiPe	Holanda	17 categorías intermedias y 3 de daño	3000	Categoría de escasez de agua (m <sup>3</sup> )	Suma de volumen de agua de uso consuntivo sin caracterizar

CExD Cumulative Exergy Demand	Suiza	10 categorías intermedias	No disponible	Agregación de uso de los recursos hídricos	Cálculo en función de su composición química, no expresa el agotamiento local ni evalúa consecuencias para la salud humana o los ecosistemas
USEtox	Dinamarca	2 categorías de toxicidad de punto intermedio	3100 (orgánicas)	Ecotoxicidad del agua dulce	Factores de caracterización estandarizados, pero con indicadores que complican la comunicación

**Fuente:** Extraído de (Farell, 2013) con base en (ILCD, 2009).

Es importante determinar en cada caso los indicadores de categoría de impacto que son relevantes para la región o país. Por ejemplo, para regiones de AL en las que existe una alta producción agrícola la eutrofización es relevante; o bien, en países cuya mezcla energética incluye altos porcentajes de fuente hidroeléctricas es importante analizar un indicador que determine los impactos potenciales por infraestructura de este tipo (presas) (CADIS & COSUDE, 2016).

La elección de los indicadores depende del contexto del estudio, así como del objetivo y el alcance. Durante esta primera fase es necesario tener claro qué es lo que se quiere conocer acerca del producto bajo estudio, de esta manera se pueden establecer los indicadores más apropiados. Si el estudio tiene un carácter científico, se recomienda llegar hasta punto medio dado que muchas veces el objetivo y el alcance del estudio no justifican un cálculo de ponderación para llegar a punto final. También se debe mencionar que usualmente se asume que la huella de agua es para agua dulce, cuando no se menciona si es marina o dulce.

A continuación, se enlistan algunas consideraciones sobre el uso de los indicadores de categoría de acuerdo con el contexto:

- En una declaración ambiental Tipo III (DAP) de acuerdo con ISO 14025<sup>5</sup>, se deben evaluar los indicadores que establece un

documento de Reglas de Categoría de Producto (RCP), los cuales generalmente solicitan indicadores de punto medio.

- En un estudio de diagnóstico (*screening*), ya sea de huella de agua o de análisis de ciclo de vida, podrían emplearse indicadores de punto final para identificar las categorías que tienen el mayor impacto y por lo tanto, las que se deben considerar en el estudio. Sin embargo, los indicadores de punto final tienen asociada una mayor incertidumbre dado que realizan una ponderación a la relevancia de los indicadores de acuerdo con el contexto de cada región.
- En un estudio de huella de agua de acuerdo con ISO 14046, la huella puede ser un perfil integral con indicadores de punto medio y/o varios indicadores o un indicador agregado de punto final. En la Tabla 2 se resumen los tipos de huella de agua que conforman un “perfil integral de huella de agua”, especificando para cuáles existen métodos de punto final bien establecidos. El detalle de estos métodos, tanto para punto medio como para punto final, se presentan en el Anexo 1.

**Tabla 5.** Tipos de huella de agua.

Debido a:	Categoría de impacto	Áreas de protección (categorías de punto final) Se
-----------	----------------------	--

	ambiental potencial:	marcan con X si hay método(s) de punto final disponible(s) a la fecha		
	Huella de agua por ...	Salud humana	Ecosistemas	Recursos de las futuras generaciones
Consumo del agua	Escasez (afecta a los humanos causando desnutrición y enfermedades)	X	X	X
	Disminución del nivel freático (no disponible para punto medio)		X	
	Disponibilidad	X		
Degradación del agua	Eutrofización de agua dulce		X	
	Toxicidad en humanos (se puede presentar como cancerígena y no cancerígena o sumada en un solo indicador)	X		
	Ecotoxicidad de agua dulce		X	
	Acidificación de agua dulce		X	
	Radiación ionizante en agua dulce	X		
	Termo-contaminación (no disponible para punto medio)		X	
Sin métodos reconocidos para punto medio ni final	Ecotoxicidad marina			
	Eutrofización marina			
	Radiación ionizante en ecosistemas marinos			
Otros indicadores disponibles	Por alteración de flujos (asociada a represas) (no disponible para punto medio)		X	

**Fuente:** Extraída de (CADIS & COSUDE, 2016).

**Nota:** Usualmente se asume que la huella de agua es para agua dulce, cuando no se menciona si es marina o dulce.

Ahora bien, en la Tabla 6 se presentan las categorías de impacto de punto medio y los métodos de evaluación recomendados cuando se desea evaluar la huella de agua de un producto de la región y al mismo tiempo se desea llevar a

cabo un proceso de verificación. Esta recomendación surge de un proceso de análisis en el que se contó con la participación de 26 expertos de la región de manera presencial (CADIS & COSUDE, 2016).

Categoría	Método	Indicador	Descripción
Escasez	Agua disponible remanente – AWARE (A. Boulay	Water Scarcity Footprint	El factor de caracterización se basa en la relación entre la extracción de agua dulce para usos humanos y su disponibilidad total de agua

	et al., 2015)	[m <sup>3</sup> <sub>equiv</sub> / m <sup>2</sup> ]	en cierta región.  Escasez = Consumo*AWARE
Disponibilidad	Huella de disponibilidad de agua (A. M. Boulay, Bulle, et al., 2011)	HH <sub>impact</sub> [DALY]	Cuantifica en un número el consumo y contaminación del proceso. Varía entre el valor positivo de la extracción (se consume toda el agua que se extrae o se devuelve en malas condiciones) y el valor negativo del vertimiento (cuando la calidad del agua de la extracción es mala y se devuelve toda el agua en óptimas condiciones).
Ecotoxicidad en agua dulce	USEtox 2.0 (USEtox® International Center et al., 2017)	EF <sub>eco</sub> [PAF m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	Estima disminución de biodiversidad acuática por emisiones al aire, agua y suelo. Nota: Al momento de la investigación ya se encontraba la versión 2.0 de este modelo, por lo que se trabajará con esta versión más actualizada.
Eutrofización en agua dulce	ReCiPe  (Huijbregts et al., 2017)	FEP <sub>x,c,i</sub> [kgP equiv / kg de sustancia]	Evalúa impacto en biodiversidad acuática por el incremento de nutrientes debido a emisiones en el aire, agua y suelo usando el fósforo como sustancia de referencia. También emplea como referencia condiciones de macrofauna de fuentes superficiales holandesas y datos de fuentes de agua europeas. Nota: Al momento de la investigación ya se encontraba una actualización del método que toma por nombre ReCiPe2016 en su versión v1.1, por lo que se trabajará con esta versión más actualizada.

**Fuente:** Extraído de (CADIS & COSUDE, 2016).

En cuanto a las categorías de impacto de punto final, los indicadores que más frecuentan en la región son: daño a ecosistemas por escasez, daño a ecosistemas por eutrofización, daño a salud humana por toxicidad y daño a ecosistemas por toxicidad. El detalle de los métodos y categorías se encuentra en el Anexo 1.

Tener una definición clara del objetivo y alcance del estudio, la información recopilada, el tipo de recursos hídricos utilizados y afectados, y los cambios asociados al agua (de manera cuantitativa y /o cualitativa), ayudará a determinar las categorías de impacto apropiadas y métodos de evaluación de impacto para el estudio y, por tanto, la elección de un tipo de huella de agua.

Es importante tener en cuenta que para que una cuantificación de huella de agua sea integral debe considerar todos los aspectos relevantes relativos a los ecosistemas, la salud humana y los recursos relacionados con el uso del agua, incluyendo la disponibilidad y degradación (sub-cláusula 3.3.3, ISO 14046:2014). La selección de las categorías de impacto a evaluar debe considerar la relevancia con respecto al producto bajo estudio, así como el cumplimiento de los principios establecidos en la sección 4 de la norma ISO 14046. En la Tabla 7 se detallan las categorías de daño y métodos de evaluación final más usados en América Latina.

**Tabla 7.** Categorías de daño y métodos de evaluación de punto final más usados en América Latina.

Área de protección (Daño)	Categoría	Método	Indicador	Descripción
---------------------------	-----------	--------	-----------	-------------

Salud humana	Enfermedades causadas por agua contaminada	USEtox (Rosenbaum et al., 2008)	DALY	Determina efectos en la salud humana, basado en USEtox y los efectos cancerígenos de las sustancias.
Calidad de ecosistemas	Disminución de agua para ecosistemas terrestres (Escasez)	(Pfister et al., 2009)	PDF m <sup>2</sup> * año	Agua consumida*WSI*Factor relacionado con limitación al crecimiento de plantas vasculares debido a escasez de agua azul.
	Eutrofización en agua dulce	(Goedkoop et al., 2009)	Especies / año	Obtiene un factor de daño de las especies a partir de la concentración de nutrientes (empleando el fósforo como sustancia de referencia).
	Ecotoxicidad en agua dulce	(Rosenbaum et al., 2008)	PDF m <sup>2</sup> * día	Estima disminución de biodiversidad acuática por emisiones al aire, agua y suelo.

**Fuente:** Extraído de (CADIS & COSUDE, 2016).

Según (CADIS & COSUDE, 2016), para la evaluación de huella de agua en América Latina se recomiendan, según un consenso científico, los métodos recomendados según el tipo de impacto son:

1. Escasez: Boulay et al. 2016 (AWARE).
2. Disponibilidad: Boulay et al. 2011 (Huella de disponibilidad de agua).
3. Ecotoxicidad en agua dulce: Rosenbaum et al. 2008 (USEtox).
4. Eutrofización en agua dulce: Goedkoop et al. 2008 (ReCiPe).

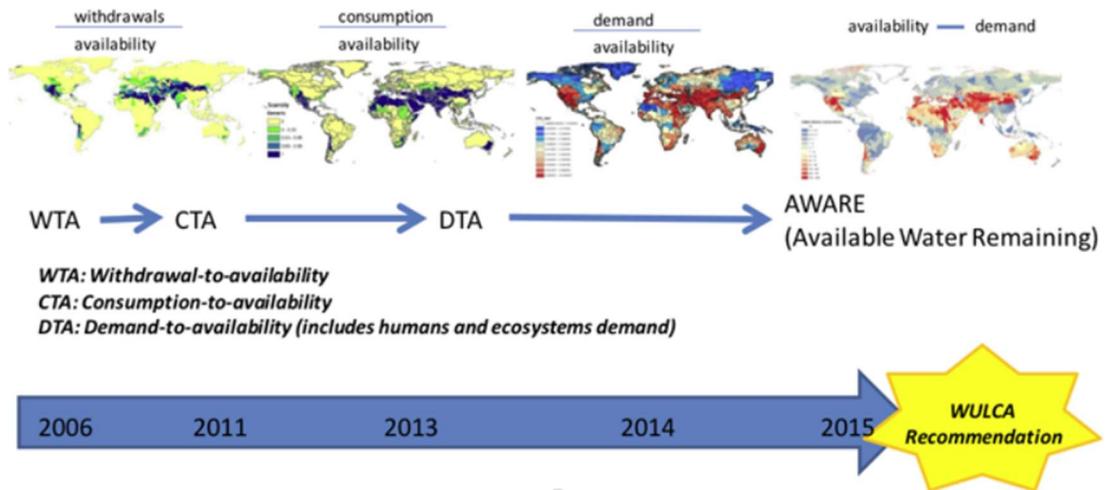
Por lo que los métodos que se desarrollarán serán precisamente estos.

## Método AWARE, para escasez de agua

Para el impacto por escasez de agua se tiene el método AWARE el cuál fue diseñado por la organización WULCA, esta organización formó parte del grupo encargado de desarrollar la norma INTE ISO 14046, donde cinco de sus representantes participaron directamente dentro del proceso ISO (WULCA, 2021).

Antes de desarrollar el indicador AWARE, se hacía uso de los indicadores WTA (Withdrawal-To-Availability), CTA (Consumption-To-Availability) y DTA (Demand-To-Availability). En la Figura 22 se aprecia la evolución de los indicadores de escasez de agua modelados en LCA:

## Evolution of scarcity indicators modeled in LCA



**Figura 22.** Evolución de los indicadores de escasez de agua dulce.  
**Fuente:** Extraído de (WULCA, 2021).

El indicador AWARE se encuentra basado en  $1/AMD$ , lo que corresponde al inverso de la diferencia entre la disponibilidad por zona y la demanda por zona (Ecuaciones 2 y 3). Este cuantifica el potencial de privación de agua, tanto para los seres humanos como para los ecosistemas, y sirve para calcular la puntuación del impacto del consumo de agua en el punto medio del ACV o para calcular la huella de escasez de agua según la norma ISO 14046.

Se basa en el agua disponible restante (AWARE, por sus siglas en inglés) por unidad de superficie en una cuenca determinada en relación con la media anual, una vez satisfechas las demandas humanas y de los ecosistemas acuáticos.

Este método se basa en la hipótesis de que el potencial de privar de agua a otro usuario

(resultante de la multiplicación del inventario por el factor de caracterización,  $CF_{AWARE}$ , Ecuación 5) es directamente proporcional a la cantidad de agua consumida (inventario) e inversamente proporcional al agua disponible al agua disponible restante por unidad de superficie y de tiempo en una región (cuenca hidrográfica) (Ecuación 7 y Figura 14).

Cuando el valor de la demanda es igual o mayor que la disponibilidad (DMA negativo), el factor de caracterización (FC) se establece como máximo, ya que la ecuación ya no sería continua ni tendría el mismo significado (Ecuación 5). El CF se normaliza (Ecuación 4) y se aplican cortes (Ecuaciones 5 y 6). Lo anterior mencionado se describe mejor a continuación y el comportamiento se encuentra en la Figura 23:

$$AMD_i = \frac{(Availability - HWC - EWR)}{Area}$$

**Ecuación 2**

$$STe_i = \frac{1}{AMD_i}$$

**Ecuación 3**

$$CF_{AWARE} = \frac{STe_i}{STe_{world\ avg}} = \frac{AMD_i}{AMD_i} = \frac{AMD_{world\ avg}}{AMD_i}, \text{ for Demand} < \text{Availability}$$

**Ecuación 4**

$$CF_{AWARE} = Max = 100, \text{ for Demand} \geq \text{Availability or } AMD_i < 0.01 \times AMD_{world\ avg}$$

**Ecuación 5**

$$CF_{AWARE} = \text{Min} = 0.1 \text{ for } AMD_i > 10 \times AMD_{\text{world avg}}$$

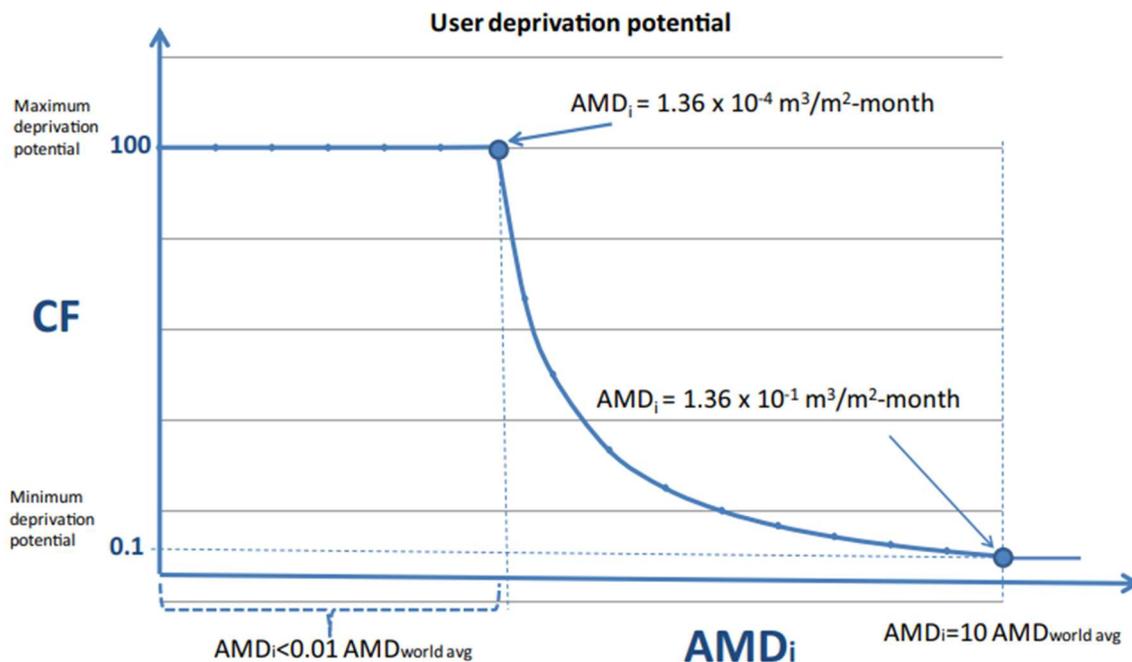
Ecuación 6

$$\text{Water Scarcity Footprint} = \text{Water Consumption (inventory)} \times CF_{AWARE}$$

Ecuación 7

Donde:

- HWC: Human Water Consumption (Consumo de agua para humanos)
- EWR: Environmental Water Requirements (Cantidad requerida de agua por el ecosistema)
- Availability: Escorrentía real (incluido el impacto humano en la regulación del caudal)
- **Nota:** Todos calculados en  $\text{m}^3/\text{mes}$  y área en  $\text{m}^2$
- $AMD_i$ : Calculado en  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{mes}$  y el volumen de agua remanente disponible para su uso una vez satisfecha la demanda, por unidad de superficie y de tiempo ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{mes}$ ). Dado que este factor se expresa en relación con la superficie, se garantiza la comparabilidad entre regiones.
- $Ste_i$ : Expresado en  $\text{m}^2 \cdot \text{mes}/\text{m}^3$  y puede interpretarse como el equivalente superficie-tiempo equivalente necesario para generar un metro cúbico de agua no utilizada en esta región.
- $AMD_{\text{world avg}}$ : Es la media ponderada del consumo de  $AMD_i$  en todo el mundo ( $0,0136 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{mes}$ ).
- $CF$ : Las unidades de este son adimensionales, expresadas en  $\text{m}^3_{\text{world eq.}}/\text{m}^3$ .



**Figura 23.** Relación entre la privación potencial y AMD para una región  $i$ , descrito por los CF's del indicador AWARE.

**Fuente:** Extraído de (A. M. Boulay et al., 2018).

Similar al potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés), el CF representa el valor relativo de la puntuación de impacto de un consumo de agua en comparación

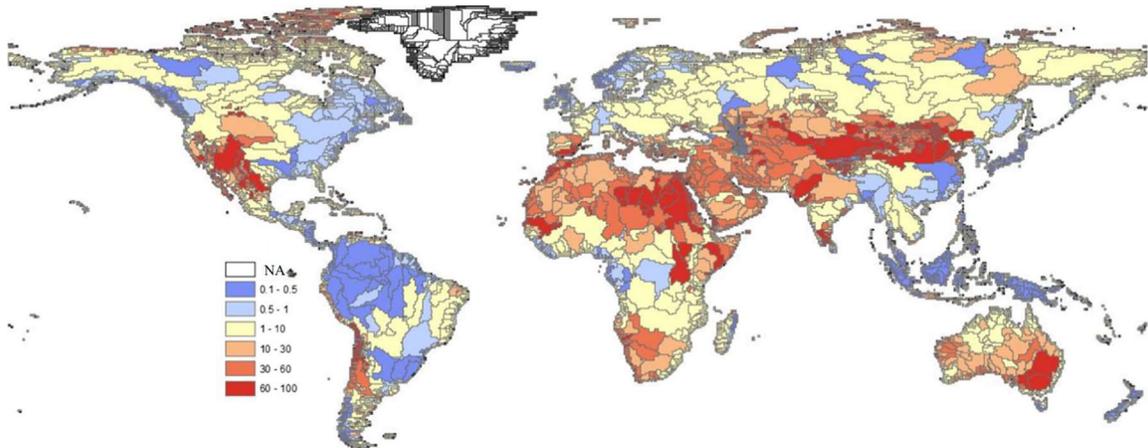
con una referencia expresada en términos de  $\text{m}^3_{\text{world eq.}}$  por  $\text{m}^3$ .

El CF está limitado en un rango de 0,1 a 100, donde un valor de 1 corresponde a una

región con la misma cantidad de agua remanente por área dentro de un cierto período de tiempo que la media mundial, valores <1 para regiones con menos problemas de escasez que la media mundial y un valor de 10, por ejemplo, que representa una región donde hay 10 veces menos agua restante por área dentro de un cierto período de tiempo que la media mundial, o que se necesita 10 veces más tiempo de superficie

para generar una cantidad de agua no utilizada en esta región que la media mundial, suponiendo un nivel dado de demanda de agua.

Finalmente, los resultados obtenidos por WULCA se muestran en el mapa de la Figura 24.



**Figura 24.** Factores de caracterización AWARE para la huella de escasez de agua en  $m^3$  eq. mundiales/ $m^3$  consumidos en la región  $i$ .

**Fuente:** Extraído de (A. M. Boulay et al., 2018)

**Nota:** Representados a nivel anual para uso no agrícola.

## ¿Cómo aplicar el método AWARE?

Para identificar los factores AWARE de la cuenca  $X$ , se debe utilizar el documento de [capa de Google](#) de AWARE. Para el caso de Costa Rica, este presenta un total de 10 subcuencas, según la división realizada por WULCA. cada una de estas subcuencas posee sus propios datos,

por lo que se debe seleccionar la subcuenca correspondiente según la ubicación del proyecto.

Ahora, para saber cómo utilizar estos factores, se debe clicar sobre la cuenca en la capa, para que esta muestre los datos. Por ejemplo, para la cuenca FID 8326, con sus respectivos factores serían los siguientes:

8326

X

8326	
FID	8326
Consumption_m3	4.0e+007
Area_m2	9.1e+009
Jan	0.1
Feb	0.3
Mar	0.4
Apr	0.4
May	0.1
Jun	0.1
Jul	0.1
Aug	0.1
Sep	0.1
Oct	0.1
Nov	0.1
Dec	0.1
Annual agri	0.4
Annual non-agri	0.2
Annual unknown	0.2

**Figura 25.** Consumo anual de agua, área de la cuenca, factores AWARE agregados mensuales y anuales que se muestran en Google Earth al seleccionar 8326.

**Fuente:** Extraído de (WULCA, 2021).

Para calcular el WF de una construcción por realizar dentro de esta cuenca, el usuario debe multiplicar el consumo de agua por unidad de producto por los factores AWARE. Se deben de tomar en cuenta los meses en los que la compra de los materiales y la construcción de la obra se encuentren activos, por lo que los factores a utilizar serán precisamente los de esos meses.

Dígase que la construcción durará 5 meses desde que arranca la obra hasta la entrega al cliente, y los meses de construcción serán de marzo a julio. Los factores por meses individuales se multiplican por el consumo de agua respectivo por metro cuadrado de construcción, como se muestra en la Tabla 8 y cálculo de la huella de agua anual por m<sup>2</sup> se observa en la Tabla 9.

**Tabla 8.** Estimación de la Huella de agua (WF) mensual por m<sup>2</sup> para una construcción.

Mes	Consumo de agua durante el mes (m <sup>3</sup> )	Área total construida (m <sup>2</sup> )	Agua por unidad de área (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	CF's según AWARE (m <sup>3</sup> - equiv/m <sup>3</sup> )	WF por mes (m <sup>3</sup> -equiv /m <sup>2</sup> )
Marzo	1500	15	100	0.4	40
Abril	2300	35	65,71	0.4	26,28
Mayo	6000	30	200	0.1	20
Junio	3600	33	109,09	0.1	10,91
Julio	2000	27	74,07	0.1	7,41

**Fuente:** Autoría propia, basada en la Figura 2 de (WULCA, 2023).

**Nota:** Los valores de consumo de agua durante cada mes de construcción son ficticios y no deben ser utilizados como una referencia cuantitativa.

**Tabla 9.** Cálculo de huella de agua (WF) anual por m<sup>2</sup> de construcción.

Mes	Área total construida (m <sup>2</sup> )	WF por mes (m <sup>3</sup> -equiv /m <sup>2</sup> )	WF ponderado (m <sup>3</sup> -equiv /m <sup>2</sup> )	WF anual (m <sup>3</sup> -equiv /m <sup>2</sup> )
Marzo	15	40	600	

Abril	35	26,28	919,80	
Mayo	30	20	600	
Junio	33	10,91	360,03	
Julio	27	7,41	200,07	
Σ	140	-	2679,9	19,14

**Fuente:** Autoría propia, basada en la Figura 3 de (WULCA, 2023).

Ahora bien, si una empresa constructora o consultara deseara conocer su WF anual, esta se podría basar en el total de m<sup>2</sup> anuales construidos y el total de agua utilizada en ese mismo lapso. Por lo que, si una empresa construyó un total de 25.000 m<sup>2</sup> durante un año y consumió un total de 520.000 m<sup>3</sup> de agua, sin hacer distinción entre el tipo de obra, es posible determinar la WF anual de esa empresa.

Para esto se debe hacer uso del CF “Annual non-agri” de la Figura 25, el cálculo sería de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 & \text{Agua por unidad de área} \\
 &= \frac{\text{volumen de agua anual}}{\text{m}^2 \text{ de construcción}} \\
 &= \frac{520.000 \text{m}^3}{25.000 \text{m}^2} = 20,8 \text{ (m}^3/\text{m}^2)
 \end{aligned}$$

**Ecuación 8**

$$\begin{aligned}
 \text{WF anual} &= \text{agua por unidad de área} \\
 & * \text{CF anual (non - agri)} \\
 &= 20,8 \text{ (m}^3/\text{m}^2) * 0,2 \text{ (m}^3 \\
 & \text{ - equiv/m}^3) \\
 &= 4.16 \text{ (m}^3 \text{ - equiv/m}^2)
 \end{aligned}$$

**Ecuación 9**

## Huella de disponibilidad de agua

Los potenciales impactos ambientales de emisiones contaminantes al agua son caracterizados en la metodología de LCA, sin embargo, los impactos por indisponibilidad del agua aún no se encontraban totalmente cuantificados, hasta antes de la huella de disponibilidad de agua. Una reducción de la disponibilidad del agua a usuarios humanos puede potencialmente afectar la salud humana.

El modelo de huella de disponibilidad de agua evalúa precisamente estos impactos antes

mencionados, para un contexto de LCA. Este considera el agua que se extrae y libera, su calidad y su escasez para evaluar la pérdida de funcionalidad asociada a los usos del agua (A. M. Boulay, Bulle, et al., 2011b).

Se presentan resultados regionalizados de los impactos sobre la salud humana para dos enfoques de modelización relativos a los usuarios afectados, incluidos o no los usos domésticos, y expresados en años de vida ajustados en función de la discapacidad (DALY, por sus siglas en inglés). Este es causado por malnutrición y las enfermedades. También propone un indicador de escasez basados en el consumo y la calidad como punto medio, por lo que este modela escenarios de compensación para superar la escasez de agua.

Este modelo se encuentra basado en métodos para caracterizar los impactos en el uso del agua en LCA, Bayart et al., recomienda un marco de trabajo general que considera tres principales vías de impacto que conducen a déficits de agua para el uso humano, los ecosistemas y las futuras generaciones. La huella de disponibilidad de agua se enfoca únicamente en los usos humanos y propone un método para evaluar las consecuencias de un acceso insuficiente al agua para las necesidades humanas (J.-B. Bayart et al., 2010; A. M. Boulay, Bulle, et al., 2011b).

Bayart y sus colegas distinguen los siguientes tipos de usuarios humanos: doméstico, agrícola, industrial, pesquero, hidroeléctrico, transporte y recreativo (Véase Tabla 10. Una disminución de la disponibilidad de agua para usos humanos puede tener repercusiones en la salud humana. Si hay suficiente riqueza económica en la zona, los usuarios se adaptarán a la falta de agua compensándola con una tecnología de reserva (por ejemplo, desalinización, importación de agua o bienes, etc.).

<b>Tabla 10.</b> Tipos de usuarios de agua.	
Usuario	Definición

Doméstico 1	Usuario doméstico que no realiza ningún tratamiento o desinfección química simple al agua antes de su uso
Doméstico 2	Usuario doméstico que realiza un tratamiento químico-físico convencional (coagulación o precipitación, proceso de eliminación de sólidos, desinfección) o tratamiento equivalente al agua antes de su uso
Doméstico 3	Usuario doméstico que realiza un tratamiento avanzado (es decir, tratamiento convencional más tratamiento adicional (desinfección UV, adsorción, etc.)) o tratamiento avanzado específico (ósmosis inversa, nanofiltración, adsorción, intercambio iónico, desalinización, etc.) o desalación al agua antes de usar
Industrial	Usuario industrial (fabricante) extrayendo el agua disponible y tratándola al nivel requerido
De enfriamiento	Agua de refrigeración de paso único para la producción de energía
Agrícola 1	Agricultura que requiere agua de riego de buena calidad
Agrícola 2	Agricultura que solo requiere agua de riego de mala calidad
Pesquero	Acuicultura de agua dulce y captura de peces
Hidroeléctrico	Producción hidroeléctrica
Transporte	Transporte de mercancías por aguas interiores
Recreativo	Actividades recreativas como natación y deportes acuáticos.

**Fuente:** Extraído de (A.-M. Boulay et al., 2010).

Los impactos de estos procesos pueden evaluarse en las categorías de impacto existentes mediante el ACV tradicional e incluirse en los resultados ampliando el sistema de productos objeto de evaluación (es decir, el sistema cuyo uso del agua se está estudiando).

El agua se considera degradada cuando esta retorna a su cuerpo de agua de origen, pero con una calidad menor a la inicial, mientras que un uso consuntivo se refiere a la evaporación, la

integración en un producto o la devolución del agua a otra cuenca o al mar.

Casi todo los usos domésticos e industriales pueden ser considerados degradativos, es importante entender que el retorno de agua contaminada no provee la misma función que el agua limpia, pero aun así algo en comparación con el agua consumida, la cual se pierde en el proceso. En la Tabla 11 se muestran las categorías de agua según su calidad, fuente y nivel de calidad para cada tipo de usuario.

**Tabla 11.** Funcionalidad de categoría de agua por usuario (S= Agua superficial, G= Agua subterránea, M= Microbiano, T= Toxicidad)

Calidad	1	2a	2b	2c	2d	3	4	5	Lluvia
Fuente	S o G	S o G	S o G	S o G	S o G	S o G	S o G	S o G	Lluvia
Nivel de calidad	Excelente	Buena	Promedio	Promedio - tóxica	Promedio - biológica	Pobre	Muy pobre	Inutilizable	N/A
Contaminación	M bajo - T baja	M bajo - T media	M medio - T media	M bajo - T alta	M alto - T baja	M alto - T media	M alto - T alta	Otro	N/A
Doméstico 1	✓	X	X	X	X	X	X	X	✓
Doméstico 2	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	✓
Doméstico 3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓

Industrial	✓	✓	✓	X	X	X	X	X	✓
De enfriamiento	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓
Agrícola 1	✓	✓	X	✓	X	X	X	X	✓
Agrícola 2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓
Pesquero	✓	X	X	X	✓	X	X	X	✓
Hidroeléctrico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Transporte	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Recreativo	✓	✓	X	✓	X	X	X	X	✓

Fuente: Extraído de (A.-M. Boulay et al., 2010).

En la Figura 26 se muestra la vía de impacto desde un inventario de uso del agua

hasta los impactos directos e indirectos generados por un déficit para usos humanos.

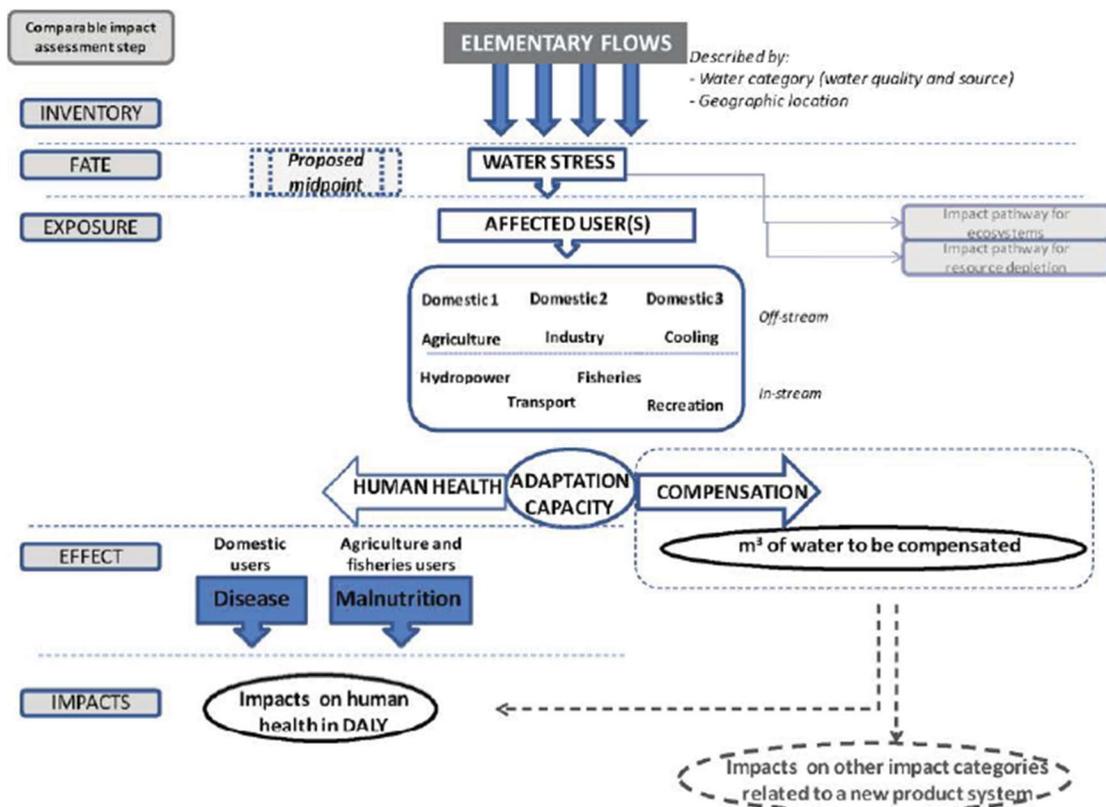


Figura 26. Vías de impacto del uso del agua para los usuarios humanos que conducen a compensaciones o impactos en la salud humana.

**Fuente:** Extraído de (A. M. Boulay, Bulle, et al., 2011b).

Boulay et al., (2010) determinaron dos importantes conceptos necesarios para identificar los déficits de agua por uso humano: usuarios humano y categorías de agua, definiendo el agua de calidad suficiente y fuente adecuada para ser funcional para los primeros.

Se crearon tres categorías de usuarios domésticos para tener en cuenta las diferentes calidades del agua utilizada de agua para uso doméstico en función de la disponibilidad local. Cada calidad requiere distintos niveles de tratamiento. Cada usuario se clasifica como dentro y fuera del cauce según Bayart et al., (2010). y como se muestra en la Figura 18. En este modelo no se ha tenido en cuenta la energía hidroeléctrica fuera del cauce.

Las categorías de agua representan los 17 posibles flujos elementales descritos por fuente (superficial, subterránea o pluvial) y calidad del agua. Los flujos elementales describen los intercambios entre el sistema producto evaluado y el medio ambiente.

La calidad del agua se evalúa en función de una serie de parámetros y de sus umbrales, que determinan los usuarios para los que una categoría de agua específica es funcional (calidad suficiente y fuente adecuada).

Alternativamente, si la situación socioeconómica no es suficientemente favorable, los usuarios sufrirán directamente la reducción del agua disponible. Esto podría provocar enfermedades causadas por un acceso limitado al agua doméstica (falta de higiene y acceso a agua potable) o pérdidas de productividad agrícola que provoque malnutrición.

## Descripción del modelo

El modelo caracteriza los impactos asociados a la cantidad de agua que entra y sale del sistema del producto para una categoría dada. Los impactos potenciales a la salud humana se encuentran calculados basados en la diferencia entre la extracción y la emisión de recurso al ambiente, como se puede observar en la ecuación 10 (A. M. Boulay, Bulle, et al., 2011b).

$$HH_{impact} = \sum_{i=1}^{17} (CF_i \times V_{i,in}) - \sum_{i=1}^{17} (CF_i \times V_{i,out})$$

**Ecuación 10**

Donde:

- $HH_{impact}$ : Expresa los impactos a la salud humana en DALY
- $CF_i$ : Es el factor de caracterización de la categoría de agua,  $i$  para la categoría de impacto a salud humana (en DALY/m<sup>3</sup> de la categoría de agua  $i$ ).
- $V_i(in \ y \ out)$ : Es el volumen de la categoría de agua  $i$  que entra y sale del sistema del producto o el proceso, para un flujo elemental  $i$  (en m<sup>3</sup>).

El factor de caracterización  $CF_i$  incluye los tres principales componentes que pueden ser comparados con los tres factores usados tradicionalmente para definir las emisiones relacionadas con las categorías de impacto:

1. Destino
2. Exposición
3. Efecto

Como se describe en la ecuación 11, el destino representa el estrés de agua local (primer término, la exposición la medida en que el usuario o usuarios se verán afectados por un cambio en la disponibilidad de agua y su capacidad para adaptarse al cambio (segundo término) y el efecto representa el impacto en la salud humana de un déficit del recurso hídrico para el usuario  $j$  (tercer término).

$$CF_i = \sum_{j=1}^{10} (\alpha_i \times U_{i,j} (1 - AC) \times E_j)$$

**Ecuación 11**

Donde:

- $\alpha_i$ : Expresa el índice de estrés hídrico de la categoría i (adimensional).
- $U_{i,j}$ : El usuario(s) j que se verá(n) afectado(s) por el cambio en la disponibilidad de la categoría de agua i (adimensional).
- $AC$ : La capacidad de adaptación (adimensional).
- $E_j$ : El factor de efecto para el usuario j (DALY /m<sup>3</sup>).

Ahora bien, respecto a estos componentes:

## Destino: Estrés del recurso hídrico ( $\alpha_i$ )

Este representa el nivel de competición entre los usuarios debido al estrés físico de los recursos, teniendo en cuenta la calidad y las variaciones estacionales, y distinguiendo entre aguas superficiales subterráneas. Debido a que estos dos tipos de recursos a menudo no representan la misma escasez en una misma región y, pueden no servir a los mismos usuarios.

El parámetro  $\alpha_i$  se calculó basándose en la relación CU/Q90 (para más información consultar Döll (2009)), el agua consumida (CU, por sus siglas en inglés) fue calculada utilizando los datos de modelo WaterGAP. A pesar de que no se tomaron en cuenta los efectos estacionales para la disponibilidad de recursos de aguas subterráneas renovables (GWR, por sus siglas en inglés), sí se tuvo en cuenta el denominador para las aguas superficiales mediante el parámetro Q90. El parámetro  $\alpha_i$  se describe en las siguientes ecuaciones.

$$\alpha_{surface,i}^* = \frac{CU \times (1 - f_g)}{Q90} \times \frac{1}{P_i}$$

**Ecuación 12**

$$\alpha_{GW,i}^* = \frac{CU \times f_g}{GWR} \times \frac{1}{P_i}$$

**Ecuación 13**

Donde:

- $CU$ : Representa el uso consuntivo en km<sup>3</sup>/año.
- $f_g$ : Representa la fracción del uso dependiente de las aguas subterráneas.
- $GWR$ : El recurso renovable de aguas subterráneas disponible en km<sup>3</sup>/año.
- $P_i$ : La proporción de agua disponible de categoría i.

Es importante destacar que en este modelo se asume que el agua de mejor calidad se consume primero que el agua de menor calidad, esto resulta en una mayor escasez para las mejores calidades del recurso. El índice de estrés hídrico se encuentra modelado en un rango de 0 a 1, esto basado en umbrales de estrés hídrico aceptados.

Las evaluaciones de estrés hídrico bajo, moderado, alto y muy alto estrés hídrico se asocian a extracciones de agua del 10, 20, 40 y el 80% del agua disponible, respectivamente. Se generaron correlaciones entre las relaciones de extracciones-disponibilidad y consumo-disponibilidad, las cuales se utilizaron para establecer los umbrales correspondientes del agua disponible.

Dado que el índice de estrés pretende reflejar la competencia entre usuarios, el  $\alpha_i$  se fija en 0 para un bajo estrés hídrico (el consumo de agua por m<sup>3</sup> de agua no afectará a otros usuarios cuando el agua es abundante) y hasta 1 para un estrés del recurso hídrico muy alto (el consumo de agua por m<sup>3</sup> privará a otros usuarios competidores de ese mismo m<sup>3</sup>).

Por lo tanto, el indicador de punto medio propuesto por Boulay et al., (2011), es el indicador por estrés de agua (WSI, por sus siglas en inglés). Este indicador usa la disponibilidad de agua de diferentes fuentes y su calidad mediante la ponderación del estrés para cada uno de los tipos de agua. Los resultados de cada flujo se agregan a la ecuación 14 de la misma manera que en la ecuación 10 para el punto final, utilizando el estrés de agua  $\alpha_i$  como punto medio CF.

$$WSI = \sum_i (\alpha_i \times V_{i,in}) - \sum_i (\alpha_i \times V_{i,out})$$

**Ecuación 14**

Donde:

- $WSI$ : Expresa el resultado del punto medio en m<sup>3</sup> equivalentes de agua.

- $\alpha_i$ : El índice de estrés de la categoría de agua ( $m^3$  de agua equivalente por  $m^3$  de agua de la categoría  $i$  extraída/liberada).
- $V_i(in\ y\ out)$ : Los volúmenes de agua de la categoría  $i$  que entran y salen del sistema del proceso o producto (es decir, flujos elementales en  $m^3$ ).

## Usuarios afectados ( $U_{i,j}$ )

Un cambio en la disponibilidad de agua  $i$  no afectará a todos los usuarios en la misma medida. Los impactos dependen de (1) la funcionalidad del agua para un usuario específico  $j$ ,  $F_{i,j}$  (basado en su calidad y el tipo de recurso hídrico), y la identificación de los usuarios con más probabilidades de verse afectados por un cambio en la disponibilidad de agua en la zona de interés  $U_j$  (A. M. Boulay, Bulle, et al., 2011b).

Juntos, estos parámetros permiten evaluar la medida en que el usuario  $j$  se verá afectado por un cambio en la disponibilidad de la categoría de agua  $i$ , tal cual se muestra en las ecuaciones 13 y 14.

$$U_{i,j} = \frac{U_j \times F_{i,j}}{\sum_{j, fuera\ de\ la\ cuenca} (U_j \times F_{i,j})}$$

**Ecuación 15**

$$U_{i,j} = U_j \times F_{i,j}$$

**Ecuación 16**

Donde:

- $U_{i,j}$ : Representa la proporción en la que el usuario  $j$  se ve afectado por un cambio en la disponibilidad de agua para la categoría  $i$  (adimensional).
- $U_j$ : La proporción en que el usuario  $j$  se ve afectado por un cambio en la disponibilidad de agua, es decir, aquél de quien se tomará esta agua adicional, los

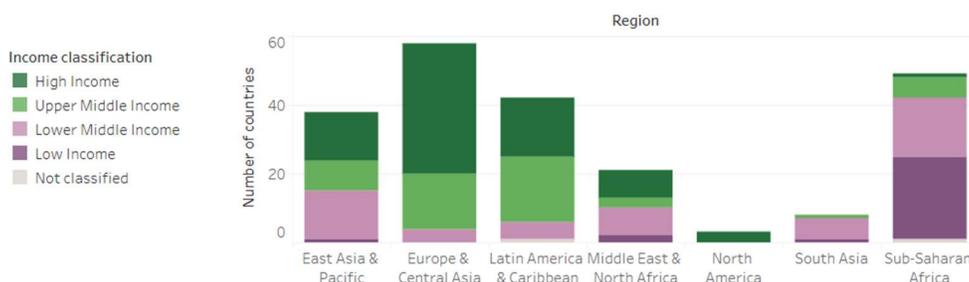
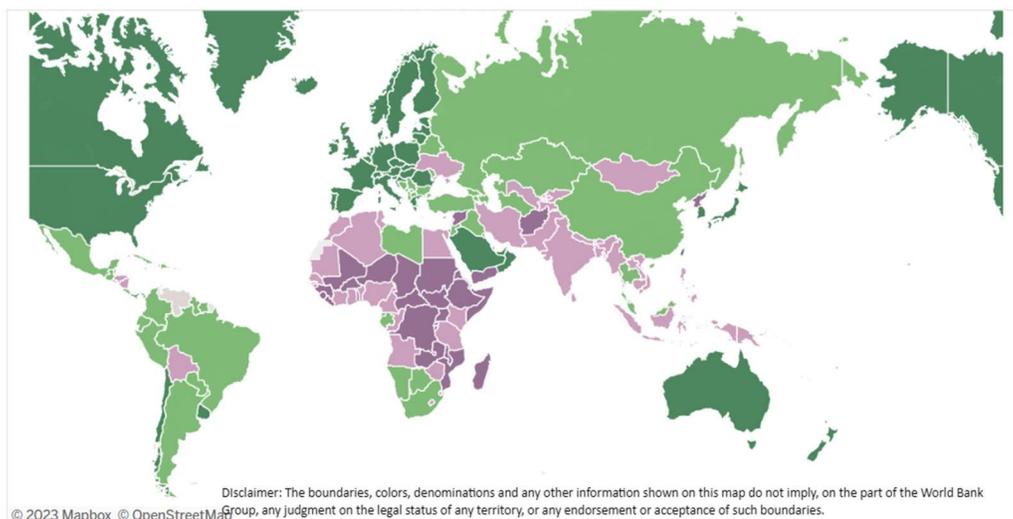
cuales son considerados usuarios marginales (adimensional). **Nota:**

- $F_{i,j}$ : La funcionalidad para la categoría de agua  $i$  para el usuario  $j$  (adimensional). **Nota:** Las categorías de agua presentadas por Boulay et al., (2010) se relacionan con los usuarios mediante un parámetro binario de funcionalidad (1 o 0) que refleja si la categoría de agua es funcional o no para un usuario determinado. Esta se encuentra basada en el uso potencial del agua  $i$  por el usuario  $j$  sin ningún tratamiento adicional.

## Capacidad de adaptación (AC)

Este define si el cambio en la disponibilidad de agua generará escenarios deficitarios o de compensación. El parámetro socioeconómico que fue escogido por Boulay et al., (2011b) para indicar la capacidad de adaptación de un país fue la clasificación del PIB del Banco Mundial (Ver Figura 27).

Su correlación con el acceso a una fuente de agua mejorada o saneamiento mejorado fue reportada por las Naciones Unidas. Se propone que los países de bajos ingresos (PIB < \$1.035/per cápita) no podrán adaptarse a un cambio en disponibilidad de agua y, por lo tanto, sufrirán déficits de agua, mientras que los países de ingresos altos (PIB > \$ 13.205/per cápita) tendrán los medios para compensar completamente este tipo de cambio.



**Figura 27. Capacidad de adaptación basada en la clasificación por país del Banco Mundial para el mundo.**

**Fuente:** Extraído de (Hamadeh et al., 2022).

A los países de ingresos medio bajo (\$1.086/per cápita < PIB < \$4.255/ per cápita) e ingreso medio alto (\$4.256/per cápita < PIB < 13.205), como lo es el caso de Costa Rica (PIB de \$12.472/per cápita), se les atribuye una

capacidad de adaptación proporcional a sus ingresos, lo que significa que, en estos países, se produce tanto compensación como déficit. Esta relación se encuentra dada en la ecuación 17.

$$AC = (9,510^{-5} \times PIB) - 8,910^{-2}, \text{ para } 936 \frac{\$}{\text{cap}} < PIB < 11.455 \frac{\$}{\text{cap}}$$

**Ecuación 17**

## Factor de efecto ( $E_j$ )

Este factor evalúa la importancia de los impactos en la salud humana causados por un déficit de agua para el usuario  $j$  para 5 de cada 10 usuarios: doméstico (1, 2 y 3), agricultura y pesca. Si se presenta un déficit de agua para el resto de los usuarios (transporte, hidro, industria, refrigeración y recreación), los impactos solo se

generarán a través de un proceso de compensación cuando ocurran en países capaces de compensar. Esto se refleja en el valor cero de  $E_j$  para estos usuarios.

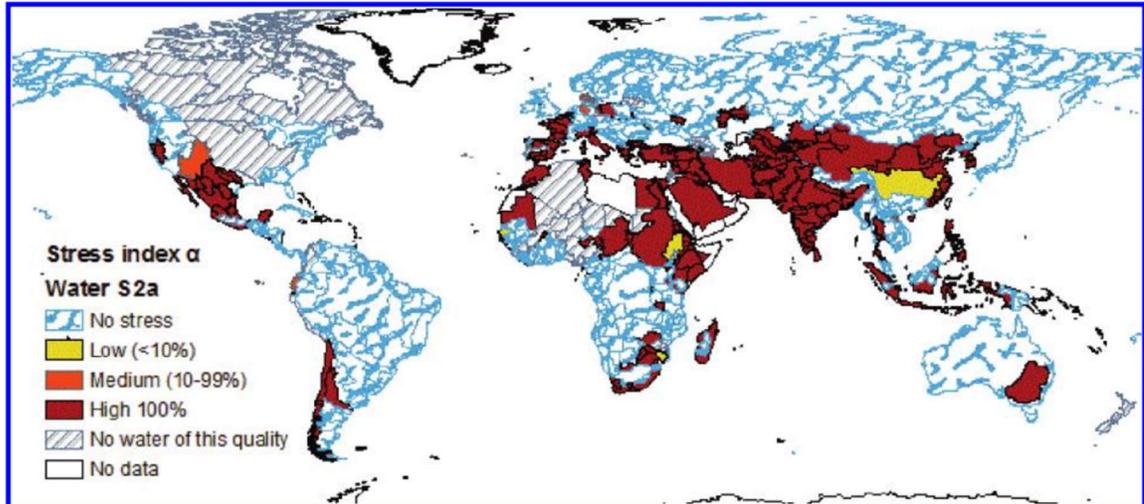
Se calcula dividiendo la relación de las cargas de salud de los problemas de higiene y saneamiento relacionados con el agua por el volumen real de agua deficitaria para usos domésticos (basado en un valor de 50 L/per cápita/día para asegurar bajos problemas de

salud y cubrir la mayoría de los servicios básicos).

Los factores de efecto resultantes son  $6,53 \times 10^{-5}$ ,  $2,02 \times 10^{-5}$  y  $3,11 \times 10^{-3}$  DALY/m<sup>3</sup> para agricultura, pesca y uso doméstico, respectivamente. Por lo tanto, un déficit de uso doméstico es crítico, ya que muestra impactos en la salud que son 2 órdenes de magnitud mayores que los de la agricultura o la pesca.

Junto con los caudales elementales, se proponen los índices de estrés hídrico ( $\alpha_i$ ) para calcular el indicador de estrés hídrico (WSI) en el nivel medio. La figura 28 muestra el índice de estrés hídrico para aguas superficiales de buena calidad ( $\alpha_{2a}$ ).

## Resultados

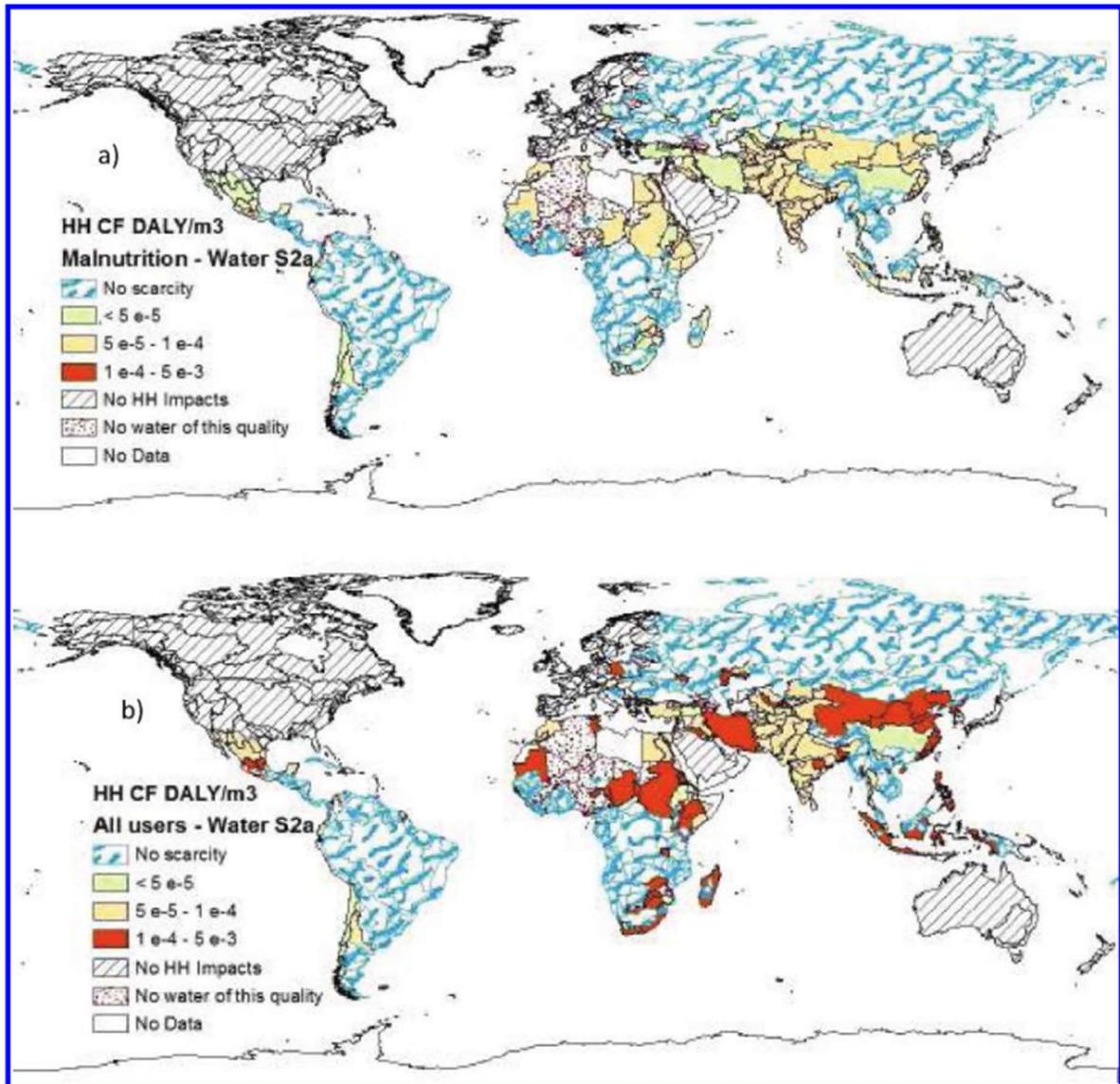


**Figura 28.** Índice de estrés de agua regional a2a, basado en la proporción del uso consuntivo sobre los recursos renovables disponibles, incluidos los datos locales de calidad del agua y modelado en función de los umbrales de estrés aceptados.

**Fuente:** Extraído de (A. M. Boulay, Bulle, et al., 2011).

En la figura 29 se muestran los resultados del impacto potencial a la salud humana (en DALY/m<sup>3</sup>) por el uso de 1 m<sup>3</sup> agua de buena calidad (S2a). Los CF's mostrados en la Figura 29a están basados en la hipótesis de que varios usuarios se ven afectados proporcionalmente a su uso y por lo tanto incluyen impactos provocados por la falta de higiene y saneamiento relacionados con el déficit de agua para uso doméstico e impactos generados por la desnutrición tanto a la agricultura como en la pesca.

Los CF's de la Figura 29b se refieren a los impactos en la salud generados solo por la desnutrición tanto de la agricultura como de la pesca. Como era de esperar, las áreas de altos ingresos como América del Norte, Europa y Australia no muestran impactos directos en la salud humana porque tienen capacidades máximas de adaptación. Sin embargo, generarán impactos potenciales a partir de la compensación.



**Figura 29.** Factores de caracterización de la salud humana para aguas superficiales de buena calidad (categoría S2a) en DALY/m<sup>3</sup>

**Fuente:** Extraído de (A. M. Boulay, Bulle, et al., 2011b).

**Notas:** (a) considerando que la agricultura es el único usuario marginal afectado (junto con la pesca), lo que lleva a la desnutrición y (b) considerando que todos los usuarios se ven afectados proporcionalmente a su uso (es decir, incluir también a los usuarios domésticos y, por lo tanto, considerar las cargas de salud debido a la falta de higiene y saneamiento además de la desnutrición).

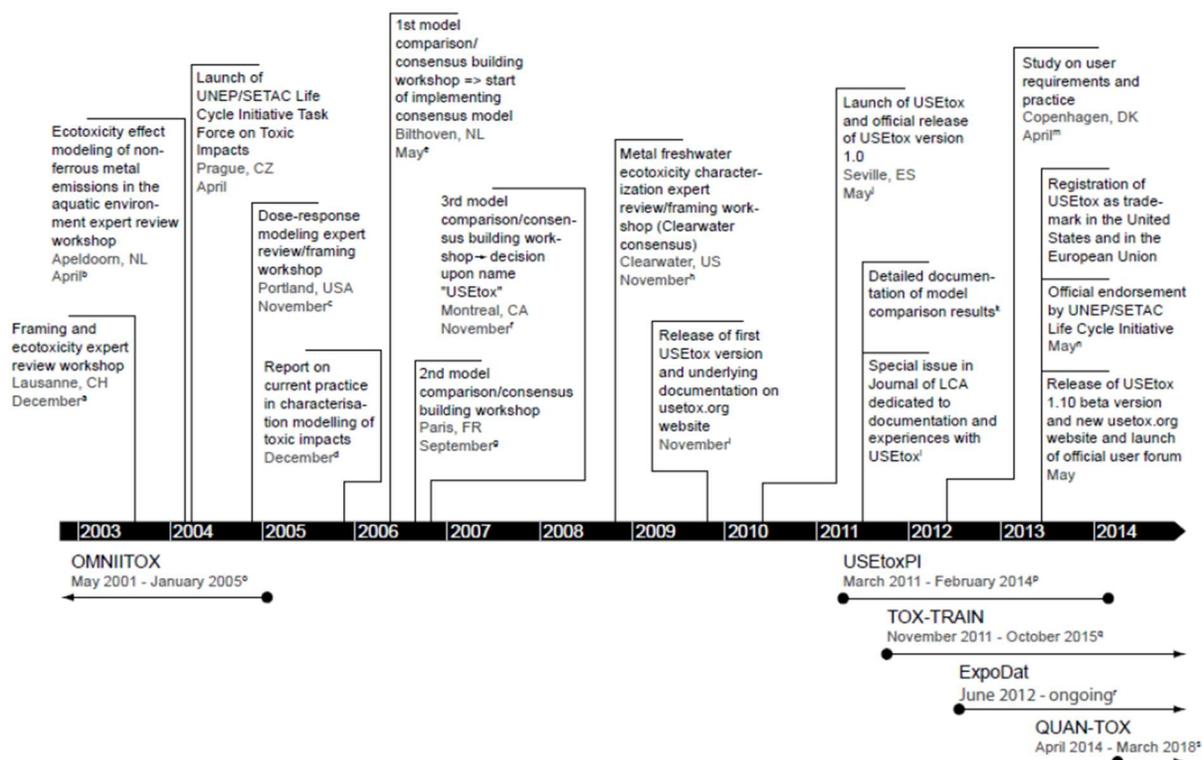
## Método USEtox, para ecotoxicidad en agua dulce

En 2005 una comparación comprensiva de la caracterización de los modelos de toxicidad en

LCA fue iniciada desarrollado por un equipo del Programa de Ambiente de las Naciones Unidas (UNEP, por sus siglas en inglés) y por la

Sociedad de Toxicidad Ambiental y Química (SETAC, por sus siglas en inglés). Inicialmente esta iniciativa abarcó directamente los siguientes desarrolladores de modelos; CalTOX, IMPACT 2022, USES-LCA, BETR, EDP, WATSON y EcoSense (Rosenbaum et al., 2008).

Posteriormente, en su versión 2.0, se incluyeron nuevos métodos que no se encontraban al momento de efectuar la primera versión del modelo, estos se detallan en la Figura 30.



**Figura 30.** Cronología del desarrollo científico y la difusión de USEtox.

**Fuente:** Extraído de (USEtox® International Center et al., 2017).

Los profesionales a cargo tuvieron un total de tres talleres de trabajo, donde los participantes encargados de realizar la comparación de los modelos identificaron los problemas claves a evaluar, estas son destino, exposición y efecto. Esto se realizó mediante una comparación de los factores de caracterización finales y seleccionaron las salidas intermedias para destino, exposición humana y efectos tóxicos, esto fue aplicado con un set de datos de prueba en todos los modelos.

Finalmente, el modelo USEtox fue desarrollado siguiendo los siguientes principios:

1. Parsimonia: Tan simple como sea posible, tan complicado como sea necesario.

2. Mimetismo: Sin diferir más de los modelos originales que estos difieren entre sí.
3. Evaluación: Proporcionar un depósito de conocimiento a través de la evaluación frente a un amplio conjunto de modelos existentes.
4. Transparencia: Estar bien documentado, incluido el razonamiento para la elección del modelo.

El modelo de consenso científico USEtox (nombrado en reconocimiento a la Iniciativa del Ciclo de Vida de UNEP-SETAC bajo la cual fue desarrollado) es el resultado principal del ejercicio de comparación, y su nombre también transmite

el mensaje de que las categorías de toxicidad deben incluirse en el LCA.

El modelo USEtox incluye una serie de parámetros, sin embargo, para el actual proyecto, solamente es de interés los efectos ecotoxicológicos en agua dulce. Por lo que esta sección determinará únicamente el factor de efecto toxicológico de agua dulce que relaciona los efectos sobre las especies de ecosistemas de agua dulce con la fracción biodisponible de sustancias químicas en agua dulce (Ver Figura 22).

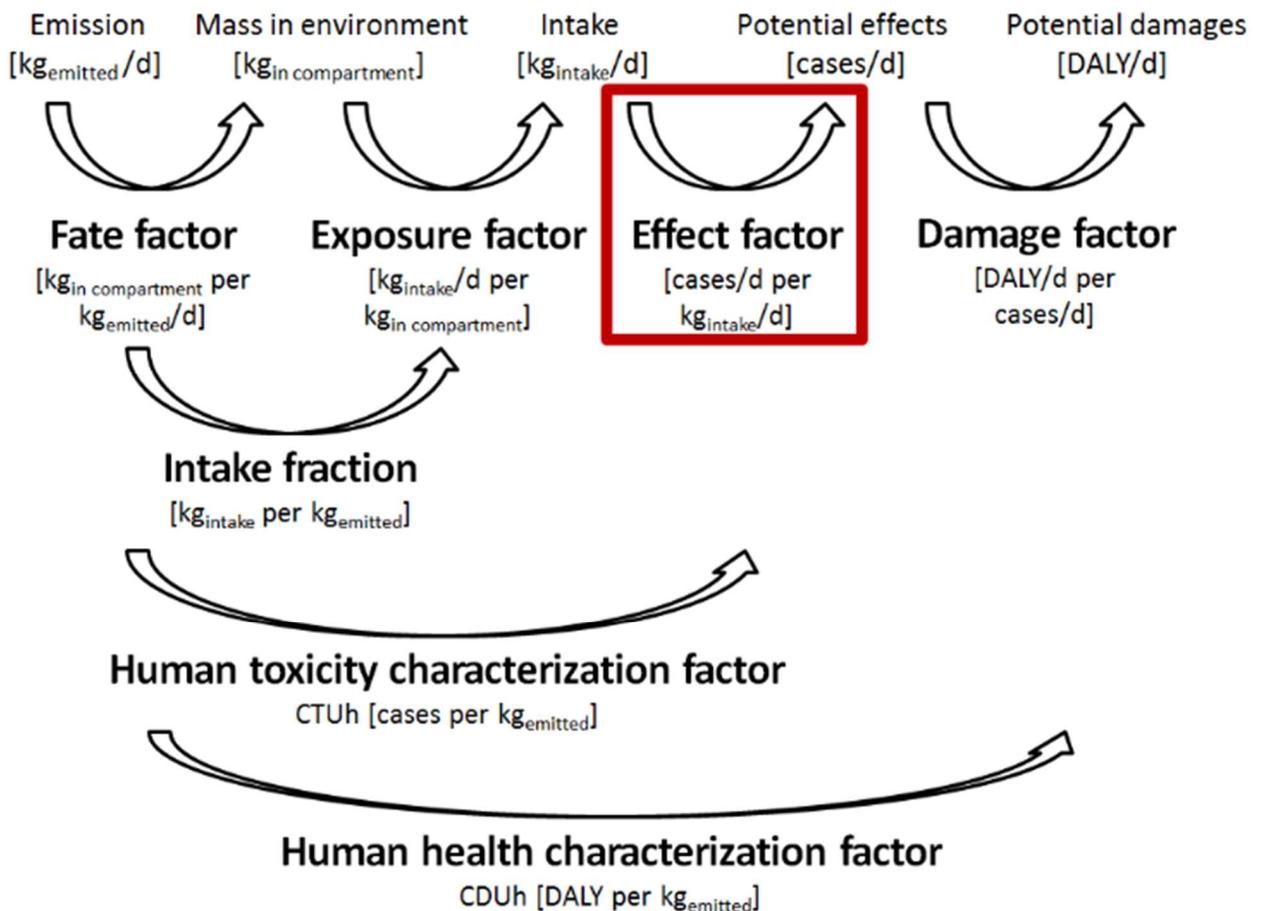
Las explicaciones de los símbolos e índices se dan en el Apéndice A y los parámetros correspondientes en USEtox se dan en los Apéndices B a E del documento oficial USEtox Version 2,0 (ver Anexo 2, para una información más completa se debe consultar directamente el

documento) (USEtox® International Center et al., 2017).

## Descripción del modelo

USEtox calcula los factores de caracterización para la toxicidad humana y la ecotoxicidad de agua dulce. Como se demuestra en la Figura 31, la evaluación toxicológica implica una cadena de causa-efecto emitida que vincula las emisiones con los impactos a través de varios pasos, los cuales en conjunto resultan en el Factor de caracterización por ecotoxicidad:

1. Factor de destino ambiental.
2. Factor de exposición.
3. Factor de efecto.



**Figura 31.** Descripción simbólica del marco de emisión por daño para impactos eco-toxicológicos caracterizados con USEtox 2.0.

**Fuente:** Extraído de (USEtox® International Center et al., 2017).

El factor de efecto eco-toxicológico representa la toxicidad crónica de la sustancia para un ecosistema de agua dulce. La toxicidad crónica se deriva de observaciones acerca de la sensibilidad de una muestra de especies de las que puede estar compuesto un ecosistema.

Las observaciones de sensibilidad que se necesitan para derivar el factor de efecto se componen del conjunto de resultados de pruebas disponibles, que suelen ser experimentos de laboratorio que exponen organismos de prueba de agua dulce de diferentes niveles tróficos en el ecosistema a la sustancia química en condiciones controladas y reproducibles en pruebas preferiblemente estandarizadas (USEtox® International Center et al., 2017).

Se realiza una selección a partir de los datos de toxicidad disponibles, que pueden representar exposiciones agudas o crónicas en comparación con el ciclo de vida del organismo (aspecto temporal) o puntos finales de respuesta media, baja o nula, como la NOEC

(Concentración sin efecto observado) , LOEC (Concentración de efecto más baja observada), EC10 (una concentración de efecto que causa un efecto del 10 % en un rasgo de historia de vida vital) o, a menudo, EC50 (ibidem, que causa un efecto del 50 % en un rasgo de historia de vida vital).

Para revelar los posibles efectos crónicos de una sustancia en el ecosistema, se da preferencia a los resultados de pruebas crónicas o sub - crónicas para LCIA con EC50 (Larsen & Hauschild, 2007). Los motivos de esto son, entre otros, la solidez estadística de derivar el nivel de respuesta del 50% y, no menos importante, la interpretación ecológica del criterio de valoración EC50 en términos de impactos que son significativos y pueden observarse en campo expuesto.

En la Tabla 12 se muestran los requisitos de duración de la exposición de USEtox para identificar pruebas crónicas y sub - crónicas:

<b>Tabla 12.</b> Duración necesaria para la clasificación de una prueba como aguda, sub - crónica o crónica.			
	Agudo	Sub - crónico	Crónico
Vertebrados	< 7 días	≥ 7 días; < 32 días	≥ 32 días
Invertebrados	< 7 días	≥ 7 días; < 21 días	≥ 21 días
Plantas	< 7 días	-	≥ 7 días
Algas	< 3 días	-	≥ 3 días

**Fuente:** Extraído de (USEtox® International Center et al., 2017).

Los resultados de las pruebas de ecotoxicidad se notifican como Concentraciones de efecto EC<sub>x</sub>, donde el efecto puede ser la mortalidad, la inmovilización, la reproducción u otros criterios de valoración y 'x' se refiere a la fracción de los organismos de prueba que muestran el efecto.

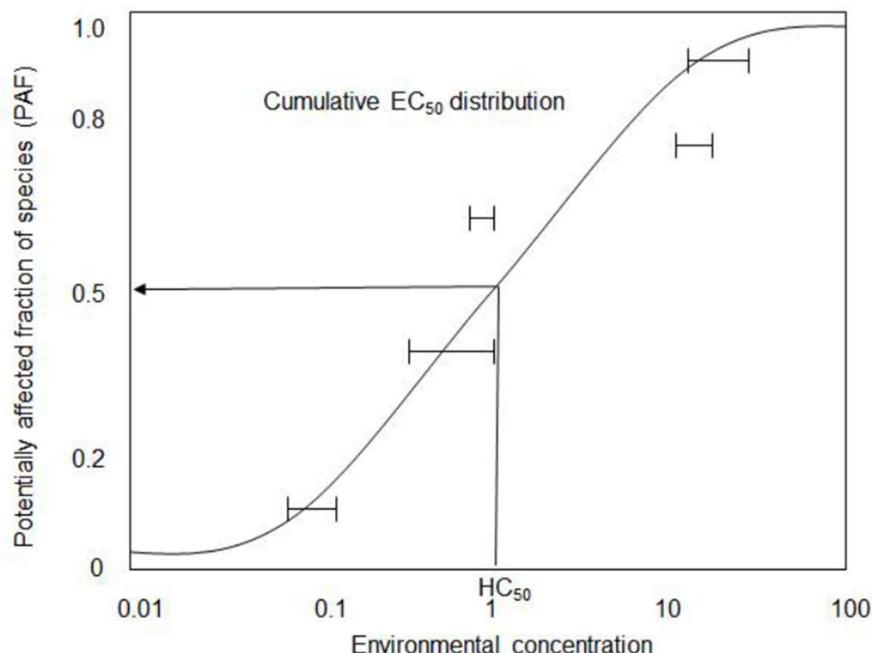
Los resultados de EC<sub>50</sub> se determinan en el medio de la curva de efecto de concentración del experimento y, por lo tanto, son más sólidos que los resultados de las pruebas para niveles de efecto más bajos. Por lo tanto, se utilizan para la determinación del factor de efecto eco-toxicológico para minimizar las incertidumbres en el factor de efecto.

Tras la recopilación del conjunto de resultados de la prueba, la distribución de los resultados de la prueba para el producto químico

en diferentes organismos de prueba se muestra en la curva de distribución de sensibilidad de especies (SSD) (Posthuma et al., 2002).

Un SSD de EC50s crónico (SSD<sub>EC50</sub>, crónico) representa la fracción de especies en el ecosistema que se ven afectadas por encima de su valor de EC50 crónico (Y) en función de la concentración biodisponible (X) de la sustancia química. En la Figura 32 se muestra un ejemplo de una curva de SSD.

El punto medio de SSD se ha denominado HC50, la concentración peligrosa para el 50 % de las especies. En USEtox el HC50 es pues específicamente: el HC50<sub>EC50</sub><sup>b</sup>. Este valor USEtox HC<sub>50</sub> de la sustancia química indica la concentración correspondiente al 50 % de las especies expuestas por encima de su valor EC<sub>50</sub>.



**Figura 32.** Curva de distribución de sensibilidad de especies (SSD) que muestra la distribución acumulada de los valores de EC50 en las especies analizadas para un producto químico (los rangos de EC50 de prueba representan la variación entre los datos disponibles para una especie determinada).

**Fuente:** Extraído desde (USEtox® International Center et al., 2017).

El factor de efecto en USEtox se basa en el nivel de HC50 (aquí: la media geométrica de EC50) en lugar del nivel de HC5 o PNEC utilizado en la evaluación reglamentaria del riesgo químico, reflejando de hecho la estimación más probable de la sensibilidad al nivel de EC50 en lugar de las especies más sensibles.

Como fórmula, el factor de efecto para la ecotoxicidad acuática ha sido definido por (Gandhi et al., 2010; Rosenbaum et al., 2008)) como:

$$EF_{eco} = \frac{f_{eco}}{HC_{50}}$$

**Ecuación 18**

Donde:

- $EF_{eco}$ : Factor de efecto eco-toxicológico para ecosistemas acuáticos de agua dulce [PAF m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>]
- $f_{eco}$ : Multiplicador para ecosistemas [-]. Definido con un valor predeterminado de 0.5 según (USEtox® International Center et al., 2017).

- $HC_{50}$ : Media geométrica de EC50 crónicas para especies de agua dulce [kg m<sup>-3</sup>].

La concentración peligrosa a la que el 50% de las especies en el ecosistema de agua dulce están expuestas por encima de su valor de EC50 se determina como la media geométrica de los valores de EC50 acuáticos crónicos:

$$HC_{50} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n EC_{50,i}} = 10^{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log_{10} \left( \frac{EC_{50,i}}{1000} \right)\right]}$$

**Ecuación 19**

Donde:

- $HC_{50}$ : Media geométrica de EC50 acuáticos crónicos [kg m<sup>-3</sup>].
- $HC_{50,i}$ : Concentración a la que el 50% de los organismos de prueba de la especie *i* muestran efectos [mg L<sup>-1</sup>].
- 1000: Factor de conversión de mg/L a g/L [mg g<sup>-1</sup>].

## Conversión y selección de datos

El procedimiento para el cálculo de los factores de efecto de ecotoxicidad se puede resumir de la siguiente manera:

1. Reunir datos experimentales de EC50 para el producto químico de interés;
2. Especificar, para cada valor de EC50, si se basa en una exposición crónica o aguda (ver Tabla 9) y dar preferencia a los valores de EC50 crónicos;
3. Cuando falten datos crónicos, utilizar los datos de EC50 agudos disponibles para derivar el EC50 crónico equivalente por especie dividiendo por un valor ACR de 2 (Rosenbaum et al., 2008) a menos que se disponga de otra información.
4. Cuando se disponga de más de un punto de datos de EC<sub>50</sub> para una especie, eliminar los posibles valores atípicos y calcule el valor de EC<sub>50</sub> representativo para la especie como la media geométrica del resto de los valores de EC<sub>50</sub> disponibles (mg/L) para esa especie  $i$  ( $EC_{50,i} = 10^{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log_{10}(\frac{EC_{50,i}}{1000})}$ ) para  $j \in \{1, \dots, n\}$  valores individuales de EC50 para la especie  $i$ ).
5. Siguiendo la Ecuación 17, tomar el logaritmo de la media geométrica EC50 por especie y calcule el promedio de los valores logarítmicos. Este promedio es igual al  $\log_{10} HC_{50}$  ( $\log_{10} \text{ kg/m}^3$ ).
6. Implementar este valor en la columna AD de la hoja "Datos de la sustancia" del archivo del modelo USEtox o de los archivos de la base de datos de sustancias.
7. Siempre tener cuidado con las unidades.

USEtox aplica preferentemente los valores crónicos de Payet ((Payet, 2004), siempre que representen valores de EC50 medidos. Se da segunda prioridad a los datos agudos de Payet (2004), aplicando una mejor estimación de la relación agudo-crónico (ACR) de 2 para sustancias orgánicas y 2,2 para pesticidas.

## Método ReCiPe para Eutrofización en agua dulce

El método ReCiPe abarca categorías de indicadores de impacto armonizados en puntos medios y finales (impactos globales). Este fue desarrollado por diversos institutos y universidades de Holanda (RIVM, CML, Pré consultants, Radboud Universiteit Nijmegen, postCE Delft). El objetivo principal de ReCiPe es lograr la alineación de estos dos métodos para la EICV; el CML 2002 y el Eco-indicator 99 (Huijbregts et al., 2016).

El método presenta factores de acuerdo con tres perspectivas (Ver Tabla 1.3 de (Huijbregts et al., 2017)). Estas perspectivas representan un conjunto de opciones de evaluación como perspectiva temporal o las expectativas de que una gestión sea adecuada o que el desarrollo de la tecnología del futuro pueda evitar futuros daños y perjuicios (Farell, 2013; Huijbregts et al., 2016).

1. Individualista (I): Esta perspectiva es basada a corto plazo. El tipo de impacto es evidente y existe tecnología para la adaptación. Evalúa un horizonte de 20 años para impactos de acidificación y eutrofización, y de 100 años para toxicidad humana y ecotoxicidad acuática.
2. Hierarchist (H): Perspectiva que se basa en los principios de una política más común en cuanto a plazos. Evalúa un horizonte de 100 años para impactos de acidificación y eutrofización, y toma un horizonte infinito para impactos en toxicidad humana y ecotoxicidad acuática. Modelo de consenso, tan a menudo encontrado en modelos científicos, por lo que se considera el modelo predeterminado.
3. Egalitarian (E): Perspectiva de principio precautorio; de largo plazo. Algunos impactos no están claramente

reconocidos. Evalúa un horizonte de 500 años para impactos de acidificación y eutrofización, y toma un horizonte infinito para impactos en ecotoxicidad acuática y toxicidad humana.

El método ReCiPe como tal propone una serie de indicadores de punto medio, los cuales se pueden apreciar desarrolladamente en la Tabla 1.4 de Huijbregts et al. (2017). Existe una diferencia en la unidad del indicador para cada categoría y la unidad del factor de caracterización de punto medio (CFm).

Esto se debe a que se ha introducido una sustancia de referencia, por lo que el factor de caracterización es un número adimensional que expresa la fuerza de una cantidad para una sustancia en relación con la de la sustancia de referencia.

Para el caso de la eutrofización de agua dulce, se toma como indicador el aumento de fósforo presente en el agua con unidades de

- Los factores de destino se derivaron utilizando un modelo de destino global de última generación para el fósforo en lugar de un modelo de destino europeo.
- El factor de efecto se actualizó con base en Azevedo et al., (2013b, 2014), incluyendo especies heterótrofas y autótrofas.
- Los factores agregados del país y del mundo se recalcularon en función de los datos de población actualizados (año 2015)

La eutrofización de agua dulce se produce debido a la descarga de nutrientes en el suelo o en las masas de agua dulce y el consiguiente aumento de los niveles de nutrientes, es decir, fósforo y nitrógeno. Los impactos ambientales

año  $\times m^3$ . El factor de caracterización medio es la potencial eutrofización de agua dulce (FEP, por sus siglas en inglés) y se define en kg P (fósforo) en agua dulce (Huijbregts et al., 2017).

## Descripción del modelo

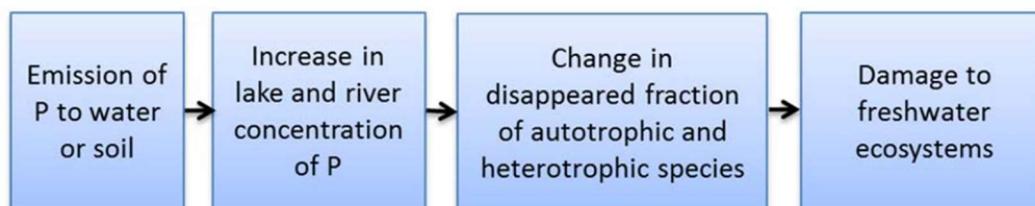
El modelo de eutrofización de agua dulce del método ReCiPe2016 en su versión v1.1 se encuentra basado principalmente en Helmes et al., (2012), Azevedo et al., (2013a), Azevedo et al. (2013b) y Azevedo (2014). Algunos de los cambios de esta versión respecto a ReCiPe2008 son:

- El factor de caracterización europeo fue reemplazado por un factor promedio mundial, basado en factores específicos de la red.

relacionados con la eutrofización de agua dulce son numerosos.

Estos siguen una secuencia de impactos ecológicos compensados por el aumento de las emisiones de nutrientes en el agua dulce, lo que aumenta la absorción de nutrientes por parte de organismos autótrofos, como cianobacterias y algas, y especies heterótrofas, como peces e invertebrados. En última instancia, esto conduce a una pérdida relativa de especies.

En este modelo, los impactos de las emisiones al agua dulce se basan en la transferencia de fósforo del suelo a los cuerpos de agua dulce, su tiempo de residencia en los sistemas de agua dulce y en la fracción potencialmente desaparecida (PDF) tras un aumento en las concentraciones de fósforo en el agua dulce (Figura 33).



**Figura 33.** Cadena de causa y efecto para las emisiones de fósforo que causan la pérdida de riqueza de especies de agua dulce.

**Fuente:** Extraído desde (Huijbregts et al., 2017).

En este modelo se utilizan los factores de destino (FF) descritos por Helmes et al., (Helmes et al., 2012) para las emisiones de fósforo al agua dulce, basados en un nuevo modelo de destino global en una resolución de cuadrícula de medio grado. Los procesos de eliminación que se tienen en cuenta son la advección específica de la red, la retención de fósforo y el uso del agua. El FF representa el tiempo de residencia neto en el compartimento de agua dulce (en años).

El FF acumulativo de una emisión en una celda de la cuadrícula es la suma de los FF de la celda individual de emisión y de todas las celdas de la cuadrícula del receptor aguas abajo j. Los factores de destino agregados del país y del mundo se determinaron con base en estimaciones de población cuadriculadas, que sirvieron como indicador de la intensidad de emisión de P en una cuadrícula de 0,5°x0,5° con las estimaciones de población del año 2015, estos fueron tomados de CIESIN et al., (CIESIN, 2005) y ajustados para coincidir con los totales de las Naciones Unidas, además se usaron para este propósito.

Con este método se obtuvo un factor de destino promedio mundial de las emisiones de P al agua dulce durante 84 días (0,23 años). Para las emisiones a los suelos agrícolas, los FF se multiplicaron por 0,1, ya que normalmente el 10 % de todo el P se transporta desde el suelo

agrícola a las aguas superficiales (Bouwman et al., 2009). Las emisiones al agua de mar no conducen a la eutrofización del agua dulce ya que no hay transporte del agua de mar al agua dulce.

$$FEP_{x,c,i} = \frac{FF_{x,c,i}}{FF_{P,fw,world\ average}}$$

**Ecuación 20**

Donde:

- $FEP_{x,c,i}$  = Es el potencial de eutrofización en agua dulce de la sustancia x para la emisión al compartimento c en la celda i (en kg P en equivalentes de agua dulce/kg de sustancia x al compartimento c en la cuadrícula i)
- $FF_{x,c,i}$  = Es el factor de destino de la sustancia x emitida al compartimento c en la celda de cuadrícula i (años)
- $FF_{P,fw,world\ average}$  = Es el factor de destino promedio mundial de la emisión de P al agua dulce (85 días).

Los FEP promedio mundiales resultantes, se presentan en la Tabla 13 y para los factores específicos del país, estos se pueden encontrar en la Tabla 14.

<b>Tabla 13.</b> Potenciales de eutrofización de agua dulce para fósforo y fosfato en agua dulce, suelos agrícolas y agua de mar (en kg P en equivalentes de agua dulce/kg), iguales para todas las perspectivas.		
Sustancia	Compartimento de emisiones	FEP (kg P eq en agua dulce / kg)
Fósforo (P)	Agua dulce	1,00
	Suelo agrícola	0,10
	Agua de mar	0
Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	Agua dulce	0,33
	Suelo agrícola	0,033
	Agua de mar	0

**Fuente:** Extraído de (Huijbregts et al., 2017).

<b>Tabla 14.</b> Potenciales de eutrofización de agua dulce específicos para Costa Rica para el daño a los ecosistemas de agua dulce (kg P-equivalentes/kg)				
País	Emisiones en agua dulce		Emisiones al suelo	
	P	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	P	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Costa Rica	1,16E-01	7,77E-02	1,16E-02	3,77E-03

**Fuente:** Extraído desde la Tabla S4.3 de (Huijbregts et al., 2017).

## Recopilación de datos de inventario de huella de agua

El análisis del inventario de ciclo de vida es la fase del ciclo de vida que más esfuerzo requiere en términos de tiempo y recursos. Además, el análisis como tal requiere datos de calidad para una correcta cuantificación de la huella de agua, ya que, a mejor calidad de la información, menor es la incertidumbre de los resultados.

COSUDE y CADIS han determinado los principales obstáculos para la obtención de datos (CADIS & COSUDE, 2016):

- La información disponible no es representativa geográfica o estadísticamente.
- La información que se requiere no se conoce.
- Los mecanismos de medición y seguimiento son insuficientes.
- Confidencialidad de la información.

Estos obstáculos se presentan por un poco prestación de importancia hacia el recurso hídrico. A continuación, se muestran las fuentes de información locales de utilidad cuando se desarrollan estudios de agua. Además de esto también se mencionan una serie de bases de datos de ciclo de vida, que pueden consultarse para complementar el inventario de huella de agua.

## Fuentes de información disponibles

## Instituciones relacionadas con la gestión del agua y oficinas de estadística

La fuente de información más usada para el desarrollo de estudios de huella de agua en América Latina son las instituciones gubernamentales, las cuales pueden proveer datos acerca de distintos temas, entre ellos:

- Porcentaje de consumo de agua por sector.
- Cobertura de agua potable y de tratamiento de agua residual.
- Datos de disponibilidad de agua.
- Datos directos de estaciones de medición en las cuencas.
- Datos de caudales de ríos y nivel freático de pozos.
- Volumen de agua concesionada.
- Información del balance hídrico de las cuencas nacionales.

Otra fuente de información con un importante valor se encuentra en las oficinas de estadística de cada país con datos de población, cobertura de agua potable, saneamiento, uso de suelo y en general estadísticas socioeconómicas por región.

Los sistemas gubernamentales de transparencia de cada país, por su parte, también constituyen una posible fuente de datos útiles para los estudios de huella de agua cuando esta no se encuentra directamente accesible en sitios de internet o reportes de instituciones gubernamentales.

Para el caso de Costa Rica, COSUDE y CADIS presenta un listado de las instituciones relacionadas con la gestión del agua y oficinas de estadística, especificadas en la Tabla 15.

<b>Tabla 15.</b> Instituciones relacionadas con la gestión del agua y oficinas de estadística en Costa Rica. Fuente:(CADIS & COSUDE, 2016)		
<b>Ministerio de Ambiente y Energía – Dirección de aguas</b>		
Información sobre concesiones, pozos, permisos, usos de las concesiones.		<a href="http://minae.go.cr">Ministerio de Ambiente y Energía - República de Costa Rica (minae.go.cr)</a>
<b>Instituto de Acueductos y Alcantarillados</b>		
Datos sobre caudales servidos de agua potable, calidad del agua potable, porcentaje de la población con cobertura del servicio de agua potable, caudal de fuentes captadas para uso potable.		<a href="http://aya.go.cr">Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (aya.go.cr)</a>
<b>Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica</b>		
Series de datos hidro meteorológicos. Fuentes de información consultadas para estudios de HH de Café, Banano y Arroz.		<a href="#">Inicio - IMN</a>
<b>Ministerio de Agricultura y Ganadería</b>		
Boletín estadístico N°27. Fuentes de información consultadas para estudios de HH de Café, Banano y Arroz		<a href="http://mag.go.cr">Ministerio de Agricultura y Ganadería (mag.go.cr)</a>
<b>Instituto del Café de Costa Rica</b>		

Fuentes de información consultadas para estudios de HH de café		<a href="#">ICAFE – Instituto del Café de Costa Rica</a>
<b>Instituto Regional para el Estudio de Sustancia Tóxicas</b>		
Base de datos: aplicación de Nitrógeno por hectárea en cultivos. Fuente de información consultadas para estudios de HH de Café, Banano y Arroz.		<a href="#">El Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas de la Universidad Nacional (IRET-UNA)</a>
<b>Ministerio de Salud</b>		
Entidad encargada legalmente de que se realicen tratamientos para las aguas residuales en el país.		<a href="#">Sitio Web del Ministerio de Salud Costa Rica. Bienvenido</a>
<b>FONAFIFO</b>		
Encargado de realizar los pagos por servicios ambientales relacionados con el recurso hídrico		<a href="#">FONAFIFO   Sitio Web</a>
<b>Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento</b>		
Información de Agua Subterráneas y Riego encargado de identificar los acuíferos y su vulnerabilidad.	<b>SENARA</b>	<a href="#">Senara</a>
<b>Instituto Nacional de Estadística y Censos</b>		
Información sobre la población con acceso al agua potable, información que actualiza con cada censo nacional.		<a href="#">Inicio (inec.cr)</a>

**Fuente:** Extraído de (CADIS & COSUDE, 2016).

# Bases de datos de ciclo de vida de agua

Las bases de datos de ciclo de vida son útiles para obtener datos de consumo de materiales y emisiones relacionadas al producto que se está evaluando con un enfoque de ciclo de vida, además, algunas proporcionan el balance de agua.

Para el caso de la construcción, este tipo de bases de datos resultan muy atractivos como una primera aproximación y una muy acertada, por lo que con un buen inventario de los materiales de construcción de una vivienda

puede ser analizado de forma más sencilla y práctica con estos datos.

No se debe dejar de lado el hecho de que lo ideal sería que cada compañía dedicada a la extracción y manufactura de las materias primas realizaran sus propias huellas de agua, para así utilizar datos reales y no estimados.

En la Figura 34 se muestra el proceso esquematizado del concepto de balance de agua. La calidad del agua no se considera en el balance, pero sí forma parte del inventario, es decir se deben considerar las emisiones para posteriormente calcular los impactos asociados a la degradación.



**Figura 34.** Balance de agua de un proceso (Adaptado de Fundación Chile, AguaLimpia y Embajada de Suiza - COSUDE, 2016).

**Fuente:** (CADIS & COSUDE, 2016).

Las bases de datos de ciclo de vida más usadas para estudios de huella de agua en la región son: Ecoinvent v3.9 y Quantis water database. Existen otras que se emplean en menor medida como lo son: ELCD, USLCI, Agrifootprint, Input-Output y Water Footprint Data Base.

A pesar de que las bases de datos cuentan con gran cantidad de inventarios de ciclo de vida, en muchos casos a estas les hace falta estar acondicionadas al contexto de América Latina. La falta de información a nivel local, o la poca claridad acerca de la precisión o método de medición de algunos inventarios disponibles en las bases de datos, constituyen obstáculos de la

fase de análisis de inventario de huella de agua (CADIS & COSUDE, 2016).

Por esta razón se identificaron los datos primordiales a adaptar en los conjuntos de datos (datasets) al contexto regional para incrementar la representatividad de los estudios de huella de agua:

- Extracción de agua de acuerdo con la fuente: subterránea, superficial, etc.
- Matriz energética para producción de electricidad.

- Evaporación en represas para países que cuentan con producción de energía hidroeléctrica.
- Porcentaje de tratamiento de agua residual de acuerdo con la región.
- Datos de porcentaje de alcantarillado sanitario.
- Porcentaje de agua que se descarga a los distintos cuerpos de agua.
- El flujo del efluente y del cuerpo de agua receptor.
- Cobertura de acueducto (agua potable).
- Caudal de los ríos proveedores de agua potable.
- Pérdidas de agua entre la producción de agua potable y el agua efectivamente utilizada (facturada).
- Calidad de agua en los ríos de la cuenca evaluada.
- Información del caudal ecológico y el método sugerido para su estimación.
- Codificación transparente y estandarizada para identificación de cuencas y subcuencas en la región, basada en criterios técnicos.

Esta información puede ser encontrada en diversas fuentes en línea, softwares geoespaciales e instituciones, como lo son:

- Google Earth
- Universidades
- Organismos de investigación gubernamentales
- Agencias ambientales estatales y locales
- Informes de cámaras empresariales
- Banco central
- Publicaciones técnicas y científicas indexadas.

## Requisitos de los datos y de la calidad de los datos

Para la recolección de datos para estimar la huella de agua en construcciones, las partes interesadas deberán de tomar en cuenta los siguientes requisitos para describir el flujo de agua que se utilizará en las diversas fases del

ciclo de vida de una construcción, esto según la norma ISO 14046 (2015):

- Cantidades de agua utilizada, esto incluyendo la medición de la liberación y la extracción del agua.
- Tipo de recurso de agua utilizado: Pluvial, agua superficial, agua de mar, agua salobre, agua subterránea (excluyendo agua fósil) y agua fósil.
- Características físicas, químicas y biológicas del agua a utilizar.
- Formas de uso del agua: Evaporación, transpiración, integración en el producto, liberación en diferentes cuencas hidrográficas o en el mar.
- Desplazamiento de agua de un tipo de recurso fuente de agua a otro tipo de recurso de agua dentro de una cuenca hidrográfica, como lo puede ser de agua subterránea a agua superficial o viceversa.
- Emisiones al aire o vertidos al agua y al suelo que impacten en la calidad del agua.

En cuanto a la calidad de los datos, las partes interesadas deberán de incluir una serie de parámetros respecto al agua a utilizar durante la construcción, esto para datos primarios. Los requisitos para la calidad de los datos son:

- Cobertura temporal: En esta sección se deberá de incluir la información referente a las fechas en las que fueron tomados los datos.
- Cobertura geográfica: Se debe indicar el área geográfica donde se recopilan los datos de los procesos unitarios para satisfacer el objetivo del estudio. En una construcción los datos deberán ser tomados en campo.
- Cobertura tecnológica: Deberá especificarse que tecnología se está aplicando para la recolección de datos y si esta consiste en la aplicación de una sola técnica o corresponde a la mezcla de varias tecnologías.
- Precisión: Medida de variabilidad de los datos para cada dato tomado, en este se pueden aplicar diversas medidas de dispersión como

lo son la varianza, desviación estándar, coeficiente de variación, entre otros.

- **Integridad:** Se debe especificar qué datos han sido tomados en cuenta en la evaluación de huella de agua y a que materiales y procesos corresponden, esta se debe de representar como el porcentaje de datos que se han medido o estimado.
- **Representatividad:** Este consiste en la evaluación cualitativa del grado en el cual los datos representan la verdadera población de interés. Esto se realiza mediante la definición de los requisitos anteriores, por ejemplo: cobertura geográfica, cobertura tecnológica, entre otros.
- **Coherencia:** Hace referencia a si la metodología está siendo aplicada de manera uniforme en las fases de ciclo de vida que se están evaluando o si esta varía para cada una de las etapas.
- **Reproducibilidad:** Característica que determina si la información brindada acerca de la metodología y los valores de los datos podrían ser replicados por otro profesional que desee reproducir los resultados que han sido informados.
- **Fuentes de los datos:** Incluyendo los modelos cuando se utilicen (incluyendo

documentación sobre las suposiciones del modelo, variación del modelo y exactitud).

- **Incertidumbre:** Se deben de mencionar los datos, modelos y suposiciones que han sido aplicadas a la evaluación para obtener los resultados.

Respecto a los datos que faltan y las suposiciones tomadas, estos deben documentarse e indicarse claramente, respaldando la decisión que se ha tomado al respecto. La exclusión de datos o la inclusión de suposiciones debería evaluarse. Por último, los resultados de la huella de agua no deben ser alterados mediante compensaciones para evitar sesgar los resultados obtenidos.

## Información sobre descargas de agua y tratamiento

Las características de las descargas de las aguas residuales en la región están relacionadas principalmente con la normatividad y el tipo de actividades económicas. De acuerdo con los decretos y normas vigentes, los parámetros de calidad del agua que se deben de cumplir en la descarga hacia alcantarillado y cuerpos de agua varían.

En la Tabla 16 se muestra un resumen del marco jurídico existente para Costa Rica respecto a parámetros de descargas de agua.

<b>Tabla 16.</b> Marco jurídico relacionado con parámetros de descargas de agua en Cota Rica. Fuente:(CADIS & COSUDE, 2016)	
Normatividad	Descripción
Decreto 39887-S-Minae	Reglamento de aprobación de sistemas de tratamiento de Aguas Residuales.
Decreto N° 39.316/S	Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos.
Decreto 33601	Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales.
Decreto 34431-MINAE	Reglamento del Canon Ambiental por Vertidos.
Decreto 33903	Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales.
Decreto 30480	Determina los principios que regirán la política nacional en materia de gestión de los recursos hídricos.
Decreto 32868	Canon por concepto de aprovechamiento de aguas.
Resolución N°	Requisitos, formulario y trámites que deben cumplir los

R-355-MINAE	administrados para la obtención del Permiso de Vertidos.
Decreto 36304	Modificaciones, Adiciones y Derogaciones al Decreto 33601-S-MINAE

Fuente: Extraído desde (CADIS & COSUDE, 2016).

## Confidencialidad de información y fuentes de información de acceso libre

La principal fuente de información para el desarrollo de los estudios de evaluación de huella de agua es la elaboración del inventario de puerta a puerta. Cuando estos datos son confidenciales, se podría ofrecer la divulgación únicamente del resultado final.

El problema de confidencialidad puede ser resuelto con la firma de convenios al iniciar el estudio de huella de agua; sin embargo, es importante que queden muy claros los términos para la publicación desde el inicio de la colaboración, con acuerdos escritos de la información para evitar contratiempos en fases posteriores del estudio.

Cuando la información no está disponible de manera libre para realizar los estudios se recomienda realizar alguna de estas acciones:

1. Consultar bases de datos de acceso libre.
2. Consultar estudios científicos sobre ACV.

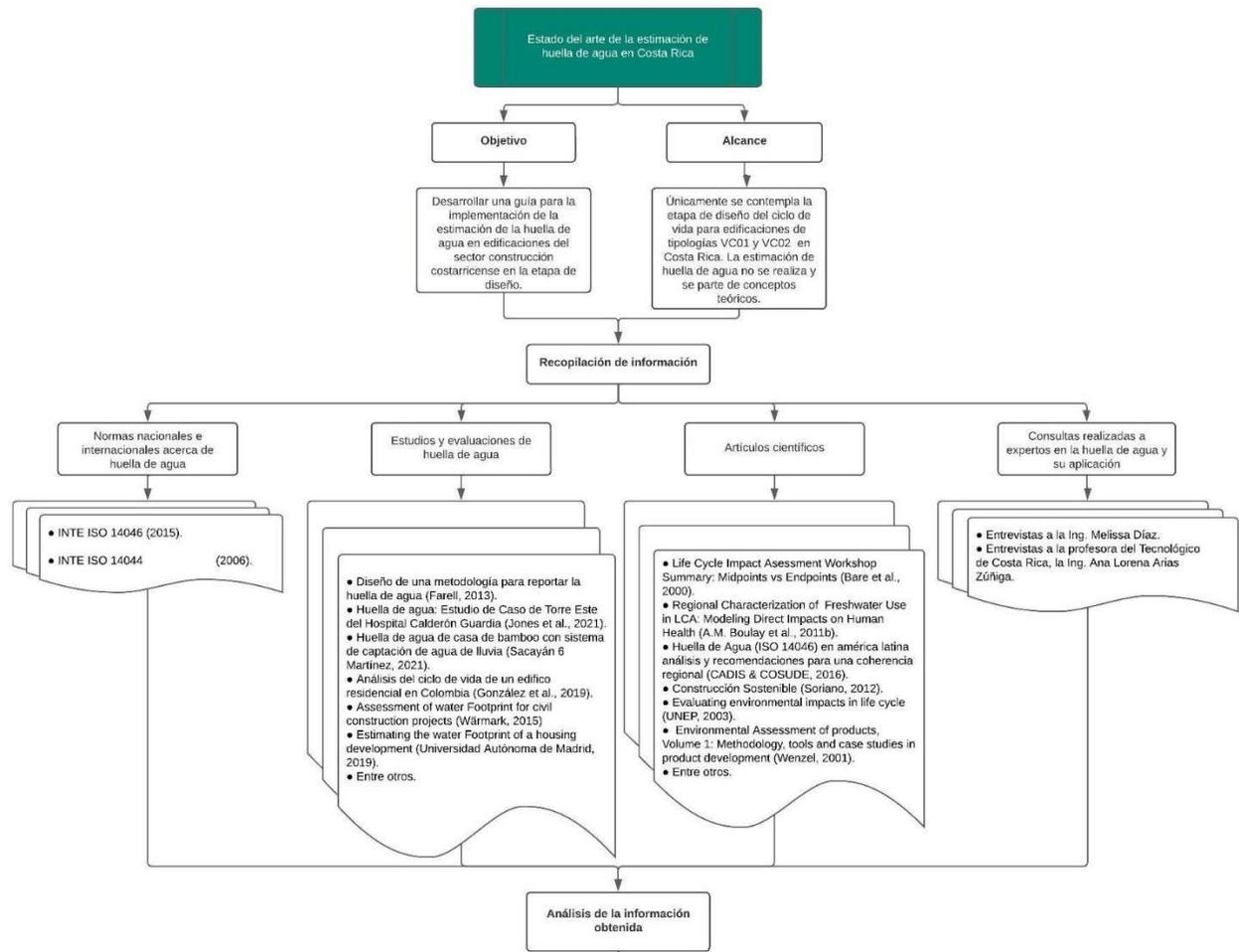
En el caso del presente estudio, se trata de un inventario de la cuna a la puerta, lo que significa que únicamente serán contabilizados los materiales necesarios para la construcción, mas no serán incluidos otros insumos como lo son el consumo propio de agua durante la construcción, los combustibles necesarios para el transporte de los materiales, entre otros. Esto implica que solo se contabiliza el agua correspondiente a la manufactura de los materiales necesarios para construir la obra.

# Metodología

Para la realización del presente proyecto se formularon tres fases, las cuales fueron el análisis del estado del arte de la estimación de huella de agua en Costa Rica, posteriormente, el planteamiento de una metodología para el registro de datos que permitan estimar la huella de agua en edificaciones en su etapa de diseño y finalmente, con base en la información obtenida y la metodología planteada, la generación de una herramienta para el registro de datos para estimar la huella de agua en edificaciones en la etapa de diseño. Es importante destacar que esta investigación tiene un enfoque metodológico cualitativo, según los límites y el alcance de la investigación.

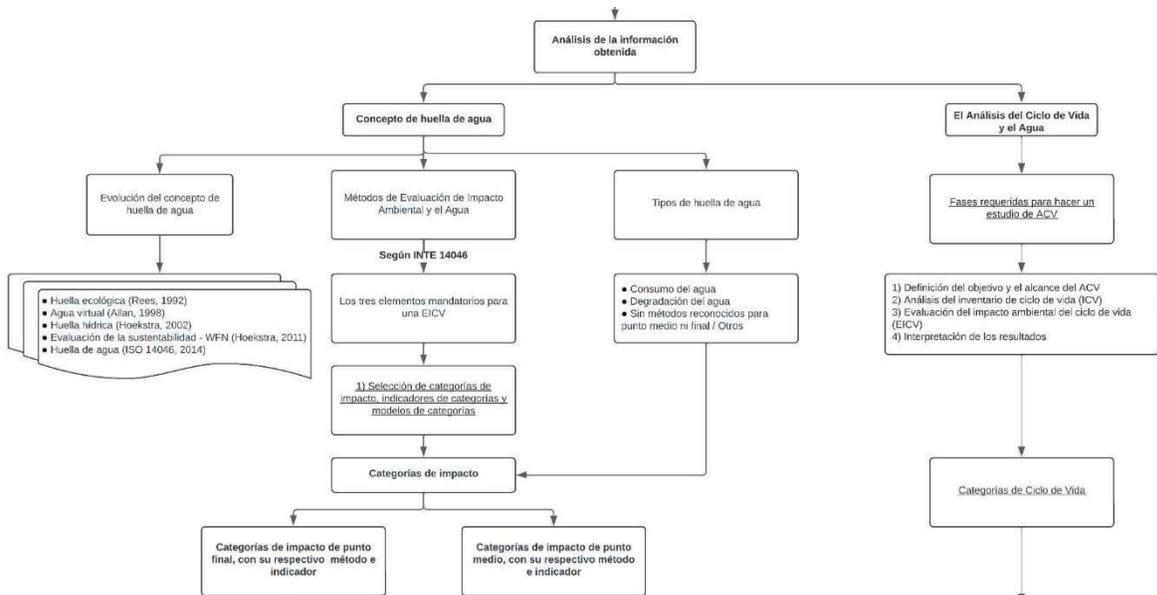
## **Análisis del estado del arte de la huella de agua en Costa Rica**

Para la elaboración del primer objetivo se realizó una búsqueda de información a nivel nacional e internacional, con el fin de identificar los conceptos básicos acerca de la huella de agua, que deben ser tomados en cuenta para su estimación. A continuación, en las Figura 35, 36, 37 y 38 se muestra el proceso de investigación realizado (En el Apéndice 2 se muestra el diagrama de flujo completo):

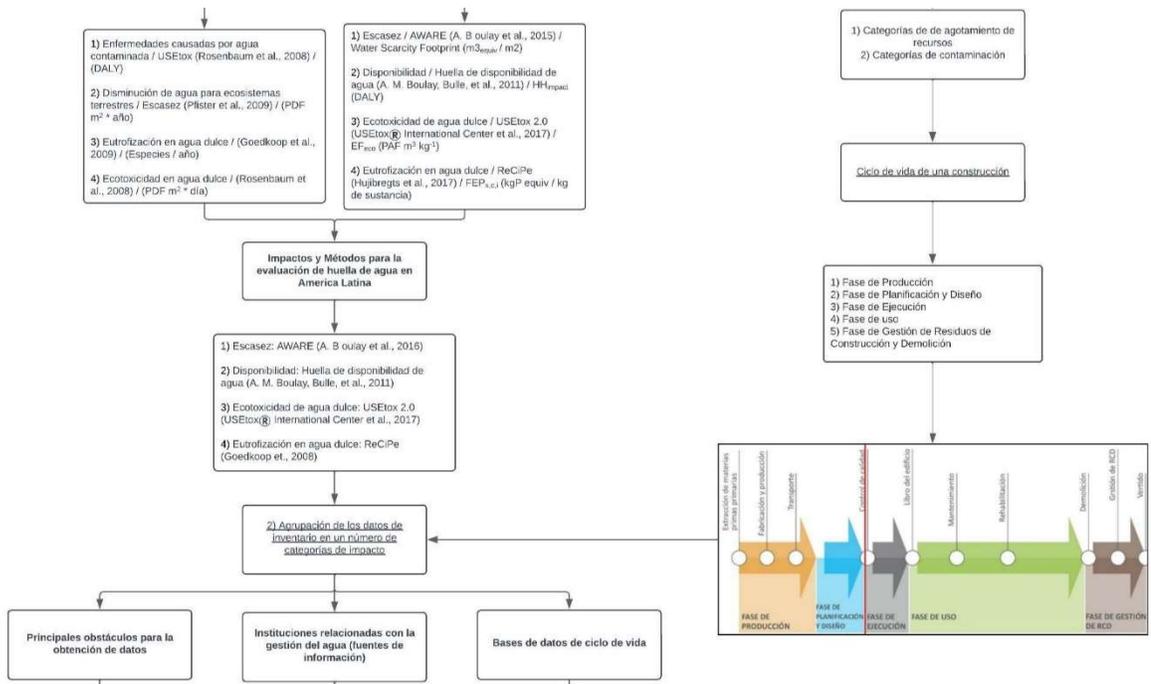


**Figura 35.** Proceso de investigación de la huella de agua para su implementación en el sector construcción costarricense – Parte 1.

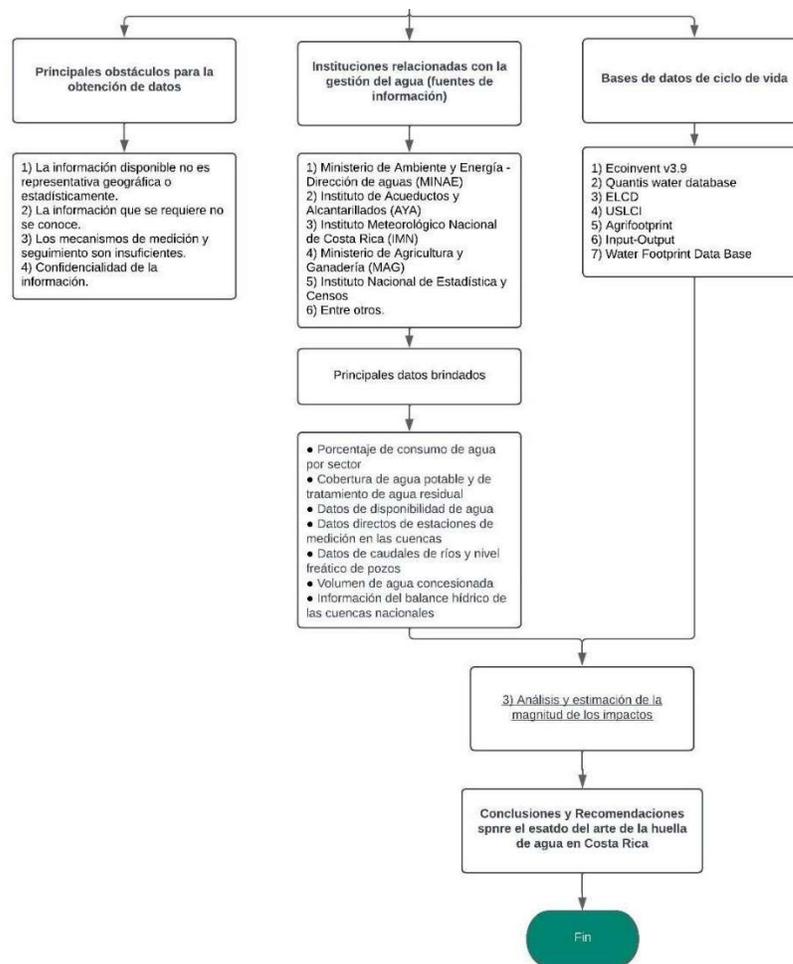
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 36.** Proceso de investigación de la huella de agua para su implementación en el sector construcción costarricense – Parte 2.  
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 37.** Proceso de investigación de la huella de agua para su implementación en el sector construcción costarricense – Parte 3.  
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 38.** Proceso de investigación de la huella de agua para su implementación en el sector construcción costarricense – Parte 4.

**Fuente:** Elaboración propia

Para la elaboración del primer objetivo, primeramente, se realizó una búsqueda de información acerca del concepto de huella de agua, la misma información recopilada mostró que todo estudio de huella de agua debe incluir un objetivo y un alcance.

Las principales fuentes de información para la elaboración del estado del arte de la huella de agua fueron las normas nacionales e internacionales, estudios y evaluaciones preexistentes de huella de agua, artículos científicos y las consultas realizadas a expertos en huella de agua.

Esta información mostró que para comprender cómo se realiza una evaluación de

huella de agua, es importante no solo comprender el concepto de huella de agua, sino, que también resulta importante comprender el concepto de Análisis del Ciclo de Vida. Para una correcta comprensión del concepto de huella de agua se lograron definir 3 aspectos importantes, la evolución de la huella de agua, los tipos de agua que existen y los métodos de Evaluación de Impacto Ambiental y el Agua.

Este último presenta los tres elementos mandatorios para realizar una Evaluación de Inventario de Ciclo de Vida (EICV). En el segundo elemento, se detallan una serie de requisitos para realizar la agrupación de los datos, en estos se logró identificar las limitaciones presenta la

investigación, como lo son las bases de datos y los principales obstáculos para la obtención de datos.

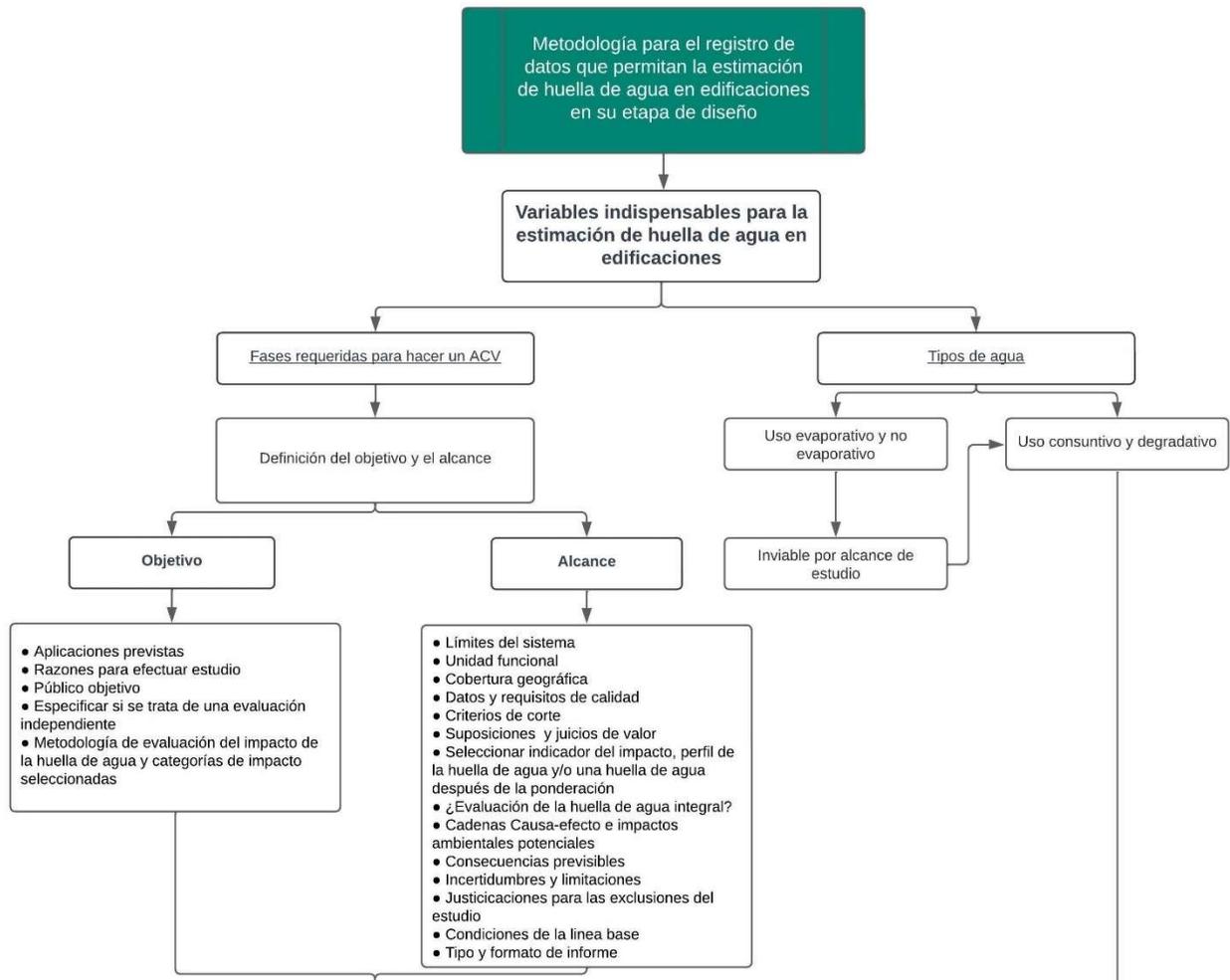
Para parte del concepto de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y el Agua, fue importante identificar y definir las fases necesarias para hacer estudios de ACV. Además de esto, también se logró identificar el Ciclo de Vida de una construcción, a modo general, ya que esta no varía entre tipos de edificaciones.

Finalmente, se realizaron las conclusiones y recomendaciones acerca del estado del arte de la huella de agua en Costa Rica.

## **Metodología propuesta para el registro de datos de huella de agua en**

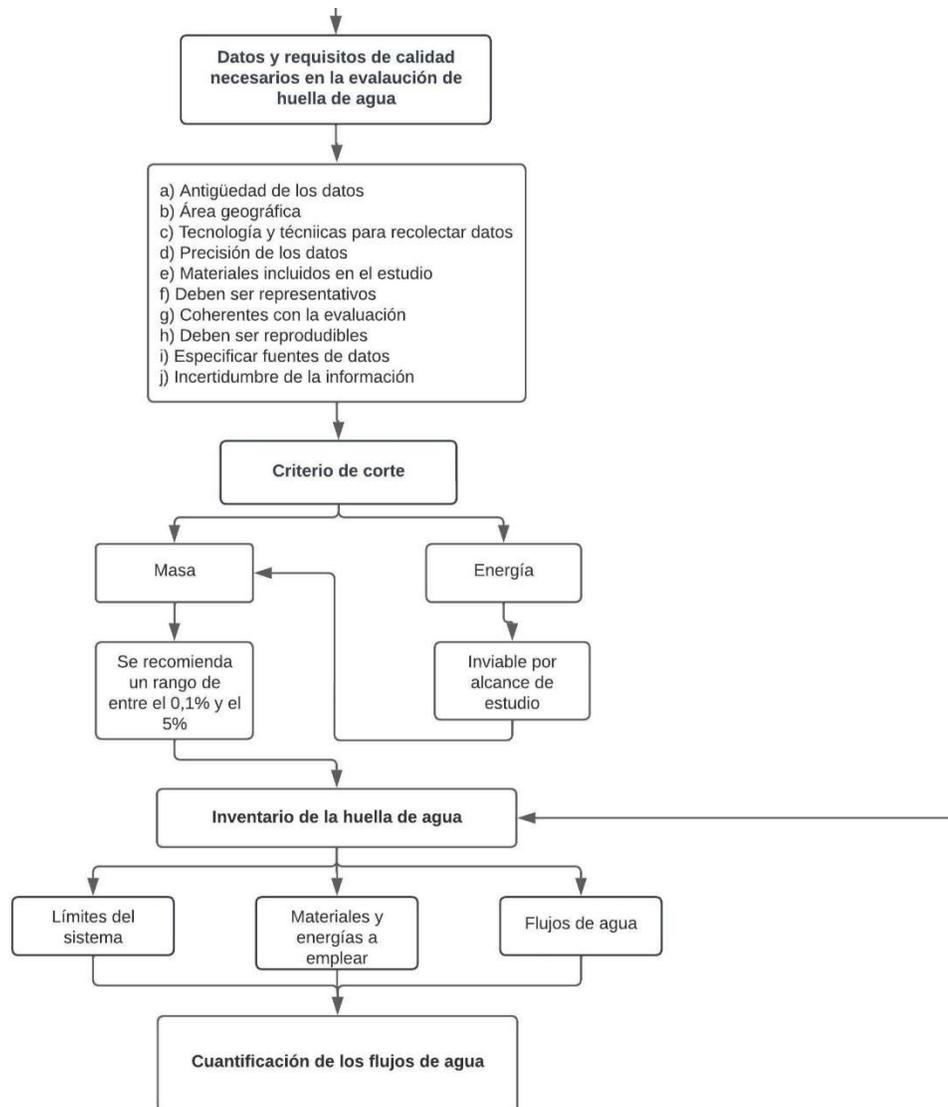
## **edificaciones en su etapa de diseño**

Como aporte a la comunidad del sector construcción se elaboró la propuesta de una metodología para registrar datos de huella de agua en el sector. En esta se buscó identificar las variables indispensables para la estimación de Huella de Agua en edificaciones, establecer los pasos específicos a seguir para la estimación de Huella de agua en edificaciones, identificar la relación entre las actividades por realizar y definir una secuencia lógica, establecer los datos y sus requisitos de calidad, establecer un límite de corte para los datos y realizar conclusiones y recomendaciones sobre la metodología propuesta, esto se muestra en las Figuras 39, 40, 41 y 42 (En el Apéndice 3 se muestra el diagrama de flujo completo):



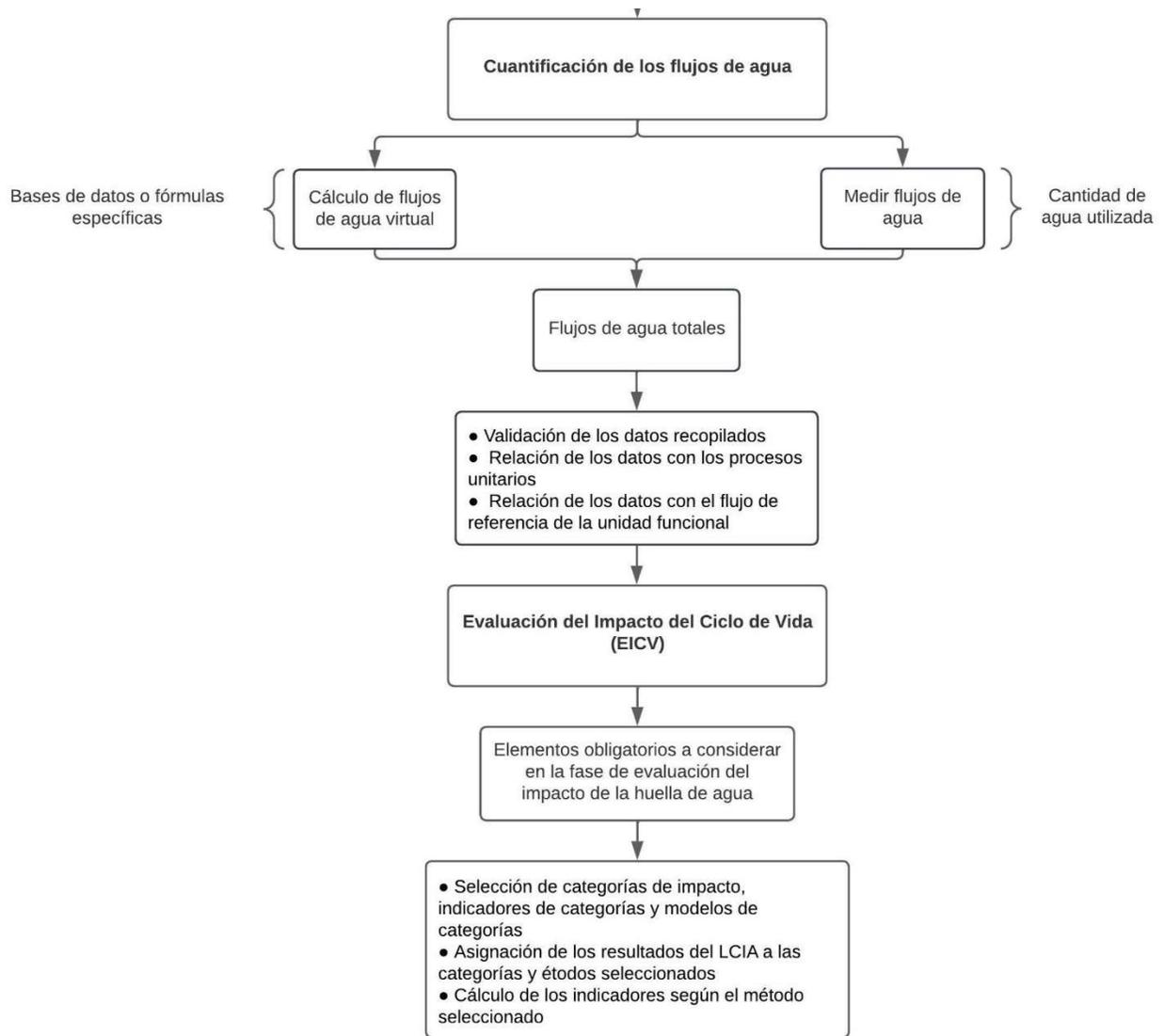
**Figura 39.** Proceso para generar una metodología para el registro de datos que permitan la estimación de la huella de agua en edificaciones en su etapa de diseño – Parte 1.

**Fuente:** Elaboración propia.



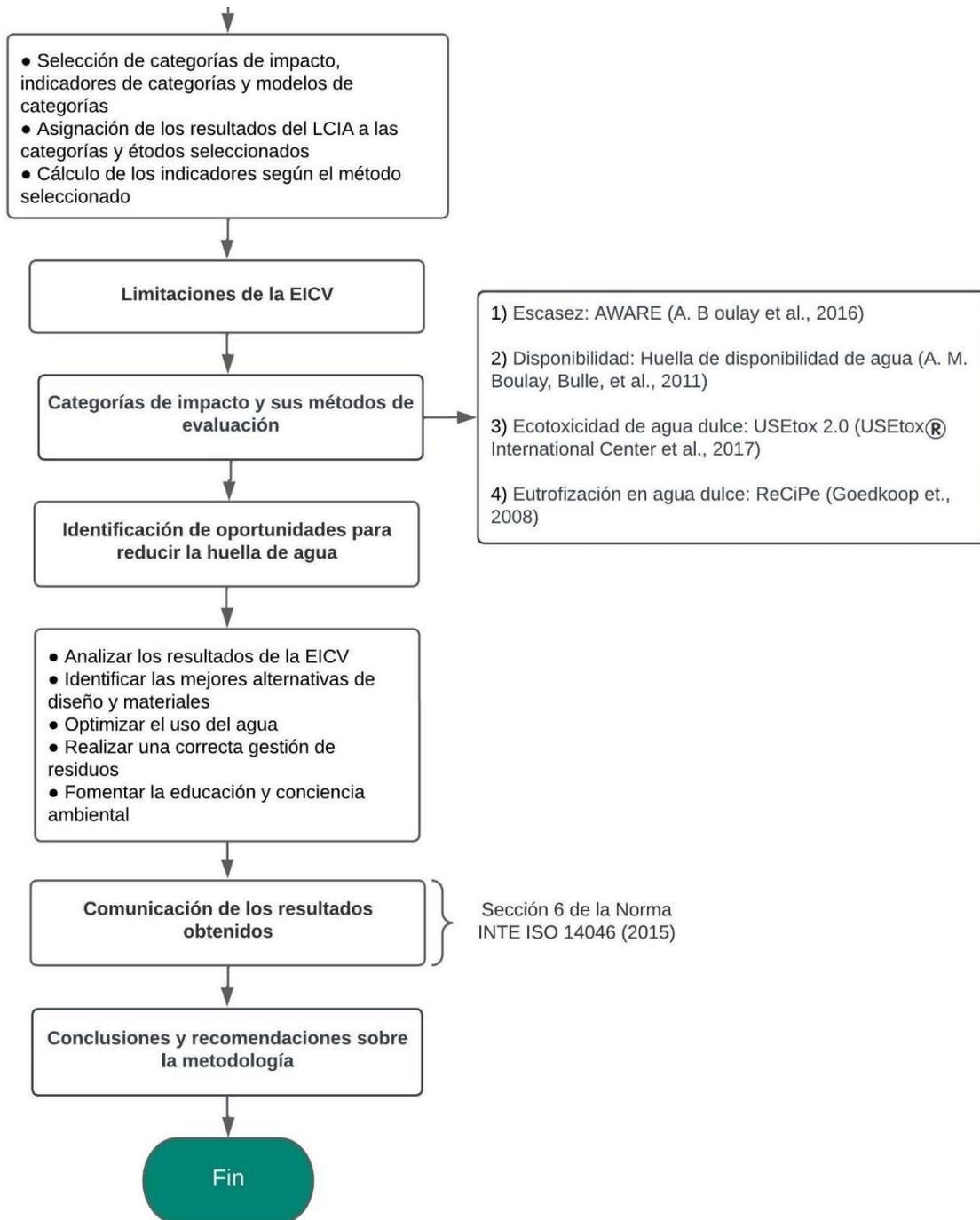
**Figura 40.** Proceso para generar una metodología para el registro de datos que permitan la estimación de la huella de agua en edificaciones en su etapa de diseño – Parte 2.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 41.** Proceso para generar una metodología para el registro de datos que permitan la estimación de la huella de agua en edificaciones en su etapa de diseño – Parte 3.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 42.** Proceso para generar una metodología para el registro de datos que permitan la estimación de la huella de agua en edificaciones en su etapa de diseño – Parte 4.

**Fuente:** Elaboración propia.

Para esta se determinó, que las variables indispensables para la estimación de huella de agua se engloban en dos grupos, los tipos de

agua que se utilizarán a lo largo de la recogida de datos y las fases requeridas para realizar una ACV.

Para el primero se estableció un uso consuntivo y degradativo, debido que este es el más utilizado y, el uso evaporativo y no evaporativo es inviable para el proyecto debido a que requiere de estimaciones de evaporaciones y retornos a las fuentes de agua dulce, este es un tipo de agua que se aplica mayoritariamente en procesos agrícolas.

En cuanto a las fases requeridas para realizar un ACV, se destaca la definición del objetivo y el alcance, ya que estos establecen cual los razones, motivos y principales características que tendrá el estudio que se realizará. Además de este, también se detalla el Inventario de la huella de agua, donde la cuantificación de los flujos de agua se basa en el cálculo de flujos de agua virtual y la medición de los flujos de agua.

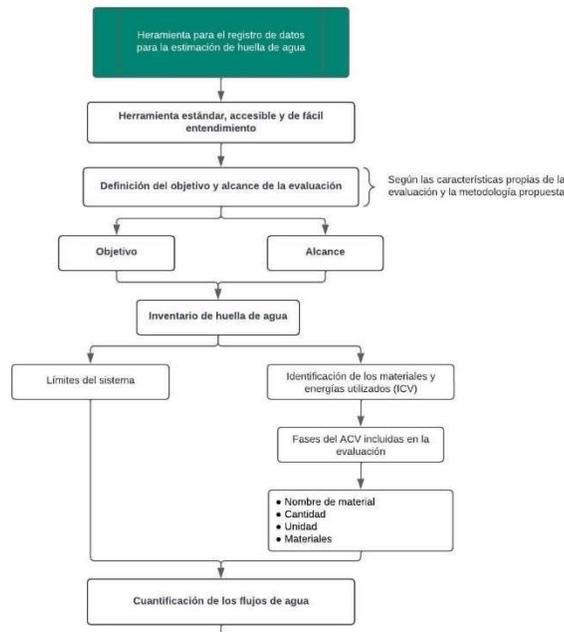
Para la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida se determinó que las limitaciones de la investigación no permiten que la metodología evalúe la huella de agua, sin embargo, si plantea propuestas de categorías de impacto, indicadores de categorías y modelos de categorías.

La correcta aplicación de la metodología permite identificar oportunidades para reducir la huella de agua, como lo puede ser el identificar las etapas del ciclo de vida que están aportando más impacto al recurso hídrico o la implementación de sistemas de ahorro de agua para la edificación que reduzcan

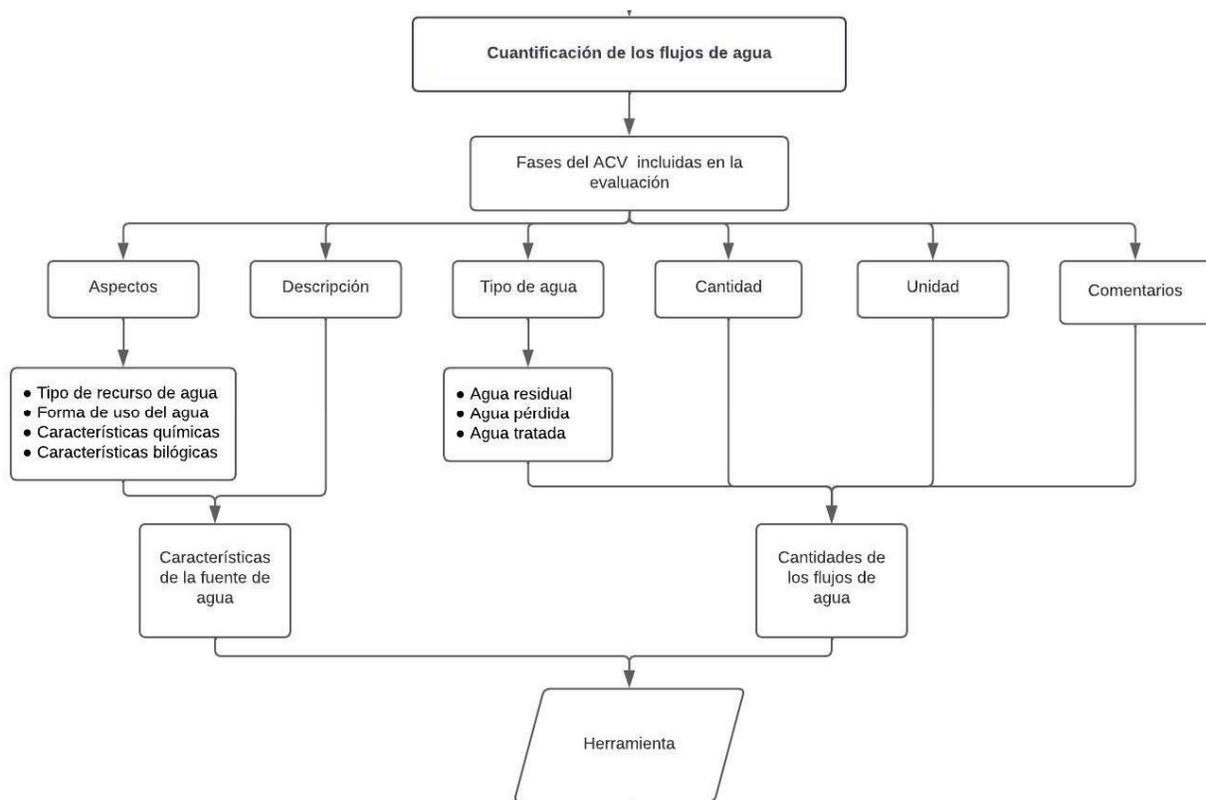
considerablemente el impacto durante su etapa de uso.

## Herramienta para el registro de datos de huella de agua en edificaciones en la etapa de diseño

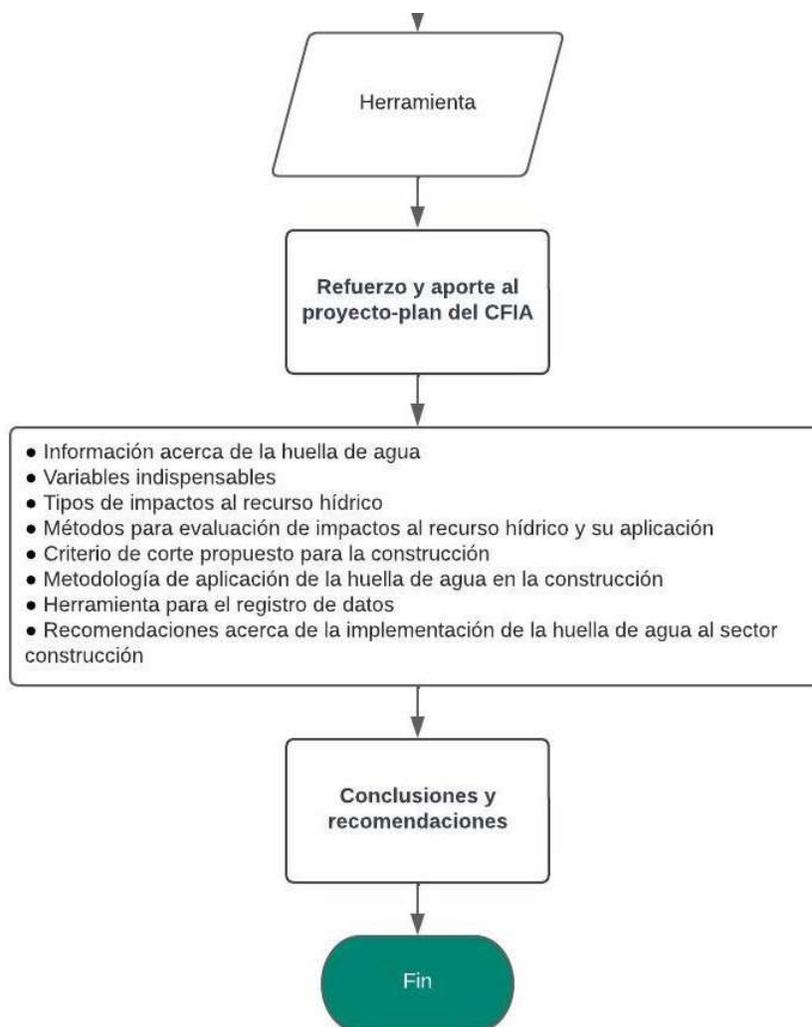
La herramienta se encuentra comprendida de tres objetivos, el generar una herramienta estándar, accesible y de fácil entendimiento, reforzar y aportar al proyecto-plan piloto para la implementación de la huella de agua en el sector construcción del CFIA y, realizar conclusiones y recomendaciones acerca de la herramienta generada, esto se puede consultar en las Figuras 43, 44, 45 y 46 (En el Apéndice 4 se muestra el diagrama de flujo completo):



**Figura 43.** Proceso de generación de una herramienta para el registro de datos para la estimación de huella de agua en edificaciones – Parte 1.  
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 44.** Proceso de generación de una herramienta para el registro de datos para la estimación de huella de agua en edificaciones – Parte 2.  
**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 45.** Proceso de generación de una herramienta para el registro de datos para la estimación de huella de agua en edificaciones – Parte 3.

**Fuente:** Elaboración propia.

Para que la herramienta sea estándar, accesible y de fácil entendimiento, se diseñó un proceso lógico para evaluar la huella de agua, el cual, complementado con la información recopilada en el estado del arte, permite comprender que es la huella de agua y como aplicarla a la construcción de Costa Rica.

Además, se hacen sugerencias sobre la escogencia de los métodos de evaluación de impacto, categorías de impacto, límites de corte, entre otros. Esto con base en las recomendaciones de CAIDS y COSUDE (2016), que surgen de un proceso de análisis en el que

se contó con la participación de 26 expertos de la región de manera presencial.

Por su parte, la herramienta resulta en un documento de Excel que presenta una serie de espacios por llenar y preguntas por responder, trabajando a modo de “checklist”.

El planteamiento de esta herramienta tiene como fin aportar al proyecto-plan piloto para la implementación de la huella de agua en el sector construcción del CFIA, de forma que la herramienta sirva de apoyo para futuros estudios de huella de agua y, principalmente para profesionales que desean incursionar en la

implementación de la huella de agua en el sector construcción costarricense.

## Técnica de recolección de información

Debido a que la cantidad de información de huella de agua es escasa, y lo es aún más si se encuentra relacionada con Costa Rica y el sector construcción, por lo que es necesario recurrir a técnicas de recolección de información que permitan generar el conocimiento necesario para plantear una metodología que cumpla con los estándares nacionales e internacionales.

La incursión y uso de nuevas tecnologías de información y comunicación (TIC) en la sociedad han transformado la sociedad de la información y el conocimiento, esta transformación se basa en la modificación de las dimensiones espaciotemporales, en las que se realizan las comunicaciones y se accede a la información.

Debido a esta incursión y uso de la TIC, actualmente existe una gran cantidad de formas en que los investigadores recojan, analicen y

presenten datos. Entre los tipos de técnicas destacan: Lectura y documentación, Observación y participación, Conversación y narración, Registro de datos en los entornos virtuales y la utilización conjunta de las técnicas de recolección de datos (Orellana & Sánchez, 2006).

De estas, solamente fueron utilizadas las técnicas de Lectura y documentación y, las entrevistas.

## Lectura y documentación

Toda investigación, sin importar su espacio de actuación, requiere de un búsqueda, lectura, interpretación y apropiación de información relacionada con el tema objeto de estudio. En esta etapa, el internet proporciona facilidades de búsqueda y acceso a diferentes fuentes documentales en formato digital, por ejemplo: libros digitales, revistas electrónicas, ponencias, informes de investigaciones, actas de congresos, boletines, censos, bases de datos, periódicos electrónicos, enciclopedias (Orellana & Sánchez, 2006). Para una mejor comprensión, consultar las Figuras 46 y 47.

Tipo	Descripción
Textuales	Contienen únicamente texto, su navegación es lineal porque carece de hipervínculos. Prácticamente es el tradicional documento de texto en formato digital, plasmado o colgado en la web.
Hipertextuales	Al igual que los textuales contienen únicamente texto, con la diferencia en que existen relaciones mediante hipervínculos entre las palabras o conjuntos de palabras que lo componen, tanto dentro del mismo como hacia otros documentos hipertextuales. Proporcionando una navegación no lineal.
Multimediales	Son los documentos en donde se combina texto, imágenes, fotografías, sonidos, animaciones, video y/o cualquier otro tipo de datos en formato digital. Estos documentos no presentan hipervínculos por lo que su navegación puede considerarse lineal.
Hipermediales	Si a un documento multimedial se le agrega la capacidad de vincularse dentro del mismo o con otros documentos, es decir se le agregan hipervínculos, entonces se convierte en un documento hipermedial. Por consiguiente su navegación no es lineal, «no secuencial» de acuerdo al camino elegido por el usuario.

**Figura 46.** Clasificación de documentos en los entornos virtuales.

Fuente: Extraído desde (Valzacchi, 2003).

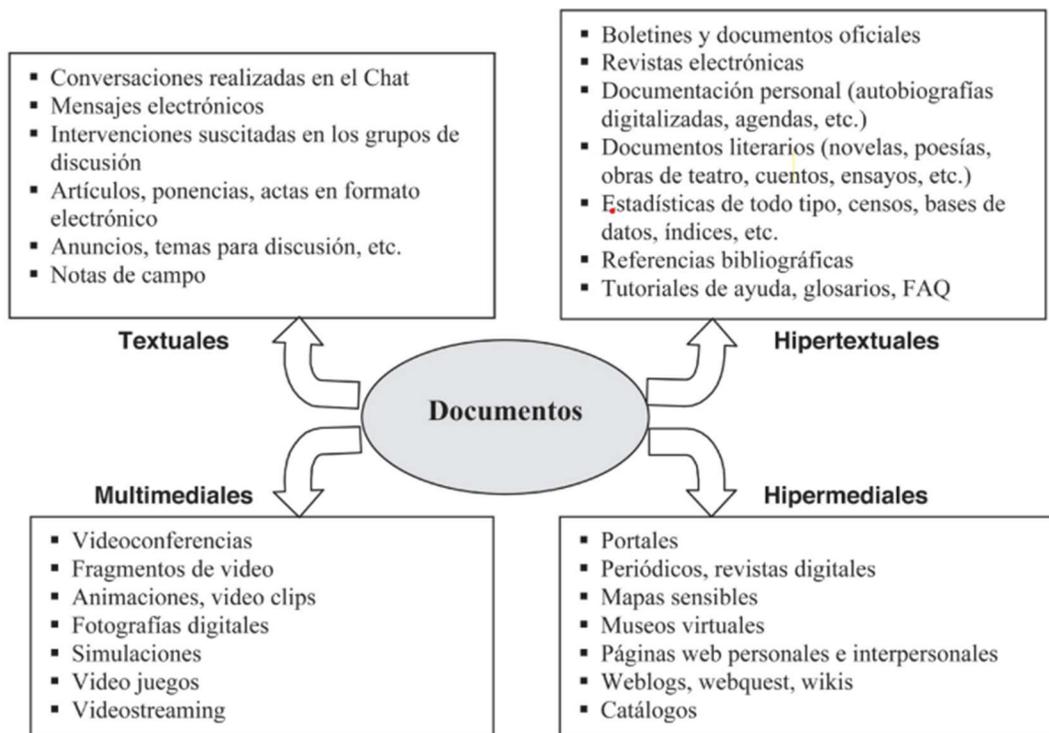


Figura 47. Ejemplos de documentos en los Entornos Virtuales.

Fuente: (Orellana & Sánchez, 2006).

## Entrevistas

La entrevista es una de las estrategias de recogida de información más utilizadas en procesos de investigación, el principal objetivo de una entrevista es obtener información de forma oral y personalizada sobre acontecimientos, experiencias, opiniones de personas.

En estas siempre participan al menos dos personas, donde una de ellas toma una posición de entrevistadora y la otra de entrevistada, generándose una interacción en torno a una temática de estudio entre ambos. Cuando en las entrevistas existan más de una persona entrevistada, se realizará una entrevista grupal, esto significa que la anata también se encuentra

definida por el número de personas entrevistadas. El grado de estructuración también establece una tipología de entrevista, estos grados son: la entrevista estructurada, semiestructurada y la no entrevista no estructurada o en profundidad.

Además de estos dos criterios de clasificación también se encuentra el momento, que conduce a hablar de entrevistas iniciales o exploratorias (también llamadas diagnósticas), de seguimiento o desarrollo y finales (Folgueiras Bertomeu, 2018). En la Figura 48 se encuentran los criterios de clasificación expuestos, para las tipologías de entrevistas:

Crterios	Tipologías de entrevistas
<b>Según el momento</b>	Inicial De desarrollo Final
<b>Según el grado de estructuración</b>	Estructurada Semiestructurada No estructurada o en profundidad
<b>Según el número de participantes</b>	Individual Grupal

**Figura 48.** Tipologías de entrevista según criterios.  
**Fuente:** Extraído desde (Folgueiras Bertomeu, 2018).

## Entrevista estructurada

En esta se decide de antemano que tipo de información se quiere y con base en ello se establece un guion de entrevista fijo y secuencial. El entrevistador sigue el orden marcado y las preguntas están pensadas para ser contestadas brevemente. El entrevistado debe acotarse a este guion preestablecido a priori (Folgueiras Bertomeu, 2018).

## Entrevista semiestructurada

En la entrevista semiestructurada también se define de antemano que tipo de información se requiere y con base en ello se establece un guion de preguntas, a pesar de esto, las cuestiones se elaboran de forma abierta lo que permite recoger información más rica y con más matices que en la entrevista estructurada.

En esta es esencial que el entrevistador tenga una actitud abierta y flexible para poder ir saltando de pregunta según las respuestas que se vayan dando o, inclusive, incorporar alguna nueva cuestión a partir de las respuestas dadas por la persona entrevistada (Folgueiras Bertomeu, 2018).

## Entrevista no estructurada o en profundidad

La entrevista no estructurada o en profundidad es aquella que se realiza sin un guion previo. Sigue un modelo de conversación

entre iguales. En esta modalidad, el rol del entrevistador supone no sólo obtener respuestas, sino, también saber qué preguntar hacer o no hacer. En la entrevista en profundidad no hay un guion prefijado, sino una serie de temas con posibles cuestiones que pueden plantearse a la persona entrevistada (Folgueiras Bertomeu, 2018). Según (Ruiz, 2012), algunos de los objetivos de la entrevista en profundidad son:

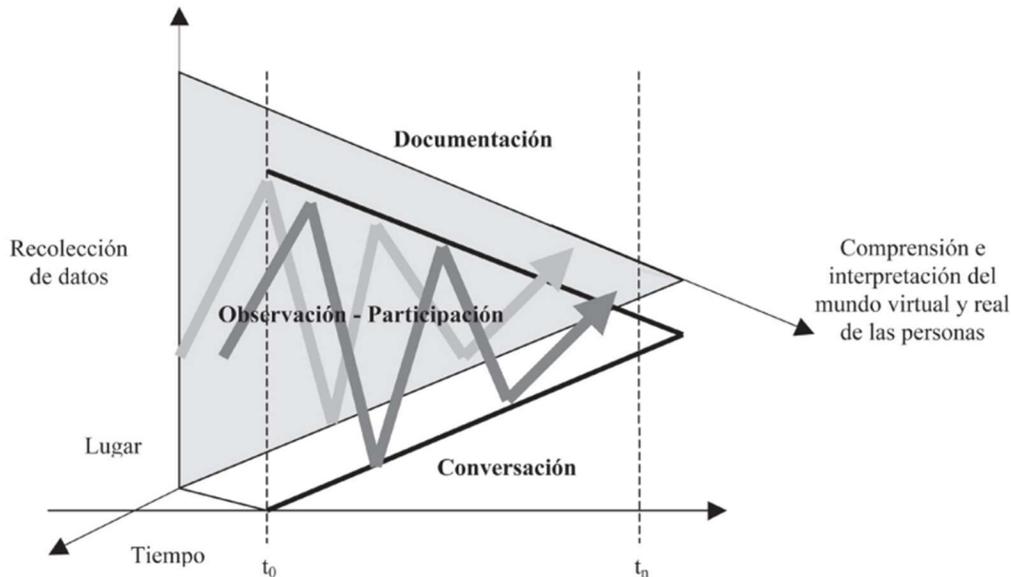
- Comprender más que explicar.
- Buscar la respuesta subjetivamente sincera.
- Obtener unas respuestas emocionales frente a racionales.
- Preguntar sin esquema fijo para las respuestas.
- Controlar el ritmo de la entrevista en relación con las respuestas recibidas.
- Alterar el orden y características de las preguntas e, interrumpir cuando es necesario introducir o matizar algo o reconducir el tema.
- Explicar el sentido de la pregunta tanto como sea necesario y permitir crear juicios de valor u opiniones.
- Encontrar un equilibrio entre familiaridad y profesionalidad.

## Utilización conjunta de las técnicas de recolección de datos

La combinación, uso conjunto o complementariedad de las técnicas de recolección de datos está implícita en las

estrategias metodológicas y por consiguiente en el proceso de triangulación de estas para contrastar los datos. De esta forma el investigador obtiene información exhaustiva y variada para la comprensión e interpretación de

la situación objeto de estudio (Orellana & Sánchez, 2006). En la Figura 49 se muestra el uso conjunto de las técnicas de documentación, observación y de conversación en estudio cualitativo:



**Figura 49.** Utilización conjunta de técnicas de recolección de datos en entornos virtuales.

**Fuente:** Extraído desde (Orellana & Sánchez, 2006).

## Metodología de obtención de información

Para la búsqueda de información más actualizada y con un criterio profesional, se realizaron una serie de entrevistas semiestructuradas sobre información complementaria acerca de aspectos e indagación, dirigidas a profesionales que se encuentran relacionados con la huella de agua.

En estas entrevistas se realizaron preguntas a través de reuniones virtuales, realizadas mediante la herramienta tecnológica "MS Teams" (MS Teams, 2017), las reuniones fueron grabadas para su posterior visualización, el formato de estas entrevistas se puede encontrar en el Apéndice 1.

# Resultados

## Análisis del estado del arte de la estimación de huella de agua en Costa Rica

### Literatura sobre conceptos básicos acerca de la huella de agua que deben ser tomados en cuenta para su estimación

La huella de agua, como se ha descrito a lo largo de este proyecto, es un concepto que implica la medición de la cantidad total de impactos al ambiente, producidas de forma directa o indirecta por productos o procesos en todas las etapas de su ciclo de vida.

La primera vez que este concepto fue mencionado de forma oficial fue en la norma internacional INTE 14046, para estimarla se debe aplicar la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Con base en la literatura consultada, se formuló la Tabla 17, donde se encontró cuáles son los conceptos básicos acerca de la huella de agua, que deben ser tomado en cuenta para su estimación.

En la Tabla 18 se detallan los términos más importantes para una mejor comprensión de la huella de agua, enfocado en el ACV y en la evaluación de la huella de agua. Respecto a los términos relacionados con los productos, los sistemas del producto, los procesos y las organizaciones, estos se encuentran en la Tabla 19. Finalmente, respecto a la Tabla 20, se detallan los términos importantes para la comprensión de la huella de agua, relacionados con los datos y a la calidad de los estos.

<b>Concepto</b>	<b>Definición</b>
Agua dulce	Agua que contiene una concentración baja de sólidos disueltos, el agua dulce comúnmente contiene menos de 1.000 mg/L de sólidos disueltos y generalmente se acepta como adecuada para su extracción y tratamiento convencional para producir agua potable.
Agua superficial	Agua sobre el suelo que fluye y se almacena, tales como ríos y lagos, excluyendo el agua de mar.
Agua subterránea	Agua que está contenida en una formación subterránea y que puede recuperarse.
Cuenca hidrográfica	Área desde la cual las escorrentías de agua procedentes de precipitaciones drenan por gravedad a una corriente u otro cuerpo de agua.
Flujo elemental de agua	Agua que entra al sistema bajo estudio, que ha sido extraída del medio ambiente; o agua que sale del sistema bajo estudio que es liberada al medio ambiente.
Uso del agua	Uso del agua por actividades humanas.
Consumo de agua	Agua extraída de la cuenca hidrográfica pero no que no retorna a la misma cuenca hidrográfica. El consumo de agua puede ser debido a la evaporación, a la transpiración, a la integración en un proceso, por

	liberación en una cuenca hidrográfica diferente o al mar.
Extracción del agua	La remoción antropogénica del agua de cualquier cuerpo de agua o de cualquier cuenca hidrográfica, ya sea de forma temporal o permanente.
Degradación del agua	Cambios negativos en la calidad del agua.
Calidad del agua	Características físicas, químicas y biológicas del agua con respecto a su aptitud para el uso previsto por los humanos o los ecosistemas.
Disponibilidad del agua	La extensión en la cual los seres humanos y los ecosistemas tienen suficientes recursos de agua para sus necesidades.
Escasez de agua	La extensión en que la demanda de agua se compara con el reabastecimiento del agua de un área

**Fuente:** Elaboración propia, mediante la sección de términos y definiciones de las normas INTE (INTE ISO 14046, 2015; ISO 14044, 2006).

<b>Tabla 18. Términos importantes para la comprensión de la huella de agua relacionados con el ACV y a la evaluación de la huella de agua.</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Definición</b>
Huella de agua	Métrica o métricas con las que se cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua.
Huella de agua en la construcción	Métrica o métricas con las que se cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua en la construcción.
Evaluación de la huella de agua	Recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales ambientales relacionados con el agua utilizada o afectada, por un producto, un proceso o una organización.
Evaluación integral de la huella de agua	La integralidad en la huella de agua implica considerar todos los atributos ambientales pertinentes o aspectos del medio ambiente, de la salud humana y de los recursos relacionados con el agua, incluyendo la disponibilidad y la degradación del agua.
Ciclo de vida	Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición general.
Análisis de ciclo de vida (ACV)	Recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema de producto a través de su ciclo de vida.
Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV)	Fase del análisis del ciclo de vida que implica la recopilación y la cuantificación de entradas y resultados de un sistema del producto durante su ciclo de vida.
Análisis del inventario de la huella de agua	Fase de evaluación de la huella de agua que implica la recopilación y la cuantificación de entradas y resultados relacionados con el agua para productos, procesos u organizaciones.
Inventario de la huella de agua	Resultado del análisis del inventario de la huella de agua, este debe incluir flujos elementales que se utilizan para evaluaciones posteriores del impacto de la huella de agua. Se los puede encontrar de dos tipos: directo e indirecto.
Límite del sistema	Conjunto de criterios que especifican cuáles de los procesos unitarios son parte de un sistema del producto o de las actividades de una organización.
Criterios de corte	Especificación de la cantidad de flujo de materia o de energía o del nivel de importancia ambiental asociado a los procesos unitarios o al sistema del producto para su exclusión del estudio.
Evaluación del impacto de la huella de agua	Es la continuación del análisis del inventario de la huella de agua, esta se encuentra a dirigida a conocer y evaluar la magnitud y cuán significativos son los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua de un

	proceso, producto u organización.
Categoría de impacto	Clase que representa asuntos ambientales de interés a la cual se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida.
Indicador de categoría de impacto	Representación cuantificable de una categoría de impacto.
Perfil de la huella de agua	Es la recopilación de resultados de los indicadores de categoría de impacto que consideran los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua.
Factor de caracterización	Factor que surge de un modelo de caracterización que se aplica para convertir el resultado del análisis del inventario del ciclo de vida asignado a la unidad común del indicador de categoría.

**Fuente:** Elaboración propia, mediante la sección de términos y definiciones de las normas INTE (INTE ISO 14046, 2015; ISO 14044, 2006).

**Tabla 19.** Términos importantes para la comprensión de la huella de agua relacionados con los productos, los sistemas del producto, los procesos y las organizaciones.

Concepto	Definición
Sistema de producto	Conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de productos, que desempeña una o más funciones definidas, y que sirve de modelo para el ciclo de vida de un producto.
Unidad funcional	Desempeño cuantificado de un sistema del producto, proceso u organización para su utilización como unidad de referencia.
Flujo de referencia	Medida de las salidas de los procesos en un sistema del producto determinado, esta es requerida para cumplir la función expresada mediante la unidad funcional.
Categoría de producto	Grupo de producto que pueden cumplir funciones equivalentes.
Reglas de categoría de producto	Conjunto de reglas específicas, requisitos y guías para el desarrollo de declaraciones ambientales para una categoría de producto.

**Fuente:** Elaboración propia, mediante la sección de términos y definiciones de las normas INTE (INTE ISO 14046, 2015; ISO 14044, 2006).

**Tabla 20.** Términos importantes para la comprensión de la huella de agua relacionados con los datos y a la calidad de los mismos.

Concepto	Definición
Datos primarios	Valor cuantificado de un proceso unitario o de una actividad obtenida de una medición directa, o de cálculos con base en mediciones directas de su fuente original.
Datos secundarios	Datos obtenidos de otras fuentes diferentes a las de una medición directa o a los de un cálculo basado en mediciones directas de la fuente original.
Bases de datos de huella de agua	Estas son compilaciones de información cuantitativa y cualitativa sobre el uso de agua en diferentes actividades y productos a lo largo de su ciclo de vida. Estas proporcionan información detallada sobre los flujos de agua utilizados y los impactos ambientales asociados, lo que permite la evaluación de la huella de agua de diferentes actividades y productos.

**Fuente:** Elaboración propia, mediante la sección de términos y definiciones de las normas INTE (INTE ISO 14046, 2015; ISO 14044, 2006).

## Definición de los diferentes tipos de agua

Según la información recopilada el uso del agua del ser humano está presentando cada vez más impactos negativos en la salud humana, en el crecimiento económico, el medio ambiente y la estabilidad geopolítica. A raíz de esto, es

necesario gestionar el recurso hídrico considerando sus diferentes tipos de agua (agua dulce, agua pluvial y agua residual), distinguir entre sus diferentes fuentes de extracción (superficial y/o subterránea), su disponibilidad y distribución, así como integrar los impactos ambientales provocados por el uso de esta (Farell, 2013).

Uso evaporativo y no evaporativo corresponde al agua que se evapora durante su uso, por lo que esta no encuentra se inmediatamente disponible para un posterior uso; el uso no evaporativo, por su parte, se entiende como el agua que retorna a cualquier fuente de agua dulce y se encuentra disponible después de su uso.

Este enfoque evaporativo considera todo flujo de retorno como agua no consumida, indiferentemente de la calidad con que lo hace. Esto significa que cuando evalúa el agua agrícola, este solo contabiliza el volumen teórico de agua que requiere un cultivo para crecer, sin considerar el volumen de agua real que se utilizó en el riego, su fuente, ni los impactos provocados por pesticidas y fertilizantes.

De igual forma, al evaluar la etapa de producción, resta el volumen de agua residual como agua disponible a otros usos y solo contabiliza la que efectivamente se evaporó en el proceso. En la etapa de uso, si se evalúa el agua que bebe el ser humano, solo registra el 35% del volumen de agua que se evapora cuando la persona suda y respira, considerando el resto como flujo de retorno disponible para otros usos (Farell, 2013; Muñoz et al., 2008).

#### Uso consuntivo y degradativo

En cuanto al enfoque de uso consuntivo, se considera como agua consumida toda extracción de agua dulce que se evapora o se descarga en una cuenca diferente a la de origen o el mar, y/o se encuentra materializada en productos y residuos. Por su parte, el uso degradativo, es el agua que retorna a su fuente de origen, pero con una calidad alterada.

En esta metodología se procederá a hacer uso del enfoque del uso consuntivo y degradativo, debido a que con este tipo de evaluación se pueden detectar las etapas, sustancias y procesos que mayor escasez e impactos provocan al ambiente, lo que permite proponer

soluciones que ayuden a reducir la huella de agua.

Se encontró que las bases de datos que brindan información a los inventarios de ciclo de vida detallan la cantidad de agua que requiere cada substancia o proceso y la reportan de manera diferente según la fuente: agua de lago, agua de río, agua salada/océano, agua de pozo/subterránea, agua de origen desconocido, agua de enfriamiento y agua de turbina (plantas hidroeléctricas). A pesar de esto, no siempre resulta sencillo hacer esta clasificación y por otro lado los factores de caracterización para diferentes fuentes aún son muy discutidos (Farell, 2013).

Para temas referidos a la estandarización se establece una diferencia mínima entre el agua superficial y el agua subterránea dado que los impactos provocados por su uso resultan diferentes. Por lo que el usuario es el encargado de clasificar si el origen del agua es superficial o subterráneo. Esto lo puede hacer consulta la página del [Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados \(aya.go.cr\)](http://Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (aya.go.cr)) y revisar cual es el origen del agua que se consume según el ente prestatario del servicio público.

## **Aplicación de las normas internacionales y nacionales para la estimación de la huella de agua en Costa Rica**

Con base en la búsqueda de información realizada, se encontró que solamente existe una norma internacional que trata explícitamente la huella de agua y esa es la Norma INTE 14046 (INTE ISO 14046, 2015). Esta norma es precisamente la única que rige en Costa Rica, por lo que, al realizar una estimación de la huella de agua, se deben de seguir los lineamientos que en esta se estipulan.

A pesar de esto, es importante mencionar que actualmente existen 27 métodos, normas, instructivos y metodologías para evaluar los recursos hídricos a nivel de inventario de ciclo de vida (volúmenes), de impacto o de daño. Un resumen de estos se detalla en la Tabla 21.

De igual forma es importante destacar que ninguno de los métodos realiza la evaluación de manera integral ni es reconocido globalmente como método estandarizado para reportar la

huella de agua (Berger & Finkbeiner, 2010; Farell, 2013; Kounina et al., 2012).

<b>Tabla 21.</b> Resumen de metodologías que evalúan el agua a nivel volumétrico, de impactos y daños.		
<b>Tipo de evaluación</b>	<b>Área de interés</b>	<b>Referencia</b>
<b>Inventario (m<sup>3</sup>)</b>	Marco teórico	UNEP-CETAC (J. B. Bayart et al., 2009)
	Bases de datos	Ecoinvent, GaBi, Simapro
	Métodos	Water Gap2 (Alcamo et al., 2003)
		Global Water Tool (WBCSD, 2010)
		WFN (A. Y. Hoekstra et al., 2009)
		Uso consuntivo
		Impactos al agua fresca (Canals et al., 2008)
		Parámetros de calidad (A. M. Boulay et al., 2009)
		ReCiPe (Huijbregts et al., 2016)
<b>Evaluación de impacto (Puntos medios)</b>	Humanos	Agua gris de WFN (A. Y. Hoekstra et al., 2009)
		Escasez ecológica-Suiza (Frischknech, 2008)
		Función y calidad del agua (A. M. Boulay et al., 2009)
		WSI (Pfister et al., 2009)
	Ecosistemas y recursos	EDIP (Wenzel et al., 1997, 2001)
		WSI (Pfister et al., 2009)
		Agotamiento del agua (Canals et al., 2008)
		USEtox 2.0 (Fantke et al., 2015)
		Disponibilidad de agua (A. M. Boulay, Bouchard, et al., 2011)
		H <sub>2</sub> O eq
<b>Daño (Puntos finales)</b>	Salud humana	Enfermedad / Subnutrición
		Vegetación (Pfister et al., (Maendly & Humbert, 2008) y biodiversidad (Maendly & Humbert, 2008)
		Acuíferos-biodiversidad
	Recursos	Uso consuntivo (Pfister et al., 2009)
		Exergía
		Escasez (Pfister et al., 2009)
Consumo de agua		

**Fuente:** Elaboración propia mediante Figura 3.1 de (Farell, 2013).

## Experiencias registradas sobre la huella de agua en la construcción

Respecto a los documentos que registran una evaluación de la huella de agua en el sector

construcción o con algún material afluente a ella, se obtiene la Tabla 22:

<b>Tabla 22.</b> Resumen de experiencias registradas sobre la gestión del agua en la construcción.					
Título	Año	Ubicación geográfica	Metodología aplicada	Fases evaluadas	Resultados
Huella de agua: Estudio de Caso de Torre Este del Hospital Calderón Guardia	2021	Costa Rica	Análisis de Ciclo de Vida (ACV), norma ISO 14046	Del origen de los materiales hasta la construcción de la edificación	La información obtenida de la evaluación de la huella de agua arrojó que el consumo de agua es mucho mayor en los materiales que propiamente en la construcción.
Huella de agua de casa de bambú con sistema de captación de agua de lluvia	2021	México	Análisis de Ciclo de Vida (ACV), norma ISO 14046	Del origen de los materiales hasta el uso de la edificación	La evaluación y comparación de la huella de agua para una cabaña de bambú convencional y una con captación de agua llovidas, mostró que la cabaña que presentaba un sistema de captación de aguas redujo su huella de agua en un 19%.
Análisis del ciclo de vida de un edificio residencial en Colombia	2019	Colombia	Análisis de Ciclo de Vida (ACV), norma ISO 14046	Desde la producción de los materiales de construcción hasta la disposición final del edificio residencial	El ACV que se realizó para este edificio residencial, arrojó que la etapa de uso es donde se presentan el 97% del total de los impactos ambientales del edificio, esto debido a que es la etapa donde más se consume energía y agua, lo cual se encuentra asociado a hábitos del consumo. Este estudio, además, consideró el calentamiento global potencial, el agotamiento de la capa de ozono y el agotamiento de recursos abióticos.
Assessment of water Footprint for civil construction projects	2015	Suecia	Metodología del Water Footprint Network y ACV de ISO 14046	Preparación del sitio, construcción y demolición	Este evidenció que la metodología ACV presenta una mayor huella debido a que esta metodología es más inclusiva que la del WFN. De los materiales analizados, el acero fue el que presentó la mayor

					huella de agua.
Estimating the water Footprint of a housing development	2019	España	Metodología del Water Footprint Network y ACV de ISO 14046	Extracción y producción de materiales utilizados en la fase de construcción, mas no la construcción como tal.	Del agua total consumida, se tiene que el consumo indirecto (asociado a la producción de los materiales constructivos) representa el 93,1%. Se presentan oportunidades de mejora en la gestión del recurso hídrico mediante la incorporación de tecnologías de bajo consumo de agua, la reutilización de agua de lluvia y la optimización del proceso de construcción.
Sustainable Water Consumption in a Building Industry: A Review Focusing on Building Water Footprint	2022	Japón	Metodología del Water Footprint Network y ACV ISO 14046	Extracción y producción de materiales constructivos, la fase de construcción y uso	El estudio menciona la importancia de realizar una distinción entre el tipo de constructivos, el diseño estructural y/o las variables específicas a la hora de realizar evaluaciones de huella de agua en el sector construcción. Este brinda una visión futurista, donde se exponen algunos de los principales retos que se tienen como sector para lograr una mayor conciencia respecto al desmedido uso del recurso hídrico.
Evaluating Water Footprint of Building Construction in India	2014	India	Huella hídrica	Fase de uso	Esta evaluación fue aplicada a un edificio en la India, entre los resultados se tiene que el CFW varía significativamente según la altura del edificio, su sistema estructural y más particularmente, el tipo de cimentación. Se obtuvo que la huella hídrica promedio general para la construcción de edificios residencial en la India es de $21.000\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{construidos}}$ .

**Fuente:** Elaboración propia mediante las referencias encontradas (Cboudburi & Bardhan, 2014; González et al., 2019; Jones et al., 2021; Nallaperuma et al., 2022; Sacayán & Martínez, 2021; Universidad Autónoma de Madrid, 2019; Wärmark, 2015).

Con base en esta información se puede mencionar que, si bien existen estudios acerca de

la gestión del agua en la construcción, estos aplican conceptos de huella hídrica (como el de la

India) y no los conceptos de huella de agua relacionados con los impactos ambientales asociados a estos usos de la Norma INTE 14046 (como el que se realizó en Costa Rica).

Aun así, estos estudios permiten determinar que la etapa de uso de las estructuras civiles es la que presenta mayores consumos de agua y por mucho. Lo que deja en evidencia una importante oportunidad de mejora en la gestión del recurso hídrico en la fase de uso, como lo es el agua de uso diario (exceptuando el agua de consumo humano).

Esto sugiere que la etapa que requiere de un mayor esfuerzo es precisamente la de uso, sin embargo, esta etapa no es considerada en este proyecto según el alcance de este. El alcance se encuentra delimitado hasta la fase de diseño, lo que significa que únicamente se considera la extracción y producción de materias primas.

Además, según las metodologías aplicadas para los diferentes proyectos constructivos se destaca la necesidad de realizar una clara descripción de la obra que se analizará, la cual deberá cumplir con la metodología propuesta en este proyecto y por ende, en las directrices de la Norma INTE 14046 (2015).

También es importante mencionar que en algunos de los estudios realizados posteriormente a la fecha de lanzamiento de la Norma INTE 14046, se presentan confusiones entre la huella hídrica y la huella de agua. Estos estudios indican que se encuentran evaluando la huella de agua para una construcción según la norma, sin embargo, la realidad es otra, debido a que se comenta acerca de huella azul, verde y gris, lo cual corresponde a huella hídrica y no huella de agua, como lo es el caso del estudio realizado en la India.

## **Guía para la estimación de huella de agua en edificaciones en su etapa de diseño**

### **Variables indispensables para la estimación de huella de agua en**

## **edificaciones según la norma INTE 14046:2015**

Las variables indispensables para la estimación de huella de agua en edificaciones son las cuatro fases requeridas para hacer un estudio de ACV de acuerdo con las normas INTE (INTE ISO 14046, 2015; ISO 14044, 2006).

De forma paralela también se debe realizar una selección de las categorías de impacto y, por ende, el método con el que se evaluará cada una de las categorías seleccionadas, ya sea una o más.

### **Fases requeridas para hacer un ACV**

Según la norma INTE 14046 (2015), las cuatro fases requeridas para realizar una evaluación de la huella de agua de una construcción son:

1. Definición del objetivo y el alcance.
2. Análisis del inventario de la huella de agua.
3. Evaluación del impacto de la huella de agua.
4. Interpretación de los resultados.

En el caso de un estudio del inventario de huella de agua, este solamente debe contener las siguientes tres fases:

1. Definición del objetivo y del alcance.
2. Análisis del inventario de la huella de agua.
3. Interpretación de los resultados.

### **Definición del objetivo y alcance de la evaluación**

#### Objetivo

El objetivo principal de una evaluación de huella de agua en la construcción es identificar, cuantificar y analizar el consumo de agua y los impactos ambientales asociados a las diferentes etapas del ciclo de vida de una construcción, las cuales, para el presente trabajo, solamente se estarán contabilizando etapa de producción y la etapa de planificación y diseño.

Al definir el objetivo de la evaluación de la huella de agua, se deben declarar sin

ambigüedades los siguientes elementos (INTE ISO 14046, 2015):

- Las aplicaciones previstas.
- Las razones para efectuar el estudio.
- El público objetivo, por ejemplo: a quienes está previsto que se les informe de los resultados del estudio.
- Se debe especificar si el estudio es una evaluación única e independiente, o forma parte de un análisis del ciclo de vida.
- También se debe especificar si el estudio forma parte del análisis del ciclo de vida donde está prevista una aseveración comparativa.

Algunos ejemplos de objetivos de una evaluación de huella de agua para una construcción podrían ser los siguientes:

1. Identificar las etapas del ciclo de vida de la construcción que generan mayores impactos ambientales y consumo de agua y, buscar alternativas para reducir estos impactos.
2. Evaluar la eficiencia del uso del agua en los procesos de construcción, identificar oportunidades para reducir el consumo de agua y mejorar la gestión de los recursos hídricos.
3. Comparar diferentes alternativas de diseño y construcción para determinar cuál de ellas genera menor huella de agua y menor impacto ambiental.
4. Establecer objetivos y metas de mejora para reducir la huella de agua en la construcción y establecer estrategias para lograr estas metas.
5. Sensibilizar a los responsables de la toma de decisiones, así como a los trabajadores y usuarios finales, acerca de la importancia de la gestión del agua y la necesidad de reducir el impacto ambiental de las construcciones en este recurso.

### Alcance

El alcance de una evaluación de huella de agua en la construcción depende de los objetivos específicos que se establezcan para la evaluación, lo que significa que el alcance debe ser coherente con el objetivo de la evaluación de la huella de agua.

Al definir el alcance del estudio, se deben de considerar y describir los siguientes elementos (INTE ISO 14046, 2015):

*Sistema bajo estudio, límites del sistema y límites de la organización según sea pertinente.*

En este se debe de especificar que procesos unitarios se incluirán dentro de la evaluación de la huella de agua, de igual forma, los límites del sistema deberán ser coherentes con el objetivo del estudio. Los criterios utilizados para establecer los límites del sistema se deben de identificar y explicar (INTE ISO 14046, 2015).

### *Unidad funcional*

Para la unidad funcional se establece que para la construcción de viviendas unifamiliares de tipologías constructivas VC01 y VC02, según las tipologías constructivas del ONT (2021), es el área en m<sup>2</sup> construidos (m<sup>2</sup><sub>construido</sub>) (INTE ISO 14046, 2015). Si se desea extrapolar la unidad funcional a otros tipos de edificaciones, se deben determinar los parámetros claves que son relevantes para esa categoría específica de construcción. Estos parámetros pueden incluir el área construida, la funcionalidad específica y las normativas aplicables. De esta manera, se puede adaptar la unidad funcional y establecer criterios adecuados para evaluar y comparar el desempeño ambiental de diferentes tipos de construcciones.

### *Definición y cobertura geográfica y temporal del estudio*

Se deberá especificar claramente la ubicación exacta del estudio en el territorio nacional y, además, se debe denotar la fecha de cuando es realizada la evaluación (INTE ISO 14046, 2015).

### *Datos y requisitos de calidad de los datos*

Los requisitos para la calidad de los datos deberían tratar lo siguiente:

- a) Deberán especificar la antigüedad de los datos.
- b) El área geográfica de donde se deben recopilar los datos para poder cumplir con el objetivo de la evaluación, como lo es el área de abastecimiento cubierta por el ente prestador de los servicios del agua a la construcción y, una vez finalizada, durante el uso de esta.
- c) La tecnología y las técnicas implementadas para realizar la toma de datos.
- d) La precisión de los datos, esta dependerá de varios factores, como la disponibilidad de datos, la calidad de la recopilación de datos y la especificidad del análisis. No hay un valor único o estándar que se pueda establecer para todos los casos, ya que cada estudio puede tener diferentes características y objetivos.
- e) Se debe especificar a que materiales del ciclo de vida de la construcción se la han incluido en el estudio y cuáles no.
- f) Representatividad, lo que significa que los datos deben reflejar la verdadera población de interés.
- g) Deben ser coherentes con la evaluación cualitativa del grado en el cual el conjunto de datos refleja la verdadera población de interés (por ejemplo: cobertura geográfica, período de tiempo y cobertura tecnológica)
- h) Los datos deben ser reproducibles, esto significa que la información sobre la metodología y los valores de los datos podrían permitir a un profesional independiente reproducir los resultados que han sido informados.
- i) Las fuentes de los datos, incluyendo los modelos cuando se utilicen.
- j) Incertidumbre de la información (por ejemplo: datos, modelos y suposiciones)

Los datos secundarios solamente se deberían utilizar para las entradas cuando la recopilación de los datos primarios no sea posibles o factibles y pueden incluir datos procedentes de bibliografía, datos calculados, estimados, predicciones del modelo u otros datos representativos. Las razones para utilizar datos secundarios para procesos significativos deben justificarse y documentarse (INTE ISO 14046, 2015).

#### *Criterios de corte*

Los criterios de corte especifican la cantidad de flujo de materia o energía o del nivel de importancia ambiental asociado a los procesos unitarios o al sistema del producto para su exclusión del estudio. Debido a esto, no existe un criterio de corte universal para la huella de agua en la construcción, ya que este dependerá directamente del objetivo de evaluación y del contexto específico de la construcción en cuestión (INTE ISO 14046, 2015).

Para confeccionar los criterios de corte existen unos criterios de exclusión, los cuales se utilizan en la práctica LCA para decidir qué entradas se van a incluir en la evaluación, tales como:

1. Masa: Para este criterio de evaluación se deben de incluir todas las entradas que aporten masa al sistema, a partir de ahí se define un porcentaje de corte el cual se encarga de determinar los materiales que son significativas en el estudio (y que por ende deben ser incluidos) y los que no lo son.
2. Energía: En el caso de la energía se aplica de forma similar que el de masa, con la diferencia de que este se centra en el consumo de energía, de igual forma se establece un porcentaje de corte de forma que los insumos que requieran más de ese porcentaje unitario de consumo de energía son significativos (y por ende deben ser incluidos en la evaluación) y cuales no lo son.

Una forma de establecer el criterio de corte para los materiales constructivos es por medio del cálculo del porcentaje del peso de cada materia prima respecto al total de la masa de los materiales. Con estos valores, se debe definir

qué tan minucioso se hará la evaluación. Es importante mencionar que entre más materiales sean ingresados al sistema, más complicado se hará este, por lo que se recomienda establecer el criterio de corte con base en el objetivo y el alcance del proyecto, de forma que este solo facilite el procedimiento.

La Ing. Melissa Díaz (2023), quien trabaja activamente en evaluaciones de huella de agua, expuso en una de las entrevistas que los criterios de corte para la construcción rondan entre el 0,1% y el 5%, por lo que se recomienda, hasta donde sea posible, mantenerse en ese rango definido por la profesional.

#### *Suposiciones, juicios de valor y elementos opcionales*

La evaluación de la huella de agua en la construcción debe realizarse de manera objetiva y basada en datos y hechos. Sin embargo, es posible que surjan juicios de valor o interpretaciones subjetivas en el proceso de evaluación. Si este es el caso, se deben de especificar clara y detalladamente todas las suposiciones que se hayan asumido durante la evaluación de la huella de agua. Algunos ejemplos de juicios de valor o suposiciones pueden ser (INTE ISO 14046, 2015):

- a) La elección de los impactos ambientales considerados durante la evaluación: Dependiendo de los objetivos y el alcance de la evaluación, es posible que se deban elegir ciertos impactos ambientales para incluir en la evaluación. La elección de estos impactos puede ser subjetiva y depender de la perspectiva del evaluador.
- b) La elección de los límites del sistema: Es importante establecer los límites del sistema para la evaluación de la huella de agua en la construcción. La elección de estos límites puede ser subjetiva y depender de la perspectiva del evaluador. Por ejemplo, en la presente investigación se estableció como límite del sistema, una evaluación de huella de agua hasta la etapa de diseño en

edificaciones del sector construcción costarricense.

- c) La valoración de la importancia relativa de los diferentes flujos de agua: La valoración de la importancia relativa de los diferentes flujos de agua en la huella de agua de la construcción también puede ser subjetiva. Es importante tener en cuenta que algunos flujos de agua pueden tener un impacto ambiental mayor que otros, y es necesario considerar esto al interpretar los resultados de la evaluación.

Es importante mencionar que, si bien es cierto, los juicios de valor pueden abundar en el proceso de evaluación de la huella de agua en la construcción, estos deben ser explícitos y justificados con base a criterios técnicos y científicos sólidos. Además de esto, se deben presentar los resultados de la evaluación y juicios de valor que se hayan realizado (INTE ISO 14046, 2015).

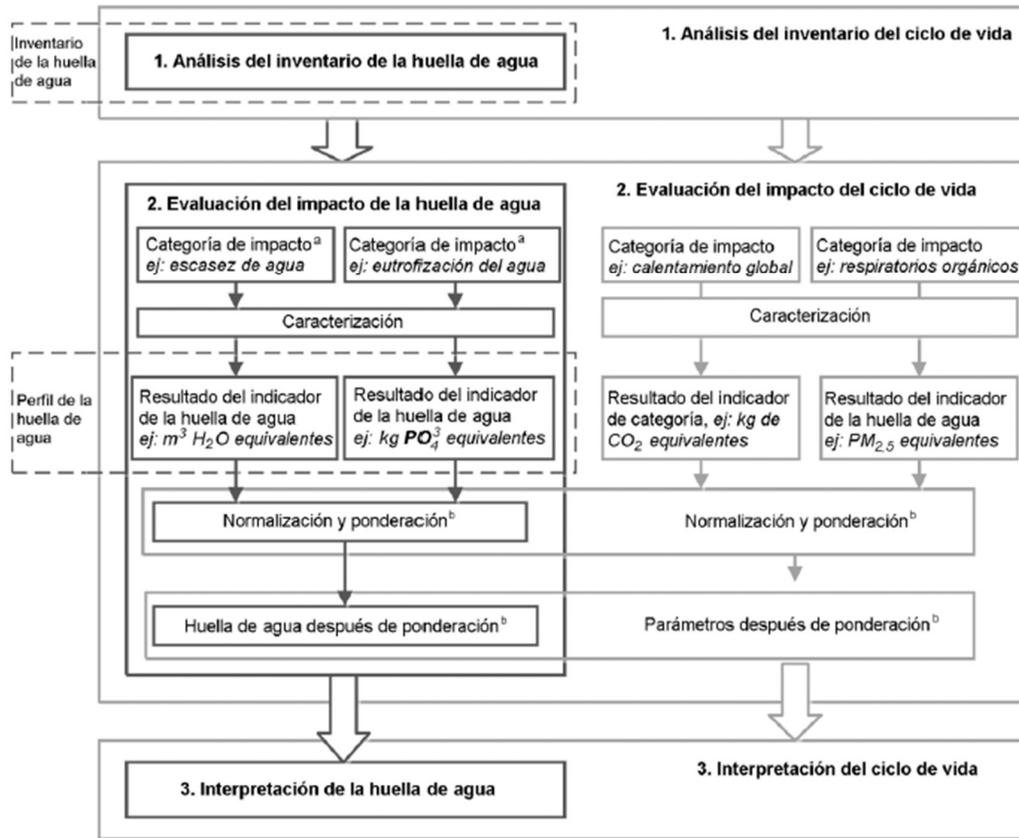
#### *Metodología de evaluación del impacto de la huella de agua, y las categorías de impacto seleccionadas*

Los impactos relacionados con el agua se pueden presentar por uno o más parámetros que cuantifiquen los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto u organización relacionados con el agua, incluyendo (INTE ISO 14046, 2015):

- El resultado del indicador de la huella de agua (por ejemplo: huella de agua por escasez), relacionado con una sola categoría de impacto (por ejemplo: escasez de agua).
- El perfil de la huella de agua que abarca varios resultados de indicadores.

Para futuras evaluaciones de huella de agua en edificaciones del sector construcción costarricense, se recomienda emplear el perfil de la huella de agua sobre el resultado del indicador de la huella de agua. Esto se debe a que el perfil de la huella de agua aplica más de un indicador, lo que permite medir que tipo de impacto es el

más relevante en cada una de las fases del ciclo de vida de una edificación (ver Figura 50).



**Figura 50.** Concepto de la huella de agua como una evaluación única e independiente o como parte de un análisis del ciclo de vida.

**Fuente:** Extraído desde (INTE ISO 14046, 2015).

**Leyenda:**

<sup>a</sup> Ejemplo de otras categorías de impacto incluyendo ecotoxicidad acuática, acidificación acuática, contaminación térmica, toxicidad humana (debida a la contaminación del agua).

<sup>b</sup> Denota fases opcionales.

**Nota:** En la figura, el concepto de la huella de agua como una evaluación única e independiente solamente se muestra en las cajas negras; la fase del análisis del ciclo de vida completo se muestra en las cajas grises.

La selección de las categorías de impacto; indicadores de categoría y modelos de caracterización se deben de seleccionar con base en los objetivos y el alcance del estudio. El método o los métodos aplicados en la evaluación del impacto de la huella de agua deben describirse claramente y documentarse.

La descripción de estos debe incluir una descripción de los mecanismos ambientales que son considerados por el método o métodos de

evaluación del impacto de la huella de agua (INTE ISO 14046, 2015).

Para el caso presente proyecto se establecen 4 métodos que evalúan 4 diferentes categorías de impacto, los cuales a su vez presentan 4 diferentes indicadores de categoría.

*Considerar si los resultados de la evaluación de la huella de agua van a incluir un resultado del indicador del impacto (especificar cual), un perfil*

*de la huella de agua y/o una huella de agua después de la ponderación*

El perfil de huella de agua muestra los flujos de agua y los impactos ambientales asociados a lo largo del ciclo de vida de una construcción, este es de utilidad a la hora de identificar las etapas del ciclo de vida con mayor impacto y los flujos de agua más importantes. Este es recomendado si se busca una visión general del impacto ambiental de la edificación.

Si el objetivo es obtener un indicador único que refleje el impacto total de la construcción sobre los recursos hídricos para su comparación con otras construcciones, entonces se puede seleccionar un solo indicador para reportar diferentes proyectos de construcción con la misma naturaleza constructiva. Esta selección deberá estar respaldada mediante información científica confiable que brinde un respaldo de la elección (INTE ISO 14046, 2015).

Se sugiere realizar un perfil de la huella de agua para la construcción, mediante la cuantificación de la huella de agua para las 4 categorías de impacto recomendadas en la Tabla 6, las cuales se estiman mediante 4 diferentes métodos, cada uno de ellos asociado a un indicador de categoría.

*Considerar si la evaluación de la huella de agua será integral*

Una evaluación de huella de agua se considera integral cuando abarca todo el ciclo de vida del producto o actividad que se está evaluando, desde la extracción de las materias primas hasta la disposición final, que en el caso de la construcción sería la demolición y en algunos casos, el reciclaje de los escombros.

El concepto de huella de agua integral considera la evaluación de los flujos de agua directos e indirectos, así como los impactos ambientales asociados a la utilización de los recursos hídricos a lo largo de todo el ciclo de vida de la edificación.

Además, una evaluación de huella de agua también se considera integral cuando se tienen en cuenta todos los impactos ambientales asociados a la utilización de agua (INTE ISO 14046, 2015).

Debido a esto la metodología para evaluar la huella de agua en el presente proyecto no sería integral, ya que esta solo cubre las dos

primeras fases del ciclo de vida una construcción, como se ha mencionado anteriormente. Además, solo analizar 4 impactos ambientales de todos los disponibles.

*Cadenas de causa-efecto e impactos ambientales potenciales que son considerados en la evaluación de la huella de agua*

Para seleccionar las cadenas de causa-efecto e impactos ambientales potenciales que deben ser cubiertos por la evaluación de la huella de agua, es importante realizar una evaluación de los aspectos ambientales relacionados con la utilización de agua en el ciclo de vida del producto o actividad que se está evaluando, como lo sería en este caso la construcción.

Una vez identificadas las fases del ciclo de vida de la construcción que se evaluarán, se debe evaluar su relevancia en función del contexto específico de la actividad o el producto evaluado.

*Consecuencias previsibles de los impactos ambientales excluidos*

En cuanto a las consecuencias previsibles de los impactos ambientales potenciales excluidos, es importante tener en cuenta que la exclusión de ciertos impactos puede generar incertidumbre en la evaluación de la huella de agua y puede no reflejar completamente los impactos ambientales asociados a la utilización de agua (INTE ISO 14046, 2015).

Por lo tanto, es importante justificar claramente las exclusiones y documentar los resultados de la evaluación de la huella de agua, incluyendo las limitaciones y la incertidumbre asociada a las exclusiones.

*Incertidumbres y limitaciones*

Una evaluación de la huella de agua de una situación particular no es suficiente para utilizarse en la descripción completa de los impactos ambientales potenciales de productos, procesos u organizaciones.

Aunque una evaluación de la huella de agua en la construcción puede proporcionar información valiosa, existen ciertas incertidumbres y limitaciones que deben tenerse

en cuenta, como lo pueden ser (INTE ISO 14046, 2015):

- a) Incertidumbres en las estimaciones: La precisión de los resultados de la huella de agua dependerá en gran medida de la calidad y disponibilidad de los datos. Las incertidumbres pueden surgir debido a la falta de datos precisos, el uso de estimaciones y la variabilidad en los patrones de consumo de agua.
- b) Limitaciones de alcance: Es posible que algunos flujos de agua e impactos ambientales relevantes se excluyan debido a limitaciones en la metodología o en los datos disponibles. También puede ser difícil incluir flujos de agua y actividades indirectas que tienen impactos significativos.
- c) Simplificaciones en los modelos: La evaluación de la huella de agua a menudo utiliza modelos simplificados para representar la complejidad de los sistemas involucrados. Estos modelos pueden no reflejar completamente la complejidad real de los sistemas y, por lo tanto, pueden llevar a resultados que no son precisos.
- d) Contexto local: Las condiciones locales, como la disponibilidad de agua y las características geográficas, pueden influir en los resultados de la evaluación de la huella de agua. Por lo tanto, es importante tener en cuenta el contexto local al interpretar los resultados.
- e) Limitaciones en la comparabilidad: Es posible que los resultados de la evaluación de la huella de agua no sean comparables entre diferentes edificios o proyectos, ya que las condiciones locales y las limitaciones de alcance pueden variar. Por lo tanto, es importante tener cuidado al comparar resultados de diferentes evaluaciones.
- f) Unidad funcional: Inicialmente el establecimiento de una unidad funcional para las construcciones de Costa Rica puede resultar imposible, esto debido a que las características de cada zona del país varían entre sí, además de que las construcciones

mismas tienen diferentes tipologías constructivas. Se recomienda utilizar el m<sup>2</sup> como unidad funcional y además de esto, asociarlo a una de las tipologías constructivas detalladas en el Manual de Tipologías Constructivas del Ministerio de Hacienda.

#### *Justificaciones para las exclusiones del estudio*

La justificación de no considerar ciertas cadenas de causa-efecto e impactos ambientales en la evaluación de la huella de agua en construcciones se basa en la definición del alcance de la evaluación y la identificación de los impactos ambientales más significativos.

Es importante documentar y explicar claramente por qué se han excluido ciertos impactos ambientales y cómo se ha llegado a esa decisión. Esto puede basarse en la falta de datos disponibles, la complejidad de la cadena de causa-efecto, la insignificancia de los impactos ambientales en comparación con otros, o cualquier otra consideración relevante.

Se debe tener en cuenta que la exclusión de ciertos impactos ambientales puede afectar la precisión y exactitud de la evaluación de la huella de agua. Por lo tanto, es necesario evaluar cuidadosamente y justificar cualquier exclusión para asegurar que la evaluación sea lo más completa y precisa posible dentro del alcance definido (INTE ISO 14046, 2015).

#### *Condiciones de la línea base que se comparen con las condiciones actuales causadas por las actividades*

En la evaluación de la huella de agua en la construcción, la línea base se refiere a las condiciones previas a la realización de la actividad o proyecto que se está evaluando. La línea base se utiliza para comparar con las condiciones actuales que son causadas por las actividades, con el fin de determinar el impacto ambiental que ha tenido el proyecto.

La línea base se define mediante la identificación y medición de los parámetros clave que se consideran relevantes para la evaluación. Por ejemplo, la línea base debería incluir la medición de la calidad del aire y el agua antes de

iniciar cualquier actividad relacionada con la construcción, remodelación, demolición, entre otros. Así como la evaluación de la biodiversidad y la calidad del suelo en la zona donde se va a realizar la actividad.

Para la construcción de un edificio, la línea base podría incluir la medición de la calidad del aire y el agua antes del inicio de la construcción, así como la evaluación de la biodiversidad y la calidad del suelo en la zona donde se va a construir el edificio.

Es importante que la línea base se establezca de manera rigurosa y precisa para que se pueda comparar adecuadamente con las condiciones actuales. Además, es importante tener en cuenta que las condiciones pueden cambiar con el tiempo, por lo que es necesario actualizar la línea base periódicamente para garantizar que siga siendo relevante y útil para la evaluación de la huella de agua (INTE ISO 14046, 2015).

#### *Tipo y formato de informe*

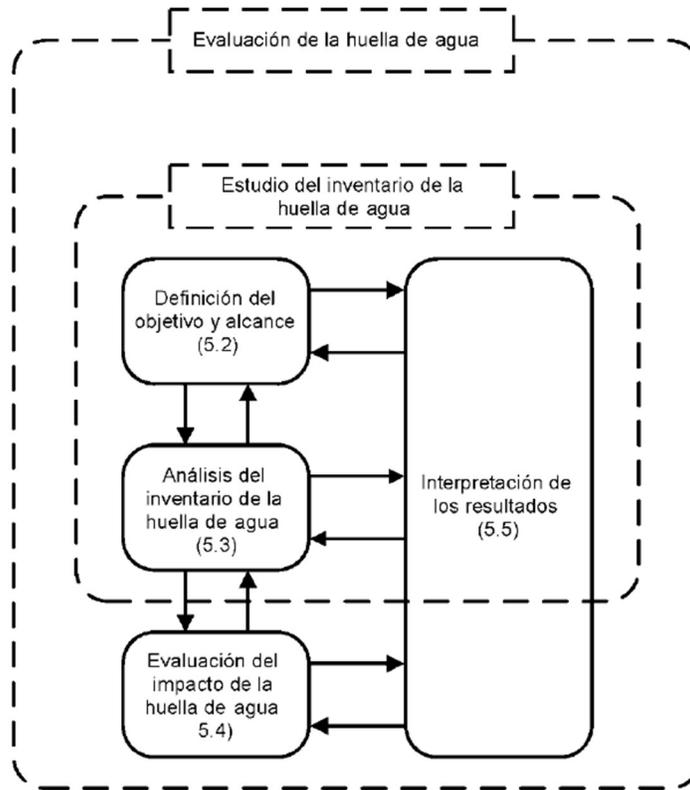
Si se desea reportar la evaluación de la huella de agua y los resultados de esta, se deberán seguir las reglas especificadas en la Norma ISO 14044 (2006) donde se menciona que tanto el tipo como el formato del informe, deberán definirse en la fase de alcance del estudio. Los resultados y conclusiones deben informarse de forma completa, precisa y sin prejuicios a la audiencia objetivo. Aparte de esto, los datos, métodos, supuestos y limitaciones deberán ser transparentes y ser presentados con el suficiente detalle como para brindar una comprensión de lectura sencilla para el lector.

#### *Tipo de revisión crítica*

Para que la revisión de un informe de huella de agua sea crítica se debe verificar que (para más información acerca de cómo realizar una revisión técnica, revisar el Capítulo 7 de la norma ISO 14046 (2006):

- Los métodos utilizados para determinar las huellas del agua deben ser coherentes con la Norma INTE (2006).
- Los métodos y el modelo de simulación del inventario utilizados para realizar la evaluación de la huella de agua deben ser científica y técnicamente válidos.
- Los datos y los resultados del modelo utilizados deben ser apropiados y razonables en relación con el objetivo del estudio.
- Las interpretaciones deben reflejar las limitaciones identificadas y el objetivo del estudio.
- El informe del estudio debe ser transparente y coherente con el objetivo y el alcance del estudio.

Para un mejor entendimiento de estas fases, ya sea para realizar una evaluación de la huella de agua o un estudio de inventario de huella de agua, y forma en que estas se interrelacionan, se puede consultar la Figura 51.

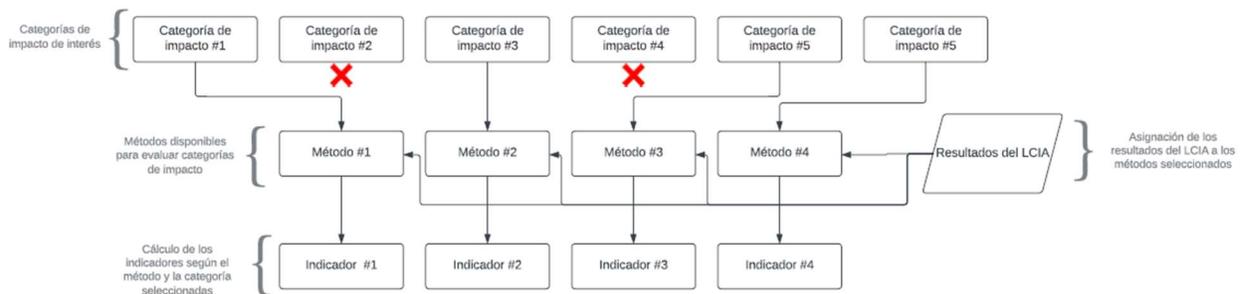


**Figura 51.** Fases de la evaluación de la huella de agua.  
**Fuente:** Extraído desde (INTE ISO 14046, 2015).

Anudado a esto, es importante considerar que la fase de evaluación del impacto de la huella de agua deberá incluir los siguientes elementos de forma obligatoria (ver Figura 52):

- Selección de categorías de impacto, indicadores de categorías y modelos de categorías.

- Asignación de los resultados del LCIA a las categorías y métodos seleccionados.
- Cálculo de los indicadores según el método seleccionado.



**Figura 52.** Diagrama de flujo de la evaluación del impacto de la huella de agua.  
**Fuente:** Elaboración propia con base en los fundamentos de la Norma INTE 14044.

## Inventario de la huella de agua para una construcción

Para realizar un inventario de la huella de agua de una construcción se deberían seguir los siguientes pasos (INTE ISO 14046, 2015):

1. Definir los límites del sistema: es importante establecer qué se va a incluir en el análisis y qué no. Por ejemplo, se puede definir que se incluirán desde la extracción de los materiales hasta el diseño, como es el caso del presente estudio.
2. Identificar los materiales y energías utilizados: se debe hacer una lista de todos los materiales y energías utilizados en la construcción, incluyendo desde la extracción de materias primas hasta el transporte y la fabricación de los materiales. Para el presente caso, solamente se contará hasta la fase de diseño de la construcción.
3. Identificar los flujos de agua: se deben identificar los flujos de agua que se utilizan en la construcción y en su fase de uso, incluyendo agua potable, agua de riego, agua de enfriamiento, entre otros. Estos flujos de agua quedan por fuera del alcance del proyecto, por lo que no serán tomados en cuenta.

## Cuantificación de los flujos de agua

Para cuantificar los flujos de agua de una construcción, es necesario considerar que estos son los flujos de agua que deben ser cuantificados (INTE ISO 14046, 2015):

1. Calcular los flujos de agua virtual: para cada flujo de agua, se debe calcular la cantidad de agua virtual asociada a la extracción, transporte, tratamiento y disposición de agua. Los flujos de agua virtual se refieren al agua necesaria para producir bienes y servicios. En otras palabras, es el agua "oculta" o indirecta utilizada en la producción de un

producto o servicio, incluyendo el agua utilizada en la producción de materiales, la energía y otros insumos utilizados en la construcción. Estos cálculos se realizan a través de bases de datos disponibles o mediante fórmulas específicas.

2. Medir los flujos de agua: se debe medir la cantidad de agua utilizada en cada uno de los flujos identificados. Esto se puede hacer mediante medidores de agua o estimaciones basadas en factores de uso congruentes con la realidad del proyecto.

Actualmente no existe una base de datos que presente valores estandarizados para Costa Rica y que sea de acceso de gratuito, por lo que la única medición de flujo de agua que se puede realizar es la de aquellos que puedan ser cuantificados en sitio por medio de medidores de agua o estimaciones realizadas a partir de factores de uso por actividad, esto partiendo del hecho que no se tiene acceso a ninguna de las robustas bases de datos que se mencionaron.

Por lo que, de ser así, una vez se ha culminada la recopilación de los datos, estos deben incluir los siguientes procedimientos de cálculo (INTE ISO 14046, 2015):

- La validación de los datos recopilados.
- La relación de los datos con los procesos unitarios.
- La relación de los datos con el flujo de referencia de la unidad funcional.

Es importante destacar que a pesar de que no se considere en este proyecto, el cálculo de los flujos de energía debería tener en cuenta las diferentes fuentes de combustible y electricidad utilizadas, la eficiencia de la conversión y la distribución del flujo de energía. Así como las entradas y salidas asociadas a la generación y a la utilización de ese flujo de energía.

## Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)

La evaluación de impacto de un ACV tiene como propósito evaluar cuán significativos

son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del Inventario de Ciclo de Vida (ICV). En general, este proceso implica la asociación de los datos de inventario con las categorías de impactos ambientales específicos y con los indicadores de esas categorías para entender estos impactos. La fase de EICV también proporciona información para la fase de interpretación del ciclo de vida (INTE ISO 14046, 2015).

En el caso del presente proyecto, se trabajará con 4 categorías de impacto:

1. Escasez.
2. Disponibilidad.
3. Ecotoxicidad en agua dulce.
4. Eutrofización en agua dulce.

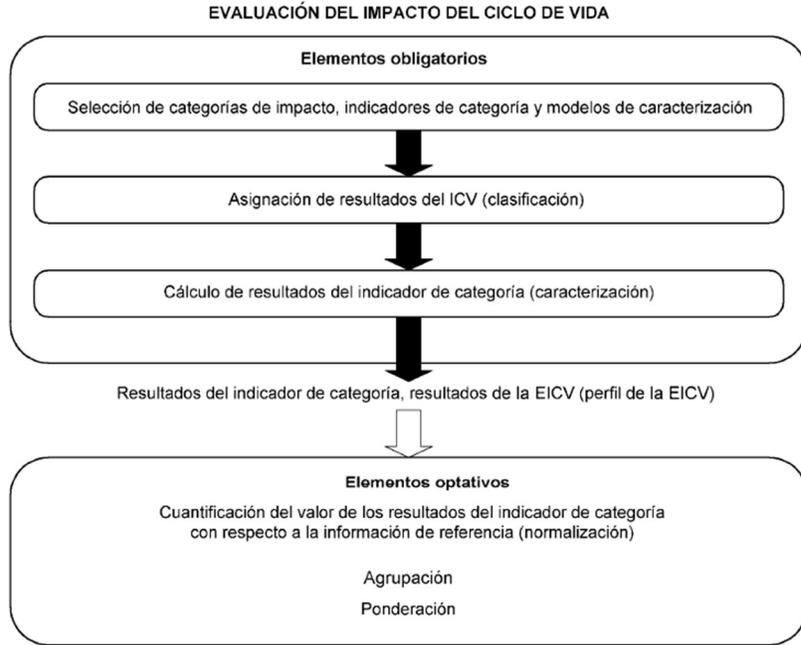
La evaluación del impacto puede incluir un proceso iterativo de revisión del objetivo y del alcance del estudio de ACV para determinar si se han cumplido los objetivos de este, o para modificar el objetivo y el alcance si la evaluación indica que no se pueden alcanzar.

Cuestiones tales como la elección, el modelado y la evaluación de categorías de impacto pueden introducir subjetividad en la fase de la EICV. Por lo tanto, la transparencia es crítica en la evaluación del impacto a fin de asegurar que las suposiciones están claramente descritas e informadas (INTE ISO 14046, 2015; ISO 14044, 2006).

### Elementos de la EICV

La EICV se puede separar en diferentes elementos, esto puede resultar útil y necesario por varias razones, como se detalla a continuación y se complementa con la Figura 53 (INTE ISO 14046, 2015):

- a) Cada elemento de la EICV se distingue y se puede definir con claridad.
- b) La fase de definición del objetivo y del alcance de un ACV puede considerar cada elemento de la EICV por separado.
- c) Una evaluación de la calidad de los métodos, suposiciones y otras decisiones de la EICV, se puede realizar para cada elemento.
- d) Dentro de cada elemento de la EICV, es posible dar transparencia a los procedimientos, las suposiciones y otras operaciones para la revisión crítica y el informe.
- e) Para cada elemento, es posible dar transparencia a la utilización de valores y de la subjetividad (juicios de valor), para la revisión crítica y el informe.



**Figura 53.** Elementos de la fase de EICV.  
**Fuente:** Extraído desde (INTE ISO 14046, 2015).

## Categorías de impacto y sus métodos de evaluación

por CADIS y COSUDE (2016) se muestran en la Tabla 23.

Las categorías de impacto que se proponen para la estimación de la huella de agua en la construcción son las mismas que se proponen

**Tabla 23.** Categorías de impacto y métodos de evaluación propuestos para evaluar la huella de agua en el sector construcción costarricense.

Categoría	Método	Indicador
Escasez	Agua disponible remanente – AWARE (A. Boulay et al., 2015)	Water Scarcity Footprint [ $m^3_{equiv} / m^2$ ]
Disponibilidad	Huella de disponibilidad de agua (A. M. Boulay, Bulle, et al., 2011)	$HH_{impact}$ [DALY]
Ecotoxicidad en agua dulce	USEtox 2.0 (USEtox® International Center et al., 2017)	$EF_{eco}$ [PAF $m^3 kg^{-1}$ ]
Eutrofización en agua dulce	ReCiPe  (Huijbregts et al., 2017)	$FEP_{x,c,i}$ [kgP equiv / kg de sustancia]

**Fuente:** Elaboración propia mediante la publicación de CADIS y COSUDE (2016).

## Pasos específicos por seguir para la estimación de la huella de agua en edificaciones y su relación

Los pasos específicos por seguir para realizar una estimación de la huella de agua en edificaciones son los mismos pasos mencionados en la metodología propuesta. Esta metodología

presenta 6 pasos, los estrictamente necesarios para realizar una estimación de la huella de agua según la norma INTE 14046 (INTE ISO 14046, 2015) son solamente 4.

La mayor diferencia entre la metodología de la norma INTE 14046 y la propuesta, es que la segunda divide dos pasos de la primera para facilitar el entendimiento del procedimiento a seguir.

El paso de ICV propuesto por la norma INTE 14046 se divide en los pasos de inventario de huella de agua y la cuantificación de los flujos de agua de ese inventario.

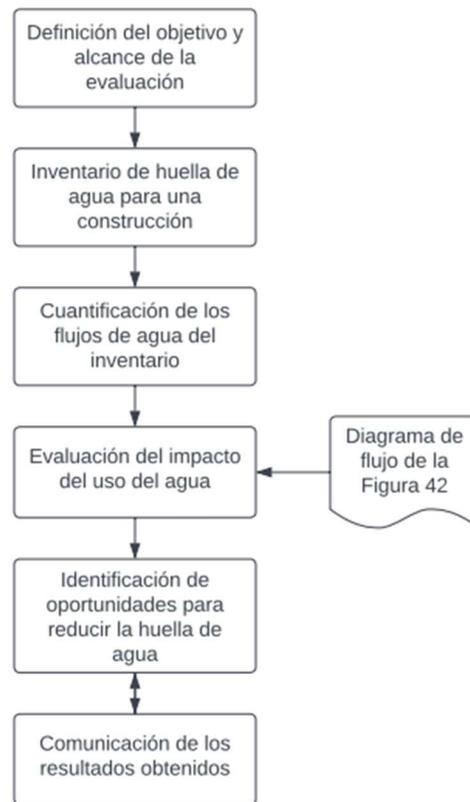
Se realizó de esta forma para que el usuario pueda comprender, de una manera más sencilla, como realizar el inventario de ciclo de vida sin la necesidad de datos y posteriormente como debe cuantificarlos y reportarlos para su aceptación.

El paso de interpretación de los resultados obtenidos del LCIA se encuentra implícito en el paso de identificación de oportunidades para reducir la huella de agua. Se realizó de esta forma debido a que la interpretación de los resultados obtenidos se encuentra directamente relacionada con la identificación de oportunidades para reducir la huella de agua.

Esta decisión fue tomada debido a que una vez se tienen los resultados del LCIA, se puede determinar cuáles son las etapas que presentan un mayor impacto por huella de agua y, cuáles son los materiales o procedimientos que consumen más agua.

Con base en esta información se pueden generar estrategias que se enfoquen precisamente en las etapas y los materiales que más huella de agua aportan a la construcción como tal y tomar medidas sobre estas para reducir sus impactos ambientales asociados al recurso hídrico.

Es de esta forma que a pesar de que la metodología propuesta posea 2 pasos más, esta brinda una mejor visión de como estimar la huella de agua y como estos pasos se relacionan entre sí. La relación entre estos pasos se observa en la Figura 54.



**Figura 54.** Pasos específicos por seguir para la estimación de la huella de agua en edificaciones.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Es importante mencionar que cada uno de estos pasos debe ser consignado cumpliendo los requisitos mencionados en la metodología propuesta y en las normas INTE 14046 y 14044 (2015; 2006) por lo que para una mejor comprensión de estos pasos específicos se recomienda consultar la metodología propuesta, en la sección de la Metodología.

## Sugerencia de límite de corte

Respecto al criterio de límite de corte, los límites deben seleccionados por los profesionales a cargo de evaluar la huella de agua de la construcción, para esto deberán definir si se desea realizar una evaluación integral de la huella de agua o si no serán evaluadas todas sus fases, cuáles se seleccionan y por qué.

La forma de seleccionar que etapas del ciclo de vida se desea evaluar debe basarse en las características propias del proyecto, por

ejemplo, si una constructora se encarga de solamente realizar el diseño de edificaciones, esta puede evaluar las fases de extracción de materias primas y diseño.

Pero, si por otro lado, se trata de una constructora que además de realizar el diseño de una edificación, se encargará de llevar a cabo la construcción de esta, se puede evaluar la inclusión de las fases de construcción y eventualmente, la de uso.

Esta última como un indicador útil que se puede brindar a los futuros usuarios de la edificación de modo que estos se informen acerca de las posibles huellas de agua que tendrá el edificio a lo largo de su etapa de operación

Esto puede ser de utilidad a la hora de evaluar la posibilidad de incorporar sistemas de ahorro de agua al sistema mecánico de la edificación, donde el diseñador puede exponer acerca de los beneficios que tendría la incorporación de estos y como se vería reflejada en un impacto ambiental más bajo y una disminución de costo económico del recurso vs el costo de los sistemas.

Para el criterio de corte en los materiales, solamente en la evaluación realizada a la Torre Este del Hospital Calderón Guardia en Costa Rica se define un criterio de corte, este corte se estableció en un 0,1% del peso total de los materiales. Sin embargo, la Ing. Melissa Díaz (2023) brinda como referencia un rango del 0,1% al 5%, cabe destacar que la Ing. Díaz posee una importante experiencia en la evaluación de huella de agua. Díaz además mencionó que el escenario ideal en la evaluación de la huella de agua en la construcción debe incluir entradas de masa y energía, pero en el caso de que se deba escoger una, lo ideal es trabajar con masas.

## Limitaciones de la EICV

La EICV trata solamente los asuntos ambientales especificados en el objetivo y el alcance, por lo que la EICV no es una evaluación completa de todos los asuntos ambientales del sistema del producto bajo estudio.

De igual forma, la EICV puede no siempre demostrar diferencias significativas entre las categorías de impacto y los resultados de sus indicadores correspondientes para diferentes alternativas de los sistemas del producto. Lo

anterior puede deberse a (INTE ISO 14046, 2015):

- Un desarrollo limitado de los modelos de caracterización, de los análisis de sensibilidad y de incertidumbre para la fase de la EICV.
- Limitaciones de la fase de ICV, tales como el establecimiento de los límites del sistema, que no incluyen todos los procesos unitarios posibles para un sistema del producto o no incluye todas las entradas y salidas de cada proceso unitario, ya que hay cortes y vacíos en los datos. Además, las incertidumbres y las diferencias en los procedimientos de asignación y de agregación, que pueden resultar en una inadecuada calidad de los datos del ICV.
- Limitaciones en la recopilación de los datos de inventario adecuados y representativos para cada categoría de impacto.

Se debe mencionar que la ausencia de dimensiones espaciales y temporales en los resultados del ICV introducen incertidumbre en los resultados de la EICV. Además de esto, actualmente no existen metodologías aceptadas de manera general para asociar de forma coherente y exacta los datos de inventario con los impactos ambientales potenciales específicos.

## Identificación de oportunidades para reducir la huella de agua

Una vez se ha realizado la EICV es posible identificar que oportunidades de mejora se aprecian para reducir la huella de agua. Para identificar estas oportunidades se pueden seguir los siguientes pasos (INTE ISO 14046, 2015):

1. Analizar los resultados de la evaluación de la huella de agua: Es necesario entender las principales fuentes de consumo de agua y los impactos ambientales asociados para identificar las áreas que requieren atención.
2. Identificar alternativas de diseño y materiales: Es importante buscar alternativas de diseño y materiales que puedan reducir el consumo de

agua, como la instalación de sistemas de recolección de agua de lluvia, la utilización de materiales con menor huella de agua, entre otros.

3. Optimizar el uso de agua: Se deben implementar medidas para optimizar el uso del agua, como la instalación de dispositivos de ahorro de agua, la reutilización de agua, la implementación de sistemas de riego eficientes, entre otros.
4. Realizar una gestión adecuada de residuos: Una adecuada gestión de residuos en la construcción también puede ayudar a reducir la huella de agua, ya que puede reducir la cantidad de agua necesaria para la producción y transporte de materiales.
5. Fomentar la educación y conciencia ambiental: Es importante fomentar la educación y conciencia ambiental en todos los involucrados en el proceso de construcción, desde los propietarios hasta los trabajadores, para que puedan contribuir a la reducción de la huella de agua.

## **Comunicación de los resultados obtenidos**

Para la comunicación de los resultados obtenidos referentes a la huella de agua, los interesados deberán hacer uso de la sección 6 de la Norma INTE 14046 (2015), donde se establecen los requisitos que deben contener los informes, ya sea según el público objetivo, los juicios de valor, entre otros.

## **Herramienta para el registro de datos para la estimación de la huella de agua en la construcción**

### **Herramienta estándar, accesible y de fácil entendimiento para el registro de los datos de huella de agua**

Una vez se han definido los conceptos básicos acerca de la huella de agua y la metodología a seguir que abarca estos temas y muestra como estos se interrelacionan, se procedió con la creación de una herramienta para el registro de datos para la estimación de la huella de agua en la construcción mediante la herramienta tecnológica MS Excel.

Esta herramienta reúne todas las características básicas que debe tener un proyecto al que se le desea evaluar la huella de agua, de forma tal que los interesados pueden realizar una especie de “llenado de formulario”.

El formato de esta herramienta se observa en las Figuras 52, 53 y 54, para sus pasos 1, 2 y 3, respectivamente. Para observar mejor la herramienta se recomienda abrir directamente el documento .xls o ya sea desde el Anexo 3.

En las Figuras 55, 56 y 57, se detallan los pasos 1, 2 y 3, respectivamente, de la herramienta para el registro de datos para la estimación de huella de agua en el sector construcción costarricense.

1. Definición del objetivo y alcance de la evaluación		
1.1 Objetivo		
Elemento	Descripción	Notas
1.1.1 Aplicaciones previstas	Ej: El presente estudio permitirá comprender los impactos del agua en la construcción de una edificación de tipología constructiva VC01 según la clasificación del ONT.	
1.1.2 Razones para efectuar el estudio	Ej: La evaluación se está realizando debido a una iniciativa de la empresa constructora en incluir la huella de agua a sus diseños y determinar que elementos son los que generan mayores impactos.	
1.1.3 Público objetivo	Ej: Empresas diseñadoras y constructoras de viviendas unifamiliares.	
1.1.4 ¿Se trata de una evaluación única e independiente o forma parte de un análisis del ciclo de vida?		
1.1.5 ¿El estudio tiene fines comparativos?		
1.2 Alcance		
Elemento	Descripción	Notas
1.2.1 Límites del sistema		
1.2.2 Unidad funcional (especifique unidades)	Ej: m <sup>2</sup> construidos para una vivienda de tipología VC02 según el Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva del ONT.	
1.2.3 Cobertura geográfica	Ej: Provincia, Cantón, Distrito y Barrio.	
1.2.4 Cobertura temporal	Ej: Fecha de inicio y final.	
1.2.5 Fuente de datos primarios	Ej: Empresa encargada de la construcción de la obra.	
1.2.6 ¿Los datos son tomados directamente del proyecto o provendrán de alguna construcción similar a la que se encuentra en estudio?		
1.2.7 ¿Cómo se recolectaron los datos?	Ej: Técnicas y tecnologías aplicadas para la recolección de los datos.	
1.2.8 Precisión de los datos	Ej: La varianza de los datos resultó baja.	
1.2.9 Criterio de corte	Ej: Con base en los pesos unitarios totales para cada material y el peso total de la estructura, se determina un criterio de corte del 5%, de forma que se incluyan solamente los materiales más representativos en la evaluación de huella de agua.	Este punto debe ser completado una vez se tenga el inventario de ciclo de vida.
1.2.10 Fuente de datos secundarios	Ej: Base de datos Ecoinvent en su versión más reciente.	
1.2.11 Suposiciones y juicios de valor	Ej: Se supone que toda el agua consumida es agua subterránea.	
1.2.12 ¿Cuáles categorías de impactos ambientales relacionados con el uso de agua serán considerados?		
1.2.13 Mencione los métodos que utilizará para evaluar los impactos ambientales relacionados con el uso del agua seleccionados y relacionelos entre sí	Ej: Se utilizará el método AWARE para evaluar el impacto por escasez y el método USEtox 2.0 para evaluar la ecotoxicidad en agua dulce.	
1.2.14 ¿La evaluación de la huella de agua será integral?		
1.2.15 Incertidumbre y limitaciones		
1.2.16 Mencione y justifique cuáles categorías de impacto fueron excluidas	Ej: Se descartó la categoría de impacto por Eutrofización marina debido a que la fuente del agua consumida es superficial.	

**Figura 55.** Paso 1 de la herramienta para el registro de datos para la estimación de la huella de agua en la construcción.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Notas:** Las celdas en color amarillo muestran los espacios que deben ser rellenados. Las celdas sin ejemplos corresponden a espacios donde se debe seleccionar una de las opciones.

2. Inventario de huella de agua para la construcción en estudio				
Elemento		Descripción		Notas
2.1 Definir los límites del sistema		0		
2.2 Identificación de los materiales y energías utilizados (ICV)				
2.2.1 Fase de Producción <input type="checkbox"/> Aplica según los límites del sistema				
Nombre	Cantidad	Unidad	Materiales	
Por ejemplo: Concreto	1250	m <sup>3</sup>	Definición según base de datos escogida	
2.2.2 Fase de Planificación y Diseño <input type="checkbox"/> Aplica según los límites del sistema				
Nombre	Cantidad	Unidad	Materiales	
Por ejemplo: Gasolina	100	L	Definición según bases de datos escogida	

**Figura 56.** Paso 2 de la herramienta para el registro de datos para la estimación de la huella de agua en la construcción.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Nota:** Las celdas en color amarillo muestran los espacios que deben ser rellenados.

3. Cuantificación de los flujos de agua			
3.1 Fase de Producción <input type="checkbox"/> Aplica según los límites del sistema			
3.1.1 Del agua			
Aspecto	Descripción		
Tipo de recurso de agua			
Forma de uso del agua			
Características físicas	Por ejemplo: Color, olor y sabor, temperatura, pH, turbidez, entre otros.		
Características químicas	Por ejemplo: Cant. Aluminio, Cant. Mercurio, Cant Plomo, Cant. Hierro, Cant. Fluoruro, Cant. Cobre, Cant. Cloruro, Cant. Sulfatos, Cant. Nirtritos y nitratos, entre otros.		
Características biológicas	Por ejemplo: Presencia de algas, Presencia de hongos, mohos y levaduras, entre otros.		
3.1.2 De las cantidades de los flujos de agua			
Tipo de agua	Cantidad	Unidad	Comentarios
Agua residual		m <sup>3</sup>	
Agua pérdida		m <sup>3</sup>	
Agua tratada		m <sup>3</sup>	
3.2 Fase de Planificación y Diseño <input type="checkbox"/> Aplica según los límites del sistema			
3.2.1 Del agua			
Aspecto	Descripción		
Tipo de recurso de agua			
Forma de uso del agua			
Características físicas	Por ejemplo: Color, olor y sabor, temperatura, pH, turbidez, entre otros.		
Características químicas	Por ejemplo: Cant. Aluminio, Cant. Mercurio, Cant Plomo, Cant. Hierro, Cant. Fluoruro, Cant. Cobre, Cant. Cloruro, Cant. Sulfatos, Cant. Nirtritos y nitratos, entre otros.		
Características biológicas	Por ejemplo: Presencia de algas, Presencia de hongos, mohos y levaduras, entre otros.		
3.2.2 De las cantidades de los flujos de agua			
Tipo de agua	Cantidad	Unidad	Comentarios
Agua residual		m <sup>3</sup>	
Agua pérdida		m <sup>3</sup>	
Agua tratada		m <sup>3</sup>	

**Figura 57.** Paso 3 de la herramienta para el registro de datos para la estimación de la huella de agua en la construcción.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Nota:** Las celdas en color amarillo muestran los espacios que deben ser rellenados. Las celdas sin ejemplos corresponden a espacios donde se debe seleccionar una de las opciones.

# Análisis de los resultados

## Análisis del estado del arte de la estimación de huella de agua en Costa Rica

Al realizar un análisis del estado del arte de la huella de agua, se logra observar que no existe registro de estudios de huella de agua relaciones con el sector construcción costarricense que sean de carácter público, los únicos documentos relacionados con este tema son de carácter privado y corresponden a ejercicios de práctica realizados en el 2021 por dos grupos de profesionales, uno de Costa Rica y otro de México (Jones et al., 2021; Sacayán & Martínez, 2021).

Por lo que se recomienda hacer uso de la información disponible en internet, donde se pueden encontrar artículos científicos, libros e incluso conferencias donde se trata el concepto de huella de agua y su aplicación en la construcción, e intentar tomar como referencia las decisiones tomadas en estas evaluaciones, preferiblemente cuando presenten una naturaleza similar al proyecto. Esto con el fin de que los datos sean más fácilmente reproducidos a la hora de realizar comparaciones entre la información disponible y el diseño de la obra por realizar.

Se encontraron diversos estudios de huella de agua, aplicados para diferentes proyectos en diferentes partes del mundo. Cada uno de estos proyectos fue desarrollado bajo condiciones climatológicas e hídricas distintas, al igual que el diseño estructural variaba entre viviendas y edificios de una o varias plantas, lo que indica que sus resultados no son directamente comparables.

En algunos de estos se evaluó la huella de agua mediante la combinación de las dos metodologías más utilizadas y aceptadas a nivel mundial para cumplir este fin, las cuales son la

del Water Footprint Network (WFN) y la Huella de Agua especificada en la norma ISO 14046.

Es importante destacar que aún en estas publicaciones se producen severas confusiones respecto a la huella de agua de la norma ISO 14046 (INTE ISO 14046, 2015) y la huella hídrica de Hoekstra (A. Y. Hoekstra & Hung, 2002). En el caso de la huella hídrica, esta determina y cuantifica los flujos de agua en tres categorías, las cuales son: huella azul, huella verde y huella gris. Por su parte, la huella de agua se encarga de igualmente identificar las cuantías de agua, pero esta las evalúa de manera diferente, desde una perspectiva de potenciales impactos al ambiente.

Debido a que el enfoque aceptado en Costa Rica corresponde al de huella de agua, se procede con la elaboración de un resumen de los términos básicos más importantes para generar un conocimiento general de esta metodología al público objetivo, estos términos se encuentran divididos según la naturaleza de cada uno de estos y además brinda una breve descripción.

Se definieron dos tipos de uso del agua, el uso consuntivo y degradativo y el uso evaporativo y no evaporativo, donde se seleccionó el uso consuntivo y degradativo debido a que con este tipo de evaluación se pueden detectar las etapas, sustancias y procesos que mayor escasez e impactos provocan al ambiente, lo que permite proponer soluciones que ayuden a reducir la huella de agua.

Respecto a las categorías de impacto, estas se detallaron en la Tabla 5 y corresponden a: escasez, disminución del nivel freático, disponibilidad, eutrofización de agua dulce, toxicidad en humanos, ecotoxicidad de agua dulce, acidificación de agua dulce, radiación ionizante en agua dulce, termo-contaminación, ecotoxicidad marina, eutrofización marina, radiación ionizante en ecosistemas marinos y por alteración de flujos.

De entre todas las categorías de impactos que existen relacionadas con la huella de agua, CADIS y COSUDE (CADIS & COSUDE, 2016) recomiendan utilizar la escasez, la disponibilidad, la eutrofización y la ecotoxicidad como principales categorías de impacto para América Latina. CADIS y COSUDE proponen estas categorías con el fin de crear un esquema de acreditación y verificación que permita la competitividad de las compañías de la región, en un campo activo de la investigación que se encuentra en constante evolución.

Además de recomendar estas categorías, estos también realizaron una evaluación de los métodos por aplicar a cada una de estas categorías de impacto mencionadas anteriormente, esto se realizó mediante un método analítico jerárquico para la toma de decisiones.

Por lo que, los métodos AWARE, Huella de disponibilidad de agua, USEtox 2.0 y ReCiPe (v1.1) son los recomendados para la evaluación del impacto de la huella de agua para América Latina y por ende extrapolables al sector construcción costarricense.

Debido a esto, las categorías de impacto para evaluar la huella de agua en el sector construcción serán las mismas que proponen CADIS y COSUDE, basándose en el amplio conocimiento de los profesionales encargados de realizar la selección de las categorías y los métodos para evaluarlas.

En la Tabla 6 se aprecia como existe un indicador específico para cada uno de los métodos mencionados anteriormente, donde todos poseen una variable en común, el volumen de agua asociado. La investigación y desarrollo de cada uno de estos métodos muestra cual es la metodología de aplicación para cada uno de ellos, cuáles son los diferentes tipos de impactos que pueden evaluar y las ecuaciones que se ven deben emplear en el cálculo de cada uno de sus factores.

Debido a esto, se determina que, como un primer intento de aplicar esta metodología en la construcción de Costa Rica, se podría iniciar con la medición de los flujos de agua en las etapas de construcción y uso, del ciclo de vida de la edificación, debido a que la etapa a la que se dio enfoque en esta investigación resultó presentar impactos menores en comparación a las fases de construcción y uso.

Estas resultan ser las etapas del ciclo de vida que pueden ser estimadas de forma más sencilla mediante una toma de datos con instrumentos y aproximaciones propias de la edificación. El volumen de agua consumido durante la construcción puede ser fácilmente tomado en campo mediante medidores de agua, y para su etapa de uso, se puede estimar mediante los datos de consumo de agua para cada uno de los instrumentos incorporados a la edificación, como lo son las cacheras, los servicios sanitarios y los electrodomésticos, y la vida útil esperada para la construcción.

Con tan solo esta data y su posterior evaluación, se podría obtener un comportamiento aproximado de cómo la edificación está impactando al ambiente como consecuencia de su construcción y su uso a lo largo de su vida útil. El resto de las etapas del ciclo de vida requieren de tomas de datos más complejas, por ejemplo, en la etapa de diseño, donde se contabiliza el agua empleada para la extracción y producción de las materias primas necesarias para la construcción.

Estos, aparte de ser datos dependientes de los productores, requieren de un mayor empleo de recursos para su recopilación. Sin embargo, los proveedores de materias primas empiezan a incorporar más políticas ambientales a sus políticas internas. Lo que da hincapié a esperar una pronta evolución en este sector en temas ambientales y, por ende, cada vez habría más información disponible y de fácil acceso para su incorporación a futuras evaluaciones de huella de agua en el sector construcción costarricense.

Es importante recordar que los materiales de construcción ya poseen una huella de agua virtual, lo cual corresponde al agua que ha sido utilizada a lo largo de su proceso de extracción y manufactura. Por lo que, para generar informes de huella de agua, donde se incluyan los materiales, los cuales son la materia prima para la construcción y por ende no deben quedar excluidos de ninguna evaluación de huella de agua, se debe poseer una amplia base de datos.

Lo que sucede es que las bases de datos para huella de agua del sector construcción costarricense son prácticamente nulas, sin embargo, se tiene conocimiento de empresas importadoras de materiales como Holcim y Arcelor Mittal, quienes sí han incluido las declaraciones ambientales en muchos de sus productos.

Si el CFIA como ente interesado en incorporar la huella de agua al sector construcción, desea obtener resultados reales y que estos puedan ser reproducibles y comparables, se debería de proponer una iniciativa al MINAE, quienes según el acuerdo 09-2022-MINAE publicado en el Alcance N°23 a La Gaceta N°27, son los responsables de regular el etiquetado ambiental y de eficiencia energética, además de establecer las condiciones de gestión de las etiquetas ambientales y energéticas de Costa Rica (MINAE, 2023).

Además del CFIA y el MINAE, también se pueden tocar las puertas del MEIC quienes, según la Política Nacional de Compras Públicas Sustentables y Creación del Comité Directivo Nacional de Compras Sustentables publicada en el Decreto Ejecutivo 39310, se deben encargar de promover la conformidad con la Ley de Fortalecimiento de las Pequeñas y Medianas Empresas, el desarrollo empresarial sostenible, dirigido a armonizar la producción empresarial con los recursos naturales y la calidad de vida de los habitantes (Presidencia de La República et al., 2015).

Estos, en conjunto deberán encargarse de incitar a las empresas proveedoras de materiales constructivos más importantes, a incluir estas declaraciones ambientales a todos sus productos.

De igual forma como ya se mencionó anteriormente, en la actualidad ya se conoce de empresas que han incluido estas declaraciones ambientales a sus productos, por lo que uno de los primeros pasos podría ser la recopilación de todos estos datos disponibles en una sola base de datos. Esta base de datos debería tener como fin el reunir toda la información disponible acerca de huellas sobre los productos constructivos, lo cual facilitaría y agilizaría enormemente el proceso de evaluación de huella de agua.

Las construcciones son productos que presentan rangos de tiempo muy limitados, y el tiempo que existe entre la etapa de diseño y la etapa de construcción es muy corto. Lo que apunta a que no es viable realizar estudios de huella de agua que busquen ofrecer soluciones sostenibles a los proyectos, no si estas soluciones son presentadas una vez se ha concretado la compra de materiales o se ha iniciado la construcción. Por lo que resulta importante considerar desde un inicio los impactos ambientales de la construcción para así,

plantear los mecanismos de estimación de huella de agua que mejor se adopten al diseño de la edificación y los objetivos de la evaluación misma.

Además de la información recabada acerca de las bases de datos, también se tiene el cálculo de los indicadores de impacto asociados a los métodos que seleccionen, donde estos requieren una serie de entradas para cada material, como lo pueden ser todos los minerales y energía necesarios para manufacturar cada uno de los materiales. De igual forma estos procesos no tienen como única salida al producto, sino que se presentan emisiones al suelo, al agua y al aire en su proceso de fabricación y transporte.

Las variables indispensables para aplicar la huella de agua en la construcción fueron identificadas correctamente, como lo es la metodología del Análisis de Ciclo de Vida, siendo esta un requisito indispensable para la aplicación de la huella de agua en la construcción y cualquier otro sector de Costa Rica. Las categorías de impacto y los métodos para utilizar también resultan variables indispensables, donde se debe elegir correctamente según el objetivo y el alcance del proyecto.

Para realizar una evaluación integral de la huella de agua en la construcción es necesario analizar todos los impactos relacionados con el ciclo de vida de la estructura, para generar datos desde diferentes puntos de afectación. Donde los mayores impactos pueden presentarse en una fase del ciclo determinada para una categoría de impacto en específico. Se tiene claro que la realidad país no es muy favorable respecto a la gestión del recurso hídrico en la construcción, sin embargo, la idea del proyecto es generar una guía sencilla y de fácil entendimiento que incite a las partes actoras de una construcción sobre tomar interés acerca del tema y empezar a incluirlo en sus proyectos.

Inicialmente puede resultar en un proceso tedioso y sin objetivos del todo claros, sin embargo, en cuanto este concepto se empiece a implementar en el sector el proceso desencadenará un efecto “bola de nieve” (FourWeekMBA, 2023). Siendo el objetivo final, no solo el desarrollo y aplicación de la huella de agua a la mayoría de los proyectos, sino que se diversifique la evaluación a diferentes tipos de huella, como lo son la huella de carbono o la huella ecológica (AQUAE Fundación, 2021).

# Metodología para la estimación de huella de agua en edificaciones en su etapa de diseño

En cuanto a la metodología propuesta para la estimación de huella de agua en edificaciones en su etapa de diseño, se plantearon seis procedimientos para la evaluación de la huella hídrica, no obstante, únicamente tres de ellos fueron efectivamente incorporados debido al alcance del proyecto donde la evaluación se realizaba hasta la fase de diseño, los procedimientos son visibles en la Figura 43. En esta misma figura se puede observar cómo se encuentran relacionados los seis pasos a seguir, a pesar de que como se comentó, solo serán incluidos los primeros tres. Se realizó de esta forma buscando guiar a las partes interesadas en la inclusión de la huella de agua en la construcción, brindando una visión amplia de las partes que deben incluirse si se desea realizar una evaluación integral en todas sus etapas, para que así las partes puedan definir cuales procedimientos incluirán en su evaluación.

Los requisitos de calidad que deben presentar los datos se encuentran directamente relacionados con las especificaciones solicitadas por la norma ISO 14046 (INTE ISO 14046, 2015). En estos requisitos se notó que la recolección y análisis de datos deben realizarse con meticulosidad y rigurosidad, por lo que es recomendable crear una base de datos para la huella de agua en la construcción costarricense, como se mencionó anteriormente o facilitar el acceso de bases de datos como lo pueden ser Ecoinvent y Quantis water database, entre otros (CADIS & COSUDE, 2016).

Los costos de estas bases de datos varían según la cantidad de información que estas ofrezcan, debido a esto puede resultar erróneo decidir una base de datos sobre otra meramente por su precio, estas deben ser analizadas desde el contexto construcción para seleccionar la que ofrezca más información al sector. Si se llegase a concretar la selección de una base de datos, es recomendable que esta sea aplicada y aceptada a nivel nacional, en búsqueda de fortalecer los principios de

representatividad reproducibilidad de los resultados obtenidos.

Se recomienda establecer un límite de corte de masa para la construcción, con un rango de entre el 0,1% y el 5%, esto según la recomendación de la profesional Ing. Melissa Diaz (2023), quien presenta un importante conocimiento del área y quien, además, ha trabajado de la mano con la construcción en diversos proyectos. Sin embargo, este no debe ser el parámetro oficial de todas las evaluaciones, debido a que una evaluación minuciosa podría requerir de límites de corte por debajo del rango brindado por la Ing. Díaz, y para una evaluación más general, los límites podrían encontrarse por encima del rango.

## Herramienta para el registro de datos para la estimación de la huella de agua en la construcción

Finalmente, respecto a la herramienta elaborada, esta se diseñó de forma que resulte sencilla y de fácil entendimiento si se complementa con la información presentada en esta investigación. Sin embargo, esta presenta oportunidades de mejora que deben ser incorporadas conforme se implemente la huella de agua en el sector construcción costarricense y en los proyectos que este desarrolle. Una de las oportunidades de mejora más importantes es que esta, como su nombre lo indica, solo busca guiar a las partes interesadas y no busca habilitar secciones de cálculo.

Por lo que si algún interesado desear utilizar la herramienta con fines de evaluación de impactos, no lo podrá realizar. Esta, además, contiene unos espacios sobre las características del agua que no resultan fáciles de calcular, como lo son las características físicas, químicas y biológicas.

Debido a esto, se incentiva la incorporación de un trabajo multidisciplinario e interdisciplinario para evaluaciones de impactos ambientales asociados al recurso hídrico, los

cuales se encarguen de realizar las pruebas al agua en las diferentes etapas del ciclo de vida (según alcance y objetivo) y determine las características más relevantes para su posterior incorporación a la herramienta. Esta herramienta presenta espacios destinados al registro de los datos del sistema, donde se deberán incluir características como el material, la cantidad de material a utilizar en la construcción, la unidad utilizada para expresar las cantidades y, los datos de entrada y salida para cada subproceso de producción de los materiales.

En el paso tres de la herramienta se deben detallar los flujos de agua elementales del sistema, los cuales deberán clasificarse según el tipo de agua, que puede ser: agua consumida, agua residual y agua tratada.

El objetivo final de este proyecto se encontraba en aportar y reforzar el proyecto-plan piloto para la implementación de la huella de agua en el sector construcción del CFIA, según los resultados obtenidos, resulta complicado y poco viable aplicar integralmente la huella de agua sin la implementación de bases de datos o softwares que agilicen el proceso de cálculo.

Estas bases de datos y herramientas existen por una razón y cobran por sus licencias debido a la rigurosa labor de estimación que existe en el trasfondo de cada uno de los datos y resultados presentados por estos. Por lo que la implementación de la huella de agua en el sector debe iniciar como una propuesta de mejora y beneficios para las constructoras, consultoras y profesionales, de forma tal que en un futuro se apliquen estas herramientas de acceso privado o bien, se generen bases de datos propias, que sean de dominio y acceso público.

Para optimizar el aprovechamiento de los incentivos existentes, en lugar de duplicar esfuerzos, se podría centrar en utilizar los mecanismos ya establecidos para certificaciones en el sector de la construcción costarricense. En vez de crear nuevos estímulos, sería beneficioso promover la inclusión de criterios específicos

relacionados con la huella de agua en las certificaciones existentes. De esta manera, las empresas que aspiran a certificaciones sostenibles también estarían motivadas a evaluar y reducir su huella hídrica. Además, se podría trabajar en la sensibilización y difusión de estas prácticas entre las empresas del sector, resaltando los beneficios tanto ambientales como de reputación que conlleva la adopción de medidas sostenibles en la construcción.

También se pueden promulgar asociaciones y colaboraciones entre el gobierno, las empresas, las instituciones académicas y las organizaciones ambientales, lo que se puede traducir en una acelerada adopción de la huella de agua y por ende, en la creación de bases de datos públicas para compartir información y buenas prácticas. La implementación de la huella de agua puede ofrecer beneficios como una mejor comprensión del uso del agua en sus proyectos, la identificación de oportunidades para la eficiencia hídrica, mejora en la reputación y diferenciación en el mercado al demostrar su compromiso con la sostenibilidad.

Finalmente, las certificaciones y los sellos de sostenibilidad, puede promover y reconocer las construcciones que implementen la huella de agua y otras prácticas sostenibles, lo cual puede ser un aliciente para que las constructoras busquen mejorar sus prácticas.

Como sección final del análisis de resultados se puede destacar la importancia de iniciar proyectos enfocados en la generación, recopilación y facilitación de los datos del sector construcción costarricense. Este proceso se puede realizar mediante la centralización del servicio de evaluación de datos de huella de agua por medio del CFIA o cualquier otra entidad competente.

# Conclusiones

Respecto a esta sección de la investigación se puede afirmar que la investigación del estado del arte de la huella de agua permitió establecer los conceptos básicos acerca de la huella de agua y como estos deben interpretarse. Se ha aplicado la norma ISO 14046 en el desarrollo de toda la investigación, dicha norma es la principal fuente de información tanto a nivel internacional como a nivel nacional.

Debido al crecimiento en la implementación de la huella hídrica en el sector de la construcción, resulta imposible abordar todas las investigaciones de carácter internacional, lo que lleva a la conclusión de que la información recopilada puede volverse obsoleta de manera abrupta. Es fundamental mantenerse informado sobre las actualizaciones en esta materia.

La investigación sobre las experiencias registradas de la huella hídrica en el sector de la construcción revela que actualmente se está avanzando en la implementación del concepto de huella de agua y Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en este ámbito. Un hallazgo significativo en la mayoría de estas experiencias es que la fase del ciclo de vida que más contribuye al consumo de agua en una construcción es la de uso. Esta etapa emerge como crítica en el ciclo de vida de una edificación, dado que, en promedio, las estructuras se diseñan para una vida útil de entre 50 y 60 años. Durante este periodo, el consumo de agua vinculado a las actividades humanas persistirá, sin contar los años adicionales de servicio que podría tener la edificación mediante mantenimientos preventivos a lo largo de su vida útil.

Mediante la investigación se determinó que la fase que más impacto representa, para edificaciones, corresponde a la fase de uso. Por tanto, es imperativo llevar a cabo evaluaciones de huella de agua y emplear metodologías que integren específicamente esta fase. Esta aproximación no solo permite corroborar que la etapa de uso es la que más agua consume en el

sector de la construcción costarricense, sino que también destaca la necesidad de focalizar los esfuerzos de sostenibilidad en esta fase crítica del ciclo de vida de las edificaciones.

Se observó que la fase de uso no fue contemplada en las herramientas y metodologías presentadas en este proyecto, lo que sugirió que la parte más esencial para la evaluación de la huella de agua quedó fuera de su alcance. Aunque esta limitación impidió un análisis exhaustivo de la totalidad del ciclo de vida de la construcción, se propuso un abordaje ante esta carencia mediante estimaciones basadas en consumos por persona, la proyección del número de usuarios, y la consideración de elementos diseñados para la gestión eficiente del recurso hídrico.

La constante confusión entre los términos de huella hídrica y huella de agua en los informes consultados demuestra que, pese al interés por implementar el concepto al sector, aún se presentan falencias a nivel mundial en conceptos básicos de la huella de agua. Se resalta el hecho de que actualmente no se ha definido ninguna metodología como metodología oficial, lo cual le corresponde al Consejo Mundial del Agua.

Se concluye que la metodología óptima respecto a la legislación del país es la de huella de agua, no obstante, para brindar un perfil de huella de agua más completo, es importante implementar una combinación entre ambas metodologías.

Del segundo objetivo de esta investigación se concluye que las variables para la estimación de huella de agua se engloban en dos grupos, los tipos de agua que se utilizarán a lo largo de la recogida de datos y las fases requeridas para realizar una ACV.

Para el primero se estableció un uso consuntivo y degradativo, debido que este es el más utilizado y, el uso evaporativo y no evaporativo es inviable para el proyecto debido a que requiere de estimaciones de evaporaciones y retornos a las fuentes de agua dulce, y es mayormente utilizado en el sector agrícola.

En cuanto a las fases requeridas para realizar un ACV, se destaca la definición del objetivo y el alcance, ya que estos establecen cuales son las razones, motivos y principales características que tendrá el estudio por realizar. Además de este, también se detalla el Inventario de la huella de agua, donde se deben cuantificar los flujos de agua con base en el cálculo de flujos de agua virtual y la medición de los flujos de agua.

La definición de la mayoría de estas variables en un proyecto de construcción deberá ser definidas por los profesionales a cargo, ya que no se pueden establecer valores generales para la construcción, cuando esta es una actividad que se realiza bajo diferentes condiciones ambientales, y donde, además, la evaluación de impactos puede variar significativamente según la tipología constructiva de la edificación y, la ubicación temporal y geográfica.

Los 6 pasos específicos por seguir resultaron muy similares a los especificados en la norma ISO 14046, a diferencia de que los pasos propuestos incluyeron una segregación de la etapa de análisis del inventario de la huella de agua en dos pasos, donde se buscó registrar el agua virtual asociada a los materiales que se utilizarán para construir la obra, y otro paso donde se deben registrar las cantidades de agua directa utilizada durante las diferentes fases.

Cada uno de estos registros debe realizarse de forma individual para cada fase del ciclo de vida tomando en cuenta que las variables para cada una de estas varían. Además, se agrega un paso más, el cual es la comunicación de los resultados, a pesar de que no se abundó mucho en este paso, se incorporó debido a su importancia para un futuro donde los informes de huella de agua de construcción se realicen bajo una misma metodología de comunicación, en este caso se sugirió consultar la norma para informarse acerca de este paso.

Aunque la metodología originalmente planteada abarca seis pasos, la atención del proyecto se centra únicamente en los primeros tres de estos. Se determinó que la interconexión de los seis pasos propuestos sigue un enfoque secuencial y lineal, esto significa que es esencial

finalizar una etapa antes de iniciar con la siguiente.

Después de analizar los datos conforme a la norma ISO 14046 y los criterios de calidad correspondientes, se llega a la conclusión de que excede los límites y el propósito de este proyecto estimar todas las entradas y salidas para un solo material de construcción. No obstante, es importante destacar que esta tarea no es inalcanzable, pero requiere acceso a información específica proveniente de las plantas de producción de los materiales, así como una considerable cantidad de tiempo para obtener una conclusión sólida sobre los impactos ambientales asociados con dicho producto. Esto destaca la carencia de información disponible y de acceso público relacionada con la huella de agua en esta área específica.

Para los límites de corte en evaluaciones de huella de agua del sector construcción costarricense, se propone un rango desde el 0,1% hasta el 5%, siendo los encargados de la evaluación de ciclo de vida quienes deberán tomar la decisión sobre cual porcentaje, que se encuentre dentro de este rango, resulta más beneficioso para cumplir con el objetivo de la evaluación.

Para que la herramienta desarrollada se utilice de la manera correcta, esta requiere de fuentes de datos, primarios o secundarios que provean las entradas para posteriormente obtener las salidas por medio de la base datos o por un software. Si bien es cierto se desarrollaron cuatro métodos para evaluar diferentes categorías de impacto, no fue posible incorporar su implementación en un programa como lo es MS Excel, además de no poseer la mayor referencia para la estimación de huella de agua, datos de los materiales constructivos utilizados.

Sin embargo, esta resulta de suma ayuda para guiar a los profesionales a cargo de una evaluación de agua, como un primer intento de generalizar los reportes de huella de agua en la construcción costarricense. De forma que, si su implementación se concreta o evoluciona en una herramienta más sofisticada, será posible generar huellas de agua que sea comparables entre sí, lo que facilitará la selección de los materiales que resulten más convenientes en cuanto a disminución de la huella de agua.

# Recomendaciones

Inicialmente, se recomienda siempre investigar acerca de las evaluaciones de huella de agua más recientes, debido a que este es un concepto que se encuentra en constante evolución, cada vez existen más investigaciones acerca de huella de agua a modo general y aplicadas al sector construcción, estas investigaciones pueden presentar una naturaleza muy similar con el proyecto que se busca desarrollar y, por ende, resultarían en un gran punto de partida para evaluar la huella de agua.

En este proyecto solo se analizaron documentos relacionados con la huella de agua en la construcción y algunos otros relacionados con la agricultura, como lo es el caso del Proyecto Final de Graduación de la ahora ingeniera Ana Loreno Vallejo (Vallejo, 2015) donde se aplica la huella de agua en las plantas empacadoras de banano. Por lo que es recomendable indagar acerca de procedimientos industriales que presenten similitudes con el sector construcción para reforzar o corregir la toma de datos propuesta en este proyecto.

Además de esto, también se deben generar bases de datos para los materiales constructivos de Costa Rica, ya sean de etiqueta nacional o importados del exterior. En cuanto a la metodología aplicada, se recomienda se aplique en conjunto con la huella hídrica, la cual ofrece otra visión de los consumos realizados en todo el ciclo de vida de una construcción.

Según el estado del arte de esta investigación, se determinó que los materiales constructivos producidos en Costa Rica presentan huellas de agua relativamente bajas en comparación con las de otros países o el promedio mundial. Por lo que se recomienda abarcar el ciclo de vida de la edificación hasta su fase de uso, donde típicamente se aporta más impacto al recurso hídrico, por lo que es importante evaluar la etapa de diseño, pero es recomendable evaluar hasta la fase de uso.

Por otro lado, al reflexionar sobre las formas para incrementar la demanda de

verificación de la norma, se considera necesaria una mayor divulgación de esta, sus resultados y beneficios para las organizaciones. Desde el sector público, esto podría vincularse a programas nacionales e internacionales, políticas gubernamentales y sistemas de eco-etiquetado, que permitan dar a conocer el beneficio que adquieren las empresas al apostar por un esquema como este.

Además, se recomienda impulsar propuestas de inclusión de declaraciones ambientales a los materiales constructivos y que además algún ente regulador (como lo puede ser el MINAE o el MEIC) se encargue de generar una base de datos de declaraciones ambientales que sea de fácil acceso del sector. Este ente regulador deberá velar porque estas declaraciones ambientales se encuentren en constante revisión y actualización, para que la información disponible siempre sea de la mejor calidad posible.

Se recomienda enfáticamente fortalecer las competencias técnicas en materia de huella de agua dirigidas específicamente a empresas constructoras, consultoras y entidades de verificación involucradas en este tipo de análisis. De igual forma se sugiere implementar capacitaciones especializadas y crear bases de datos dedicadas a este propósito.

También sería altamente beneficioso el desarrollo de una herramienta que evalúe la huella de agua mediante enfoques tipo "screening" (se emplean indicadores de punto final) a cargo del ente regulador de estos servicios.

Como complemento a estas prácticas y si la finalidad para la ejecución de la herramienta de recopilación de datos, se sugiere su aplicación hasta la fase de cuantificación de flujos. En cuanto a los pasos subsiguientes, como la Evaluación del impacto del uso del agua, la Identificación de oportunidades para reducir la huella de agua y la Comunicación de los resultados obtenidos, se aconseja emplear un software de pago especializado en evaluar el

impacto del uso del agua. Asimismo, se recomienda contar con personal capacitado para interpretar los resultados generados por el software y para identificar oportunidades que conduzcan a la reducción de la huella de agua. En última instancia, se insta a que este personal comunique los resultados de acuerdo con los requisitos establecidos en la norma INTE ISO 14046, con el objetivo de garantizar que las evaluaciones realizadas y por realizar en el sector de la construcción costarricense sean comparables entre sí.

Además, se propone orientar los esfuerzos hacia el desarrollo de un formato de informe estandarizado para los resultados obtenidos. Esto no solo facilitaría la comparación, tornándola más ágil y sencilla, sino que también eliminaría la necesidad de realizar suposiciones en la interpretación de los resultados de otros productos o estructuras.

A pesar de que este proyecto se centró en solo una tipología constructiva, se recomienda realizar herramientas y metodologías de evaluación específicas para cada tipología constructiva, debido a que como se ha comentado anteriormente, cada edificación presenta características propias, las cuales se pueden ver afectadas por las condiciones del sitio. El realizar una herramienta específica para cada tipología permitiría realizar evaluaciones más acertadas y reales acerca del impacto ambiental de cada construcción, sin importar su uso, dimensiones o materiales empleados.

Con la metodología desarrollada se presentó una primera propuesta para incluir la huella de agua al sector construcción costarricense, esta propuesta consta de 6 pasos específicos, sin embargo, la investigación se limita hasta el paso de cuantificación de los flujos de agua involucrados hasta la fase de diseño. Por lo que se recomienda buscar ampliar el alcance de las futuras evaluaciones hasta el último paso, esto mediante el pago de bases de datos, o bien, la implementación de softwares que estimen la huella de agua, como lo pueden ser SimaPro, eToolLCD, Aquacrop y el WaterFootprint Assessment Tool.

Para una aplicación efectiva de la herramienta de recopilación de datos, se sugiere utilizarla hasta la fase de cuantificación de flujos. Posteriormente, se aconseja emplear un software especializado de pago para llevar a cabo la Evaluación del impacto del uso del agua, la

Identificación de oportunidades para reducir la huella hídrica y la Comunicación de los resultados obtenidos. Es esencial contar con personal capacitado para interpretar los resultados generados por el software, identificando oportunidades concretas para reducir la huella de agua del proyecto y comunicar estos resultados conforme a los requisitos establecidos en la norma INTE ISO 14046.

La herramienta realizada se presentó con un énfasis en estructuras por construir o que aún se encuentran en su fase de diseño, por lo que la creación de una guía de aplicación de huella de agua en edificaciones ya construidas resultaría de gran ayuda, esto debido a que años atrás el concepto de construcción sostenible no resonaba mucho en el sector y por esta razón, se considera que la evaluación de estas estructuras ya construidas, puede beneficiar significativamente en la disminución de huella de agua en la construcción de Costa Rica.

Finalmente, como retroalimentación al proyecto-plan piloto para la implementación de la huella de agua en el sector construcción, se recomienda incluir el análisis de otras huellas de construcción, ya que, al momento de realizar una evaluación de huella de agua, se está avanzando significativamente con la evaluación de las demás huellas asociadas.

En la Tabla 24 se denotan los entes a los que se encuentra dirigida cada una de las recomendaciones:

<b>Tabla 24.</b> Asignación de responsabilidades para cada una de las recomendaciones mencionadas.		
Recomendación	Resumen	Ente o rol sugerido en Costa Rica
Investigación Previa	Realizar investigaciones sobre las evaluaciones de huella de agua más recientes, especialmente aquellas aplicadas al sector construcción, para fundamentar y mejorar el proyecto.	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Tecnológico de Costa Rica, y entidades académicas especializadas.
Ampliación de Documentación	Ampliar el análisis a documentos relacionados con procedimientos industriales similares al sector construcción para fortalecer la toma de datos propuesta.	Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Tecnológico de Costa Rica, y entidades privadas relacionadas con la construcción.
Generación de Bases de Datos	Crear bases de datos para materiales constructivos de Costa Rica, ya sean de etiqueta nacional o importados del exterior.	Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Tecnológico de Costa Rica, y entidades reguladoras del sector.
Aplicación Conjunta con Huella Hídrica	Integrar la metodología de evaluación de la huella de agua con la huella hídrica para obtener una visión más completa del consumo durante todo el ciclo de vida de la construcción.	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), Tecnológico de Costa Rica, y entidades académicas especializadas.
Evaluación Completa del Ciclo de Vida	Evaluar el ciclo de vida de la edificación hasta la fase de uso para abordar el impacto significativo en el recurso hídrico durante esta etapa.	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), Tecnológico de Costa Rica, y entidades académicas especializadas.
Divulgación y Vinculación	Promover la norma y sus beneficios a través de programas nacionales e internacionales, políticas gubernamentales y sistemas de eco-etiquetado para aumentar la demanda de verificación.	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC), Tecnológico de Costa Rica, y entidades dedicadas a la divulgación ambiental.
Inclusión de Declaraciones Ambientales	Impulsar la inclusión de declaraciones ambientales en materiales constructivos y crear una base de datos accesible y revisada constantemente.	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC), Tecnológico de Costa Rica, y entidades reguladoras del sector.
Fortalecimiento de Competencias Técnicas	Fortalecer las competencias técnicas en huella de agua dirigidas a empresas constructoras, consultoras y entidades de verificación. Implementar capacitaciones y bases de datos especializadas.	Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, instituciones educativas, Tecnológico de Costa Rica, y Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA).
Desarrollo de Herramienta de Evaluación	Desarrollar una herramienta tipo "screening" para evaluar la huella de agua, a cargo de un ente regulador.	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC), Tecnológico de Costa Rica, y entidades reguladoras del sector.
Guía para Edificaciones Construidas	Crear una guía específica para la aplicación de la huella de agua en edificaciones ya construidas, considerando las características individuales.	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC), Tecnológico de Costa Rica, y entidades especializadas en construcción sostenible.
Ampliación del Alcance	Ampliar el alcance de las futuras evaluaciones hasta el último paso, utilizando bases de datos o softwares especializados para estimar la huella	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC), Tecnológico de Costa Rica, y

	de agua.	entidades académicas especializadas.
Análisis de Otras Huellas	Incluir el análisis de otras huellas de construcción para obtener una evaluación más integral del impacto ambiental asociado.	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC), Tecnológico de Costa Rica, y entidades relacionadas con la evaluación ambiental.

**Fuente:** Elaboración propia

# Limitaciones

En la presente investigación se logró reconocer una serie de limitaciones que influyeron en el desarrollo del producto deseado. El concepto de huella de agua es un tema que se encuentra en constante evolución, por lo que una definición o procedimiento aceptados hoy en día, puede resultar obsoleto al día de mañana, lo cual indica que, a pesar del esfuerzo realizado, la investigación realizada terminará, tarde o temprano, siendo obsoleta.

La ausencia de manuales o guías en Costa Rica para orientar a los stakeholders del sector construcción en la implementación de la huella de agua representa una limitación significativa. Esta carencia se convierte en un desafío directo para el proyecto, ya que, aunque la investigación busca abordar esta laguna, la realidad es que una evaluación teórica enfrenta limitaciones frente a evaluaciones prácticas. La falta de estudios específicos en el sector construcción costarricense impacta directamente la efectividad del proyecto, subrayando la necesidad urgente de investigaciones prácticas y orientadas a la realidad local para una implementación más sólida.

Una de las finalidades de la huella de agua es llegar a un concepto de agua neutral, para cumplir esto se requiere de la estimación del porcentaje de agua perdida en el tratamiento de aguas residuales de construcción, y actualmente esta información no se encuentra presente en las bases de datos de las diferentes instituciones relacionadas con la gestión del recurso hídrico en Costa Rica.

En el contexto de esta investigación, una limitación significativa es la omisión del análisis del agua de mar, a pesar de la importancia de las extensas zonas costeras de Costa Rica. La extracción de recursos hídricos y las emisiones directas al mar, prácticas comunes en estas áreas, no fueron abordadas en este trabajo. Además, es importante señalar que únicamente se evaluó el impacto ambiental relacionado con la huella de agua, excluyendo deliberadamente

consideraciones sobre otras huellas ambientales. Esta limitación restringe la comprensión integral de los impactos ambientales asociados a las construcciones cercanas a las costas del país, resaltando la necesidad de futuras investigaciones para abordar estas omisiones y lograr un análisis más completo.

Al analizar únicamente las fases de extracción de materiales y diseño de una construcción, se excluyó la cuantificación de combustible utilizado en el transporte de materiales y productos constructivos, el cual, según la literatura estudiada, suele presentar un fuerte aporte de huella de agua en la construcción.

Las categorías de impacto desarrolladas son todas de punto medio, lo cual deja totalmente por fuera a los indicadores de punto final, esto significa que si bien es cierto los impactos de punto medio reflejan los impactos generados, los daños causados por estos impactos y los cuales son evaluados en los indicadores de punto final, no fueron tomados en cuenta.

Los métodos seleccionados para evaluar las diferentes categorías de impacto no pudieron ser desarrollados y aplicados por medio de ejemplos debido a la falta de datos disponibles, por lo que su desarrollo y aplicación no quedan del todo claros.

No se tiene acceso a bases de datos para Costa Rica de forma gratuita, esta puede ser considerada la principal limitación del actual proyecto. Los datos de entrada y salida son el insumo más valioso de un sistema de evaluación de huella de agua en la construcción.

Algunas de las partes mencionadas en la norma ISO 14046 (2015) para el desarrollo de un estudio de huella de agua como lo son el desarrollo del informe y la comunicación de los resultados fueron excluidas de este proyecto, por temas del alcance de la investigación.

# Apéndices

## Apéndice 1

## Cronograma

- Inicio de la entrevista.
- Saludo y presentación del entrevistador.
- Solicitud de información del entrevistado.
- Solicitud de permiso para grabar la sesión.
- Preguntar a las personas entrevistadas si quieren que sus nombres aparezcan anónimos en los informes, o si, por el contrario, quieren que aparezcan.
- Explicación sobre el proyecto.
- Sesión de preguntas.
- Comentarios finales.
- Cierre de la entrevista.

# ENTREVISTA PARA AMPLIAR CONOCIMIENTO ACERCA DE LA HUELLA DE AGUA

DATOS DE IDENTIFICACIÓN DE LA ENTREVISTA		
Fecha:	Hora Inicial:	Hora Final:
Plataforma utilizada:	Duración de la entrevista (min):	
DATOS DE IDENTIFICACIÓN DE LA PERSONA ENTREVISTADA		
Nombre: Melissa Díaz		
Profesión:		
Institución para la que labora:		
Cargo o posición:		
BATERÍA DE PREGUNTAS		
<ol style="list-style-type: none"><li>1. ¿En qué áreas de aplicación de la huella de agua tiene mayor conocimiento? ¿Ha desarrollado proyectos en esa(s) proyectos? ¿Qué clase de proyectos?</li><li>2. En palabras sencillas, y según su criterio profesional ¿Qué es la huella de agua?</li><li>3. ¿Por qué consideraría importante implementar la huella de agua en los diferentes procesos de producción?</li><li>4. A modo general, que opina respecto a la implementación de la huella de agua y el análisis de ciclo de vida en el sector construcción.</li><li>5. ¿Tiene conocimiento de la existencia de normas internacionales acerca de la huella de agua, además de la ISO 14046? ¿Diferencias respecto a la ISO 14046?</li><li>6. ¿Tiene conocimiento de normas nacionales diferentes a las ISO que provean información acerca de la huella de agua? (Únicamente profesionales costarricenses)</li><li>7. ¿Qué fases del ciclo de vida especificados en la p.35 de la ISO 14044 aplicarían para una guía de estimación de huella de agua? (¿porque los excluye?)</li><li>8. ¿Qué datos considera necesarios en una investigación cualitativa de la huella de agua?</li><li>9. ¿En el procedimiento de validación de datos, cual es la forma más conveniente para validarlos? (balances de masa, los balances de energía y / o análisis comparativos de los factores de liberación)</li></ol>		

10. ¿Actualmente conoce de algún estudio a nivel público o privado para implementar la huella de agua en el sector construcción en específico? Además de las evaluaciones realizadas a la industria cementera.
11. ¿Qué tan pronto creé que se podrá aplicar huella de agua a modo obligatorio en la mayoría de los procesos?
12. ¿Posee algún documento de interés para el proyecto en cuestión que pueda ser facilitado?
13. ¿Según su criterio profesional, considera viable la realización de una guía cualitativa para una posterior estimación de la huella de agua en el sector construcción? ¿Qué aspectos considera importantes a tomar en cuenta? ¿Qué unidad funcional establecería para su estimación?
14. Es preferible hacer uso de la herramienta SimaPro

### Información importante

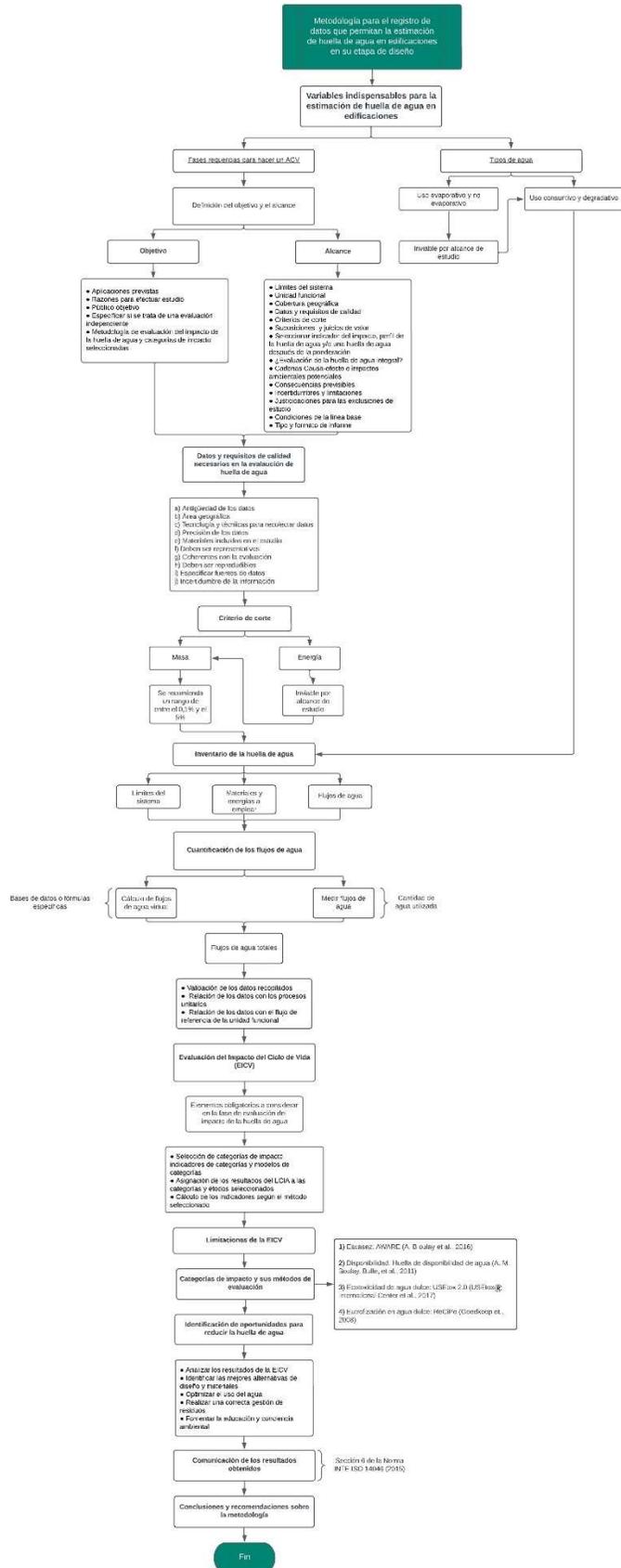
Pregunta 4, 5 y 6.

- d) Life cycle inventory analysis:
  - 1) data collection procedures;
  - 2) qualitative and quantitative description of unit processes;
  - 3) sources of published literature;
  - 4) calculation procedures;
  - 5) validation of data, including
    - i) data quality assessment, and
    - ii) treatment of missing data;
  - 6) sensitivity analysis for refining the system boundary;
  - 7) allocation principles and procedures, including
    - i) documentation and justification of allocation procedures, and
    - ii) uniform application of allocation procedures.

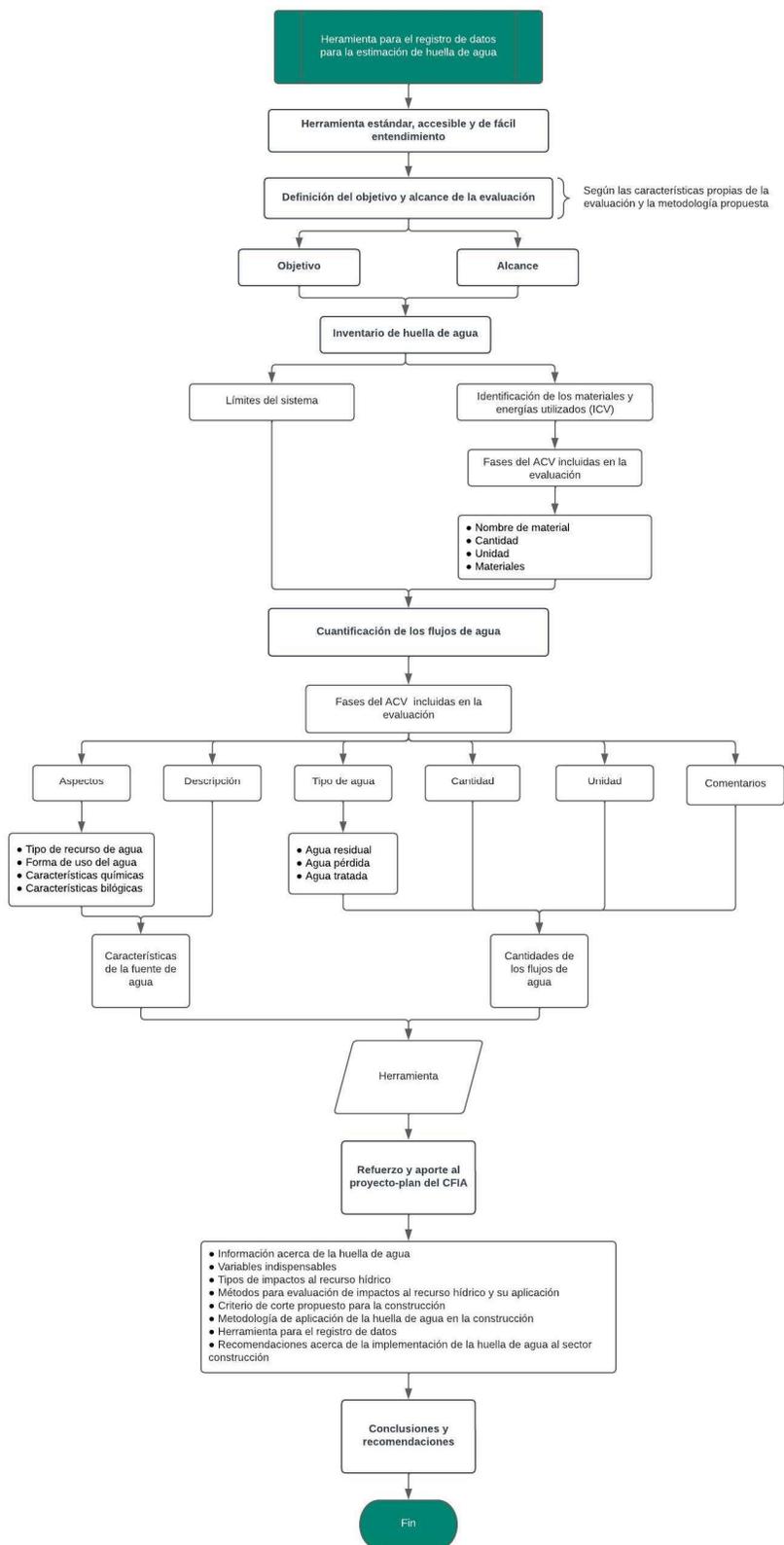
## **Apéndice 2**



## **Apéndice 3**



## **Apéndice 4**



## **Apéndice 5**

## 1. Definición del objetivo y alcance de la evaluación

### 1.1 Objetivo

Elemento	Descripción	Notas
1.1.1 Aplicaciones previstas	Ej: El presente estudio permitirá comprender los impactos del agua en la construcción de una edificación de tipología constructiva VC01 según la clasificación del ONT.	
1.1.2 Razones para efectuar el estudio	Ej: La evaluación se está realizando debido a una iniciativa de la empresa constructora en incluir la huella de agua a sus diseños y determinar que elementos son los que generan mayores impactos.	
1.1.3 Público objetivo	Ej: Empresas diseñadoras y constructoras de viviendas unifamiliares.	
1.1.4 ¿Se trata de una evaluación única e independiente o forma parte de un análisis del ciclo de vida?		
1.1.5 ¿El estudio tiene fines comparativos?		

### 1.2 Alcance

Elemento	Descripción	Notas
1.2.1 Límites del sistema		
1.2.2 Unidad funcional (especifique unidades)	Ej: m <sup>2</sup> construidos para una vivienda de tipología VC02 según el Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva del ONT.	
1.2.3 Cobertura geográfica	Ej: Provincia, Cantón, Distrito y Barrio.	
1.2.4 Cobertura temporal	Ej: Fecha de inicio y final.	
1.2.5 Fuente de datos primarios	Ej: Empresa encargada de la construcción de la obra.	
1.2.6 ¿Los datos son tomados directamente del proyecto o provendrán de alguna construcción similar a la que se encuentra en estudio?		
1.2.7 ¿Cómo se recolectaron los datos?	Ej: Técnicas y tecnologías aplicadas para la recolección de los datos.	
1.2.8 Precisión de los datos	Ej: La varianza de los datos resultó baja.	
1.2.9 Criterio de corte	Ej: Con base en los pesos unitarios totales para cada material y el peso total de la estructura, se determina un criterio de corte del 5%, de forma que se incluyan solamente los materiales más representativos en la evaluación de huella de agua.	Este punto debe ser completado una vez se tenga el inventario de ciclo de vida.
1.2.10 Fuente de datos secundarios	Ej: Base de datos Ecoinvent en su versión más reciente.	
1.2.11 Suposiciones y juicios de valor	Ej: Se supone que toda el agua consumida es agua subterránea.	

1.2.12 ¿Cuáles categorías de impactos ambientales relacionados con el uso de agua serán considerados?		
1.2.13 Mencione los métodos que utilizará para evaluar los impactos ambientales relacionados con el uso del agua seleccionados y relacionelos entre sí	Ej: Se utilizará el método AWARE para evaluar el impacto por escasez y el método USEtox 2.0 para evaluar la ecotoxicidad en agua dulce.	
1.2.14 ¿La evaluación de la huella de agua será integral?		
1.2.15 Incertidumbre y limitaciones		
1.2.16 Mencione y justifique cuales categorías de impacto fueron excluidas	Ej: Se descartó la categoría de impacto por Eutrofización marina debido a que la fuente del agua consumida es superficial.	

## 2. Inventario de huella de agua para la construcción en estudio

Elemento	Descripción	Notas
<b>2.1 Definir los límites del sistema</b>	0	

### 2.2 Identificación de los materiales y energías utilizados (ICV)

2.2.1 Fase de Producción <span style="float: right;"><input type="checkbox"/> Aplica según los límites del sistema</span>			
Nombre	Cantidad	Unidad	Materiales
Por ejemplo: Concreto	1250	m <sup>3</sup>	Definición según base de datos escogida
2.2.2 Fase de Planificación y Diseño <span style="float: right;"><input type="checkbox"/> Aplica según los límites del sistema</span>			
Nombre	Cantidad	Unidad	Materiales
Por ejemplo: Gasolina	100	L	Definición según bases de datos escogida

### 3. Cuantificación de los flujos de agua

#### 3.1 Fase de Producción

Aplica según los límites del sistema

##### 3.1.1 Del agua

Aspecto	Descripción
Tipo de recurso de agua	
Forma de uso del agua	
Características físicas	Por ejemplo: Color, olor y sabor, temperatura, pH, turbidez, entre otros.
Características químicas	Por ejemplo: Cant. Aluminio, Cant. Mercurio, Cant Plomo, Cant. Hierro, Cant. Fluoruro, Cant. Cobre, Cant. Cloruro, Cant. Sulfatos, Cant. Nirritos y nitratos, entre otros.
Características biológicas	Por ejemplo: Presencia de algas, Presencia de hongos, mohos y levaduras, entre otros.

##### 3.1.2 De las cantidades de los flujos de agua

Tipo de agua	Cantidad	Unidad	Comentarios
Agua residual		m <sup>3</sup>	
Agua pérdida		m <sup>3</sup>	
Agua tratada		m <sup>3</sup>	

#### 3.2 Fase de Planificación y Diseño

Aplica según los límites del sistema

##### 3.2.1 Del agua

Aspecto	Descripción
Tipo de recurso de agua	
Forma de uso del agua	
Características físicas	Por ejemplo: Color, olor y sabor, temperatura, pH, turbidez, entre otros.
Características químicas	Por ejemplo: Cant. Aluminio, Cant. Mercurio, Cant Plomo, Cant. Hierro, Cant. Fluoruro, Cant. Cobre, Cant. Cloruro, Cant. Sulfatos, Cant. Nirritos y nitratos, entre otros.
Características biológicas	Por ejemplo: Presencia de algas, Presencia de hongos, mohos y levaduras, entre otros.

##### 3.2.2 De las cantidades de los flujos de agua

Tipo de agua	Cantidad	Unidad	Comentarios
Agua residual		m <sup>3</sup>	
Agua pérdida		m <sup>3</sup>	
Agua tratada		m <sup>3</sup>	

# Anexos

## Anexo 1

## General object and operator syntax

Symbol	Definition
$k, k_{ij}, K, K_{ow}$	Scalar (italic), sometimes with indices (upright unless a counting index or vector/matrix element index). Matrix element $k_{ij}$ is interpreted as the element of matrix $\mathbf{K}$ at row $i$ and column $j$ and can be interpreted as process from column $j$ (input) to row $i$ (output).
$V_{air[G]}$	Separation of different indices: specification of variable (e.g. index “air”) is separated from spatial context of variable (e.g. index “G” for global). Alternative notations would be (both not used): $V_{air}^G$ or $V_{air G}$
$k_{air \rightarrow air sl}$ $K_{air carpet}$ $EF_{human,noncanc,inh}$ $fr\_M_{dis,C.fw \rightarrow G.fw[C \rightarrow G]}$	Different separators between indices: Direction from e.g. compartment to another compartment is expressed by “ $\rightarrow$ ”. Intersection for e.g. partition coefficients or compartments or phases is expressed by “ ”. Indices indicating different aspects (e.g. human tox/ecotox vs. cancer/non-cancer vs. inhalation/ingestion exposure) are separated by “,”. Indices that belong together, but must be separated, are separated by “.”.
$\vec{m} \in \mathbb{R}^n$	Vector (non-capital italic letters) containing elements (scalars) as in $\vec{m} = \begin{pmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_n \end{pmatrix} = (m_1, \dots, m_n)^T$
$\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{n \times m}$	Matrix (capital bold upright letters) containing elements (scalars) as in $\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & \cdots & k_{nm} \end{pmatrix}$
$\frac{d\vec{m}(t)}{dt} = \mathbf{K} \vec{m}(t) + \mathfrak{s}$	Operators between matrices and vectors should not be “ $\cdot$ ” (vector dot product) or “ $\times$ ” (vector cross product). Between scalars, all operators are allowed.

## Symbols for spatial scales

Symbol	Refers to
[C]	Continental scale
[G]	Global scale
[S]	Generic scale (refers to all spatial scales)
[U]	Urban scale

## Symbols for indices of objects

Symbol	Refers to
acc	Accumulation
abs	Absorption
ads	Adsorption
adv	Advective
air	Air
app	Apparent
aq	Water phase
asl	Agricultural soil compartment
aw	Air water
beef	Beef
biota	Biota
burial	Burial
cattle	Cattle
Corg	Organic carbon
dairy	Dairy
deg	Degradation
dep	Deposition
des	Desorption
disc	Discharge
diss	Dissolution /dissolved
DOC	Dissolved organic carbon
drizzle	Drizzle
dry	Dry
dw	Drinking water compartment
eff	Effective
esc	Escape
exp	Exposed
fish	Fish
fw	Fresh water compartment
fwsd	Fresh water sediment compartment
gas	Gas
goat	Goat
growth	Growth
inf	Infiltration
land	Land
leach	Leaching
leaf	Leaf
m	Mass
meat	Meat
metab	Metabolism
milk	Milk
mixed	Mixed
npav	Unpaved surface compartment

Symbol	Refers to
nsl	Natural soil compartment
osl	Other soil compartment
other	In conjunction with “meat” it refers to “goat and sheep”.
ow	Octanol/water
part	Particles
pav	Paved surface compartment
penetr	Penetration
pork	Pork
rain	Rain
rain	Rain
res	Re-suspension
runoff	Run off
sd	Sediment compartment
sea	Sea
sed	Sedimentation
sheep	Sheep
sl	Soil
sl	Aerosol
solid	Solid phase
std	Standard
strat	Stratosphere
susp	Suspended matter
sw	Sea water compartment
tot	Total
unexp	Unexposed
vap	Vaporization/vapor
veg	Vegetation
vol	Volatilization
w	Water
wash	Washout
wet	Wet
<i>r</i>	Residence time

## A. Environmental fate (and ecosystem exposure)

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
ADSORB.w1C.sd1C	$u_{ads, fw \rightarrow fwsd}[C]$	$[m.s^{-1}]$	ADSORPTION to sediment	eq. (122)
ADSORB.w1G.sd1G	$u_{ads, fw \rightarrow fwsd}[G]$	$[m.s^{-1}]$		
ADSORB.w2C.sd2C	$u_{ads, sw \rightarrow swsd}[C]$	$[m.s^{-1}]$		
ADSORB.w2G.sd2G	$u_{ads, sw \rightarrow swsd}[G]$	$[m.s^{-1}]$		
AEROSOLdeprate.C	$U_{dep, air, ae}[C]$	$[m.s^{-1}]$	DEPOSITION VELOCITY aerosol particles	Table 10
AEROSOLdeprate.G	$U_{dep, air, ae}[G]$	$[m.s^{-1}]$		
AEROSOLdeprate.U	$U_{dep, air, ae}[U]$	$[m.s^{-1}]$		

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
AerosolWashout.C	$U_{wash,ae[C]}$	$[m.s^{-1}]$	Aerosol WASHOUT	eq. (98)
AerosolWashout.G	$U_{wash,ae[G]}$	$[m.s^{-1}]$		
AerosolWashout.U	$U_{wash,ae[U]}$	$[m.s^{-1}]$		
AREAFRAC.s1C	$fr_{A_{ns}[C]}$	[-]	AREA FRACTION soil	eq. (44)
AREAFRAC.s1G	$fr_{A_{ns}[G]}$	[-]		eq. (45)
AREAFRAC.s2C	$fr_{A_{as}[C]}$	[-]		eq. (45)
AREAFRAC.s2G	$fr_{A_{as}[G]}$	[-]		eq. (44)
AREAFRAC.s1U	$fr_{A_{npav}[U]}$	[-]	AREA FRACTION unpaved surface	Table 6
AREAFRAC.s3U	$fr_{A_{pav}[U]}$	[-]	AREA FRACTION paved surface	Table 6
AREAFRAC.w1C	$fr_{A_{fw}[C]}$	[-]	AREA FRACTION water	eq. (18)
AREAFRAC.w1G	$fr_{A_{fw}[G]}$	[-]		
AREAFRAC.w2C	$fr_{A_{sw}[C]}$	[-]		eq. (19)
AREAFRAC.w2G	$fr_{A_{sw}[G]}$	[-]		
AREAland.C	$A_{land[C]}$	$[km^2]$	Area land	Table 4
AREAland.G	$A_{land[G]}$	$[km^2]$		Table 5
AREAsea.C	$A_{sea[C]}$	$[km^2]$	Area sea	Table 4
AREAsea.G	$A_{sea[G]}$	$[km^2]$		Table 5
BAFfish1.C	$BAF_{dissolved.fish.fw}[C]$	$[L.kg^{-1}]$	BIOACCUMULATION FACTOR fish	eq. (87)
BAFfish1.G	$BAF_{dissolved.fish.fw}[G]$	$[L.kg^{-1}]$		
BAFfish2.C	$BAF_{dissolved.fish,sw}[C]$	$[L.kg^{-1}]$		
BAFfish2.G	$BAF_{dissolved.fish,sw}[G]$	$[L.kg^{-1}]$		
BIOMass.w1C	$C_{biota, fw}[C]$	$[mg.L^{-1}]$	CONCENTRATION biota in water	Table 10
BIOMass.w1G	$C_{biota, fw}[G]$	$[mg.L^{-1}]$		
BIOMass.w2C	$C_{biota, sw}[C]$	$[mg.L^{-1}]$		
BIOMass.w2G	$C_{biota, sw}[G]$	$[mg.L^{-1}]$		
BURIAL.sd1C	$U_{burial, fwsd}[C]$	$[m.s^{-1}]$	SEDIMENT BURIAL sediment	eq. (42)
BURIAL.sd1G	$U_{burial, fwsd}[G]$	$[m.s^{-1}]$		
BURIAL.sd2C	$U_{burial, swsd}[C]$	$[m.s^{-1}]$		
BURIAL.sd2G	$U_{burial, swsd}[G]$	$[m.s^{-1}]$		
C.aC	$cf_{tair}[C]$	[-]	Calibration constant	Table 10
C.aU	$cf_{tair}[U]$	[-]	Correction factor	Table 10
COLLECTeff.C	$CE_{ae}[C]$	[-]	Aerosol COLLECTION EFFICIENCY	Table 10

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
COLLECTeff.G	$CE_{ae[G]}$	[-]		
COLLECTeff.U	$CE_{ae[U]}$	[-]		
CORG	$fr\_m_{Corg, std, sl} s_d$	[-]	Standard mass FRACTION organic carbon in soil/sediment	Table 10
CORG.s1C	$fr\_m_{Corg, nsl[C]}$	[-]	Mass FRACTION organic carbon soil	
CORG.s1G	$fr\_m_{Corg, nsl[G]}$	[-]		
CORG.s2C	$fr\_m_{Corg, asl[C]}$	[-]		
CORG.s2G	$fr\_m_{Corg, asl[G]}$	[-]		
CORG.sd1C	$fr\_m_{Corg, fwsd[C]}$	[-]	Mass FRACTION organic carbon sediment	
CORG.sd1G	$fr\_m_{Corg, fwsd[G]}$	[-]		
CORG.sd2C	$fr\_m_{Corg, swsd[C]}$	[-]		
CORG.sd2G	$fr\_m_{Corg, swsd[G]}$	[-]		
CORGsusp1.C	$fr\_m_{Corg, susp, fw} [C]$	[-]	Mass FRACTION organic carbon in suspended matter	
CORGsusp1.G	$fr\_m_{Corg, susp, fw} [G]$	[-]		
CORGsusp2.C	$fr\_m_{Corg, susp, sw} [C]$	[-]		
CORGsusp2.G	$fr\_m_{Corg, susp, sw} [G]$	[-]		
D	$K_{ow, app, pH7}$	[-]	Apparent octanol/water PARTITION COEFFICIENT at neutral pH	eqs. (71) - (72)
Deff.s1C	$D_{eff, nsl[C]}$	$m^2 \cdot s^{-1}$	Effective DIFFUSION coefficient in soil	eq. (57)
Deff.s1G	$D_{eff, nsl[G]}$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$		
DEPTH.s1C	$h_{nsl[C]}$	[m]	DEPTH soil compartment	Table 10
DEPTH.s1G	$h_{nsl[G]}$	[m]		
DEPTH.s2C	$h_{asl[C]}$	[m]		
DEPTH.s2G	$h_{asl[G]}$	[m]		
DEPTH.sd1C	$h_{fwsd[C]}$	[cm]	Mixed DEPTH sediment compartment	
DEPTH.sd1G	$h_{fwsd[G]}$	[cm]		
DEPTH.sd2C	$h_{swsd[C]}$	[cm]		
DEPTH.sd2G	$h_{swsd[G]}$	[cm]		
DEPTH.w1C	$h_{fw[C]}$	[m]	Mixed DEPTH water compartment	
DEPTH.w1G	$h_{fw[G]}$	[m]		
DEPTH.w2C	$h_{sw[C]}$	[m]		
DEPTH.w2G	$h_{sw[G]}$	[m]		

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
DESORB.sd1C.w1C	$U_{des, fwsd \rightarrow fw[C]}$	$[m \cdot s^{-1}]$	DESORPTION from sediment	eq. (124)
DESORB.sd1G.w1G	$U_{des, fwsd \rightarrow fw[G]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
DESORB.sd2C.w2C	$U_{des, sswd \rightarrow sw[C]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
DESORB.sd2G.w2G	$U_{des, sswd \rightarrow sw[G]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
DIFFgas	$D_{gas}$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Gas phase DIFFUSION coefficient	eq. (58)
DIFFwater	$D_{water}$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Water phase DIFFUSION coefficient	eq. (59)
DOC.w1C	$K_{DOC w, fw [C]}$	$[mg \cdot L^{-1}]$	Concentration of dissolved (colloidal) organic carbon in water	eq. (89)
DOC.w1G	$K_{DOC w, fw [G]}$	$[mg \cdot L^{-1}]$		eq. (88)
DOC.w2C	$K_{DOC w, sw [C]}$	$[mg \cdot L^{-1}]$		
DOC.w2G	$K_{DOC w, sw [G]}$	$[mg \cdot L^{-1}]$		
DRYDEPaerosol.C	$U_{dep, dry, ae[C]}$	$[m \cdot s^{-1}]$	Dry aerosol DEPOSITION rate	eq. (94)
DRYDEPaerosol.G	$U_{dep, dry, ae[G]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
DRYDEPaerosol.U	$U_{dep, dry, ae[U]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
EROSION.s1C	$V_{nsl[C]}$	$[mm \cdot yr^{-1}]$	EROSION of soil	Table 4
EROSION.s1G	$V_{nsl[G]}$	$[mm \cdot yr^{-1}]$		Table 5
EROSION.s2C	$V_{asl[C]}$	$[mm \cdot yr^{-1}]$		Table 4
EROSION.s2G	$V_{asl[G]}$	$[mm \cdot yr^{-1}]$		Table 5
FATfish1.C	$C_{F_{fish, fw[C]}}$	[-]	FAT CONTENT fish	Table 10
FATfish1.G	$C_{F_{fish, fw[G]}}$	[-]		
FATfish2.C	$C_{F_{fish, sw[C]}}$	[-]		
FATfish2.G	$C_{F_{fish, sw[G]}}$	[-]		
FRAC.w1C.w1G	$fr_{M_{disc, fw[C \rightarrow G]}}$	[-]	FRACTION discharge continental fresh water to global fresh water	Table 10
FRAC.w1G.w1C	$fr_{M_{disc, fw[G \rightarrow C]}}$	[-]	FRACTION discharge global fresh water to continental fresh water	
FRACa.s1C	$fr_{V_{gas, nsl[C]}}$	[-]	VOLUME FRACTION air in soil	Table 10
FRACa.s1G	$fr_{V_{gas, nsl[G]}}$	[-]		
FRACa.s2C	$fr_{V_{gas, asl[C]}}$	[-]		
FRACa.s2G	$fr_{V_{gas, asl[G]}}$	[-]		
FRACagsoil.C	$fr_{A_{land, asl[C]}}$	[-]	Fraction agricultural soil	Table 4
FRACagsoil.G	$fr_{A_{land, asl[G]}}$	[-]		Table 5
FRACfresh.C	$fr_{A_{land, fw[C]}}$	[-]	Fraction fresh water	Table 4
FRACfresh.G	$fr_{A_{land, fw[G]}}$	[-]		Table 5
FRACinf.s1C	$fr_{V_{rain, inf, nsl[C]}}$	[-]	VOLUME FRACTION of precipitation infiltrating into soil	Table 4
FRACinf.s1G	$fr_{V_{rain, inf, nsl[G]}}$	[-]		Table 5

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
FRACinf.s2C	$fr_{V_{rain,inf,asl}[C]}$	[-]		Table 4
FRACinf.s2G	$fr_{V_{rain,inf,asl}[G]}$	[-]		Table 5
FRACnatsoil.C	$fr_{A_{land,nsl}[C]}$	[-]	Fraction natural soil	Table 4
FRACnatsoil.G	$fr_{A_{land,nsl}[G]}$	[-]		Table 5
FRACrun.s1C	$fr_{V_{rain,runoff,nsl}[C]}$	[-]	VOLUME FRACTION of precipitation on soil running off to surface water	Table 4
FRACrun.s1G	$fr_{V_{rain,runoff,nsl}[G]}$	[-]		Table 5
FRACrun.s2C	$fr_{V_{rain,runoff,asl}[C]}$	[-]		Table 4
FRACrun.s2G	$fr_{V_{rain,runoff,asl}[G]}$	[-]		Table 5
FRACs.s1C	$fr_{V_{solid,nsl}[C]}$	[-]	VOLUME FRACTION solids soil	Table 10
FRACs.s1G	$fr_{V_{solid,nsl}[G]}$	[-]		
FRACs.s2C	$fr_{V_{solid,asl}[C]}$	[-]		
FRACs.s2G	$fr_{V_{solid,asl}[G]}$	[-]		
FRACs.sdC	$fr_{V_{solid,wsd}[C]}$	[-]	VOLUME FRACTION solids in sediment	eq. (40)
FRACs.sdG	$fr_{V_{solid,wsd}[G]}$	[-]		
FRACw.s1C	$fr_{V_{water,nsl}[C]}$	[-]	VOLUME FRACTION water soil	Table 10
FRACw.s1G	$fr_{V_{water,nsl}[G]}$	[-]		
FRACw.s2C	$fr_{V_{water,asl}[C]}$	[-]		
FRACw.s2G	$fr_{V_{water,asl}[G]}$	[-]		
FRACw.sdC	$fr_{V_{water,wsd}[C]}$	[-]	VOLUME FRACTION water in sediment	
FRACw.sdG	$fr_{V_{water,wsd}[G]}$	[-]		
FRg.aC	$fr_{m_{gas,air}[C]}$	[-]	FRACTION of chemical in gas phase air	eq. (8)
FRg.aG	$fr_{m_{gas,air}[G]}$	[-]		
FRg.aU	$fr_{m_{gas,air}[U]}$	[-]		
FRorig.cldw	$fr_{m_{cldw}}$	[-]	Fraction original species in cloud water	eqs. (9)-(10)
FRorig.s1	$fr_{m_{nsl}}$	[-]	Fraction original species in soil	eqs. (49)-(50)
FRorig.s2	$fr_{m_{asl}}$	[-]		
FRorig.s1w	$fr_{m_{nsl,water}}$	[-]	Fraction original species in porewater of soil	eqs. (51)-(52)
FRorig.s2w	$fr_{m_{asl,water}}$	[-]		
FRorig.sd1	$fr_{m_{fwsd}}$	[-]	Fraction original species in sediment	eqs. (38)-(39)
FRorig.sd2	$fr_{m_{swwsd}}$	[-]		
FRorig.w1	$fr_{m_{fw}}$	[-]	Fraction original species in water	eqs. (21)-(22)
FRorig.w2	$fr_{m_{sw}}$	[-]		

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
FRs.s1C	$fr_{m_{solid,nsI}[C]}$	[-]	FRACTION of chemical in solid phase soil	eq. (46)
FRs.s1G	$fr_{m_{solid,nsI}[G]}$	[-]		
FRs.s2C	$fr_{m_{solid,asI}[C]}$	[-]		
FRs.s2G	$fr_{m_{solid,asI}[G]}$	[-]		
FRw.s1C	$fr_{m_{water,nsI}[C]}$	[-]	FRACTION of chemical in water phase soil	eq. (48)
FRw.s1G	$fr_{m_{water,nsI}[G]}$	[-]		
FRw.s2C	$fr_{m_{water,asI}[C]}$	[-]		
FRw.s2G	$fr_{m_{water,asI}[G]}$	[-]		
FRw.w1C	$fr_{m_{diss,fw}[C]}$	[-]	FRACTION of chemical dissolved in water	eq. (20)
FRw.w1G	$fr_{m_{diss,fw}[G]}$	[-]		
FRw.w2C	$fr_{m_{diss,sw}[C]}$	[-]		
FRw.w2G	$fr_{m_{diss,sw}[G]}$	[-]		
GASABS.aC.s1C	$U_{abs,gas,air \rightarrow nsI}[C]$	$[m.s^{-1}]$	GAS ABSORPTION to soil	eq. (107)
GASABS.aC.s2C	$U_{abs,gas,air \rightarrow asI}[C]$	$[m.s^{-1}]$		
GASABS.aG.s1G	$U_{abs,gas,air \rightarrow sI}[G]$	$[m.s^{-1}]$		
GASABS.aG.s2G	$U_{abs,gas,air \rightarrow sI}[G]$	$[m.s^{-1}]$		
GASABS.aC.w1C	$U_{abs,gas,air \rightarrow fw}[C]$	$[m.s^{-1}]$	GAS ABSORPTION to water	eq. (109)
GASABS.aC.w2C	$U_{abs,gas,air \rightarrow sw}[C]$	$[m.s^{-1}]$		
GASABS.aG.w1G	$U_{abs,gas,air \rightarrow fw}[C]$	$[m.s^{-1}]$		
GASABS.aG.w2G	$U_{abs,gas,air \rightarrow sw}[G]$	$[m.s^{-1}]$		
GASABS.aU.s1U	$u_{abs,gas,air \rightarrow npav}[U]$	$[m.s^{-1}]$	GAS ABSORPTION to unpaved surface	eq. (102)
GASABS.aU.s3U	$u_{abs,gas,air \rightarrow pav}[U]$	$[m.s^{-1}]$	GAS ABSORPTION to paved surface	
GasWashout.C	$U_{wash,gas}[C]$	$[m.s^{-1}]$	Gas WASHOUT	eq. (97)
GasWashout.G	$U_{wash,gas}[G]$	$[m.s^{-1}]$		
GasWashout.U	$U_{wash,gas}[U]$	$[m.s^{-1}]$		
GROSSSEDRate.w1C	$U_{sed,fw}[C]$	$[m.s^{-1}]$	GROSS SEDIMENTATION rate from water	eq. (36)
GROSSSEDRate.w1G	$U_{sed,fw}[G]$	$[m.s^{-1}]$		
GROSSSEDRate.w2C	$U_{sed,sw}[C]$	$[m.s^{-1}]$		
GROSSSEDRate.w2G	$U_{sed,sw}[G]$	$[m.s^{-1}]$		
H0sol	$H_{diss}$	$[kJ.mol^{-1}]$	ENTHALPY of dissolution	Table 10
H0vap	$H_{vap}$	$[kJ.mol^{-1}]$	ENTHALPY of vaporization	
HEIGHT.aC	$h_{air}[C]$	[m]	Mixed HEIGHT air compartment	
HEIGHT.aG	$h_{air}[G]$	[m]		
HEIGHT.aU	$h_{air}[U]$	[m]		
IRRIGATION.C	$u_{[C]}$	$[km^3]$	Irrigation	Table 4

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
IRRIGATION.G	$U_{[G]}$	[km <sup>3</sup> ]		Table 5
IRRIGATION.w1C	$U_{fw[C]}$	[m.s <sup>-1</sup> ]	IRRIGATION from fresh water to soil	eq. (118)
IRRIGATION.w1G	$U_{fw[G]}$	[m.s <sup>-1</sup> ]		
k.aC.aG	$k_{air[C \rightarrow G]}$	[s <sup>-1</sup> ]	TRANSFER air from continental to global scale	eq. (14)
k.aC.aU	$k_{air[C \rightarrow U]}$	[s <sup>-1</sup> ]	TRANSFER air from continental to urban scale	eq. (13)
k.aC.s1C	$k_{air \rightarrow nsl[C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER air to natural soil	eq. (106)
k.aC.s2C	$k_{air \rightarrow asl[C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER air to agricultural soil	
k.aC.w1C	$k_{air \rightarrow fw[C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER air to fresh water	eq. (108)
k.aC.w2C	$k_{air \rightarrow sw[C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER air to seawater	
k.aG.aC	$k_{air[G \rightarrow C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER air from global to continental scale	eq. (15)
k.aG.s1G	$k_{air \rightarrow nsl[G]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER air to natural soil	eq. (106)
k.aG.s2G	$k_{air \rightarrow asl[G]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER air to agricultural soil	
k.aG.w1G	$k_{air \rightarrow fw[G]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER air to fresh water	eq. (108)
k.aG.w2G	$k_{air \rightarrow sw[G]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER air to seawater	
k.aU.aC	$k_{air[U \rightarrow C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER air from urban to continental scale	eq. (12)
k.aU.s3U	$k_{air \rightarrow fw[U \rightarrow C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER urban air to continental fresh water	eq. (101)
k.s1C.aC	$k_{nsl \rightarrow air[C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER natural soil to air	eq. (112)
k.s1C.w1C	$k_{nsl \rightarrow fw[C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER natural soil to fresh water	eq. (116)
k.s1G.aG	$k_{nsl \rightarrow air[G]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER natural soil to air	eq. (112)
k.s1G.w1G	$k_{nsl \rightarrow fw[G]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER natural soil to fresh water	eq. (116)
k.s2C.aC	$k_{asl \rightarrow air[C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER agricultural soil to air	eq. (112)
k.s2C.w1C	$k_{asl \rightarrow fw[C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER agricultural soil to fresh water	eq. (116)
k.s2G.aG	$k_{asl \rightarrow air[G]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER agricultural soil to air	eq. (112)
k.s2G.w1G	$k_{asl \rightarrow fw[G]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER agricultural soil to fresh water	eq. (116)
k.w1C.aC	$k_{fw \rightarrow air[C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER fresh water to air	eq. (114)
k.w1C.s2C	$k_{fw \rightarrow asl[C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER fresh water to agricultural soil	eq. (117)
k.w1C.w2C	$k_{fw \rightarrow sw[C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER fresh water to coastal seawater	eq. (23)
k.w1G.aG	$k_{fw \rightarrow air[G]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER fresh water to air	eq. (114)
k.w1G.s2G	$k_{fw \rightarrow asl[G]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER fresh water to agricultural soil	eq. (117)
k.w1G.w2G	$k_{fw \rightarrow sw[G]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER fresh water to ocean	eq. (23)
k.w2C.aC	$k_{sw \rightarrow air[C]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER seawater to air	eq. (114)
k.w2C.w2G	$k_{adv,sw[C \rightarrow G]}$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER coastal seawater to	eq. (27)

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
			global scale	
k.w2G.aG	$k_{sw \rightarrow air[G]}$	$[d^{-1}]$	TRANSFER seawater to air	eq. (114)
k.w2G.w2C	$k_{adv,sw[G \rightarrow C]}$	$[d^{-1}]$	TRANSFER ocean water to continental scale	eq. (30)
kas.air.aC	$U_{m,air,air sl[C]}$	$[m \cdot s^{-1}]$	PARTIAL MASS TRANSFER COEFFICIENT air side of air/soil interface	eq. (103)
kas.air.aG	$U_{m,air,air sl[G]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
kas.air.aU	$U_{m,air,air sl[U]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
kas.soil.sC	$U_{m,sl,air sl[C]}$	$[m \cdot s^{-1}]$	PARTIAL MASS TRANSFER COEFFICIENT soil side of air/soil interface	eq. (105)
kas.soil.sG	$U_{m,sl,air sl[G]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
kas.soil.sU	$U_{m,sl,air sl[U]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
kaw.air.aC	$U_{m,air,air w[C]}$	$[m \cdot s^{-1}]$	PARTIAL MASS TRANSFER COEFFICIENT air side of air/water interface	eq. (110)
kaw.air.aG	$U_{m,air,air w[G]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
kaw.water.wC	$U_{m,w,air w[C]}$	$[m \cdot s^{-1}]$	PARTIAL MASS TRANSFER COEFFICIENT water side of air/water interface	eq. (111)
kaw.water.wG	$U_{m,w,air w[G]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
kdeg.aC	$k_{deg,air[C]}$	$[d^{-1}]$	TRANSFER from air by degradation	eq. (61)
kdeg.aG	$k_{deg,air[G]}$	$[d^{-1}]$		
kdeg.air	$k_{deg,air25^{\circ}C}$	$[s^{-1}]$	Gas phase degradation RATE CONSTANT at 25 oC	Substance data
kdeg.aU	$k_{deg,air[U]}$	$[d^{-1}]$	TRANSFER from air by degradation	eq. (61)
kdeg.s1C	$k_{deg,nsl[C]}$	$[d^{-1}]$	TRANSFER from soil by degradation	eq. (65)
kdeg.s1G	$k_{deg,nsl[G]}$	$[d^{-1}]$		
kdeg.s2C	$k_{deg,asl[C]}$	$[d^{-1}]$		
kdeg.s2G	$k_{deg,asl[G]}$	$[d^{-1}]$		
kdeg.sd1C	$k_{deg,fwsd[C]}$	$[d^{-1}]$		
kdeg.sd1G	$k_{deg,fwsd[G]}$	$[d^{-1}]$	TRANSFER from sediment by degradation	eq. (64)
kdeg.sd2C	$k_{deg,swsd[C]}$	$[d^{-1}]$		
kdeg.sd2G	$k_{deg,swsd[G]}$	$[d^{-1}]$		
kdeg.sed	$k_{deg,sd}$	$[s^{-1}]$		
kdeg.soil	$k_{deg,sl}$	$[s^{-1}]$	Bulk degradation RATE CONSTANT standard soil at 25 oC	
kdeg.w1C	$k_{deg,fw[C]}$	$[d^{-1}]$	TRANSFER from water by degradation	eq. (63)
kdeg.w1G	$k_{deg,fw[G]}$	$[d^{-1}]$		
kdeg.w2C	$k_{deg,sw[C]}$	$[d^{-1}]$		
kdeg.w2G	$k_{deg,sw[G]}$	$[d^{-1}]$		
kdeg.water	$k_{deg,w}$	$[s^{-1}]$	Bulk degradation RATE CONSTANT at 25 oC	Substance data
k.aU.s1U	$k_{air[U] \rightarrow npav[U]}$	$[d^{-1}]$	TRANSFER from air to unpaved surface	eq. (119)
KDEPmean.C	$k_{dep,air[C]}$	$[s^{-1}]$	MEAN atmospheric deposition rate	eq. (90)

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
KDEPmean.G	$k_{dep,air[G]}$	$[s^{-1}]$		
KDEPmean.U	$k_{dep,air[U]}$	$[s^{-1}]$		
kdry.C	$k_{tot,dry,air[C]}$	$[s^{-1}]$	Total rate constant removal from atmosphere during dry episodes	eq. (93)
kdry.G	$k_{tot,dry,air[G]}$	$[s^{-1}]$		
kdry.U	$k_{tot,dry,air[U]}$	$[s^{-1}]$		eq. (92)
kesc.aC	$k_{adv,air \rightarrow strat[C]}$	$[d^{-1}]$	TRANSFER from air to stratosphere	eq. (62)
kesc.aG	$k_{adv,air \rightarrow strat[G]}$	$[d^{-1}]$		
Kh	$K_{gas w}$	[-]	Dimensionless gas/water PARTITION COEFFICIENT of the original species	eq. (66)
Kh.C	$K_{aw[C]}$	[-]	Dimensionless air/water PARTITION COEFFICIENT of original species	eq. (69)
Kh.G	$K_{aw[G]}$	[-]		
Kh.U	$K_{aw[U]}$	[-]		
kleach.s1C	$k_{leach,nsl[C]}$	$[d^{-1}]$	TRANSFER from soil by leaching	eq. (126)
kleach.s1G	$k_{leach,nsl[G]}$	$[d^{-1}]$		
kleach.s2C	$k_{leach,asl[C]}$	$[d^{-1}]$		
kleach.s2G	$k_{leach,asl[G]}$	$[d^{-1}]$		
Kow	$K_{ow}$	[-]	Octanol/water PARTITION COEFFICIENT of the original species	Substance data
Kow.alt	$K_{ow,alt}$	[-]	Octanol/water PARTITION COEFFICIENT of alternate form	eq. (70)
Kp	$K_d$	[-]	Dimensionless solids/water PARTITION COEFFICIENT of the original species	eqs. (74)-(78)
Kp.alt	$K_{d,alt}$	[-]	Dimensionless solids/water PARTITION COEFFICIENT of the alternate form	eqs. (79)-(82)
Kp.doc1C	$K_{DOC w,fw [C]}$	$[L.kg^{-1}]$	Dissolved (colloidal) organic carbon/water partition coefficient	eq.
Kp.doc1G	$K_{DOC w,fw [G]}$	$[L.kg^{-1}]$		eq.
Kp.doc2C	$K_{DOC w,sw [C]}$	$[L.kg^{-1}]$		eq.
Kp.doG2G	$K_{DOC w,sw [G]}$	$[L.kg^{-1}]$		eq.
Kp.s1C	$K_{solid,sl w,nsl [C]}$	$[L.kg^{-1}]$	Soil/water PARTITION COEFFICIENT soil	eq. (84)
Kp.s1G	$K_{solid,sl w,nsl [G]}$	$[L.kg^{-1}]$		
Kp.s2C	$K_{solid,sl w,asl [C]}$	$[L.kg^{-1}]$		
Kp.s2G	$K_{solid,sl w,asl [G]}$	$[L.kg^{-1}]$		
Kp.sd1C	$K_{solid,sd w,fw [C]}$	$[L.kg^{-1}]$	Sediment/water PARTITION COEFFICIENT water	eq. (86)
Kp.sd1G	$K_{solid,sd w,fw [G]}$	$[L.kg^{-1}]$		
Kp.sd2C	$K_{solid,sd w,sw [C]}$	$[L.kg^{-1}]$		

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
Kp.sd2G	$K_{solid, sd   w, sw} [G]$	[L.kg <sup>-1</sup> ]		
Kp.susp1C	$K_{susp   w, fw} [C]$	[L.kg <sup>-1</sup> ]	Suspended solids/water PARTITION COEFFICIENT	eq. (73)
Kp.susp1G	$K_{susp   w, fw} [G]$	[L.kg <sup>-1</sup> ]		
Kp.susp2C	$K_{susp   w, sw} [C]$	[L.kg <sup>-1</sup> ]		
Kp.susp2G	$K_{susp   w, sw} [G]$	[L.kg <sup>-1</sup> ]		
Ks1w.C	$K_{sl   w, nsl} [C]$	[-]	Dimensionless soil/water PARTITION COEFFICIENT soil	eq. (83)
Ks1w.G	$K_{sl   w, nsl} [G]$	[-]		
Ks2w.C	$K_{sl   w, asl} [C]$	[-]		
Ks2w.G	$K_{sl   w, asl} [G]$	[-]		
Ksdw1.C	$K_{sd   w, fw} [C]$	[-]	Dimensionless sed/water PARTITION COEFFICIENT water	eq. (85)
Ksdw1.G	$K_{sd   w, fw} [G]$	[-]		
Ksdw2.C	$K_{sd   w, sw} [C]$	[-]		
Ksdw2.G	$K_{sd   w, sw} [G]$	[-]		
ksed.w1C	$k_{w \rightarrow fwsd} [C]$	[d <sup>-1</sup> ]	TRANSFER from sediment by sedimentation + burial	eq. (121)
ksed.w1G	$k_{w \rightarrow fwsd} [G]$	[d <sup>-1</sup> ]		
ksed.w2C	$k_{w \rightarrow swsd} [C]$	[d <sup>-1</sup> ]		
ksed.w2G	$k_{w \rightarrow swsd} [G]$	[d <sup>-1</sup> ]		
ktot.C	$k_{mean, air} [C]$	[s <sup>-1</sup> ]	Mean rate constant removal from atmosphere	eq. (91)
ktot.G	$k_{mean, air} [G]$	[s <sup>-1</sup> ]		
ktot.U	$k_{mean, air} [U]$	[s <sup>-1</sup> ]		
kwet.C	$k_{tot, wet, air} [C]$	[s <sup>-1</sup> ]	Total rate constant removal from atmosphere during wet episodes	eq. (96)
kwet.G	$k_{tot, wet, air} [G]$	[s <sup>-1</sup> ]		
kwet.U	$k_{tot, wet, air} [U]$	[s <sup>-1</sup> ]		eq. (95)
kwsd.sed.sdC	$U_{m, sd, w   sd} [C]$	[m.s <sup>-1</sup> ]	PARTIAL MASS TRANSFER COEFFICIENT sediment side of water/sed interface	Table 10
kwsd.sed.sdG	$U_{m, sd, w   sd} [G]$	[m.s <sup>-1</sup> ]		
kwsd.water.wC	$U_{m, w, w   sd} [C]$	[m.s <sup>-1</sup> ]	PARTIAL MASS TRANSFER COEFFICIENT water side of water/sed interface	
kwsd.water.wG	$U_{m, w, w   sd} [G]$	[m.s <sup>-1</sup> ]		
Molweight	MW	[g.mol <sup>-1</sup> ]	MOLECULAR WEIGHT	Substance data
NETsedrate.w1C	$U_{sed, acc, fw} [C]$	[m.s <sup>-1</sup> ]	Net SEDIMENT ACCUMULATION rate water	eq. (33)
NETsedrate.w1G	$U_{sed, acc, fw} [G]$	[m.s <sup>-1</sup> ]		
NETsedrate.w2C	$U_{sed, acc, sw} [C]$	[m.s <sup>-1</sup> ]		eq. (34)
NETsedrate.w2G	$U_{sed, acc, sw} [G]$	[m.s <sup>-1</sup> ]		
PENdepth.s1C	$h_{sl, penetr} [C]$	m	PENETRATION DEPTH soil	eq. (54)

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
PENdepth.s1G	$h_{sl,penetr[G]}$	[m]		
pH.aerw	$pH_{cloud}$	[-]	pH water aerosol	Table 10
pH.s1	$pH_{nsl}$	[-]	pH natural soil	
pH.s2	$pH_{asl}$	[-]	pH agricultural soil	
pH.w1	$pH_{fw}$	[-]	pH fresh water	
pH.w2	$pH_{sw}$	[-]	pH in sea water	
pKa.gain	$pKa,gain$	[-]	Equilibrium constant proton loss from parent compound (pKa of the base's conjugated acid dissociation reaction)	Table 10
pKa.loss	$pKa,loss$	[-]	Equilibrium constant proton loss from conjugated acid of parent compound (pKa of the acid dissociation reaction)	
PRODsusp.w1C	$J_{susp,fw[C]}$	$[g \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}]$	Autochthonous PRODUCTION of suspended matter in water	Table 10
PRODsusp.w1G	$J_{susp,fw[G]}$	$[g \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}]$		
PRODsusp.w2C	$J_{susp,sw[C]}$	$[g \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}]$		
PRODsusp.w2G	$J_{susp,sw[G]}$	$[g \cdot m^{-2} \cdot yr^{-1}]$		
Pvap25	$P_{vap,25^{\circ}C}$	[Pa]	VAPOR PRESSURE of original species at 25 oC	Substance data
RAINflow.aC.w1C	$Q_{rain,air \rightarrow fw[C]}$	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	RAIN input into continental water	eq. (25)
RAINflow.aC.w2C	$Q_{rain,air \rightarrow sw[C]}$	$[m^3 \cdot s^{-1}]$		
RAINflow.aG.w1G	$Q_{rain,air \rightarrow fw[G]}$	$[m^3 \cdot s^{-1}]$		
RAINflow.aG.w2G	$Q_{rain,air \rightarrow sw[G]}$	$[m^3 \cdot s^{-1}]$		
RAINrate.C	$U_{rain[C]}$	mm.yr <sup>-1</sup>	Average precipitation	Table 4
RAINrate.G	$U_{rain[G]}$	mm.yr <sup>-1</sup>		Table 5
RAINrate.U	$U_{rain[U]}$	[mm.yr <sup>-1</sup> ]	Annual PRECIPITATION	Table 10
RESUSPrate.sd1C	$U_{res,fwsd \rightarrow fw[C]}$	$[m \cdot s^{-1}]$	RESUSPENSION rate from sediment	eq. (125)
RESUSPrate.sd1G	$U_{res,fwsd \rightarrow fw[G]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
RESUSPrate.sd2C	$U_{res,swsd \rightarrow sw[C]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
RESUSPrate.sd2G	$U_{res,swsd \rightarrow sw[G]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		
RHO.air	$\rho_{air}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	DENSITY of air	Table 10
RHO.sed	$\rho_{sd}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	Bulk DENSITY of sediment	eq. (41)
RHO.soil	$\rho_{sl}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	Bulk DENSITY of soil	eq. (53)
RHO.water	$\rho_w$	$[kg \cdot m^{-3}]$	DENSITY of water	Table 10
RHOSolid	$\rho_{sd,sl}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	Mineral DENSITY sediment and soil	
SED.w1C.sd1C	$U_{sed,fw \rightarrow fwsd[C]}$	$[m \cdot s^{-1}]$	SEDIMENTATION to sediment	eq. (123)
SED.w1G.sd1G	$U_{sed,fw \rightarrow fwsd[G]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
SED.w2C.sd2C	$U_{sed,sw \rightarrow sward[C]}$	$[m.s^{-1}]$		
SED.w2G.sd2G	$U_{sed,sw \rightarrow sward[G]}$	$[m.s^{-1}]$		
SETTLvelocity.C	$U_{sed,susp,w[C]}$	$[m.s^{-1}]$	SETTLING VELOCITY suspended particles	eq. (32)
SETTLvelocity.G	$U_{sed,susp,w[G]}$	$[m.s^{-1}]$		
Sol.25	$S_{w,25^{\circ}C}$	$[mg.L^{-1}]$	Water SOLUBILITY of original species at 25 oC	Substance data
SOLIDadv.s1C	$U_{ad,solid,sl[C]}$	$m.s^{-1}$	SOLID-phase advection velocity soil	eq. (56)
SOLIDadv.s1G	$U_{ad,solid,sl[G]}$	$[m.s^{-1}]$		
SOLIDdiff.s1C	$D_{solid,sl[C]}$	$m^2.s^{-1}$	SOLID-phase turbation coefficient soil	eq. (60)
SOLIDdiff.s1G	$D_{solid,sl[G]}$	$[m^2.s^{-1}]$		
SUSP.w1C	$C_{susp,fw[C]}$	$[mg.L^{-1}]$	CONCENTRATION suspended matter in water	Table 10
SUSP.w1G	$C_{susp,fw[G]}$	$[mg.L^{-1}]$		
SUSP.w2C	$C_{susp,sw[C]}$	$[mg.L^{-1}]$		
SUSP.w2G	$C_{susp,sw[G]}$	$[mg.L^{-1}]$		
SYSTEMAREA.C	$A_{[C]}$	$[km^2]$	System area	Table 4
SYSTEMAREA.G	$A_{[G]}$	$[km^2]$		Table 5
SYSTEMAREA.U	$A_{[U]}$	$[km^2]$		Table 6
TAU.aC	$\tau_{air[C]}$	$[d]$	RESIDENCE TIME of air	eq. (16)
TAU.aU	$\tau_{air[U]}$	$[d]$		
TAU.w2C	$\tau_{sw[C]}$	$[d]$	RESIDENCE TIME of seawater on continental shelf	Table 10
tdry.C	$t_{dry[C]}$	$[d]$	Average duration of dry episodes	eq. (99)
tdry.G	$t_{dry[G]}$	$[d]$		
tdry.U	$t_{dry[U]}$	$[d]$		
TEMP.C	$T_{[C]}$	$[^{\circ}C]$	Temperature	Table 4
TEMP.G	$T_{[G]}$	$[^{\circ}C]$		Table 5
TEMP.U	$T_{[U]}$	$[^{\circ}C]$		Table 10
twet.C	$t_{wet[C]}$	$[d]$	Average duration of wet episodes	eq. (100)
twet.G	$t_{wet[G]}$	$[d]$		
twet.U	$t_{wet[U]}$	$[d]$		
Veff.s1C	$U_{eff,adv,sl[C]}$	$m.s^{-1}$	Effective ADVECTIVE TRANSPORT in soil	eq. (55)
Veff.s1G	$U_{eff,adv,sl[G]}$	$[m.s^{-1}]$		
VOLAT.s1C.aC	$U_{volat,ns1 \rightarrow air[C]}$	$[m.s^{-1}]$	VOLATILIZATION from soil	eq. (113)
VOLAT.s1G.aG	$U_{volat,ns1 \rightarrow air[G]}$	$[m.s^{-1}]$		
VOLAT.s2C.aC	$U_{volat,as1 \rightarrow air[C]}$	$[m.s^{-1}]$		

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
VOLAT.s2G.aG	$U_{\text{volat,asl} \rightarrow \text{air}[G]}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$		
VOLAT.w1C.aC	$U_{\text{volat,fw} \rightarrow \text{air}[C]}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	VOLATILIZATION from water	eq. (115)
VOLAT.w1G.aG	$U_{\text{volat,fw} \rightarrow \text{air}[G]}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$		
VOLAT.w2C.aC	$U_{\text{volat,sw} \rightarrow \text{air}[C]}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$		
VOLAT.w2G.aG	$U_{\text{volat,sw} \rightarrow \text{air}[G]}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$		
VOLUME.aC	$V_{\text{air}[C]}$	$[\text{m}^3]$		
VOLUME.aG	$V_{\text{air}[G]}$	$[\text{m}^3]$		
VOLUME.aU	$V_{\text{air}[U]}$	$[\text{m}^3]$		
VOLUME.s1C	$V_{\text{nsI}[C]}$	$[\text{m}^3]$	VOLUME soil compartment	eq. (43)
VOLUME.s1G	$V_{\text{nsI}[G]}$	$[\text{m}^3]$		
VOLUME.s2C	$V_{\text{asI}[C]}$	$[\text{m}^3]$		
VOLUME.s2G	$V_{\text{asI}[G]}$	$[\text{m}^3]$		
VOLUME.sd1C	$V_{\text{fwsd}[C]}$	$[\text{m}^3]$	VOLUME sediment compartment	eq. (37)
VOLUME.sd1G	$V_{\text{fwsd}[G]}$	$[\text{m}^3]$		
VOLUME.sd2C	$V_{\text{swsd}[C]}$	$[\text{m}^3]$		
VOLUME.sd2G	$V_{\text{swsd}[G]}$	$[\text{m}^3]$		
VOLUME.w1C	$V_{\text{fw}[C]}$	$[\text{m}^3]$	VOLUME water compartment	eq. (17)
VOLUME.w1G	$V_{\text{fw}[G]}$	$[\text{m}^3]$		
VOLUME.w2C	$V_{\text{sw}[C]}$	$[\text{m}^3]$		
VOLUME.w2G	$V_{\text{sw}[G]}$	$[\text{m}^3]$		
WATERflow.w1C.w2C	$Q_{\text{des,fw} \rightarrow \text{sw}[C]}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	FLOW of continental fresh water to continental sea water	eq. (24)
WATERflow.w1G.w2G	$Q_{\text{des,fw} \rightarrow \text{sw}[G]}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	FLOW of global fresh water to global sea water	eq. (29)
WATERflow.w2C.w2G	$Q_{\text{adv,sw}[C \rightarrow G]}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	FLOW of continental sea water to the global ocean	eq. (28)
WATERflow.w2G.w2C	$Q_{\text{adv,sw}[G \rightarrow C]}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	FLOW of global sea water to continental sea water	eq. (31)
WATERrun.s1C	$Q_{\text{runoff,water,nsI}[C]}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	Water run off from soil	eq. (26)
WATERrun.s1G	$Q_{\text{runoff,water,nsI}[G]}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$		
WATERrun.s2C	$Q_{\text{runoff,water,asI}[C]}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$		
WATERrun.s2G	$Q_{\text{runoff,water,asI}[G]}$	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$		
WINDspeed.C	$u_{[C]}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Wind speed	Table 4
WINDspeed.G	$u_{[G]}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$		Table 5

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Equation
WINDspeed.U	$u_{[U]}$	$[m \cdot s^{-1}]$		Table 10

## B. Human exposure

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Source	
PestClassValues	$\alpha$	[-]	Pesticide chemical class regression coefficient for pesticide dissipation in plant	Table 16	
PestReg_wheat PestReg_rice PestReg_tomato PestReg_apple PestReg_lettuce PestReg_potato	$\beta$	[-]	Plant species regression coefficient for pesticide dissipation in plant	Table 17	
Qtrans	$Q_{transp}$	$[m^3_{transpiration}/m^2_{land\ area}]$	Area equivalent transpiration flow from soil through stems	Table 11	
Vplant	$V_{plant}$	$[m^3_{tissues}/m^2_{land\ area}]$	Area equivalent volume of above ground plant tissues	Table 11	
FAI.H_apple	$FAI_{H,apple}$	$[m^2_{leaf\ area}/m^2_{soil\ area}]$	Average fruit area index of apple at herbicide application time	Table 11	
FAI.nH_apple	$FAI_{NH,apple}$	$[m^2_{leaf\ area}/m^2_{soil\ area}]$	Average fruit area index of apple at non-herbicide (insecticide, fungicide, etc.) application time		
FAI.H_rice	$FAI_{H,paddy}$	$[m^2_{leaf\ area}/m^2_{soil\ area}]$	Average fruit area index of paddy rice at herbicide application time		
FAI.nH_rice	$FAI_{NH,paddy}$	$[m^2_{leaf\ area}/m^2_{soil\ area}]$	Average fruit area index of paddy rice at non-herbicide (insecticide, fungicide, etc.) application time		
FAI.H_tomato	$FAI_{H,tomato}$	$[m^2_{leaf\ area}/m^2_{soil\ area}]$	Average fruit area index of tomato at herbicide application time		
FAI.nH_tomato	$FAI_{NH,tomato}$	$[m^2_{leaf\ area}/m^2_{soil\ area}]$	Average fruit area index of tomato at non-herbicide (insecticide, fungicide, etc.) application time		
FAI.H_wheat	$FAI_{H,wheat}$	$[m^2_{leaf\ area}/m^2_{soil\ area}]$	Average fruit area index of wheat at herbicide application time		
FAI.nH_wheat	$FAI_{NH,wheat}$	$[m^2_{leaf\ area}/m^2_{soil\ area}]$	Average fruit area index of wheat at non-herbicide (insecticide, fungicide, etc.) application time		
BAF.airgas_exp	$C_{plant-agpp}^{air}$	$[kg_{airg}/kg_{veg}]$	Bioaccumulation factor from air gas phase to above ground produce (BAFair_gas-above ground produce)		eq. (136)
BAF.air_exp	$C_{plant-agpp}^{ap}$	$[kg_{airp}/kg_{veg}]$	Bioaccumulation factor from air particulate matter to above ground produce (BAFair_particles-above ground produce)		eq. (135)
BAF.soil_exp	$BAF_{agp,sl}$	$[kg_{soil}/kg_{veg}]$	Bioaccumulation factor from soil to above ground produce (BAFsoil-above ground produce)	eq. (141)	

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Source
BAF.soil_unexp	$BAF_{bgp,sl}$	$[kg_{soil}/kg_{veg}]$	Bioaccumulation factor from soil to below ground produce (BAFsoil-below ground produce)	eq. (142)
BAF.water_fish	$BAF_{dissolve}$ $d.fish$	$[L.kg^{-1}]$	BIOACCUMULATION FACTOR fish	eq. (163)
BAF.sea_fish	$BAF_{dissolve}$ $d.fish$	$[L.kg^{-1}]$		
diet.pork diet.beef diet.poultry diet.other1  diet.other2	$Pork_{diet}$ $Beef_{diet}$ $Poultry_{diet}$ $GoatShee$  $p_{diet}$ $Other_{diet}$	$[\%]$ $[\%]$ $[\%]$ $[\%]$  $[\%]$	Average composition of human meat consumption from different meat types	Table 11
Pork.air Beef.air Poultry.air Other.air	$Pork_{air}$ $Beef_{air}$ $Poultry_{air}$ $GoatShee$ $p_{air}$	$[m^3/d]$ $[m^3/d]$ $[m^3/d]$ $[m^3/d]$  	Individual farm animal intake rate of air	Table 11
Pork.soil Beef.soil Poultry.soil Other.soil	$Pork_{soil}$ $Beef_{soil}$ $Poultry_{soil}$ $GoatShee$ $p_{soil}$	$[kg/d]$ $[kg/d]$ $[kg/d]$ $[kg/d]$  	Individual farm animal intake rate of soil	Table 11
Pork.veg Beef.veg Poultry.veg Other.veg	$Pork_{veg}$ $Beef_{veg}$ $Poultry_{veg}$ $GoatShee$ $p_{veg}$	$[kg_{FM}/d]$ $[kg_{FM}/d]$ $[kg_{FM}/d]$ $[kg_{FM}/d]$  	Individual farm animal intake rate of vegetation	Table 11
Pork.water Beef.water Poultry.water  Other.water	$Pork_{water}$ $Beef_{water}$ $Poultry_{water}$  $r$ $GoatShee$ $p_{water}$	$[kg/d]$ $[kg/d]$ $[kg/d]$   $[kg/d]$	Individual farm animal intake rate of water	Table 11
fat.pork fat.beef fat.poultry fat.other	$Pork_{fat}$ $Beef_{fat}$ $Poultry_{fat}$ $GoatShee$ $p_{fat}$	$[\%]$ $[\%]$ $[\%]$ $[\%]$  	Meat fat content	Table 11
BTF.beef	$BTF_{meat}$	$[d/kg]$	Biotransfer factor from chemical intake to beef meat (BTFmeat)	eqs. (144)- (146)
BTF.milk	$BTF_{milk}$	$[d/kg]$	Biotransfer factor from chemical intake to milk (BTFmilk)	eqs. (149)- (151)
fat.meat	$Fat_{meat}$	-	Weighted average meat fat content	eq. (147)
Dairy.air	$DC_{air}$	$[m^3/d]$	Individual dairy cattle intake rates of air, vegetation (roughage), water, and soil	eq. (156)
Dairy.veg	$DC_{veg}$	$[kg/d]$		eq. (162)
Dairy.water	$DC_{water}$	$[kg_{FM}/d]$		eq. (158)

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Source
Dairy.soil	DC <sub>soil</sub>	[kg/d]		eq. (160)
vd	v <sub>d</sub>	[m/d]	Deposition ratio accounting for both wet and dry particle deposition of particles from air to plant surfaces	Table 11
fp.wheat fp.rice fp.tomato fp.apple fp.lettuce fp.potato	fp <sub>wheat,bread</sub> fp <sub>paddy,parb</sub> fp <sub>tomato,wash</sub> fp <sub>apple,wash</sub> fp <sub>lettuce,wash</sub> fp <sub>potato,cook</sub>	[kg <sub>intake</sub> /kg <sub>in</sub> harvest]	Food processing factor for wheat (bread making) Food processing factor for paddy rice (parboiling) Food processing factor for tomato (washing) Food processing factor for apple (washing) Food processing factor for lettuce (washing) Food processing factor for potato (cooking)	Table 11
fr.air_wheat fr.air_rice fr.air_tomato fr.air_apple fr.air_lettuce fr.air_potato	fr <sub>rem,wheat</sub> fr <sub>rem,paddy</sub> fr <sub>rem,tomato</sub> fr <sub>rem,apple</sub> fr <sub>rem,lettuce</sub> fr <sub>rem,potato</sub>	[kg <sub>in</sub> air/kg <sub>applied</sub> ]	Fraction of pesticide applied mass transferred to air	Table 11
fr.soil_wheat fr.soil_rice fr.soil_tomato fr.soil_apple fr.soil_lettuce fr.soil_potato	fr <sub>soil,wheat</sub> fr <sub>soil,paddy</sub> fr <sub>soil,tomato</sub> fr <sub>soil,apple</sub> fr <sub>soil,lettuce</sub> fr <sub>soil,potato</sub>	[kg <sub>in</sub> soil/kg <sub>applied</sub> ]	Fraction of pesticide applied mass transferred to soil for different crops	eqs. (168)- (169)
lambdag	λ <sub>g</sub>	[1/d]	Growth dilution rate constant	Table 11
hF.wheat hF.rice hF.tomato hF.apple hF.lettuce hF.potato	fr <sub>harv[wheat]</sub> fr <sub>harv[paddy]</sub> fr <sub>harv[tomato]</sub> fr <sub>harv[apple]</sub> fr <sub>harv[lettuce]</sub> fr <sub>harv[potato]</sub>	[kg <sub>in</sub> harvest/kg <sub>applied</sub> ]	Harvest fraction	eq. (164)
LAI.H_wheat LAI.H_rice LAI.H_tomato LAI.H_apple LAI.H_lettuce LAI.H_potato	LAI <sub>H,wheat</sub> LAI <sub>H,paddy</sub> LAI <sub>H,tomato</sub> LAI <sub>H,apple</sub> LAI <sub>H,lettuce</sub> LAI <sub>H,potato</sub>	[m <sup>2</sup> <sub>leaf</sub> area/m <sup>2</sup> <sub>soil area</sub> ]	Leaf area index of crop at herbicide application time	Table 11
LAI.nH_wheat LAI.nH_rice LAI.nH_tomato LAI.nH_apple LAI.nH_lettuce LAI.nH_potato	LAI <sub>NH,wheat</sub> LAI <sub>NH,paddy</sub> LAI <sub>NH,tomato</sub> LAI <sub>NH,apple</sub> LAI <sub>NH,lettuce</sub> LAI <sub>NH,potato</sub>	[m <sup>2</sup> <sub>leaf</sub> area/m <sup>2</sup> <sub>soil area</sub> ]	Leaf area index of crop at non-herbicide (insecticide, fungicide, etc.) application time	

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Source
LAI	LAI	$[\frac{m^2_{\text{leaf surfaces}}}{m^2_{\text{land area}}}]$	Vegetation leaf area index, the one-sided area of plant leaf surfaces per unit land area	Table 11
MTC	MTC	[m/d]	Mass transfer coefficient at the air-leaf interface	Table 11
cattle.air cattle.veg cattle.water cattle.soil	MC <sub>air</sub> MC <sub>veg</sub> MC <sub>water</sub> MC <sub>soil</sub>	[m <sup>3</sup> /d] [kg/d] [kg <sub>FM</sub> /d] [kg/d]	Weighted average meat cattle (meat producing farm animals) intake rates for air, vegetation (roughage), water, and soil	eq. (152) eq. (148) eq. (153) eq. (154)
kdiss.wheat kdiss.rice kdiss.tomato kdiss.apple kdiss.lettuce kdiss.potato	Diss <sub>[wheat]</sub> Diss <sub>[paddy]</sub> Diss <sub>[tomato]</sub> Diss <sub>[apple]</sub> Diss <sub>[lettuce]</sub> Diss <sub>[potato]</sub>	[1/d]	Overall rate constant for dissipation (proxy for degradation) from different crops (see also the half-lives calculator at <a href="http://half-lives.dynamiccrop.org">http://half-lives.dynamiccrop.org</a> )	eq. (165)- (167)
RHO.plant	ρ <sub>plant</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	Plant density	Table 11
lambdat	λ <sub>t</sub>	[1/d]	Rate constant for elimination by chemical transformation (dissipation as proxy) within above-ground plant tissues	eqs. (138)- (139)
RCF	RCF	[kg <sub>FM</sub> /l]	Root concentration factor (RCF)	eq. (133)
ccs.wheat ccs.rice ccs.tomato ccs.apple ccs.lettuce ccs.potato	CSS <sub>wheat</sub> CSS <sub>paddy</sub> CSS <sub>tomato</sub> CSS <sub>apple</sub> CSS <sub>lettuce</sub> CSS <sub>potato</sub>	$[(\frac{kg}{m^2_{\text{leaf}}})/(\frac{kg}{m^2_{\text{soil}}})]$	Substance capture coefficient for different crops	Table 11
tapp.H_wheat tapp.H_rice tapp.H_tomato tapp.H_apple tapp.H_lettuce tapp.H_potato	τ <sub>H,wheat</sub> τ <sub>H,paddy</sub> τ <sub>H,tomato</sub> τ <sub>H,apple</sub> τ <sub>H,lettuce</sub> τ <sub>H,potato</sub>	[d]	Time of herbicide application before harvest for different crops	Table 11
tapp.nH_wheat tapp.nH_rice tapp.nH_tomato tapp.nH_apple tapp.nH_lettuce tapp.nH_potato	τ <sub>NH,wheat</sub> τ <sub>NH,paddy</sub> τ <sub>NH,tomato</sub> τ <sub>NH,apple</sub> τ <sub>NH,lettuce</sub> τ <sub>NH,potato</sub>	[d]	Time of non-herbicide (insecticide, fungicide, etc.) application before harvest for different crops	Table 11

### C. Indoor fate and exposure

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Source
fkex.a1l.U	f <sub>ex[H]</sub>	-	Air exchange fraction to urban air at home	Table 12
fkex.a2l.U	f <sub>ex[O]</sub>	-	Air exchange fraction to urban air at work	
kex.a1l	K <sub>ex[H]</sub>	h <sup>-1</sup>	Air exchange rate in the building at home	Table 8

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Source
kex.a2I	$K_{ex[O]}$	$h^{-1}$	Air exchange rate in the building at work	Table 9
-	$A_{carpet[H]}$	$m^2m^{-3}$	Area per volume (carpet) at home	Table 12
-	$A_{carpet[O]}$	$m^2m^{-3}$	Area per volume (carpet) at work	
-	$A_{total[H]}$	$m^2m^{-3}$	Area per volume (total) at home	
-	$A_{total[O]}$	$m^2m^{-3}$	Area per volume (total) at work	
VOLUME.a1I	$V_{[H]}$	$m^3$	Building volume at home	Table 8
VOLUME.a2I	$V_{[O]}$	$m^3$	Building volume at work	Table 9
-	$t_{home}$	$h \cdot d^{-1}$	Daily time at home	Table 8
-	$t_{work}$	$h \cdot d^{-1}$	Daily time at work	Table 9
$k_{deg\ wall}/k_a\ indoor$	$k_{deg,wall,in\ door}$	-	Degradation rate on room surfaces	Table 12
IR.a2I	$IR_{a[O]}$	$m^3 \cdot d^{-1}$	Individual daily inhalation of air at work	eq. (183)
IR.a1I	$IR_{a[H]}$	$m^3 \cdot d^{-1} \cdot pers^{-1}$	Individual daily inhalation rate at home	eq. (181)
-	$k_{IR[H]}$	$m^3 \cdot h^{-1} \cdot pers^{-1}$	Individual hourly inhalation rate at home	Table 8
-	$k_{IR[O]}$	$m^3 \cdot h^{-1}$	Individual hourly inhalation rate at work	Table 9
$h_m.a1I$ $h_m.a2I$	$h_m$	$m^3m^{-2}h^{-1}$	Mass transfer coefficient at wall surface	Table 12
m.a1I	$Mix_{[H]}$	-	Mixing factor at home	Table 12
m.a2I	$Mix_{[O]}$	-	Mixing factor at work	
$[NO_3].a1I$ $[NO_3].a2I$	$NO_3$	ppbv	Nitrate concentration indoors	Table 12
N.a1I	$N_{[H]}$	-	Number of people in the building at home	Table 8
N.a2I	$N_{[O]}$	-	Number of people in the building at work	Table 9
$[OH].a1I$ $[OH].a2I$	OH	ppbv	OH radical concentration indoors	Table 12
outOH	$Out_{OH}$	ppbv	Outdoor OH	Table 12
$[O_3].a1I$ $[O_3].a2I$	$O_3$	ppbv	Ozone concentration indoors	Table 12
$K_{eq\ carpet}$	$K_{eq,carpet}$	-	Partitioning coefficient indoor air - carpet	eq. (177)
$K_{eq\ wall}$	$K_{eq,wall}$	-	Partitioning coefficient indoor air - wall surface	eq. (178)
-	$f_{intake[H]}$	-	Population household indoor exposure intake fraction	eq. (180)
-	$f_{intake[O]}$	-	Population occupational indoor exposure intake fraction	eq. (182)

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Source
kdeg.a1l	$k_{g,deg[H]}$	$h^{-1}$	Removal rate due to indoor air degradation at home	eq. (173)
kdeg.a2l	$k_{g,deg[O]}$	$h^{-1}$	Removal rate due to indoor air degradation at work	
ks.a1l	$k_{s[H]}$	$h^{-1}$	Removal rate due to surface net adsorption & degradation at home	eq. (175)
ks.a2l	$k_{s[O]}$	$h^{-1}$	Removal rate due to surface net adsorption & degradation at work	
$K_{NO_3}$	$k_{NO_3}$	$h^{-1}ppbv^{-1}$	Second order constant rate for NO <sub>3</sub>	Table 12
$k_{O_3}$	$k_{O_3}$	$h^{-1}ppbv^{-1}$	Second order constant rate for O <sub>3</sub>	Table 12
$k_{OH}$	$k_{OH}$	$h^{-1}(ppbv)^{-1}$	Second order constant rate for OH	eq. (174)
ktot.a1l	$k_{total[H]}$	$h^{-1}$	Total removal rate at home	eq. (171)
ktot.a2l	$k_{total[O]}$	$h^{-1}$	Total removal rate at work	
$V_p$	$P_{vap,25^{\circ}C}$	Pa	Vapour pressure	Substance data

## D. Human and ecosystem toxicological effects

USEtox variable	Symbol	Unit	Explanation	Source
-	$HC_{50}$	$kg.m^{-3}$	Geometric mean of chronic aquatic EC50's	eq. (193)
-	$f_{eco}$	-	Multiplier	Table 13
$EF_{eco}(frw)$	$EF_{eco}$	$PAF.m^3/kg$	Ecotox effect factor freshwater aquatic ecosystems	eq. (192)
$ED_{50_{inh,noncanc}}$	$ED_{50,inh,nc}$	$kg_{intake}/lifetime$	Lifetime inhalation dose inducing non-cancer disease in 50% of population	Substance data
$ED_{50_{ing,noncanc}}$	$ED_{50,inh,c}$	$kg_{intake}/lifetime$	Lifetime ingestion dose inducing non-cancer disease in 50% of population	
$ED_{50_{inh,canc}}$	$ED_{50,ing,nc}$	$kg_{intake}/lifetime$	Lifetime inhalation dose inducing cancer in 50% of population	
$ED_{50_{ing,canc}}$	$ED_{50,ing,c}$	$kg_{intake}/lifetime$	Lifetime ingestion dose inducing cancer in 50% of population	
-	$f_{nc}$	-	Multiplier non cancer	Table 13
-	$f_c$	-	Multiplier cancer	
$EF_{hum_{inh,noncanc}}$	$EF_{inh,nc}$	$cases.kg_{intake}^{-1}$	Effect factor non-cancer via inhalation	eq. (185)
$EF_{hum_{ing,noncanc}}$	$EF_{ing,nc}$	$cases.kg_{intake}^{-1}$	Effect factor non-cancer via ingestion	eq. (186)
$EF_{hum_{inh,canc}}$	$EF_{inh,c}$	$cases.kg_{intake}^{-1}$	Effect factor cancer via inhalation	eq. (187)
$EF_{hum_{ing,canc}}$	$EF_{ing,c}$	$cases.kg_{intake}^{-1}$	Effect factor cancer via ingestion	eq. (188)

## **Anexo 2**

A continuación, se presentan los métodos más reconocidos para cada categoría de impacto y sus características más importantes. La tabla fue adaptada y complementada de Quantis (2011) provista al proyecto SuizAgua Colombia. Puede encontrar más información de otros métodos en la referencia “Guidance to ISO 14046” (Vionnet, Lessard y Humbert, en proceso de publicación) o el artículo “Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment” (Kounnina A. et al., 2013). No se incluyen métodos para agua marina porque a la fecha están poco consolidados.

<b>Escasez</b>					
<b>Método</b>	<b>Indicador</b>		<b>Descripción</b>	<b>Fortalezas</b>	<b>Debilidades</b>
	<b>Punto medio</b>	<b>Punto final</b>			
<b>Consumo equivalente - AWARE, Boulay et al. 2015</b>	$m^3_{eq}$	<b>No aplica</b>	<p>Agua consumida*AWARE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- AWARE es un factor de caracterización que se basa en la relación entre el consumo de agua dulce para usos humanos más el caudal ambiental y la disponibilidad total de agua en una unidad de área.</li> <li>- El indicador puede ser 100 veces el agua consumida. AWARE varía entre 0.1 y 100. Si el factor de caracterización de una región es 10, quiere decir que esa región tiene 10 veces menos agua remanente disponible que el promedio mundial.</li> <li>- Los datos de disponibilidad y consumo provienen del modelo global WaterGAP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disponible en capa gratuita de Google Earth por cuenca y por país en tabla Excel. Disponible por año y por mes, para uso agrícola y no agrícola.</li> <li>- Validado en consulta a expertos de diversos sectores (industria, consultoras, academia, gobierno; 48 instituciones). Recomendado por la Iniciativa de Ciclo de Vida UNEP-SETAC y validado por la Dirección General del Ambiental de la Comisión Europea (DG ENV)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es discontinuo, por el rango del AWARE (0-100), que lo puede hacer más difícil de comunicar.</li> <li>- 7 estudios de caso al 2016.</li> </ul>

<p><b>Consumo equivalente - Índice de estrés hídrico WSI, Pfister et. al. 2009</b></p>	<p><math>m^3_{eq}</math></p>	<p>Salud humana</p> 	<p><b>Punto medio:</b> Agua consumida*WSI</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- El WSI se basa en la relación entre la extracción de agua dulce para usos humanos y su disponibilidad total de agua en cierta región.</li> <li>- El indicador puede ser tan alto como el consumo de agua. WSI se encuentra entre 0.01 (representa efecto marginal) y 1, para lograr este rango utiliza una ecuación logística.</li> <li>- Considera la variabilidad de la precipitación mediante su desviación estándar en la zona.</li> <li>- Los datos de disponibilidad y consumo provienen de modelo global WaterGAP.</li> </ul> <p><b>Punto final:</b> <i>Salud humana:</i> Agua consumida*WSI*Factor relacionado con cantidad de agua requerida para prevenir desnutrición y vulnerabilidad a la desnutrición basada en el Índice de Desarrollo Humano.</p> <p><i>Ecosistemas terrestres:</i> Agua consumida*WSI*Factor relacionado con limitación al crecimiento de plantas vasculares debido a escasez de agua azul.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disponible en capa gratuita Google Earth por cuenca y por país en tabla Excel. Disponible por año y por mes.</li> <li>- Recomendado por el Protocolo ENVIFOOD, una metodología desarrollada por la Mesa Redonda para la Producción y el Consumo Sustentable de la Comisión Europea. Actúa en colaboración con UNEP y la Agencia Ambiental Europea.</li> <li>- Existen estudios de regionalización del WSI en subcuencas de países iberoamericanos (México, España, Colombia).</li> <li>- Usado en decenas de evaluaciones en estudios independientes de huella de agua o como parte de estudios ACV.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El WSI se basa en extracción y no consumo.</li> <li>- Usa criterio de experto para determinar paso a estrés medio y alto.</li> <li>- Subestima estrés en zonas áridas.</li> <li>- El enlace de causa-efecto para punto final es genérico</li> </ul>
		<p>Ecosistemas</p> 			
		<p>Recursos</p> <p><b>MJ</b></p>			

<p><b>Escasez de huella azul, Hoekstra et al. 2011</b></p>	<p><math>m^3_{eq}</math></p>	<p><b>No aplica</b></p>	<p>Agua consumida*Índice escasez agua azul (IEAA)</p> <p>- IEAA= Agua consumida/ Disponibilidad de agua azul La disponibilidad se define como el agua total disponible en la cuenca menos el caudal ambiental.</p> <p>- Para algunas cuencas, el indicador puede ser hasta 675 veces el agua consumida (según datos calculados de la WFN).</p> <p>- Los datos para calcular el índice se obtienen de Mekonnen and Hoekstra (2011), que usa base de datos globales como la FAO (2010).</p>	<p>- Disponible en capa GSI gratuita por cuenca (resolución 0.3°x0.3°) y en tabla por país. Disponible por año y por mes.</p> <p>-Recomendado por la Red de Huella Hídrica (diferente a Análisis de Ciclo de Vida).</p> <p>- Para algunas cuencas se han hecho estudios con datos locales.</p> <p>- Ampliamente usado.</p>	<p>- No predice impactos potenciales.</p>
<p><b>Método Suizo de Escasez Ecológica, Frischknecht et al. 2006</b></p>	<p><math>m^3_{eq}</math></p>	<p><b>No aplica</b></p>	<p>Se basa en un principio de distancia al objetivo político; relacionado con un flujo crítico asociado a concentraciones máximas según la normatividad y con el flujo actual.</p>	<p>- Regionalizado.</p> <p>- Propuesto en iniciativas regulatorias europeas (extensión de impuestos AVC biocombustibles, Mercado único para productos verdes).</p> <p>- Cientos de estudios</p>	<p>- Los objetivos de calidad establecidos políticamente no necesariamente coinciden con objetivos ambientales.</p>
<p><b>Consumo de agua que afecta ecosistemas de río,</b></p>	<p><b>No aplica</b></p>	<p>Ecosistemas</p>	<p>Basado en un modelo global que considera volúmenes de los ríos, descarga promedio, tiempo promedio de residencia, especies de peces en 214 cuencas del mundo</p>	<p>Considera efecto de reducción del nivel del río.</p>	<p>Baja regionalización, sólo unas pocas cuencas disponibles.</p>

Hanafiah et al. 2011					
Consumo de agua subterránea que afecta plantas, Van Zelm et al. 2010	No aplica	Ecosistemas 	Estima desaparición de plantas terrestres. Considera sólo datos de países bajos y flujo horizontal de agua subterránea.	Considera efecto de reducción del nivel freático.	Basado sólo en datos de Holanda.
Enfermedades infecciosas por escasez de agua doméstica, Motoshita et al., 2010	No aplica	Salud humana 	Basado en datos de escasez de agua, e indicadores socioeconómicos como el Índice de Desarrollo Humano y la conexión a agua segura y saneamiento en los hogares.	Disponible por país. Único estudio disponible a la fecha que modela enfermedades infecciosas (ascariasis, trichiriasis, enfermedad del gusano de hook, diarrea).	Alta incertidumbre.

Adicionalmente existen otros indicadores que presentan resultados a nivel geográfico y no tabulares: Los resultados se presentan en un mapa y se clasifican en diferentes grados de escasez hídrica. Estos indicadores no son utilizados en la metodología ACV, pero permiten una evaluación inicial del riesgo hídrico de un área geográfica (por ejemplo, en la cuenca de cierta fábrica de interés) dado que son indicadores que suelen encontrarse en estudios a menor escala y con datos de autoridades locales. Los datos usados para estos indicadores geográficos son usualmente los mismos que hacen falta para regionalizar los indicadores de ACV que sí están diseñados para evaluación de impacto potencial ambiental de productos y servicios. Un ejemplo es el método de **Balance oferta y demanda** (De Bievre & Coello, 2008). Se basa en la diferencia entre la oferta natural del agua y la demanda neta  $Q_{disponible} = Q_{natural} - Q_{captado} + Q_{retorno}$ . Se calculó para la Hoya de Quito (Ecuador), para sus 6 subcuencas.

<b>Disponibilidad</b>					
<b>Método</b>	<b>Indicador</b>		<b>Descripción</b>	<b>Fortalezas</b>	<b>Debilidades</b>
	<b>Punto medio</b>	<b>Punto final</b>			
Huella de disponibilidad de agua de Boulay (et. al. 2011)	$m^3_{eq}$	Salud humana 	<p><b>Punto medio:</b> Consolida en un número el consumo, el estrés hídrico y la contaminación del proceso:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Establece un parámetro de escasez basado en una ecuación logística que depende de la relación consumo/disponibilidad de la zona. Luego lo ajusta basado en la clasificación de la calidad de agua de entrada y salida de acuerdo con ocho categorías preestablecidas para diferentes usos (doméstico, recreacional, agricultura, etc.).</li> <li>- Varía entre el valor positivo de la extracción (se consume toda el agua que se extrae o se devuelve en malas condiciones) y el valor negativo del vertimiento (cuando la calidad del agua de la extracción es mala y se devuelve toda el agua en óptimas condiciones).</li> <li>- Utiliza datos del modelo global (WaterGAP).</li> </ul> <p><b>Punto final:</b> <i>Salud humana:</i> Evalúa impacto en salud humana asociado a estrés hídrico local, la capacidad de</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disponible en capa gratuita Google Earth por cuenca. Disponible por año.</li> <li>- Considera la fuente del agua: superficial o subterránea.</li> <li>- Fácil de comunicar porque el valor máximo de la huella de disponibilidad es la extracción de agua.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La resolución dificulta identificar índices de escasez apropiados, especialmente en algunos países de la región, por lo que la regionalización del factor se hace más preponderante.</li> <li>- El factor de caracterización considera tres elementos y dos de ellos están basados en juicios de valor.</li> <li>- En América Latina no hay información oficial disponible para el parámetro de calidad.</li> <li>- Pocas evaluaciones y retroalimentación acerca de su validez.</li> </ul>

			adaptación relacionada con el PIB, y agua requerida para nutrición e higiene y saneamiento.		
<b>Índice de Impacto Hídrico WIIX (Bayart et al. 2014)</b>	$m^3_{eq}$	<b>No aplica</b>	Se basa en WSI de Pfister, por lo tanto, aplica sus mismas características.		
			Consolida en un número el consumo, el estrés hídrico y la contaminación del proceso:  $WIIX = E * Q_e * WSI_e - S * Q_s * WSI_S$ E: Extracción de agua WSI: Índice de Pfister Q: Factor de calidad del agua que varía entre 0 y 1. $Q = \min(C_{ref}/C; 1)$ _e extracción, _s vertimiento C <sub>ref</sub> : Concentración de referencia C: Concentración de la extracción o el vertimiento  - Varía entre el valor positivo de extracción y el valor negativo del vertimiento.	- Fácil de comunicar porque el valor máximo de la huella de disponibilidad es la extracción de agua.	Pocas evaluaciones y retroalimentación acerca de su validez.  - Para la concentración de referencia se debería usar la legislación local para uso eco sistémico pero esta no siempre está disponible.  - Pocas evaluaciones y retroalimentación acerca de su validez.

## Eutrofización en Agua Dulce

Método	Indicador		Descripción	Fortalezas	Debilidades
	Punto medio	Punto final			
<b>ReCiPe</b> <b>(Goedkoop et al. 2008)</b>	<b>Kg P<sub>eq</sub></b>	Ecosistemas  <b>PDF.m<sup>2</sup>.año</b>	Evalúa impacto en biodiversidad acuática debido a emisiones de fósforo (P) en el aire, agua y suelo usando modelo. Usa datos de P y macrofauna de fuentes superficiales holandesas, y datos de P de fuentes de agua europeas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Existen modelos bien establecidos que predicen el daño de las emisiones y la concentración de Fósforo (P) en las especies acuáticas.</li> <li>- Recomendado por el Protocolo ENVIFOOD, metodología científicamente armonizada para la evaluación ambiental de productos alimenticios y bebidas. Desarrollada por la Mesa Redonda para la Producción y el Consumo Sustentable de la Comisión Europea. Actúa en colaboración con UNEP y la Agencia Ambiental Europea.</li> <li>- El modelo incluye procesos de remoción.</li> <li>- Disponible para uso en software de ACV.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No regionalizado, a pesar de que impacto depende de ecosistema.</li> <li>- El modelo de caracterización no está fácilmente accesible.</li> <li>- La conversión de punto medio a punto final se hace asumiendo una profundidad de agua de 2.5 m.</li> <li>- No regionalizado.</li> </ul>

<p><b>CML baseline 2000 (1992)</b></p>	<p><math>PO_4^{3-}_{eq}</math></p>	<p><b>No aplica</b></p>	<p>Cuantifica el enriquecimiento de ecosistemas acuáticos con macronutrientes (P) y lo expresa en términos de <math>PO_4^{3-}_{eq}</math>. Para el cálculo del crecimiento de la biomasa se emplea la relación de Redfield (derivado de la composición promedio de las algas).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los principios del método, así como lo factores de caracterización están documentados y accesibles para usarlos de una manera reproducible.</li> <li>- Método que se recomienda usar para declaraciones ambientales de producto en el International EPD System.</li> <li>- Disponible para uso en software de ACV.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El modelo no incluye consideraciones del destino de los contaminantes.</li> <li>- Limitada aceptación de partes interesadas.</li> <li>- No regionalizado.</li> </ul>
<p><b>Helmes et al. 2012 (IMPACTWorld+)</b></p>	<p><math>Kg P_{eq}</math></p>	<p><b>No aplica</b></p>	<p>Los factores de caracterización se obtienen a partir de multiplicar el factor de destino de Helmes et al. 2012 por los factores de efecto de otros autores (Struijs et al. 2011, Payet 2006) - Se basa en emisiones puntuales de fósforo, no incluye transferencia de fósforo desde suelo agrícola al agua por falta de datos a nivel global.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regionalizado a escala <math>0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}</math>.</li> <li>- El modelo incluye procesos de remoción.</li> <li>- Los principios del método, así como los factores de caracterización están documentados y accesibles.</li> <li>- Disponible para uso en software ACV.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método reciente, poco usado.</li> <li>- La regionalización se basa en las emisiones, más que en sensibilidad de los ecosistemas.</li> <li>- Es difícil de adaptar con datos locales.</li> </ul>

Ecotoxicidad en Agua Dulce					
Método	Indicador		Descripción	Fortalezas	Debilidades
	Punto medio	Punto final			
Rosenbaum et al. 2008 (Rosenbaum et al., 2008) <a href="#">Welcome to USEtox®</a>   <a href="#">USEtox®</a> , requiere registro gratuito	CTUe	Ecosistemas PDF.m <sup>2</sup> .año 	<p>Estima disminución de biodiversidad acuática por emisiones al aire, agua y suelo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo de cadena causa-efecto, integra el destino, la respuesta a la concentración, la exposición y el efecto.</li> <li>- Modelo parametrizado para las circunstancias europeas y globales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelo disponible en Excel, complejo en modelo cadena causa-efecto.</li> <li>- Desarrollado con el apoyo de la Iniciativa de Ciclo de Vida UNEP/SETAC. Aprobados por conceso científico. UNEP recomienda su uso a empresas y gobierno.</li> <li>- Disponible para más de 3000 sustancias (la mayoría son orgánicas). Factores recientemente actualizados.</li> <li>- Disponible en software de ACV y en Excel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No hay factores de caracterización para todas las sustancias (por ejemplo todos los metales pesados).</li> <li>- Los factores interinos tienen un alto coeficiente de variación.</li> <li>- No hay parametrización para circunstancias AL.</li> </ul>
(Recipe, 2009)	kg 1,4-DB eq	Ecosistemas PDF.m <sup>2</sup> .año 	<p>Se basa en un modelo completo que presenta el destino de la sustancia química, la exposición y el efecto de estos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utiliza el sistema EUSES (European Union System for the Evaluation of Substances) aplicado en la Unión Europea para evaluar sustancias existentes y nuevas.</li> <li>- Basado en concentración efectiva media (EC50).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta relevancia ambiental.</li> <li>- Disponible para cerca de 2000 sustancias.</li> <li>- Disponible en software de ACV y en excel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los modelos para metales no están bien establecidos.</li> <li>- No hay parametrización para circunstancias AL.</li> </ul>

			- Está parametrizado para las circunstancias europeas.		
--	--	--	--	--	--

Toxicidad humana					
Método	Indicador		Descripción	Fortalezas	Debilidades
	Punto medio	Punto final			
Rosenbaum et al. 2008 (Rosenbaum et al., 2008) <a href="#">Welcome to USEtox®   USEtox®.</a>	CTUh	Salud humana 	Estima impactos de enfermedades carcinogénicas y no carcinogénicas. Aplicable a escala global y europea.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Complejo modelo causa-efecto. Rutas ambientales bien descritas. - Basado en consenso, reconocido internacionalmente. - Disponible para más de 3000 sustancias (la mayoría son orgánicas). Factores recientemente actualizados. - Los factores de absorción son compatibles con factores de exposición en ambientes cerrados. - Modelo disponible en Excel gratuitamente. - Se puede usar en software de ACV.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La ruta ambiental para absorción por piel no está bien descrita.</li> <li>- Los factores interinos tienen un alto coeficiente de variación.</li> <li>- No hay factores de caracterización para todas las sustancias (p.e. todos los metales pesados).</li> <li>- No tiene mayor diferenciación más allá de la continental.</li> <li>- No válido para aplicación directa de pesticidas en cultivos.</li> <li>- Se debe modificar el Excel para que el factor de caracterización únicamente considere los impactos a la salud por consumo de agua (factor de exposición).</li> <li>- No hay parametrización para circunstancias AL.</li> </ul>

<p>Goedkoop et al. 2008 (ReCiPe, ImpactWorld+)</p>	<p><b>kg 1,4-DB eq</b></p>	<p>Salud humana</p> 	<p>Se basa en un modelo completo que representa el destino de la sustancia química, la exposición y el efecto de los mismos. Aplicable para contexto europeo.</p>	<p>- Base de datos con más de 1000 factores de caracterización de toxicidad humana - Modelos de sustancias con base científica aceptada Se puede usar en software de ACV. Bien documentado</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No válido para la absorción por piel.</li> <li>- Le faltan para metales y pesticidas, sus modelos requieren mejoras.</li> <li>- No hay parametrización para circunstancias AL.</li> </ul>
--	----------------------------	---	---	--	--

<b>Acidificación</b>					
<b>Método</b>	<b>Indicador</b>		<b>Descripción</b>	<b>Fortalezas</b>	<b>Debilidades</b>
	<b>Punto medio</b>	<b>Punto final</b>			
Goedkoop et al. 2008 (ReCiPe, actualizado en 2013)	<b>Kg SO<sub>2</sub>-eq</b>	Ecosistemas <b>PDF.m<sup>2</sup>.año</b> 	Adopta el indicador del método de saturación base que calcula el destino atmosférico con base en modelos europeos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cubre sustancias acidificantes más importantes: NOX, NH3, SO2.</li> <li>- Se tiene disponible para uso en software de ACV.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Únicamente considera ecosistemas terrestres bajo las condiciones del continente europeo.</li> <li>- No se puede bajar de escala fácilmente.</li> </ul>
Jolliet et al. 2003 (IMPACT 2002+)	<b>Kg SO<sub>2</sub>-eq</b>	Ecosistemas <b>PDF.m<sup>2</sup>.año</b> 	Basado en modelo de simulación que tiene en cuenta tipo de emisión (puntual o difusa), tiempo de residencia en el agua; puede refinarse con datos empíricos y locales. Considera acidificación de fuentes hídricas generada por emisiones al aire, agua y suelo.	Muy usado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sin actualización ni regionalización (hay áreas más sensibles a la acidificación que otras).</li> </ul>
Roy, Deschenes y Margni 2013 (IMPACT World+)	<b>No aplica</b>	Ecosistemas <b>PDF.m<sup>2</sup>.año</b> 	Basado en modelo de simulación que tiene en cuenta dispersión atmosférica, deposición por lluvia o seca, pérdidas de biodiversidad por peces. No se puede bajar de escala fácilmente	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cubre sustancias acidificantes más importantes: NOX, NH3, HNO3, SO2, SO4 -</li> <li>- Está regionalizado por matriz de 2x2.5°, país y continente; a partir de datos para áreas de lagos, y riqueza de especies por región (Norteamérica, América tropical, Europa y Asia templada, Africa y Asia tropical).</li> <li>- Considera sistemas acuáticos y terrestres.</li> <li>- Se</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La regionalización sólo es continental. - Reciente, poco usado.</li> </ul>

				tiene disponible en software de ACV.	
CML baseline 2000 (1992)	<b>Kg SO<sub>2</sub>-eq</b>	<p>Ecosistemas</p>  <p><b>PDF.m<sup>2</sup>.año</b></p>	<p>Emplea el método de Índice de peligro (Hazard Index). El modelo de transporte y deposición atmosférica se basa en el modelo europeo RAINS.</p>	<p>- Cubre sustancias acidificantes más importantes: NOX, NH3, HNO3, SO2, SO4</p> <p>- Se tiene disponible en software de ACV.</p>	<p>- Sólo provee factores de caracterización específicos geográficamente para la situación europea. - No se puede bajar de escala fácilmente.</p>

## Radiación ionizante

Método	Indicador		Descripción	Fortalezas	Debilidades
	Punto medio	Punto final			
Frischknecht et al. (2000)	kg Bq- eq	Ecosistemas  PDF.m <sup>2</sup> .año	Impacto potencial de liberación de sustancias radioactivas (p.e. plantas nucleares), basado en la modelación del ciclo de combustible nuclear francés.	Diferencia emisiones a ríos y lagos de emisiones a océano.	Los datos se refieren a la condición en Francia, de los cuales se derivan factores genéricos.
ReCiPe (Goedkoop et al. 2008)	Kg Bq U235eq	Ecosistemas  PDF.m <sup>2</sup> .año	Se basa en un modelo que describe las emisiones a la atmósfera y descargas líquidas basadas en el ciclo nuclear francés.	Incluye descargas en sitios (desde la minería, la conversión, la producción de electricidad y el procesamiento).	Los datos se refieren a la condición en Francia.

Termocontaminación					
Método	Indicador		Descripción	Fortalezas	Debilidades
	Punto medio	Punto final			
Termo-contaminación (Verones et al. 2010)	No aplica	Ecosistemas PDF.m <sup>2</sup> .año 	Basado en simulaciones de un sistema de río simplificado, requiere gran cantidad de datos.	Considera efecto de mayor temperatura del agua.	Sin regionalización

Alteración del flujo					
Método	Indicador		Descripción	Fortalezas	Debilidades
	Punto medio	Punto final			
Impacto de represas para hidroelectricidad, Maendly y Humbert (2010)	No aplica	Ecosistemas PDF.m <sup>2</sup> .año 	Utiliza datos empíricos sobre reducción de biodiversidad antes y después de construidas represas.	Considera efecto de represas en biodiversidad	Basado en datos empíricos no regionalizados.

Indicadores que combinan métodos en un solo número					
Método	Indicador		Descripción	Fortalezas	Debilidades
	Punto medio	Punto final			
Farell et. al 2013 (USETOX/WSI)	m <sup>3</sup> de agua impactada		Se basa en USEtox para la evaluación de ecotoxicidad acuática y el índice de estrés hídrico WSI para determinar el impacto por escasez.	Permite reportar la huella en una sola métrica.	- Debido a que se basa en USEtox, no se recomienda el uso de los factores interinos, debido al alto coeficiente de variación de estos.

				- La versión "recomendada" de USEtox no considera la mayoría de los factores de caracterización.
(Riddout y Pfister; 2013 (ReCiPE/WSI))	m <sup>3</sup> de agua impactada	Se basa en ReCiPe para la evaluación del impacto por degradación del agua (eutrofización, toxicidad humana y ecotoxicidad) y en el índice de estrés hídrico WSI para determinar el impacto por escasez.	Permite reportar la huella en una sola métrica.	Alta incertidumbre.

# Referencias

- Acón, E. (2019). *Revista Construcción* 230. 230, 1–60.
- Alcamo, J., Doll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rosch, T., & Siebert, S. (2003). *Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability*. 1–132.  
<https://doi.org/10.1623/hysj.48.3.317.45290>
- Allan, J. A. (1998). *Virtual Water\_ A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits*. 1–2.
- AQUAE Fundación. (2021, May 26). *La huella hídrica, de carbono y ecológica*.
- AyA. (2017). *Acuerdo de Junta Directiva N.º2017-244 Aprobado en sesión ordinaria N.* <https://www.aya.go.cr>
- Azevedo, L. B. (2014). *Development and application of stressor-response relationships of nutrients: Vol. Chapter 8* [Tesis doctoral, Radboud University]. <https://repository.ubn.ru.nl/handle/2066/129667>
- Azevedo, L. B., van Zelm, R., Elshout, P. M. F., Hendriks, A. J., Leuven, R. S. E. W., Struijs, J., de Zwart, D., & Huijbregts, M. A. J. (2013). Species richness-phosphorus relationships for lakes and streams worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, 22(12), 1304–1314. <https://doi.org/10.1111/geb.12080>
- Azevedo, L., Henderson, A., van Zelm, R., Jolliet, O., & Huijbregts, M. (2013). Assessing the Importance of Spatial Variability versus Model Choices in Life Cycle Impact Assessment: The Case of Freshwater Eutrophication in Europe. *Environmental Science & Technology*, 47(23). <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es403422a>
- Bare, J. C., Hofstetter, P., Pennington, D., & Udo De Haes, H. A. (2000). Life Cycle Impact Assessment Workshop Summary: Midpoints vs Endpoints – The Sacrifices and Benefits. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 319–326.
- Bayart, J. B., Bulle, C., Margni, M., Vince, F., Deschenes, L., & Aoustin, E. (2009). Operational characterisation method and factors for a new midpoint impact category: freshwater deprivation for human uses. *In Proceedings of the SETAC Europe: 19th Annual Meeting, Gothenborg, Sweden, 31 May–4 June 2009*.
- Bayart, J.-B., Margni, M., Bulle, C., Deschênes, L., Pfister, S., Koehler, A., & Vince, F. (2010). Framework for assessment of off-stream fresh water use within LCA. *Int. J. Life Cycle Assess*, 15, 1–439. [https://ecocostsvalue.com/EVR/img/referenc es%20others/Boulay11FreshwateruseinLCA-directhumanhealthimpacts%20\(1\).pdf](https://ecocostsvalue.com/EVR/img/referenc es%20others/Boulay11FreshwateruseinLCA-directhumanhealthimpacts%20(1).pdf)
- Bembibre, C. (2009, September). *Definición de Edificación*. Definición ABC. <https://definicionabc.com/edificacion/>
- Berger, M., & Finkbeiner, M. (2010). *Water Footprint \_ How to Address Water Use in Life Cycle Assessment*. 919–944. <https://doi.org/10.3390/su2040919>
- Boulay, A., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Bulle, C., Klemmayer, i, Lathuilliere, M., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., Oki, T., Ridoutt, B., Worbe, S., & Pfister, S. (2015). New scarcity indicator from WULCA: consensus to assess potential user deprivation. *BLCA XV Conference, Vancouver*.
- Boulay, A. M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., Pastor, A. V., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S., & Pfister, S. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>

- Boulay, A. M., Bayart, J. B., Bulle, C., Margni, M., Rosenbaum, R., & Deschênes, L. (2009, September 6). *Water Use Impact Assessment Methodology and Application to Pulp and Paper Industry. 4th International Conference on Life Cycle Management (LCM 2009)*.
- Boulay, A. M., Bouchard, C., Bulle, C., Deschênes, L., & Margni, M. (2011). *Example of how to determine the water availability footprint following the single impact category approach*.
- Boulay, A. M., Bulle, C., Bayart, J. B., Deschênes, L., & Margni, M. (2011a). Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health. *Environmental Science & Technology. American Chemical Society*. <http://dx.doi.org/10.1021/es1030883>
- Boulay, A. M., Bulle, C., Bayart, J. B., Deschênes, L., & Margni, M. (2011b). Regional characterization of freshwater use in LCA: Modeling direct impacts on human health. *Environmental Science and Technology*, 45(20), 8948–8957. <https://doi.org/10.1021/es1030883>
- Boulay, A. M., & Pfister, S. (2013). *ISO 14046 Water Footprinting and Water Impact Assessment in LCA Adjusted from UNEP training materials on water footprint (Pfister and Boulay 2013)*. [www.wulca-waterlca.org](http://www.wulca-waterlca.org)
- Boulay, A.-M., Bouchard, C., Bulle, C., Deschênes, L., & Margni, M. (2010). Categorizing water for LCA inventory. *Int. J. Life Cycle Assess.*
- Bouwman, A., Beusen, A., & Billen, G. (2009). Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970– 2050. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(GB0A04). <https://doi.org/10.1029/2009GB003576>
- Brundtland, G. H., Khalid, M., Agnelli, S., Al-Athel, S. A., Chidzero, B., Fadika, L. M., Hauff, V., Lang, I., Shijun, M., Marino de Botero, M., Singh, N., Nogueira-Neto, P., Okita, S., Ramphal, S. S., Ruckelshaus, W. D., Sahnoun, M., Salim, E., Shaib, B., Sokolov, V., ... MacNeill, J. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development*. [https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE\\_LECTURE\\_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf](https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf)
- CADIS, & COSUDE. (2016). *Huella de Agua (ISO 14046) en américa latina análisis y recomendaciones para una coherencia regional*.
- Canals, L. M., Chenoweth, J., Chapagain, A., Orr, S., Antón, A., & Clift, R. (2008). Assessing Freshwater Use Impacts in LCA Part I – Inventory Modelling and Characterisation Factors for the Main Impact Pathways. *Int J Life Cycle Assess* (2009), 28–42.
- Carazo, G. (2022). *DEP-0179-2022*. 1–1.
- Cboudhuri, I. R., & Bardhan, S. (2014). *Evaluating Water Footprint of Building Construction in India*. <https://www.researchgate.net/publication/352374069>
- CCC. (2019). *Revista Construcción 230*. <https://www.construccion.co.cr/Multimedia/Archivo/7496>
- CCC. (2021). *DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TÉCNICO*. <https://www.construccion.co.cr/Multimedia/Archivo/11251>
- CFIA. (2016). *REVISTA CFIA EDICIÓN 264*. <https://revista.cfia.or.cr/wp-content/uploads/2018/03/264-1.pdf>
- CFIA. (2022). *Presentación de perspectivas de la construcción 2023*. <https://cfia.or.cr/descargas/informes/Perspectivas-CFIA2023.pdf>
- CIESIN. (2005). *Gridded Population of the World, Version 3 (GPWv3): Population Density Grid, Future Estimates*. <http://dx.doi.org/10.7927/H4ST7MRB>
- Comisión de las comunidades europeas. (2001). *Libro verde - Fomentar un marco europeo para la responsabilidad social de las empresas*.
- Díaz, M. (2023). Entrevista para ampliar conocimiento acerca de la huella de agua / Entrevistada por Santiago Brenes. *Tecnológico de Costa Rica*.
- Díaz, M. (2023, February). *Reunión virtual*.
- Döll, P. (2009). Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environ*, 4, 1–12.
- Ercin, A. E., & Hoekstra, A. Y. (2013). *Water footprint scenarios for 2050 (Ercin & Hoekstra, 2013)*. 1–12. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S01>

- 60412013002791?token=AD15E7097DFAC  
CF23214482C35C21237947D102C49D6CC  
81F7D605F914B8D611105A8B6BA5AEF23  
39232B368786D460C&originRegion=us-  
east-1&originCreation=20220821223158
- EsAgua. (2017). *El valor de la Huella Hídrica*.  
*Escuela de Ingeniería en Construcción*. (2022).  
Objetivo General, Visión y Misión de La  
Escuela .
- Fantke, E. P., Huijbregts, M., Margni, M.,  
Hauschild, M., Jolliet, O., Mckone, T.,  
Rosenbaum, R., & Van De Meent, D.  
(2015). *USEtox ® User Manual USEtox ®  
User Manual USEtox ® 2.0 User Manual  
(Version 2)*. <http://usetox.org>
- Farell, C. (2013). *DISEÑO DE UNA  
METODOLOGÍA PARA REPORTAR LA  
HUELLA DE AGUA* [Universidad Autónoma  
Metropolitana].  
[https://www.researchgate.net/profile/Carole-  
Farell/project/Water-Footprint-with-ISO-  
14046-  
aproach/attachment/5b4c973c4cde265cb64f  
6779/AS:649004371173380@15317461082  
15/download/Huella+de+Agua.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Carole-Farell/project/Water-Footprint-with-ISO-14046-approach/attachment/5b4c973c4cde265cb64f6779/AS:649004371173380@1531746108215/download/Huella+de+Agua.pdf)
- Folgueiras Bertomeu, P. (2018). *La entrevista*.  
[http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/  
99003/1/entrevista%20pf.pdf](http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/99003/1/entrevista%20pf.pdf)
- Fondo para la comunicación y la educación  
ambiental. (2017, May 30). *¿Cuánta agua  
hay en el planeta?*
- FourWeekMBA. (2023). *The Snowball Effect*.
- Frischknecht, R. (2008). *The Ecological Scarcity  
Method – Eco-Factors 2006*.
- Fundación Conama, Green Building Council  
España (GBCe), & RCD Asociación. (2018).  
*ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SECTOR  
DE LA CONSTRUCCIÓN*.
- Gandhi, N., Diamond, M., van de Meent, D.,  
Huijbregts, M., Peijnenburg, W., & Guinée,  
J. (2010). New method for calculating  
comparative toxicity potential of cationic  
metals in freshwater: Application to copper,  
nickel, and zinc. *Environmental Science and  
Technology*, 44(5195–5201).
- Global Reporting Initiative. (2018). *Guía del  
Global Reporting Initiative*.
- Goedkoop, M. J., Heijungs, R., Huijbregts, M., De  
Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R.  
(2009). *ReCiPe 2008, A life cycle impact  
assessment method which comprises  
harmonised category indicators at the  
midpoint and the endpoint level*. 1.  
<http://www.lcia-recipe.net/>
- Golcher, C. (2013). *Aplicación del cálculo de  
huella hídrica para regiones de cultivos de  
café, banano y arroz en Costa Rica*.  
[https://documentos.una.ac.cr/handle/unadoc  
s/5708](https://documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/5708)
- González, K., Pérez, L., & Galeano, E. (2019).  
Análisis del ciclo de vida de un edificio  
residencial en Colombia. *Inventum*, 14.
- Guerrero, M., & Schifter, I. (2012). *La huella del  
agua*.
- Hamadeh, N., Van Rompaey, C., Metreau, E., &  
Eapen, S. G. (2022, July 1). *New World  
Bank country classifications by income level:  
2022-2023*. World Bank Country  
Classification by Income Level.  
[https://blogs.worldbank.org/opendata/new-  
world-bank-country-classifications-income-  
level-2022-2023](https://blogs.worldbank.org/opendata/new-world-bank-country-classifications-income-level-2022-2023)
- Hanasaki, N., Fujimori, S., Yamamoto, T.,  
Yoshikawa, S., Masaki, Y., Hijioka, Y.,  
Kainuma, M., Kanamori, Y., Masui, T.,  
Takahashi, K., & Kanae, S. (2013). A global  
water scarcity assessment under Shared  
Socio-economic Pathways - Part 2: Water  
availability and scarcity. *Hydrology and  
Earth System Sciences*, 17(7), 2393–2413.  
<https://doi.org/10.5194/hess-17-2393-2013>
- Helmes, R. J. K., Huijbregts, M. A. J., Henderson,  
A. D., & Jolliet, O. (2012). Spatially explicit  
fate factors of phosphorous emissions to  
freshwater at the global scale. *International  
Journal of Life Cycle Assessment*, 17(5),  
646–654. [https://doi.org/10.1007/s11367-  
012-0382-2](https://doi.org/10.1007/s11367-012-0382-2)
- Hoekstra, A. (2008). *Water neutral: reducing and  
offsetting the impacts of water footprints*. 28.  
[https://www.academia.edu/3148132/Water\\_  
neutral\\_reducing\\_and\\_offsetting\\_the\\_impact  
s\\_of\\_water\\_footprints](https://www.academia.edu/3148132/Water_neutral_reducing_and_offsetting_the_impact_s_of_water_footprints)
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., &  
Mekonnen, M. (2011). *The Water Footprint  
Assessment Manual: Setting the Global  
Standard*. [www.earthscan.co.uk](http://www.earthscan.co.uk)
- Hoekstra, A. Y. (2003). *Virtual Water trade:  
Proceedings of the International Expert  
Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The  
Netherlands, 12-13 DECEMBER 2002,  
Value of Water Research Report Series No.  
12, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands*.  
[https://www.waterfootprint.org/media/downlo  
ads/Report12.pdf](https://www.waterfootprint.org/media/downloads/Report12.pdf)

- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2009). *Water footprint manual: State of the art 2009*, Water Footprint Network, Enschede, the Netherlands. <http://www.waterfootprint.org/>
- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). *Virtual water trade Value of Water*.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2016). *ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level (Commentary and discussion article)*. 1–10. <http://lci-recipe.net/>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report v1.1. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Humbert, S. (2017). *Step by step guide towards ISO compliant water footprint*.
- IHOBE. (2010). *Green Building Rating Systems: ¿Como evaluar la sostenibilidad en la edificación?* 1–72.
- ILCD. (2009). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Background Document Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment (LCA) DRAFT FOR PUBLIC CONSULTATION*.
- INEC. (2022). *Estadísticas de la Construcción 2021*. 2, 1–16. <https://www.inec.cr/sites/default/files/documentos-etos-biblioteca-virtual/reestconstruccion2021.pdf>
- INTE ISO 14046. (2015). *INTE ISO 14046:2015 (Español)*. [www.iso.org/patents](http://www.iso.org/patents).
- INTECO. (2018, April 25). *Hogares ticos consumen más agua que resto de centroamericanos*. [https://www.inteco.org/en\\_US/blog/recent-news-2/hogares-ticos-consumen-mas-agua-que-resto-de-centroamericanos-146#:~:text=Estudios%20recientes%20afirman%20que%20la,mayor%20que%20el%20promedio%20centroamericano](https://www.inteco.org/en_US/blog/recent-news-2/hogares-ticos-consumen-mas-agua-que-resto-de-centroamericanos-146#:~:text=Estudios%20recientes%20afirman%20que%20la,mayor%20que%20el%20promedio%20centroamericano).
- INVU. (2022, July 22). *Construcciones sostenibles: más que una vivienda verde*. <https://www.invu.go.cr/-/construcciones-sostenibles-mas-que-una-vivienda-verde?inheritRedirect=true#:~:text=Es%20un%20concepto%20integral%20de,tiempo%20de%20vida%20del%20proyecto>.
- ISO 14044. (2006). *ISO 14044 Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines*. <https://www.en-standard.eu/iso-14044-environmental-management-life-cycle-assessment-requirements-and-guidelines/#:~:text=ISO%2014044%3A2006%20specifies%20requirements%20and%20provides%20guidelines%20for,for%20use%20of%20value%20choices%20and%20optional%20elements>.
- Jones, M. K., Morales, M. J., Picado, S. de los Á., Umaña, B. E., & Vargas, M. A. (2021). *Huella de agua: Estudio de Caso de Torre Este Hospital Calderón Guardia*.
- Kounina, A., Margni, M., Bayart, J. B., Boulay, A. M., Berger, M., Bulle, C., Frischknecht, R., Koehler, A., Milà i Canals, L., Motoshita, M., Núñez, M., Peters, G., Pfister, S., Ridoutt, B., Van Zelm, R., Verones, F., & Humbert, S. (2012). Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3), 707–721. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0519-3>
- Larsen, H. F., & Hauschild, M. (2007). GM-troph: A low data demand ecotoxicity effect indicator for use in LCIA. *Int J LCA* 12(2), 2, 79–91.
- Maendly, R., & Humbert, S. (2008). *Characterization factors for damage to aquatic biodiversity caused by water use*. University of California, Berkeley CA, USA.
- MINAE. (2016, October 11). *Marco Jurídico y Legal*. <https://da.go.cr/marco-juridico-y-legal/>
- MINAE. (2023). *PODER EJECUTIVO ACUERDOS MINISTERIO DEL AMBIENTE Y ENERGÍA*.
- Muñoz, I., Milà i Canals, L., & Clift, R. (2008). Consider a Spherical Man. *Journal of Industrial Ecology*, 12.
- Nallaperuma, B., Lin, Z. E., Wijesinghe, J., Abeynayaka, A., Rachid, S., & Karkour, S. (2022). Sustainable Water Consumption in Building Industry: A Review Focusing on Building Water Footprint. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 266, 799–810.

- [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2886-4\\_56](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2886-4_56)
- Ndebele. (2002). *Get water neutral!*. The Water Foundation, Johannesburg.
- Norris, G. (2003). *Impact characterization in the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts methods for acidification, eutrophication, and ozone formation*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1162/108819802766269548>
- ONT. (2021). *Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva*. <https://www.hacienda.go.cr/docs/TipologiaConstructiva2021.pdf>
- ONU. (2015, April 15). *El consumo excesivo de agua pone en riesgo la seguridad alimentaria, advierte FAO*. Noticias Onu.
- ONU. (2022). *LOS ODS EN ACCIÓN*.
- Orellana, D. M., & Sánchez, M. C. (2006). Técnicas de recolección de datos en entornos virtuales más usadas en la investigación cualitativa. In *RIE* (Vol. 24, Issue 1). <https://revistas.um.es/rie/article/view/97661/93701>
- Payet, J. (2004). *Assessing toxic impacts on aquatic ecosystems in life cycle assessment (LCA)*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Pfister, S., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). *Assessing the Environmental Impact of Freshwater Consumption in LCA*. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es802423e#>
- Posthuma, L., Suter II, G. W., & TP, T. (2002). *Species Sensitivity Distributions in Ecotoxicology*.
- Presidencia de La República, MH, MTSS, MINAE, & MEIC. (2015). *Política Nacional de Compras Públicas Sustentables y Creación del Comité Directivo Nacional de Compras Sustentables*.
- Quiroga, R. (2007). *Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe*. CEPAL.
- Quirós, A. (2014, June 18). *Construcción sostenible, un buen negocio para todos*. <https://www.nacion.com/opinion/foros/construccion-sostenible-un-buen-negocio-para-todos/HJSDYYW7HFE4LC5DWHBVMU74G4/story/>
- Rees, W. E. (1992). Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization* 4. In *Living within a Fair Share Ecological Footprint* (Vol. 2). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9780203126448>
- Rees, W. E., & Wackernagel, M. (1996). *Nuestra huella ecológica: reduciendo el impacto humano sobre la Tierra*. LOM Ediciones.
- Rosenbaum, R. K., Bachmann, T. M., Gold, L. S., Huijbregts, M. A. J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H. F., Macleod, M., Margni, M., Mckone, T. E., Payet, J., Schuhmacher, M., Van De Meent, D., & Hauschild, M. Z. (2008). *USEtox-The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>
- Sacayán, E. E., & Martínez, A. (2021). *Huella de agua de casa de bambú con sistema de captación de agua de lluvia*. [www.centroacv.mx](http://www.centroacv.mx)
- Schnoor, J. L. (2009). *LCA and Environmental Intelligence?* <https://doi.org/10.1021/es900867c>
- Soriano, M. (2012). *Construcción Sostenible*. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/EstedocumentoesunacompilacióndelWikilibrodeConstrucciónSostenible>
- UNEP. (2003). *Evaluation environmental impacts in life cycle assessment*. [https://www.researchgate.net/publication/226404538\\_Life\\_Cycle\\_Assessment\\_and\\_Evaluation\\_of\\_Environmental\\_Impact\\_of\\_Sports\\_Equipment](https://www.researchgate.net/publication/226404538_Life_Cycle_Assessment_and_Evaluation_of_Environmental_Impact_of_Sports_Equipment)
- Universidad Autónoma de Madrid. (2019). *ESTIMATING THE WATER FOOTPRINT OF A HOUSING DEVELOPMENT*. <https://www.viacelere.com/sites/default/files/2019-12/Report%20Water%20Footprint%20Via%20Celere.pdf>
- USEtox® International Center, Fantke, P., Bijster, M., Guignard, C., Hauschild, M., Huijbregts, M., Jolliet, O., Kounina, A., Magaud, V., Margni, M., Mckone, T., Posthuma, L., Rosenbaum, R. K., Van De Meent, D., & Van Zelm, R. (2017). *USEtox® 2.0 Documentation (Version 1)* (USEtox®

- International Center, Ed.).  
<https://doi.org/10.11581/DTU:00000011>
- Vallejo, A. L. (2015). *Metodología práctica para la cuantificación de la huella de agua en Plantas Empacadoras de banano en Costa Rica*.
- Valverde, L. (2021, December 14). *Pandemia arrasó especialmente con empresas ligadas a la construcción y comercio*.  
<https://www.crhoy.com/economia/pandemia-arraso-especialmente-con-empresas-ligadas-a-la-construccion-y-comercio/>
- Vargas, M. (2017). *Evaluación de parámetros de sostenibilidad en proyectos de vivienda de interés social. Análisis del Conjunto Residencial El Porvenir, Matina*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Wärmark, K. (2015). *Assessment of water footprint for civil construction projects*.  
[http://www.w-program.nu/filer/exjobb/Katarina\\_W%C3%A4rmark.pdf](http://www.w-program.nu/filer/exjobb/Katarina_W%C3%A4rmark.pdf)
- WBCSD. (2010). *World Business Council for Sustainable Development Global Water Tool*.
- WEF. (2022). *The global risks report 2022* (17th ed.). The Global Competitiveness and Risk Team.  
[https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_The\\_Global\\_Risks\\_Report\\_2022.pdf?\\_gl=1\\*ew26zr\\*\\_up\\*MQ..&gclid=EAIaIQobChMlxN2ogKHB\\_AIV0cDICH3KTgH9EAAAYiAAEgIBq\\_D\\_BwE](https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2022.pdf?_gl=1*ew26zr*_up*MQ..&gclid=EAIaIQobChMlxN2ogKHB_AIV0cDICH3KTgH9EAAAYiAAEgIBq_D_BwE)
- Wenzel, H., Hauschild, M., & Alting, L. (2001). *Environmental Assessment of products, Volume 1: Methodology, tools and case studies in product development* (Kluwer Academic, Ed.; Vol. 1). Institute for product development .
- Wenzel, H., Hauschild, M., & Alting, L. (1997). *Environmental Assessment of Products. Volume 1: Methodology, Tools, and Case Studies in Product Development* (Vol. 1). Chapman and Hall.
- World Green Building Construction. (2013). *Construcción sostenible*. <https://gbccr.org/>
- WULCA. (2021, January 18). *WULCA*.  
<https://wulca-waterlca.org/aware/>
- WULCA. (2023, January 29). *¿Como aplicar AWARE?*  
<https://wulca-waterlca.org/aware/how-to/>
- WWAP. (2014). *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy* 1.  
<http://www.unwater.org/publications/publications-detail/en/c/218614/>
- WWAP. (2016). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo. In UNESCO.
- WWDR. (2014). *Resumen ejecutivo Agua y energía*.  
[http://burnanenergyjournal.com/wp-content/uploads/2013/03/WorldMap\\_Energy\\_ConsumptionPerCapita2010\\_v4\\_](http://burnanenergyjournal.com/wp-content/uploads/2013/03/WorldMap_Energy_ConsumptionPerCapita2010_v4_)