



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y
MATERIALES

INDICADOR DE HUELLA DE AGUA TERRITORIAL PARA CHILE
ENFOCADO AL SECTOR PRODUCTIVO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

ANDREA BELÉN MONTENEGRO ARANEDA

PROFESOR GUÍA:

FELIPE ANDRÉS DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

FRANCISCO GRACIA CAROCA

MARIANA BRÜNING GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE

2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERA CIVIL QUÍMICA
POR: Andrea Belén Montenegro Araneda
FECHA: 27 de septiembre de 2021
PROFESOR GUÍA: Felipe Díaz Alvarado

INDICADOR DE HUELLA DE AGUA TERRITORIAL PARA CHILE
ENFOCADO AL SECTOR PRODUCTIVO

Chile se enfrenta a una emergente crisis que pone en riesgo la seguridad hídrica del país, agravada por una deficiente gestión y gobernanza del agua. Se detecta como oportunidad de mejora la creación de un marco normativo adecuado. Si bien existen metodologías para detectar los impactos sobre el agua, como lo son la Evaluación de Huella Hídrica y la norma internacional ISO 14.046 Gestión Medioambiental de Huella de Agua, estas no poseen indicadores de impacto que sean específicos para las cuencas hidrográficas de Chile, por lo que se genera la necesidad de tener un indicador de huella de agua territorial para el país.

El objetivo general de este trabajo es crear un indicador de impacto hídrico específico para las distintas zonas de Chile, que se pueda evaluar en una metodología de huella de agua directa y que evidencie el efecto de una actividad productiva con respecto al contexto hidrológico local. Para lograr ello, los objetivos específicos son:

- Caracterizar la disponibilidad hídrica de las cuencas hidrográficas chilenas.
- Crear un indicador de huella de agua considerando el contexto geográfico y el consumo de una actividad productiva.
- Definir una metodología para determinar la huella de agua de una actividad productiva.
- Mostrar la aplicación del indicador de huella de agua territorial en el sector agrícola mediante un caso de estudio.

Se define el indicador de huella de agua territorial como la cantidad de veces que una actividad utiliza agua con respecto a la disponibilidad remanente del recurso en un territorio. Si el valor del indicador es menor a uno, entonces la actividad consume menos agua que la disponible y, por ende, su operación es sostenible en el tiempo. Por otro lado, si el valor es mayor a 1, quiere decir que la actividad es insostenible en el tiempo. Para el cálculo de indicador se desarrolla la caracterización hídrica de las cuencas hidrográficas considerando el caudal disponible, el consumo domiciliario y el caudal ecológico.

Para ilustrar la aplicación del indicador se analiza el caso de estudio de producción de paltas en la región de Valparaíso ocupando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida. Del análisis de inventario se concluye que se consumen 876 [m^3] por tonelada de palta cosechada en la etapa de cultivo. Los resultados de la evaluación de impactos se muestran a continuación:

Tabla I. Evaluación de impacto para el cultivo de paltas en las principales cuencas de la región de Valparaíso.

Cuenca	Indicador de huella de agua territorial [-]	Evaluación de agua disponible [m^3]
Río Petorca	34	121.139
Río Ligua	93	328.991
Río Aconcagua	3	11.365

Se obtiene que la producción de paltas es insostenible en la región de Valparaíso según los resultados del indicador de huella de agua territorial.

Se concluye que el indicador realiza una distribución equitativa de los recursos hídricos dentro de un territorio y se destaca por poseer especificidad territorial, ser físicamente interpretable y permitir obtener conclusiones rápidas y concretas para la gestión hídrica en un territorio.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, soy la persona que soy hoy gracias a las enseñanzas que me han dado. A mis papás, Marcela y Jorge, por ser mi soporte siempre y mis grandes maestros. A mi hermano, Nicolás, por enseñarme de valores inquebrantables y por darme su apoyo cuando lo he necesitado. A mis abuelas, Mariana y Lilia, por ser una fuente de inspiración y por mostrarme la fortaleza que se puede tener siendo mujer.

También quiero agradecerles a mis amigos con quienes me ha tocado transitar este camino. A la Vivi por ser la hermana que me regaló la vida. A la Chani y a la Beva por compartir conmigo sus espíritus inigualables. Al Salocin por su amistad incondicional. Al Feño por acompañarme en las jornadas de trabajo, haciéndolas más amenas. A Nico por ser un amigo con un gran corazón y por estar ahí, pase lo que pase. Al Seba por su apoyo y apañe siempre, por ser un gran amigo dentro y fuera de la U. A Gualla, por su apoyo, su cariño y por alegrarme en todo momento, gracias por abrazar mi corazón siempre. Les agradezco a todos por permitirme aprender de ustedes y acompañarme en los distintos procesos que he vivido.

Dentro de la U conocí a personas que me regalaron momentos maravillosos, que valoro mucho y que guardo con cariño en mi corazón. A mis amigos de Plan Común y de IQBT por su compañía durante los estudios, por las juntas para despejarse y pasarlo bien, y por el apoyo cuando existían dificultades. A las Artemisas por ser un grupo de mujeres maravillosas y por regalarme un espacio para desestresarme jugando a la pelota juntas. Al grupo PROSUS por permitirme compartir con ustedes mis inquietudes en torno a la sustentabilidad. Al A²IC por compartir mi interés por la docencia y darme herramientas para seguir desarrollándome en esta área; gracias Felipe C. por ser un gran mentor y por confiar en mis capacidades. Por último, agradecerle a Physis por ser un espacio en el cual logré crecer como persona y pude llevar a cabo un proyecto que ha guiado mis pasos profesionales hasta ahora; gracias Maca, More, Benja, Jenny y Felipe por dejarme aprender de ustedes y por creer en mis habilidades.

También quiero darles las gracias a mis profesores de comisión. A Francisco por apoyar mi trabajo de memoria y por enseñarme en distintos momentos de mi carrera estudiantil. A la Mari por darme la idea para desarrollar este trabajo, por apoyarme en los avances que iba teniendo y por inspirarme a lo largo de la carrera. A Felipe por guiarme en gran parte de mi camino universitario, por creer en mí y por ser un gran mentor siempre.

Por último, agradecerle a CYCLO por darme la oportunidad de llevar a cabo esta memoria, por enseñarme durante el proceso y por permitirme ser parte de este grupo de trabajo maravilloso, donde somos colegas y también amigos.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES GENERALES	1
1.1.1 Contexto mundial del agua	1
1.1.2 Distribución y desafíos hídricos por sector productivo en Chile	3
1.1.3 Realidad hídrica en Chile	4
1.1.4 Causas de la escasez hídrica en las cuencas de Chile	5
1.1.5 Lineamientos para la gestión del recurso hídrico en Chile	5
1.1.6 Caso Petorca	6
1.2 METODOLOGÍAS TRADICIONALES DE EVALUACIÓN DE HUELLA HÍDRICA	7
1.3 MOTIVACIÓN	8
2. OBJETIVOS Y LIMITACIONES	9
2.1 OBJETIVO GENERAL	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2.3 LIMITACIONES	9
3. MARCO TEÓRICO	10
3.1 CONCEPTUALIZACIÓN HIDROLÓGICA	10
3.2 TERMINOLOGÍA RELACIONADA CON EL AGUA	12
3.3 EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA (<i>WATER FOOTPRINT ASSESSMENT</i>)	13
3.3.1 Objetivo y alcance de la evaluación	13
3.3.2 Cuantificación de la huella hídrica	14
3.3.3 Evaluación de la sostenibilidad	15
3.3.4 Formulación de respuestas	19
3.4 ISO 14.406: GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL – HUELLA DE AGUA	20
3.4.1 Definición del objetivo y los alcances	21
3.4.2 Análisis de inventario	22
3.4.3 Evaluación de impacto	23
3.4.4 Interpretación de resultados	26
3.5 COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS	27
3.6 DISCUSIONES DE LAS METODOLOGÍAS	28
4. PROPUESTA DE UN INDICADOR DE HUELLA DE AGUA TERRITORIAL PARA CHILE	31
4.1 DEFINICIÓN TEÓRICA DEL INDICADOR DE HUELLA DE AGUA TERRITORIAL	31
4.2 DISCUSIONES SOBRE LA DEFINICIÓN DEL INDICADOR DE HUELLA DE AGUA TERRITORIAL	33
4.3 SÍNTESIS DEL INDICADOR DE HUELLA DE AGUA TERRITORIAL	34
4.4 FUNDAMENTOS TERRITORIALES PARA EL INDICADOR DE HUELLA DE AGUA	36
4.4.1 Disponibilidad hídrica	36
4.4.2 Consumo domiciliario	37
4.4.3 Caudal ecológico mínimo	37
4.4.4 Disponibilidad de agua remanente para otras actividades	38
4.4.5 Agua disponible relativa restante por área	38
4.5 DISCUSIÓN METODOLÓGICA DEL ANÁLISIS TERRITORIAL	38
4.6 CARACTERIZACIÓN POR CUENCA HIDROGRÁFICA PARA EL CÁLCULO DEL INDICADOR DE HUELLA HÍDRICA TERRITORIAL	41
4.7 DISCUSIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN POR CUENCA HIDROGRÁFICA	44
5. CASO DE ESTUDIO: PRODUCCIÓN DE PALTAS EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO	45
5.1 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCES	45
5.1.1 Descripción del proceso productivo	45
5.1.2 Objetivos y alcances del estudio	46
5.2 ANÁLISIS DEL INVENTARIO	46
5.2.1 Parámetros hídricos	46

5.2.2.	<i>Balance hídrico</i>	47
5.3.	EVALUACIÓN DE IMPACTOS	48
5.4.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PALTAS	49
5.4.1.	<i>Objetivos y alcances</i>	49
5.4.2.	<i>Análisis de inventario</i>	49
5.4.3.	<i>Evaluación de impactos</i>	50
6.	REFLEXIONES FINALES	52
7.	CONCLUSIONES	54
8.	BIBLIOGRAFÍA	56
9.	ANEXOS	61
ANEXO A.	DESCRIPCIÓN DE LOS USUARIOS EN LA HUELLA DE DISPONIBILIDAD DE AGUA	61
ANEXO B.	IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS TERRITORIAL.....	62
ANEXO C.	RESUMEN ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS TERRITORIAL	67
ANEXO D.	RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS TERRITORIAL PARA EL AÑO 2020	69
ANEXO E.	NIVEL DE PRODUCCIÓN DE UN CULTIVO DE PALTOS	73
ANEXO F.	BALANCE HÍDRICO DE UN CULTIVO DE PALTO EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO	74
ANEXO G.	DATOS DEL GRUPO DE PALTEROS HIGERPAL.....	79
ANEXO H.	EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL GRUPO DE PALTEROS HIGERPAL	80

Índice de figuras

FIGURA 1.	MAPA DEL NIVEL DE ESTRÉS HÍDRICO POR PAÍS EVALUADO AL AÑO 2040 [4].....	2
FIGURA 2.	EVOLUCIÓN DEL NIVEL DE ESTRÉS HÍDRICO EN CHILE POR DÉCADA DESDE EL 2010 AL 2040 [4].	2
FIGURA 3.	DISTRIBUCIÓN DE LOS DERECHOS DE APROVECHAMIENTOS CONSUNTIVOS EN CHILE A PARTIR DE LOS SECTORES PRODUCTIVOS [7].	3
FIGURA 4.	OFERTA Y DEMANDA DEL RECURSO HÍDRICO POR REGIÓN EN CHILE (ESCALA LOGARÍTMICA) [7].....	4
FIGURA 5.	CAUSAS DE LA ESCASEZ HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE CHILE. FUENTE: FUNDACIÓN CHILE, 2019 [9]. ...	5
FIGURA 6.	DIAGRAMA DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA [25]	10
FIGURA 7.	DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA DE CHILE [27].....	11
FIGURA 8.	CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS [28].....	11
FIGURA 9.	ESQUEMA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE AGUA [29].....	20
FIGURA 10.	DIAGRAMA GENERAL DEL PROCESO ESTUDIADO [29].	22
FIGURA 11.	BALANCE HÍDRICO DE UN PROCESO [29].	22
FIGURA 12.	EVALUACIÓN DE IMPACTOS DE PUNTO MEDIO Y PUNTO FINAL DEL USO DE AGUA [33].....	26
FIGURA 13.	INTERPRETACIÓN FÍSICA DE $1/AMD$ PARA UNA CUENCA HIDROGRÁFICA MOSTRANDO DOS ESCENARIOS.	35
FIGURA 14.	ESQUEMA GRÁFICO DE LOS CASOS QUE PUEDE TOMAR EL RESULTADO DEL INDICADOR DE HUELLA DE AGUA TERRITORIAL.....	35
FIGURA 15.	ESTRÉS HÍDRICO DE CHILE Y ARGENTINA PROYECTADO AL AÑO 2030 [46].....	38
FIGURA 16.	COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS PARA DEFINIR EL CAUDAL ECOLÓGICO MÍNIMO [42].....	40
FIGURA 17.	MEDICIÓN DE CAUDAL DISPONIBLE, CONSUMO DOMICILIARIO Y CAUDAL ECOLÓGICO DE LAS CUENCAS DE CAUDAL BAJO PARA LA PROYECCIÓN AL AÑO 2020.	41
FIGURA 18.	MEDICIÓN DE CAUDAL DISPONIBLE, CONSUMO DOMICILIARIO Y CAUDAL ECOLÓGICO DE LAS CUENCAS DE CAUDAL MEDIO-BAJO PARA LA PROYECCIÓN AL AÑO 2020.	42
FIGURA 19.	MEDICIÓN DE CAUDAL DISPONIBLE, CONSUMO DOMICILIARIO Y CAUDAL ECOLÓGICO DE LAS CUENCAS DE CAUDAL MEDIO PARA LA PROYECCIÓN AL AÑO 2020.	42
FIGURA 20.	MEDICIÓN DE CAUDAL DISPONIBLE, CONSUMO DOMICILIARIO Y CAUDAL ECOLÓGICO DE LAS CUENCAS DE CAUDAL ALTO PARA LA PROYECCIÓN AL AÑO 2020.....	42
FIGURA 21.	DIAGRAMA DE CICLO DE VIDA DE LA PALTA.....	45
FIGURA 22.	ETAPAS DE LA VIDA DE UN PALTO SEGÚN LA EDAD QUE POSEA [52].....	45
FIGURA 23.	CICLO DE FORMACIÓN DE FRUTOS DE UN PALTO [53].	45
FIGURA 24.	ESQUEMA DEL PROCESO DE POSTCOSECHA DE LAS PALTAS [55].	46

FIGURA 25. ESQUEMA DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS PARA EL BALANCE HÍDRICO DE LA ETAPA DE CULTIVO DE PALTAS.....	47
FIGURA 26. ESQUEMA DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS PARA EL BALANCE HÍDRICO DE LA ETAPA DEL CULTIVO DE PALTAS.....	74

Índice de tablas

TABLA 1. TEMÁTICAS PRIORITARIAS QUE DEBERÍA TENER EL “PLAN DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LOS RECURSOS HÍDRICOS” SEGÚN EL MMA (IZQUIERDA) Y FUNDACIÓN CHILE (DERECHA).	6
TABLA 2. CATEGORÍAS DE IMPACTO DE LA HUELLA DE AGUA A PARTIR DE LOS INDICADORES DE PUNTO MEDIO Y DE PUNTO FINAL [30].	23
TABLA 3. CATEGORÍAS DE IMPACTO Y MÉTODO DE EVALUACIÓN DE PUNTO MEDIO RECOMENDADOS PARA LATINOAMÉRICA [31].	23
TABLA 4. CATEGORÍAS DE DAÑO Y MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE PUNTO FINAL MÁS UTILIZADO EN LATINOAMÉRICA [31].	24
TABLA 5. FUNCIONALIDADES DE CATEGORÍA DE AGUA POR USUARIO [34].	25
TABLA 6. COMPARACIÓN ENTRE LA EVALUACIÓN HUELLA HÍDRICA (WATER FOOTPRINT ASSESSMENT) Y LA NORMA INTERNACIONAL ISO 14.046 GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL SOBRE LA HUELLA DE AGUA.	27
TABLA 7. DISPONIBILIDAD DE AGUA REMANENTE Y FACTOR DE CARACTERIZACIÓN DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN DE AGUA DISPONIBLE PARA EL AÑO 2020.....	43
TABLA 8. BALANCE HÍDRICO DE UN CULTIVO DE PALTAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA RÍO ACONCAGUA.....	48
TABLA 9. DATOS DEL GRUPO DE PALTEROS HIGERPAL.	48
TABLA 10. RESULTADOS DE LOS INDICADORES DE IMPACTO PARA EL GRUPO DE PALTEROS HIGERPAL, EVALUADOS EN LAS PRINCIPALES CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO.	49

Índice de tablas de anexos

TABLA A1. TIPOS DE USUARIOS DEL AGUA [34].	61
TABLA A2. DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS DATOS DE CADA CUENCA HIDROLÓGICA, CONSIDERANDO UN PERIODO HISTÓRICO DE 25 AÑOS (1993 - 2017) Y UNO DE 5 AÑOS (2013 - 2017).	67
TABLA A3. SUPERFICIE, CAUDAL DISPONIBLE, CONSUMO DOMICILIARIO Y CAUDAL ECOLÓGICO POR CUENCA HIDROLÓGICA PARA EL AÑO 2020.....	69
TABLA A4. PORCENTAJE DEL CAUDAL DE LA CUENCA HIDROLÓGICA QUE SE DESTINA AL CONSUMO DOMICILIARIO PARA EL AÑO 2020.	70
TABLA A5. DISPONIBILIDAD DE AGUA REMANENTE, INDICADOR DE DISPONIBILIDAD MENOS DEMANDA Y FACTOR DE CARACTERIZACIÓN DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN DE AGUA DISPONIBLE.....	72
TABLA A6. VOLUMEN DE AGUA DE RIEGO PROMEDIO A APLICAR CADA MES EN PALTOS ADULTOS DE LOS VALLES DE QUILLOTA, PETORCA Y LA LIGUA (V REGIÓN) PARA UN MARCO DE PLANTACIÓN DE 6x4 CONSIDERANDO EL RIEGO TOTAL Y EL RIEGO EFECTIVO [57].	74
TABLA A7. DATOS DE PRECIPITACIÓN MENSUAL ACUMULADA PARA LAS CUENCAS RÍO PETORCA, RÍO LIGUA Y RÍO ACONCAGUA CALCULADOS A PARTIR DEL PROMEDIO MENSUAL PARA LOS AÑOS 2014 AL 2019 [66].	75
TABLA A8. DATOS MENSUALES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA Y COEFICIENTE DE CULTIVO DEL PALTO, Y CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO PARA LOS VALLES DE QUILLOTA, PETORCA Y LA LIGUA [57].	75
TABLA A9. BALANCE HÍDRICO DE UN CULTIVO DE PALTAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA RÍO PETORCA.....	77
TABLA A10. BALANCE HÍDRICO DE UN CULTIVO DE PALTAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA RÍO LIGUA.	77
TABLA A11. BALANCE HÍDRICO DE UN CULTIVO DE PALTAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA RÍO ACONCAGUA.	78
TABLA A12. DATOS DEL GRUPO DE PALTEROS HIGERPAL.	79
TABLA A13. RESULTADOS PARA EL INDICADOR DE HUELLA DE AGUA TERRITORIAL EVALUADO PARA LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS RÍO PETORCA, RÍO LIGUA Y RÍO ACONCAGUA PARA EL AÑO 2020.	81
TABLA A14. SUPERFICIE DE LA CUENCA, CAUDAL DISPONIBLE, CONSUMO DOMICILIARIO Y CAUDAL ECOLÓGICO PARA LAS CUENCAS HIDROLÓGICAS RÍO PETORCA, RÍO LIGUA Y RÍO ACONCAGUA PARA EL AÑO 2020.....	81
TABLA A15. RESULTADOS DE LOS INDICADORES DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN DE DISPONIBILIDAD PARA LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS RÍO PETORCA, RÍO LIGUA Y RÍO ACONCAGUA PARA EL AÑO 2020.	83

1. Introducción

1.1 Antecedentes generales

1.1.1. Contexto mundial del agua

En los últimos 100 años el uso global del agua ha aumentado un 600% y se considera que siga creciendo a una tasa constante del 1% por año. Este incremento en la demanda del agua se debe a factores como el aumento de la población, el desarrollo económico, patrones de consumo cambiantes, entre otros [1].

Actualmente, se estima que la demanda mundial es de 4.600 [km³/año] y se proyecta que aumente entre 5.500 [km³/año] y 6.000 [km³/año] para el 2050, lo que correspondería a un incremento entre el 20% y el 30% de la demanda. A nivel mundial, las extracciones del recurso hídrico se distribuyen entre la agricultura, la industria, y el uso doméstico [1].

La agricultura ocupa aproximadamente un 70% de estas extracciones, de las cuales la mayoría se utiliza para el riego. La proyección del uso de agua para riego es incierta por la variabilidad que tiene este proceso, además de las cambiantes condiciones climáticas a las que se verá enfrentada este sector. Sin embargo, se estima que la agricultura tiene que satisfacer un aumento del 60% de la demanda alimentaria para el 2050 [1].

Por otro lado, la industria consume un 20% de las extracciones globales en donde un 75% se encuentra destinada para la producción de energía, mientras que un 25% se utiliza para la producción industrial [1].

Por último, el uso doméstico corresponde al 10% restante y se estima que la demanda en este sector aumente significativamente durante el período de 2010 a 2050 en la mayoría de las regiones del mundo, ya que se anticipa un crecimiento en los servicios de abastecimiento de agua en los sectores urbanos [1].

Sin embargo, hay que comprender que, dependiendo de la localidad que se estudia, estas proporciones pueden variar. Por ejemplo, los sectores urbanos poseen una mayor densidad poblacional, en contraste con la actividad industrial y agrícola, por lo mismo, las demandas hídricas urbanas se concentran mayormente en el consumo residencial. En particular, para la ciudad de Santiago de Chile estas demandas se distribuyen de la siguiente manera: 47% destinado al consumo residencial, 37% para el riego agrícola, 7% para el uso comercial, 5% para el riego de áreas verdes y 4% destinado al consumo industrial [2].

A modo de resumen, la demanda mundial de agua tendrá un crecimiento progresivo en las siguientes décadas y se estima que la demanda por el uso industrial y doméstico crecerá en mayor proporción que la demanda para uso agrícola, sin embargo, la agricultura seguirá siendo el usuario que consume más de este recurso [1].

Estrés hídrico

La UNESCO define el estrés hídrico como: *“la proporción de agua que extraen todos los sectores en relación con los recursos hídricos disponibles”* [3]. En la Figura 1 se observa la clasificación de los países según este indicador para evaluar la realidad hídrica de cada uno proyectada al 2040 [4].

Un valor elevado del nivel de estrés hídrico puede tener consecuencias negativas para el desarrollo económico y la seguridad alimentaria, ya que aumenta la competencia por la

disponibilidad de agua entre los usuarios. Por lo que la ONU ha definido, dentro de sus metas al año 2030, el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 6 sobre agua limpia y saneamiento, el que posee un indicador específico que propone “*aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua*”. Este objetivo incita a los países a generar políticas eficaces para la gestión de la oferta y la demanda del recurso, con la finalidad de promover el uso eficiente del agua [3].

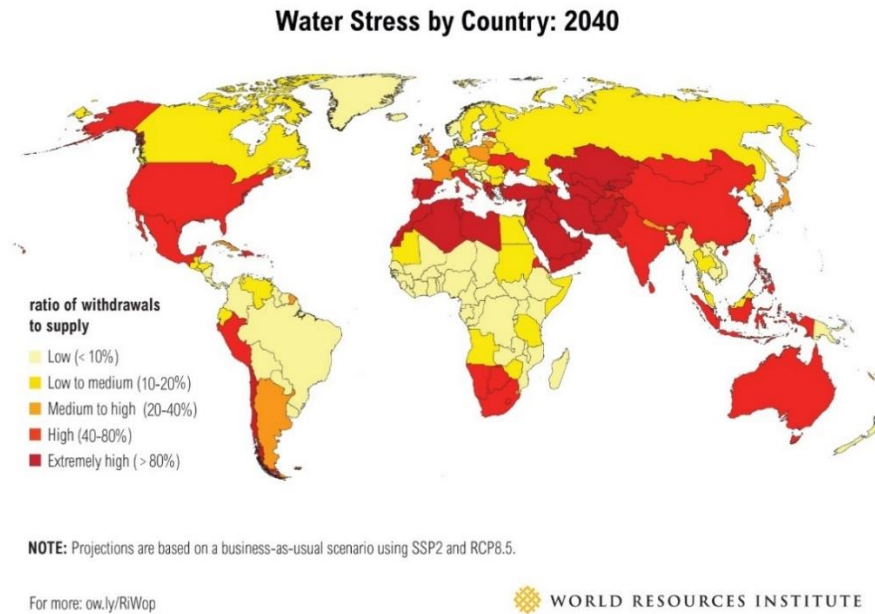


Figura 1. Mapa del nivel de estrés hídrico por país evaluado al año 2040 [4].

Actualmente se considera que cerca del 25% de la población mundial es vulnerable ante una emergente crisis hídrica, debido a que viven en zonas donde la agricultura, las industrias y las ciudades extraen el 80% del recurso disponible cada año [5].

El cálculo del nivel de estrés hídrico se ve afectado por la combinación de diferentes factores dependiendo del país. En el caso de Chile las altas temperaturas en regiones críticas y los patrones de precipitación variables han aumentado la probabilidad de estrés hídrico del país en la mayoría de sus regiones. Lo anterior se traduce en que Chile va a tener una transición de un nivel de estrés hídrico medio a uno extremadamente alto para el año 2040, como se aprecia en la Figura 2 [4].

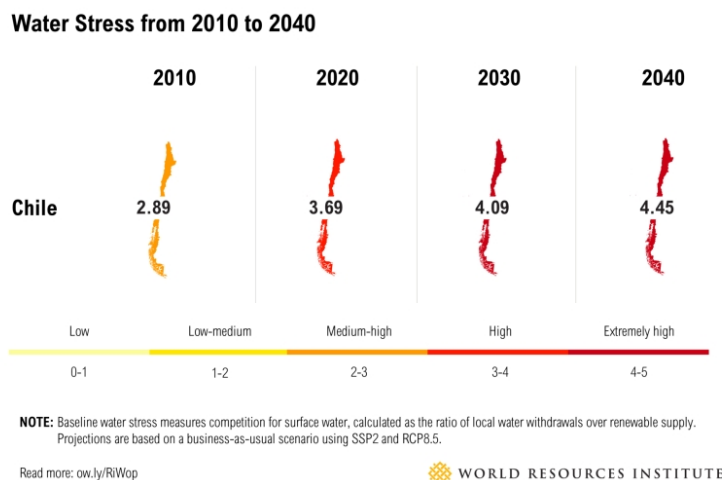


Figura 2. Evolución del nivel de estrés hídrico en Chile por década desde el 2010 al 2040 [4].

1.1.2. Distribución y desafíos hídricos por sector productivo en Chile

En Chile el dominio y aprovechamiento de las aguas está regulado a partir del Código de Aguas. En este documento se explicita que el uso del recurso puede ser consuntivo o no consuntivo [6]:

ARTICULO 13°- Derecho de aprovechamiento consuntivo es aquel que faculta a su titular para consumir totalmente las aguas en cualquier actividad.

ARTICULO 14°- Derecho de aprovechamiento no consuntivo es aquel que permite emplear el agua sin consumirla y obliga a restituirla en la forma que lo determine el acto de adquisición o de constitución del derecho.

Los usos consuntivos del agua en el país se distribuyen según los sectores productivos: un 73% es destinado a las actividades agrícolas, ganaderas y forestales; un 12% para las actividades industriales, un 9% para la minería; y un 6% para la actividad sanitaria. En la Figura 3 se puede ver la distribución de los derechos de aprovechamiento consuntivos de los diferentes sectores productivos [7]:

DISTRIBUCIÓN DE LOS USOS CONSUNTIVOS DEL AGUA.

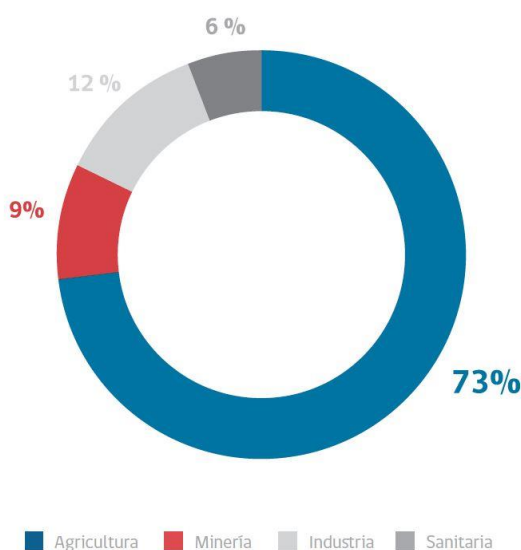


Figura 3. Distribución de los derechos de aprovechamientos consuntivos en Chile a partir de los sectores productivos [7].

Para el sector agrícola el derecho al agua permite el riego de 1,1 millones de hectáreas entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos. El desafío del agua para este sector lo constituye principalmente el aumento en la eficiencia del regadío, ya que una tecnificación del riego puede reducir el consumo hídrico en un 50% [7].

Por otro lado, el sector industrial ocupa el agua para desarrollar sus procesos productivos y, al ser estos variables entre una industria y otra, la proyección sobre la demanda del uso del recurso hídrico se realiza a partir del crecimiento estimado de cada sector productivo. La actividad industrial tiene como desafío minimizar el riesgo de contaminación del agua y optimizar el uso de este recurso en los diferentes procesos productivos [7].

Para el caso de la minería, la actividad se desempeña en zonas con mayor estrés hídrico en donde se prevé un aumento de la demanda del orden del 200% al 2035. Por esta razón, el desafío que posee este sector es la obtención de agua a partir de nuevas fuentes y la optimización del consumo en sus procesos, además de minimizar el riesgo de la contaminación de las aguas a

causa de la actividad minera, ya que esto afecta la disponibilidad hídrica para el consumo domiciliario [7].

En el caso del sector sanitario, el derecho consuntivo del agua se ocupa para la generación de agua potable, y para el transporte y tratamiento de las aguas residuales generadas por la actividad cotidiana de las personas. Cabe destacar que un 56% de los derechos de agua de este sector son para la Región Metropolitana y la Región de Valparaíso. El principal desafío se centra en disminuir los consumos locales y minimizar las pérdidas de agua potable durante la distribución del recurso [7].

Por último, el uso no consuntivo del agua destinado a la producción de energía eléctrica ha tenido una tendencia creciente. El sector energético posee una potencia instalada de 17.000 MW aproximadamente, donde un 34% es debido a la producción hidroeléctrica. Se proyecta potenciar este medio de obtención debido al potencial hidroeléctrico del país desde la región del Maule al sur [7].

1.1.3. Realidad hídrica en Chile

La disponibilidad del agua en Chile es de 53.000 [$m^3/habitante$] en promedio al año. Sin embargo, el país presenta un desequilibrio geográfico debido a la distribución que tiene el recurso en relación con la población. Existe una mayor población en las localidades donde la disponibilidad de agua es menor, como es el caso de las regiones del norte y centro del país, donde se concentra el 65% de la población y el recurso hídrico varía desde 47 [$m^3/habitante$] para la región de Antofagasta hasta los 7.037 [$m^3/habitante$] para la región de O'Higgins al año, lo que correspondería entre un 0,01% y un 13,3% del promedio nacional [8].

Además, en muchas regiones del país existe un sobre otorgamiento de los derechos consuntivos del agua que superan la disponibilidad real del recurso, lo que ha derivado en un déficit hídrico tanto de las aguas superficiales como de las subterráneas en estas localidades [8]. En la Figura 4, se puede apreciar el caudal disponible por región y la demanda de agua respectiva.

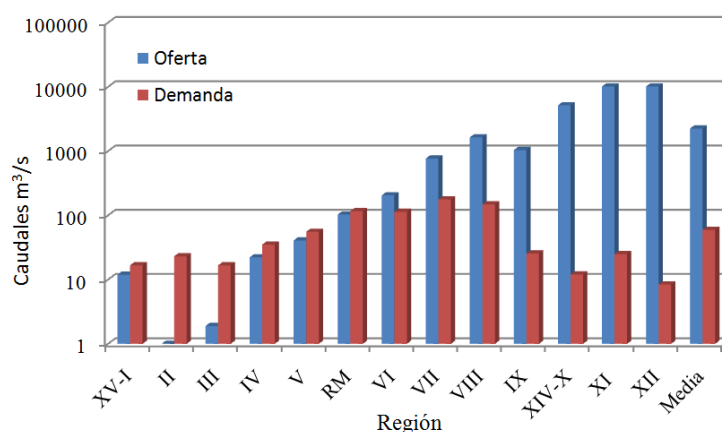


Figura 4. Oferta y demanda del recurso hídrico por región en Chile (escala logarítmica) [7].

El sobre otorgamiento se generó porque entre los años 80 y 90 existió una bonanza hidrológica, hubo varios fenómenos del Niño de gran magnitud y una pluviometría relativamente normal durante este periodo, lo que provocó que se asignaran derechos de uso del agua considerando este escenario, sin tener presente la variabilidad hídrica de los años posteriores. A partir del año 2000 empezó una disminución de la disponibilidad natural del recurso, provocando la sequía más extensa de los últimos 100 años [8].

1.1.4. Causas de la escasez hídrica en las cuencas de Chile

Fundación Chile realizó un estudio en seis cuencas del país: Copiapó, Aconcagua, Maipo, Maule, Lebu y Baker [9]. Con este análisis se identificaron las principales causas que pueden influir a futuro en la seguridad y sustentabilidad del recurso hídrico, las cuales se pueden observar en la Figura 5:

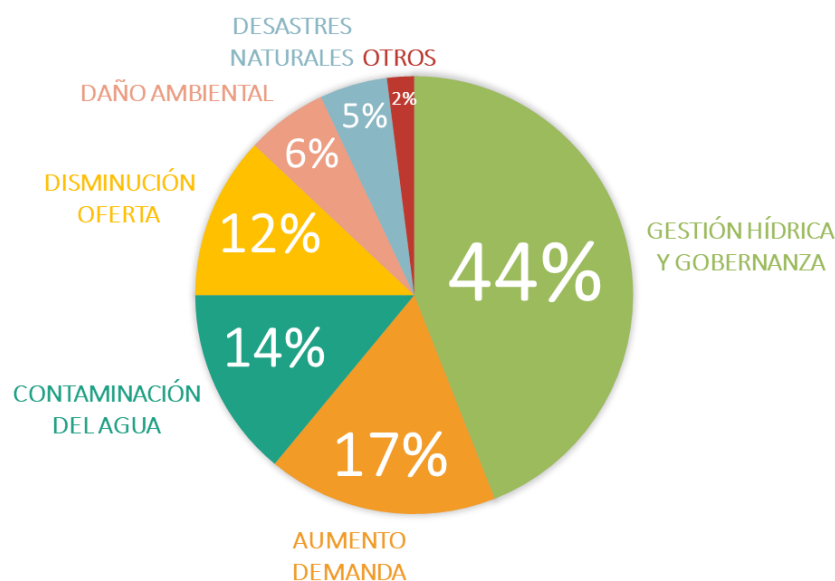


Figura 5. Causas de la escasez hídrica en las cuencas de Chile. Fuente: Fundación Chile, 2019 [9].

La principal causa es la deficiente gestión hídrica y gobernanza (44%) debido a la falta de transparencia en la información, una limitada fiscalización sobre los usuarios y un marco normativo inadecuado para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) de las cuencas [9].

La segunda causa es el aumento de la demanda (17%) ligada al aumento de la actividad productiva y al sobre otorgamiento de derechos de aprovechamiento de agua (DAA) [9].

A esta última le siguen la causa de la contaminación del agua (14%) por productos agroquímicos, pasivos mineros, carencia de tratamiento de aguas servidas en zonas rurales y concentración de sedimentos; y la causa por disminución de la oferta (12%) debido al déficit en las precipitaciones, el retroceso de los glaciares y la sobreexplotación de acuíferos [9].

1.1.5. Lineamientos para la gestión del recurso hídrico en Chile

Actualmente se encuentra en desarrollo el “*Plan de Adaptación al Cambio Climático para los Recursos Hídricos*”, documento que tiene como objetivo ser una guía para resguardar la seguridad hídrica en Chile, ya que se analizarán diversos temas que debieran incluir la definición de las líneas de acción con indicadores, metas y asignaciones de responsabilidades.

Se espera que este plan se enfoque en los temas prioritarios planteados por el Ministerio de Medio Ambiente y, también, por Fundación Chile. Las temáticas prioritarias para ambas instituciones se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Temáticas prioritarias que debería tener el “Plan de Adaptación al Cambio Climático para los Recursos Hídricos” según el MMA (izquierda) y Fundación Chile (derecha).

Ministerio de Medio Ambiente [10]	Fundación Chile [11]
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Gestión sustentable de los recursos hídricos, que permita una adecuada protección de la cantidad y calidad de las aguas.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>La disponibilidad y aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos.</i>
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Prevenir y enfrentar la escasez: superar la escasez a corto plazo y abordarla de forma permanente. Comprensión del ciclo hidrológico en el manejo de los recursos, recarga artificial de acuíferos, obtención de recursos desde nuevas fuentes, como plantas desalinizadoras, construcción de infraestructura hídrica y otros.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>El manejo de los cauces y el control de crecidas y aluviones.</i>
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Fortalecer y ampliar los sistemas de monitoreo, con especial atención en la instalación de estaciones en altura, extender y mejorar el monitoreo de la calidad de las aguas y de los acuíferos, para estos últimos a través de un programa nacional de monitoreo.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>El conocimiento, monitoreo e investigación de los recursos hídricos y sistemas de información</i>
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Mantener y fortalecer el inventario, monitoreo y estudio de los glaciares.</i> • <i>Potenciar el desarrollo de una Ley de Glaciares, que permita la conservación de estos cuerpos, considerando los efectos del cambio climático.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>La conservación y protección de los recursos hídricos y los ecosistemas asociados, y gestión de la calidad de las aguas.</i>
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Mejorar la satisfacción de la demanda de agua potable en las zonas de menor cobertura.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>El abastecimiento de agua potable y saneamiento, en las ciudades y en el área rural.</i>
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Reutilización del recurso.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>El aprovechamiento de agua para riego.</i>
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Educación de la población. Promover la cultura de conservación del agua en la comunidad y las acciones para el uso eficiente del recurso.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>La participación de los usuarios y la ciudadanía. capacitación del público.</i>
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Mejorar la institucionalidad para la planificación del recurso, su asignación, protección, fiscalización y resolución de conflictos.</i> 	

1.1.6. Caso Petorca

La región de Valparaíso se ha visto afectada por una mega sequía provocada por el decaimiento de las precipitaciones desde hace más de 10 años. Sin embargo, esta situación se ha visto agravada por la mala gestión de los recursos hídricos. Esto ha generado varios conflictos socioambientales asociados al agua, que se encuentran relacionados con la contaminación derivada de la minería, la construcción de embalses destinados al regadío, la implantación de proyectos energéticos, la contaminación de los cursos de agua y la producción intensiva de frutales de exportación, principalmente de paltos y cítricos [12, 13].

La provincia de Petorca es una de las comunas más afectadas con respecto al tema hídrico en la región, llegando a vulnerarse el derecho humano de acceso al agua. Cerca de un 20% de la población depende de camiones aljibe para contar con un suministro de agua potable, los cuales los abastecen con 50 litros por persona al día, cifra que corresponde a la mitad de lo

recomendado por la Organización Mundial de la Salud [14]. Esta situación se debe a la gestión hídrica que permitió que en las zonas bajas y medias de la cuenca del Río Petorca al año 2000 se duplicara el otorgamiento de derechos de uso consuntivo de agua, los cuales se vieron aumentados en un 1.200% hacia el año 2018 [12].

Con todo esto, Petorca se ha convertido en un caso de interés nacional por la inequidad que existe en el acceso al agua, donde la agricultura consume la mayor proporción de los recursos, situación que se ha visto facilitada por los problemas de fiscalización y manejo de las cuencas hidrográficas, lo que genera contradicciones entre las políticas de gestión del recurso con respecto a las necesidades de la población local y el funcionamiento de los ecosistemas [12].

En la región de Valparaíso se han empezado a desarrollar planes para hacer frente a esta problemática. Sin embargo, entre los actores convocados a las reuniones se ha excluido a los comités de Agua Potable Rural y a personas de la sociedad civil, dejando las decisiones a cargo de los titulares de los derechos de agua, quienes destinan principalmente el agua al regadío [13].

1.2 Metodologías tradicionales de evaluación de huella hídrica

La huella hídrica (*Water Footprint*, en inglés) se introdujo en 2002 como un indicador del uso de agua dulce que analiza tanto el uso de agua directo como indirecto de un consumidor o productor, considerando la temporalidad y el lugar geográfico en los cuales se está cuantificando el agua. En el 2011 se formalizó una metodología con respecto a este indicador, llamada Evaluación de la Huella Hídrica (*Water Footprint Assessment*, en inglés) [15].

Por otra parte, la metodología más usada para evaluar los impactos ambientales es el Análisis de Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment*, en inglés), que corresponde a la norma internacional ISO 14.040. Para el caso del agua, esta metodología realiza una evaluación del desempeño ambiental de productos y servicios a lo largo de su ciclo de vida, a través de una cuantificación del uso del recurso y un posterior análisis de su contaminación por medio de diferentes categorías de impacto (eutrofización, acidificación y toxicidad humana y ecológica) [15, 16]. En el año 2014, se publicó la norma internacional ISO 14.046 Gestión Medioambiental de Huella de Agua, con un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) [17].

Tanto la Evaluación de Huella Hídrica como la norma internacional ISO 14.046 Gestión Medioambiental de Huella de Agua poseen una estructura metodológica similar, teniendo etapas para definir objetivos y alcances, cuantificar el uso de agua, evaluar los impactos y, por último, interpretar los resultados obtenidos.

Por un lado, la Evaluación de Huella Hídrica se encarga de cuantificar el consumo y pérdida de calidad del agua, mientras que la Gestión Medioambiental de Huella de Agua cuantifica el consumo de agua y evalúa los criterios de disponibilidad o degradación del agua a partir de diferentes indicadores de impacto.

Con respecto a la evaluación de impactos a nivel geográfico, la Evaluación de Huella Hídrica relaciona el uso de agua de una actividad con respecto a la disponibilidad que existe en la zona de la cual se extrajo, a través del indicador de escasez hídrica [18]. Por otro lado, en la Gestión Medioambiental de Huella de Agua, se puede implementar el método de agua disponible remanente (*Available Water Remaining* o *AWARE*), el cual determina la cantidad de agua disponible relativa restante por área en una zona, después de que se haya satisfecho la demanda de los seres humanos y de los ecosistemas. El resultado obtenido se compara con el promedio mundial y, a partir de esto, se define un factor de caracterización para la zona analizada. [19].

Por una parte, el indicador de escasez ocupado en la Evaluación de Huella Hídrica no asegura que exista agua disponible para las personas y los ecosistemas, lo cual es importante para que

no se generen conflictos sociales y/o ambientales. Por otro lado, el indicador de agua disponible remanente realiza una comparación con respecto a la disponibilidad de agua mundial, en vez de definir su criterio de impacto según las necesidades del territorio analizado, ya que las realidades hídricas de una región dependen tanto de la disponibilidad que exista, como de la demanda que haya en la zona.

1.3 Motivación

Habiendo detectado que la principal causa que pone en riesgo la seguridad hídrica del país es la gestión y gobernanza del agua, se identifica como oportunidad de mejora la implementación de un marco normativo adecuado y su correcta fiscalización. Para ello es necesario establecer una metodología con criterios específicos que evalúen los impactos hídricos sobre un territorio y que, en base a los resultados, se pueda desarrollar un plan de acción para lograr una gestión sostenible del agua. Actualmente, esto se puede desarrollar con la Evaluación de Huella Hídrica o con la norma internacional ISO 14.046 Gestión Medioambiental de Huella de Agua. Sin embargo, estas metodologías no poseen indicadores de impacto que sean específicos al contexto de Chile, por lo que se genera la necesidad de tener un indicador de impacto hídrico para cada territorio del país.

El propósito de este trabajo consiste en diagnosticar la situación hídrica de las distintas cuencas hidrográficas del país y evaluar el impacto de una actividad productiva sobre las fuentes de agua dentro de una localidad, permitiendo identificar oportunidades de mejora sobre el uso del agua en la industria y, de esta manera, lograr una gestión eficiente de los recursos hídricos asignados.

Particularmente, este trabajo consistirá en crear un indicador que refleje el impacto sobre el agua directa de una actividad considerando el contexto local de las cuencas hidrográficas de Chile. Para poder diferenciar las distintas realidades hídricas del país, se realizará una caracterización de cada una de las cuencas hidrográficas con el propósito de exponer la situación local que se esté analizando. Teniendo en cuenta lo anterior, se evaluará el indicador en un caso de estudio del sector agrícola y se comparan los resultados con los valores obtenidos para los indicadores de las metodologías tradicionales, con el objetivo de evaluar la idoneidad del indicador propuesto. Por último, se determinará cuál es el indicador más adecuado a utilizar en una evaluación de impactos hídricos para Chile.

2. Objetivos y limitaciones

Este trabajo de memoria se desarrolla como parte de la línea de proyectos en torno al agua de la empresa CYCLO Consulting SpA. y posee los objetivos presentados a continuación.

2.1. Objetivo General

Crear un indicador de impacto hídrico específico para las distintas zonas de Chile, que se pueda evaluar en una metodología de huella de agua directa y que evidencie el efecto de una actividad productiva con respecto al contexto hidrológico local.

2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la disponibilidad hídrica de las cuencas hidrográficas chilenas.
- Crear un indicador de huella de agua considerando el contexto geográfico y el consumo de una actividad productiva.
- Definir una metodología para determinar la huella de agua de una actividad productiva.
- Mostrar la aplicación del indicador de huella de agua territorial en el sector agrícola mediante un caso de estudio.

2.3. Limitaciones

El diseño de la metodología de medición de huella de agua considerará un escenario particular con respecto a los datos de disponibilidad hídrica y consumo domiciliario que logre mostrar el contexto más representativo de los últimos años para el país. En consecuencia, esta memoria no tendrá presente el efecto de los recursos temporalmente variables, como el clima y las precipitaciones, que puede afectar la oferta hídrica futura en las diferentes regiones.

Por otro lado, este trabajo no considerará dentro de la disponibilidad hídrica los recursos de agua de origen subterráneo, ya que para hacer esto es necesario realizar una modelación hidrogeológica de los diferentes acuíferos del país [20].

Además, se trabajará con datos de origen bibliográfico y no con datos obtenidos a partir de una medición directa en los lugares de estudio, por este motivo los análisis realizados pueden diferir en algunas zonas en particular.

Finalmente, esta memoria realizará un análisis genérico de los procesos productivos, por lo que no se evaluarán los casos en los que una industria en particular tenga mayor o menor tecnología que afecten la eficiencia del uso de agua en los procesos.

3. Marco teórico

3.1. Conceptualización hidrológica

La superficie de la Tierra se encuentra cubierta por un 70% de agua, de la cual un 97,5% es agua salada y un 2,5% es agua dulce, este último corresponde al recurso apto para el consumo humano. Sin embargo, la mayor parte del agua dulce no se encuentra disponible, ya que un 69,3% se localiza en polos o glaciares, un 30% está almacenada en acuíferos y solo un 0,3% está presente en ríos y lagos [21].

En el mundo, los recursos hídricos provenientes de fuentes de agua dulce pueden encontrarse de manera superficial o subterránea. Las aguas superficiales se entienden como cualquier cuerpo de agua que se encuentre en la superficie terrestre como, por ejemplo, ríos, lagos, lagunas y glaciares. Por otro lado, las aguas subterráneas corresponden a las aguas que fluyen a través de los materiales porosos del subsuelo hacia niveles más bajos que los de infiltración y que se almacenan en acuíferos [22, 23].

Los recursos hídricos superficiales pueden clasificarse en cuencas hidrográficas o también llamadas cuencas de drenaje, como se muestra en Figura 6, estas corresponden a una unidad morfológica desde la cual la escorrentía superficial directa de la precipitación se drena por gravedad hacia un cuerpo de agua [24].



Figura 6. Diagrama de una cuenca hidrográfica [25].

En Chile, la Dirección General de Aguas (DGA) identifica 101 cuencas hidrográficas, las que se describen como los caudales de aguas provenientes de afluentes, subafluentes, quebradas, esteros, lagos y lagunas que fluyen a ella de manera continua o discontinua. A su vez, se definen 467 subcuencas hidrográficas, las que corresponden a las unidades de caudales que aportan agua a una cuenca. Por último, existen 1.496 subcuencas hidrográficas o microcuencas, que son las unidades de caudales que aportan agua a una subcuenca [26].

La delimitación geográfica de las cuencas, subcuencas y microcuencas de Chile se muestra en la Figura 7.

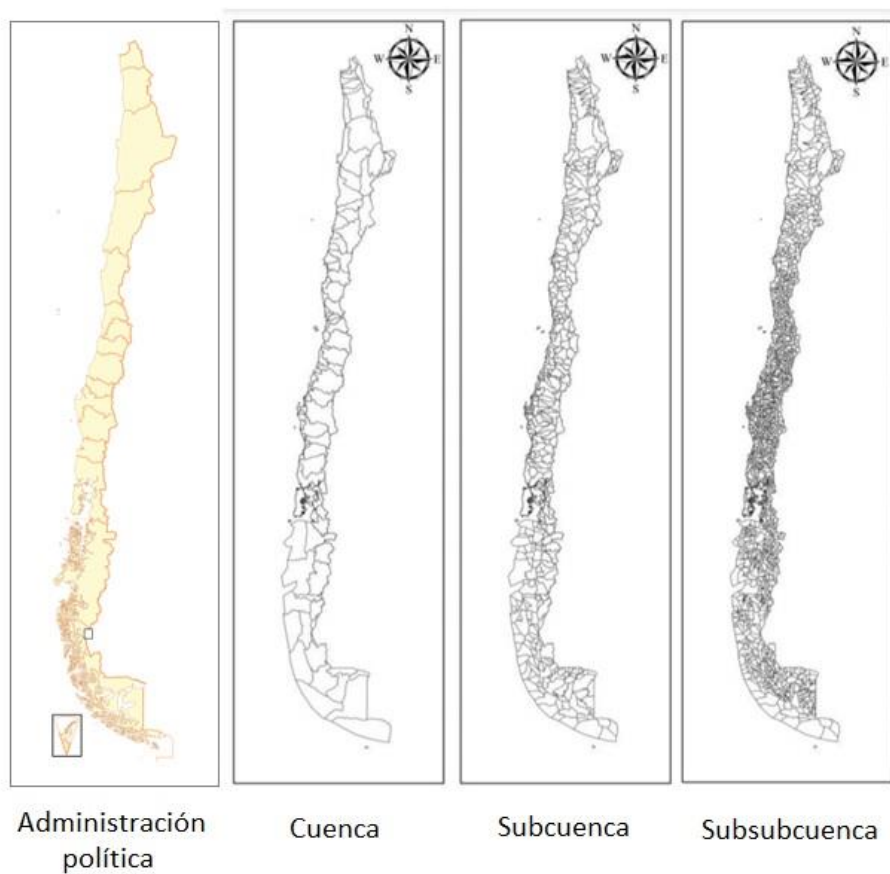


Figura 7. Delimitación geográfica de Chile [27].

Considerando la forma de la cuenca, la densidad de su corriente y su textura, se definió una clasificación para los distintos tipos de cuencas de Chile, a partir de fotointerpretación, las cuales se muestran en la Figura 8 [28].

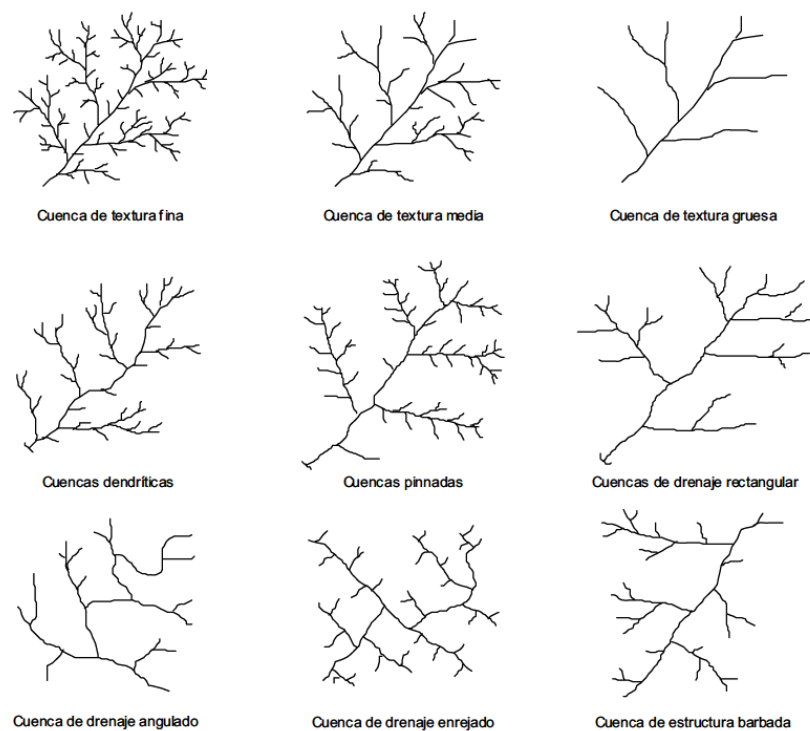


Figura 8. Clasificación de los tipos de cuencas hidrográficas [28].

3.2. Terminología relacionada con el agua

A continuación, se presentan algunas terminologías relacionadas con los recursos hídricos:

El uso de agua corresponde a la utilización de los recursos hídricos debido a la actividad humana, que puede darse de forma consuntiva o no consuntiva. El uso consuntivo se refiere al flujo de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica, por lo que el agua ya no se encuentra disponible en las mismas condiciones físicas y/o químicas. Por otra parte, el uso no consuntivo corresponde a que la actividad desarrollada que ocupa recursos hídricos no genera cambios en el flujo de agua en la fuente natural [15, 24].

La extracción de agua corresponde al agua extraída de manera antropogénica desde una cuenca hidrográfica o un cuerpo de agua, ya sea de manera permanente o temporal [24].

El consumo de agua se define como la cantidad de agua extraída, ya sea de forma permanente o temporal, para un uso determinado y que no se retorna a la cuenca o cuerpo de agua del que se extrajo. En general, se refiere al recurso que no está disponible para su reutilización en la cuenca o no es posible recuperarla porque existió filtración, evapotranspiración o contaminación [15, 24].

La disponibilidad de agua se entiende como el grado de recursos hídricos suficientes para cubrir las necesidades de los seres humanos y de los ecosistemas. La disponibilidad depende de la precipitación y de la evapotranspiración, y corresponde a un porcentaje de la escorrentía global calculada generalmente por región [15, 24].

La escasez de agua es la relación entre el uso del agua y su disponibilidad. La escasez de agua física corresponde a la falta de agua y/o al acceso a agua de calidad [15].

La falta de agua es la carencia absoluta de agua, es decir, donde el flujo disponible de agua no cumple con los requisitos mínimos per cápita definidos para el uso del agua. En ciertos casos se mide como la cantidad de personas que tienen que compartir cada unidad de recurso hídrico [15].

El estrés hídrico describe las consecuencias de la escasez de agua en los ecosistemas y en las poblaciones humanas. Puede estar relacionado con la disminución en la calidad del agua o en la existencia de conflictos por su disponibilidad [15].

El índice de explotación de agua es un indicador de la presión o del estrés que existe en los recursos de agua dulce. Se calcula, anualmente, como la relación entre la extracción total de agua dulce y el recurso renovable total disponible [15].

La productividad del agua (unidades de producto/m³) es la relación que mide el uso del agua con respecto a los bienes y servicios que se producen con esta. Corresponde a la proporción de beneficios netos según el agua utilizada en el proceso de producción [15].

La eficiencia del uso del agua (m³/unidades de producto) es el inverso de la productividad del agua y corresponde al volumen de agua utilizada para lograr cierto nivel de producción o servicio [15].

3.3. Evaluación de la Huella Hídrica (*Water Footprint Assessment*)

La Evaluación de la Huella Hídrica, según *Water Footprint Network*, es una herramienta que mide el volumen total de agua dulce utilizada para producir los productos y servicios consumidos por las personas o que son producidos por una empresa. Puede clasificarse en huella hídrica directa u operacional y huella hídrica indirecta o de la cadena de suministro. La huella directa corresponde al volumen de agua consumido o contaminado por las propias operaciones de un proceso, en cambio la indirecta se refiere al agua consumida o contaminada de todos los productos y servicios de una empresa [15].

La evaluación de la sostenibilidad se realiza considerando la temporalidad y el lugar geográfico en el cual se desarrolla la medición. Cabe destacar que para hacer una Evaluación de la Huella Hídrica que sea representativa de la realidad hídrica de la entidad analizada es necesario realizar mediciones mensuales por un año [15].

La metodología para llevar a cabo la Evaluación de la Huella Hídrica involucra 4 fases [18]:

- Establecer el objetivo y definir el alcance de la evaluación.
- Cuantificar la huella hídrica de un proceso, producto, productor o consumidor considerando el tiempo y el espacio de la medición.
- Evaluar la sostenibilidad ambiental, social y económica de la huella hídrica.
- Formular una estrategia de respuesta al impacto generado.

3.3.1. Objetivo y alcance de la evaluación

En la primera fase se determina el objetivo del estudio, la entidad a analizar (proceso, producto, consumidor, etc.) y se definirán los alcances de las distintas fases de la metodología. Cuando el objetivo del estudio es la identificación de puntos críticos, entonces es necesario incluir mayor detalle en el alcance, la contabilidad y la evaluación para determinar cuándo y dónde existe un mayor impacto ambiental, social y económico. Por otro lado, si el objetivo es formular políticas para reducir la huella hídrica, entonces se requiere un mayor grado de detalles espaciales y temporales. Además, se definirán alcances para la cuantificación, la evaluación de la sostenibilidad y para la formulación de respuesta [18].

Los alcances de la cuantificación consideran:

- Tipo de agua analizada: directa y/o indirecta, subterránea y/o superficial.
- Temporalidad y lugar geográfico del estudio.
- Las etapas dentro de la cadena de valor que se van a evaluar.
- Periodo de la data.

Los alcances de la evaluación de la sostenibilidad consideran:

- Si se desarrolla una evaluación de la sostenibilidad del agua azul, verde y/o gris.
- Si se evalúan los impactos sociales, medioambientales y/o económicos.
- Si los puntos críticos evaluados permiten un análisis de los impactos primarios y/o secundarios.¹

¹ El término “impactos primarios” es usado en el contexto de evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica en un lugar geográfico determinado. Los impactos primarios se refieren al efecto de la huella hídrica en los flujos y en la calidad del agua de la cuenca hidrológica. [18]

El término “impactos secundarios” es usado, al igual que el término “impactos primarios”, en el contexto de evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica en un lugar geográfico determinado. Los impactos secundarios se refieren a los impactos de la huella hídrica en los valores ecológicos, sociales y económicos últimos como la biodiversidad, el bienestar, la seguridad y la salud humana. [18]

Los alcances de la formulación de respuesta consideran:

- Si se lleva a cabo un enfoque según el lugar geográfico, entonces la formulación de respuesta se orienta a qué se puede hacer para reducir los impactos, quién(es) se encargaría(n), en cuánto disminuye la huella hídrica y en cuánto tiempo se lograría hacerlo.
- Si se lleva a cabo un enfoque según los consumidores, entonces la formulación de respuesta se orienta a qué pueden hacer los consumidores, la compañía y/o el gobierno involucrado para reducir los impactos.

3.3.2. Cuantificación de la huella hídrica

En la segunda fase se definen los indicadores que se ocuparán para llevar a cabo el cálculo del inventario: huella hídrica azul, huella hídrica verde y huella hídrica gris [18]. Por simplicidad, se mostrará solamente el cálculo para determinar la huella hídrica total de un producto.

La huella hídrica azul es un indicador de consumo de aguas superficiales y subterráneas, y se encarga de cuantificar el agua que se evapora, que se incorpora a un producto, que no se devuelve a la cuenca en el mismo periodo de tiempo o se retorna hacia otra cuenca o hacia el mar. La huella hídrica azul se define de la siguiente manera [18]:

$$HH_{azul} = \text{Agua azul evaporada} + \text{Agua azul incorporada} + \text{Agua azul que no retorna} \quad (1)$$

Donde:

HH_{azul} : Huella hídrica azul

La huella hídrica verde se refiere al consumo de agua proveniente de las precipitaciones y que se almacena como humedad en el suelo, o se queda en la superficie del suelo y la vegetación. En los procesos productivos la huella hídrica verde corresponde al consumo de agua de lluvia que se ocupa principalmente en los sectores agrícolas y forestal, y se define de la siguiente manera [18]:

$$HH_{verde} = \text{Agua verde evaporada} + \text{Agua verde incorporada} \quad (2)$$

Donde:

HH_{verde} : Huella hídrica verde

La huella hídrica gris es el indicador de degradación del agua que puede ser asociada a un proceso productivo. Se define como el volumen de agua dulce que se requiere para poder diluir los contaminantes que se emiten en el proceso analizado, según la siguiente fórmula [18]:

$$HH_{gris} = \frac{V_{efl} \cdot C_{efl} - V_{afl} \cdot C_{afl}}{C_{max} - C_{nat}} \quad (3)$$

Donde:

- HH_{gris} : Huella hídrica gris
- V_{efl} : Volumen de agua del efluente
- C_{efl} : Concentración en el efluente del parámetro medido
- V_{afl} : Volumen de agua del afluente
- C_{afl} : Concentración en el afluente del parámetro medido
- C_{max} : Concentración máxima del parámetro medido en el cuerpo receptor según la normativa ambiental.
- C_{nat} : Concentración natural en el cuerpo receptor de agua, libre de impactos antropogénicos del parámetro medido.

Por último, la huella hídrica de un producto se define como el volumen total de agua dulce que se usa tanto de forma directa como indirecta para producir un producto, considerando el consumo y contaminación del agua a lo largo de toda la cadena de valor. La huella hídrica de un producto con n etapas se calcula de la siguiente manera [18]:

$$HH_{producto} = \sum_{i=1}^n HH_{etapa\ i} \quad (4)$$

Donde:

- $HH_{producto}$: Huella hídrica total de un producto
- $HH_{etapa\ i}$: Huella hídrica una etapa i

Cabe destacar que cada etapa del proceso tiene asociada su respectiva huella hídrica azul, verde y gris, como se muestra en la siguiente fórmula [18]:

$$HH_{etapa} = HH_{etapa,azul} + HH_{etapa,verde} + HH_{etapa,gris} \quad (5)$$

Donde:

- HH_{etapa} : Huella hídrica total de una etapa
- $HH_{etapa,azul}$: Huella hídrica azul de una etapa
- $HH_{etapa,verde}$: Huella hídrica verde de una etapa
- $HH_{etapa,gris}$: Huella hídrica gris de una etapa

3.3.3. Evaluación de la sostenibilidad

Siguiendo con la evaluación de huella hídrica, en la tercera fase se determina la perspectiva para realizar el análisis, que puede ser geográfica, de proceso, de producto, de productor o de consumidor. Si es geográfica entonces se analizará la huella hídrica de un área determinada considerando la zona de captación o una cuenca hidrológica completa. Por otro lado, si es cualquiera de los otros casos se analizará la contribución de la huella hídrica en un rango más amplio, ya que se puede evaluar el impacto a nivel global o considerando un área geográfica específica [18]. Por simplicidad, se detallarán solamente la perspectiva geográfica, de proceso y de producto.

Perspectiva geográfica

La perspectiva geográfica considerara como área de estudio la cuenca del río para analizar la sostenibilidad de la huella hídrica considerando tres enfoques: medioambiental, social y económico. Esto se lleva a cabo a través de 4 pasos [18]:

- Identificar y calcular los criterios de sostenibilidad: medioambiental, social y económico.
- Identificar puntos críticos: zonas de captación o periodos del año en que la huella hídrica no es sostenible.
- Identificar y calcular los impactos primarios en los puntos críticos escogidos: cambios en el flujo y la calidad del río.
- Identificar y calcular los impactos secundarios en los puntos críticos escogidos: bienes o servicios que se ven afectados en los ámbitos ecológico, social y económico en la zona de captación como resultado de los impactos primarios.

El criterio de sostenibilidad ambiental para identificar puntos críticos ambientales se desarrolla a partir de 3 indicadores: la escasez de agua azul, la escasez de agua verde y el grado de contaminación del agua [18].

El nivel de escasez de agua azul en una cuenca x y en un periodo t se define de la siguiente manera:

$$EH_{azul}[x, t] = \frac{\sum HH_{azul}[x, t]}{DH_{azul}[x, t]} \quad (6)$$

Donde:

EH_{azul} : Escasez de agua azul en la cuenca x , en un periodo t

HH_{azul} : Huella hídrica azul en la cuenca x , en un periodo t

DH_{azul} : Disponibilidad de agua azul en la cuenca x , en un periodo t

La disponibilidad de agua azul se define como la escorrentía natural de la cuenca menos el flujo requerido para mantener el ecosistema [18].

El nivel de escasez de agua verde en una cuenca x y en un periodo t se define como:

$$EH_{verde}[x, t] = \frac{\sum HH_{verde}[x, t]}{DH_{verde}[x, t]} \quad (7)$$

Donde:

EH_{verde} : Escasez de agua verde en la cuenca x , en un periodo t

HH_{verde} : Huella hídrica verde en la cuenca x , en un periodo t

DH_{verde} : Disponibilidad de agua verde en la cuenca x , en un periodo t

La disponibilidad de agua verde se determina a partir de la evapotranspiración total que existe en el área de estudio, descontándole la evapotranspiración que se reserva para la vegetación natural y la de la tierra que no se destina a la producción. En general, la disponibilidad de agua verde es un valor complejo de estimar [18].

Por otra parte, el grado de contaminación del agua en una cuenca x y en un periodo t se define como:

$$GCH[x, t] = \frac{\sum HH_{gris}[x, t]}{EN_{act}[x, t]} \quad (8)$$

Donde:

- GCH : Grado de contaminación hídrica en la cuenca x , en un periodo t
 HH_{gris} : Huella hídrica gris en la cuenca x , en un periodo t
 EN_{act} : Escorrentía natural actual en la cuenca x , en un periodo t

Si alguno de los indicadores entrega como resultado un valor mayor a 1, entonces la huella hídrica es ambientalmente insostenible y se considera que existe un punto crítico medioambiental [18].

La huella hídrica de una cuenca es socialmente insostenible y genera un punto crítico cuando las necesidades básicas humanas no son satisfechas o no se cumplen las reglas básicas de equidad para la población que habita esa zona. Cabe destacar que la identificación de puntos críticos ambientales permite generar una lista de potenciales puntos críticos sociales [18].

La huella hídrica de una cuenca es económicamente insostenible y genera un punto crítico cuando no se distribuye ni se utiliza de manera económicamente eficiente. El agua en una cuenca debe asignarse de manera económicamente eficiente a diferentes usuarios (eficiencia de asignación) y cada usuario debe usar su agua asignada de manera eficiente también (eficiencia productiva). Cuando el precio del agua para el usuario está por debajo de su costo económico real, esto a menudo resulta en un uso ineficiente, por lo que el costo económico total al usuario del agua puede servir como indicador [18].

Cuando ya se identificaron los puntos críticos y se ha establecido su nivel de severidad es posible evaluar los impactos primarios y secundarios de cada uno. Los impactos primarios se encargan de estimar el efecto de las huellas hídricas azul, verde y gris en la hidrología de la cuenca a través de distintas variables (escorrentía, nivel del agua, calidad del agua, etc.). Por otra parte, los impactos secundarios evalúan el efecto de las huellas hídricas considerando variables ambientales (abundancia de especies, biodiversidad, pérdida de hábitat), sociales (salud humana, empleo, distribución de bienestar y seguridad alimentaria) y económicas (ingresos de los diferentes sectores económicos donde se ve impactada el agua) [18].

Perspectiva de proceso

Que la huella hídrica de un proceso específico sea o no sostenible depende de dos criterios: el contexto geográfico y las características del proceso. El primer criterio se refiere a que si un proceso se sitúa en un punto crítico (en cierta cuenca o en cierto periodo del año), entonces la huella hídrica no es sostenible. Por otra parte, el segundo criterio se refiere a que las huellas hídricas azul, verde o gris de un proceso, por sí solo, son insostenibles cuando la huella puede evitarse o reducirse porque hay disponible una mejor tecnología a un costo aceptable o que genera un beneficio social. Un proceso que es considerado por sí solo insostenible, no necesariamente contribuye a la escasez o al grado de contaminación dentro de la cuenca en la que se sitúa, sin embargo, se considera como un proceso no sostenible porque consumen agua innecesariamente y/o usurpan la capacidad de asimilación de residuos [18].

Perspectiva de producto

La sostenibilidad de la huella hídrica de un producto depende de la sostenibilidad de la huella de los procesos que lo componen, que pueden estar situados en una o más cuencas y en distintas épocas del año. Para evaluar la sostenibilidad de la huella hídrica de un producto es necesario evaluar cada componente basándose en dos criterios: si la huella hídrica de algún componente está situada en un punto crítico o si la huella hídrica de algún proceso, por sí solo, es insostenible [18].

Otro enfoque corresponde a implementar un Análisis de Ciclo de Vida para poder evaluar el impacto ambiental general de los productos. Para ello se pueden utilizar las huellas azul, verde y gris como indicadores ambientales para medir el uso de los recursos hídricos a través del consumo de agua y la capacidad de estos para asimilar los residuos. Posteriormente, se evalúa el impacto ambiental local considerando el nivel de escasez de agua y el grado de contaminación del recurso en la cuenca en la que se encuentra la huella hídrica del producto [18].

Cuando un determinado producto contribuye a la huella hídrica azul total en una cuenca, el impacto de esa huella hídrica específica depende de dos factores: qué tan grande es la huella hídrica azul específica y cuál es el nivel de escasez de la huella hídrica azul en la cuenca. Para la huella hídrica verde se puede utilizar el mismo razonamiento. De manera similar, cuando cierto producto contribuye a la huella hídrica gris total en una cuenca, el impacto depende de: qué tan grande es la huella hídrica gris específica y cuál es el nivel de contaminación del agua en la cuenca [18].

El índice de impacto de la huella hídrica azul se basa en la huella hídrica azul de un producto, además de la escasez de agua azul (recordar ecuación (6) considerando una captación x en la cuenca y un mes t , como se muestra en la siguiente fórmula [18]:

$$IIHH_{azul} = \sum_x \sum_t (HH_{azul}[x, t] \times EH_{azul}[x, t]) \quad (9)$$

Donde:

- $IIHH_{azul}$: Índice de impacto de la huella hídrica azul
- HH_{azul} : Huella hídrica azul del producto
- EH_{azul} : Escasez de agua azul

El índice de impacto de la huella hídrica verde, por su parte, se basa en la huella hídrica verde de un producto, además de la escasez de agua verde (recordar ecuación (7)) considerando una captación x en la cuenca y un mes t , como se observa a continuación [18]:

$$IIHH_{verde} = \sum_x \sum_t (HH_{verde}[x, t] \times EH_{verde}[x, t]) \quad (10)$$

Donde:

- $IIHH_{verde}$: Índice de impacto de la huella hídrica verde
- HH_{verde} : Huella hídrica verde del producto
- EH_{verde} : Escasez de agua verde

Por último, el índice de impacto de la huella hídrica gris se basa en la huella hídrica gris de un producto, además del grado de contaminación hídrica (recordar ecuación (8)) considerando una captación x en la cuenca y un mes t , según la siguiente fórmula [18]:

$$IIHH_{gris} = \sum_x \sum_t (HH_{gris}[x, t] \times GCH[x, t]) \quad (11)$$

Donde:

- $IIHH_{gris}$: Índice de impacto de la huella hídrica gris
 HH_{gris} : Huella hídrica gris del producto
 GCH : Grado de contaminación hídrica

Estos tres índices de impacto de la huella hídrica se refieren a diferentes tipos de uso del agua que no son comparables entre sí. Pueden ser útiles para comparar el impacto local de la huella hídrica de diferentes productos, pero no sirven como base para formular medidas de respuesta específicas. Para estos casos es de mayor utilidad identificar los puntos críticos y generar un plan de respuesta basado en estos [18].

3.3.4. Formulación de respuestas

En la cuarta fase se definen las acciones que se pueden llevar a cabo para reducir la huella hídrica en un área específica y cuánto tiempo se necesitaría para lograrlo. Para esto, existe un inventario de opciones a realizar que sirve de guía para lograr cambios en la huella hídrica a nivel operacional, de cadena de suministro o sobre el uso del agua [18].

Las opciones a nivel operacional son [18]:

- Reducción del uso del agua de consumo en las operaciones de reciclado, la adopción de dispositivos de ahorro de agua, reemplazar procesos.
- Reducir el volumen de aguas residuales, reciclaje de productos químicos, tratamiento de aguas residuales antes de su eliminación.

Las opciones a nivel de cadena de suministro son [18]:

- Acordar objetivos de reducción con los proveedores o cambiar a otro proveedor.
- Obtener un control mayor sobre la cadena de suministro.
- Cambiar el modelo de negocio con el fin de incorporar o mejorar el control de la cadena de suministro.

Las opciones sobre un mejor uso del agua son [18]:

- Reducir el diseño de uso del agua cuando se utiliza el producto (inodoros, equipos de saneamiento, equipos de riego de ahorro de agua).
- Evitar o minimizar el uso de sustancias en los productos que pueden ser perjudiciales cuando se diluyen en el agua (jabones, champús).

3.4. ISO 14.406: Gestión medioambiental – Huella de agua

La evaluación de la huella hídrica (ISO 14.046) tiene un enfoque metodológico basado en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de un producto, servicio o proceso considerando los usos directos e indirectos del agua en la cadena de valor y los correlaciona con potenciales impactos sobre el agua [29].

El Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta que evalúa el desempeño ambiental de productos y servicios en las etapas de su existencia. El ACV puede desarrollarse como un análisis “desde la cuna a la puerta” o “desde la cuna a la tumba”, como se muestra en la Figura 9. En el primer caso se considera desde el procesamiento de materias primas hasta la salida del producto final, cuando se calcula la huella de agua de una fábrica o planta productiva. En el segundo caso se incluyen las etapas de distribución, uso y consumo de productos, y la disposición final de los residuos [15, 29].

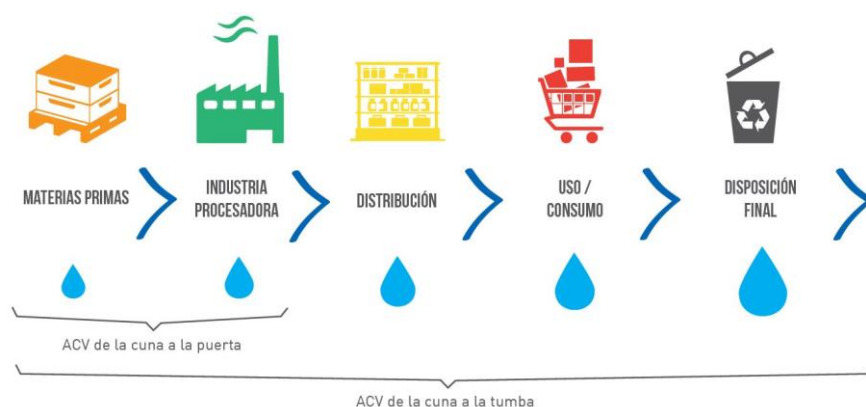


Figura 9. Esquema del Análisis de Ciclo de Vida en el cálculo de la huella de agua [29].

Una evaluación de la huella de agua realizada de acuerdo con esta Norma Internacional [24]:

- Se basa en una evaluación del ciclo de vida (ISO 14.044).
- Es modular, es decir, la huella de agua de las diferentes etapas del ciclo de vida se puede sumar para representar la huella de agua total.
- Identifica los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua.
- Incluye dimensiones geográficas y temporales relevantes.
- Identifica la cantidad de agua utilizada y los cambios en la calidad del agua.
- Utiliza conocimientos hidrológicos.

Una evaluación de la huella hídrica puede desarrollarse como una evaluación independiente, donde solo se evalúan los impactos relacionados con el agua; o como parte de una evaluación del ciclo de vida, donde se considera de forma integral los impactos ambientales [24].

Para la correcta realización de una evaluación de huella hídrica, la ISO14.046 define principios fundamentales que se utilizan como guía para las decisiones relacionadas con la planificación, realización y presentación de informes [24].

A continuación, se presentan los principios de una evaluación de huella hídrica [24]:

- Perspectiva de ciclo de vida: corresponde a considerar todas las etapas del ciclo de vida de un producto con el objetivo de poder identificar y evitar el desplazamiento de una carga ambiental potencial entre las etapas del ciclo de vida o de los procesos individuales. Si es apropiado, la evaluación de la huella hídrica puede limitarse a una o varias etapas de la cadena de valor.

- Enfoque medioambiental: corresponde a evaluar los impactos ambientales asociados al agua, quedando fuera del alcance de la evaluación de huella hídrica los impactos económicos y sociales.
- Enfoque relativo y unidad funcional: una evaluación de huella hídrica está relacionada con la unidad funcional y los resultados se calculan con relación a esta.
- Enfoque iterativo: corresponde a que las fases individuales de una evaluación de la huella hídrica utilizan los resultados de fases anteriores.
- Transparencia: se enuncia información suficiente y apropiada para que los usuarios de una evaluación de huella hídrica puedan tomar decisiones.
- Relevancia: los datos y métodos se seleccionan de manera que sean apropiados para la evaluación de huella hídrica.
- Integridad: todos los datos que contribuyen significativamente en la huella hídrica se incluyen en el inventario.
- Coherencia: los supuestos, métodos y datos se aplican de manera de llegar a conclusiones de acuerdo con la definición del objetivo y el alcance de la evaluación.
- Precisión: los sesgos y las incertidumbres se reducen en la medida de lo posible.
- Prioridad del enfoque científico: las decisiones dentro de una evaluación de huella hídrica se basan preferiblemente en las ciencias naturales, en caso en que esto no es posible, también pueden basarse en las ciencias sociales o económicas.
- Relevancia geográfica: la evaluación de huella hídrica se desarrolla en cierta escala y lugar geográfico para obtener resultados relevantes considerando un contexto local.
- Exhaustividad: la huella hídrica estudia todos los aspectos ambientales relevantes del entorno natural, la salud humana y los recursos relacionados con el agua.

La metodología para llevar a cabo una evaluación de huella hídrica ocupando el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida involucra 3 fases [24]:

- Definición de objetivo y alcance.
- Análisis de inventario.
- Evaluación de impacto.

En paralelo a cada una de estas fases se va realizando un análisis del avance e interpretación de los resultados de acuerdo con los objetivos establecidos, de este modo se puede determinar si se continúa con el estudio o es necesario incorporar nueva información en las fases anteriores.

En caso de no considerar una evaluación de impactos, el análisis correspondería a un estudio de inventario de la huella hídrica, el cual puede informarse a los usuarios, pero no se puede reportar como huella hídrica [24].

3.4.1. Definición del objetivo y los alcances

En la primera fase se definen los objetivos del estudio a partir de las siguientes preguntas: ¿Cuáles son las razones para llevar a cabo el estudio? ¿Cuál es la aplicación deseada de los resultados? y ¿Hacia quién están dirigidos los resultados? Además, en esta fase se establece la entidad de estudio (producto específico, proceso o industria), el límite del sistema, la unidad funcional, la cobertura temporal y geográfica, los datos requeridos, los supuestos considerados, el grado de incertidumbre y la metodología de evaluación de impacto de la huella hídrica [24].

3.4.2. Análisis de inventario

En la segunda fase se deben cuantificar todas las entradas y salidas del sistema que sean relevantes o que contribuyan de manera significativa en los impactos ambientales relacionados con el uso de agua. Como se muestra en la Figura 10, en la cuantificación se consideran: entradas y salidas directas de agua; entradas de materias primas, insumos del proceso y energías; y salidas de productos y contaminantes. Posteriormente, se normalizan los datos con respecto a la unidad funcional escogida [24].

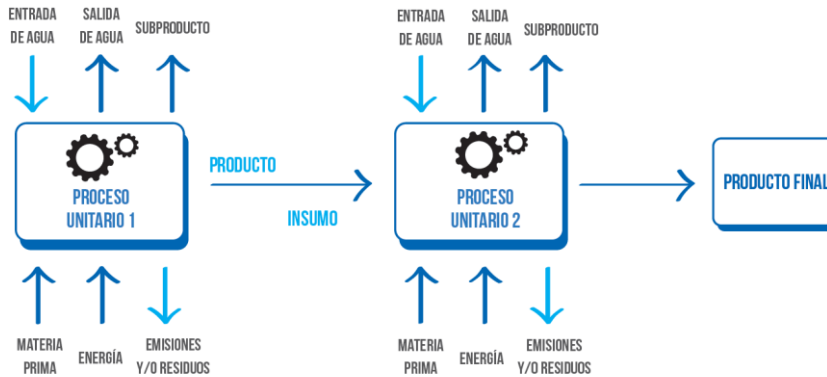


Figura 10. Diagrama general del proceso estudiado [29].

También se realiza un balance directo del agua, considerando las entradas y salidas del sistema. En la Figura 11, los flujos horizontales corresponden a los flujos de agua desde y hacia el medio ambiente, llamados flujos elementales. Por otro lado, los flujos verticales son los flujos desde y hacia actividades humanas, llamados flujos de la tecnósfera [29].

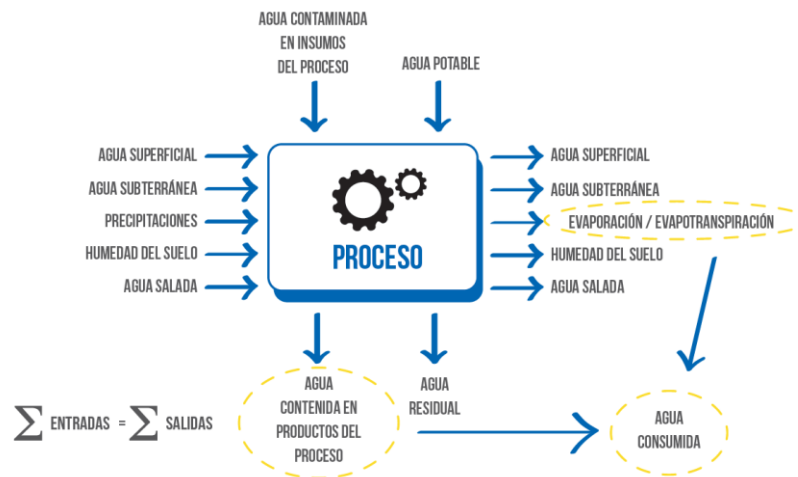


Figura 11. Balance hídrico de un proceso [29].

La información sobre los flujos elementales debe incluir [24]:

- Cantidades de agua utilizadas: en masa o volumen.
- Tipo de recursos de agua utilizados: precipitación, superficie del agua, agua de mar, agua salobre, agua subterránea, agua fósil.
- Parámetros y/o características del agua.
- Formas de uso del agua: evaporación, transpiración, integración en productos, vertido en diferentes cuencas de drenaje o en el mar, entre otros.
- Ubicación geográfica del agua utilizada o contaminada.
- Aspectos temporales del uso del agua.
- Emisiones al aire, agua y suelo que afecten la calidad del agua.

Por último, los datos obtenidos en esta fase son recopilados en planillas de inventario de usos de agua. En estas planillas se incorporan los usos indirectos del recurso por medio del consumo de insumos, energías y otros elementos que pueden ocuparse durante el proceso. Debido a que es complejo analizar el uso directo del agua que se requirieron para producir la cadena de suministros o la energía, estos datos se obtienen de fuentes de información secundaria como los son estudios y bases de datos sobre usos de agua [24].

3.4.3. Evaluación de impacto

En la tercera fase se evalúan los impactos relacionados con el uso del agua, esto corresponde a evaluar la alteración de los cuerpos de agua al extraer y/o descargar agua en volumen o calidad alterada. Para hacer el análisis se ocupan dos tipos de indicadores de impacto, denominados de punto medio y de punto final. Los de punto medio evalúan la disponibilidad y degradación del agua a partir de indicadores como la escasez hídrica, la toxicidad humana, la ecotoxicidad, la eutrofización y/o la acidificación del agua. Por otro lado, los de punto final evalúan los impactos potenciales en la salud humana y en la calidad de los ecosistemas (terrestres y acuáticos) a partir de los resultados obtenidos de los indicadores de punto medio [24]. En la Tabla 2 se muestra la clasificación de los tipos de huella hídrica según el tipo de indicador ocupado [30].

Tabla 2. Categorías de impacto de la huella de agua a partir de los indicadores de punto medio y de punto final [30].

	Disponibilidad de agua	Degradación del agua
	Punto medio	
Perfil de indicadores de punto medio	<ul style="list-style-type: none"> • Escasez de agua • Disponibilidad de agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Toxicidad humana • Ecotoxicidad • Eutrofización • Acidificación
	Punto final	
Salud humana	<ul style="list-style-type: none"> • Malnutrición y/o enfermedades relacionadas con el agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Toxicidad humana
Ecosistemas	<ul style="list-style-type: none"> • Ecosistemas terrestres • Ecosistemas acuáticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Ecotoxicidad • Eutrofización • Acidificación

Para una Evaluación de Huella de Agua en Latinoamérica se recomienda analizar las siguientes categorías de impacto y métodos de evaluación de punto medio, los que se presentan en la Tabla 3 [31]:

Tabla 3. Categorías de impacto y método de evaluación de punto medio recomendados para Latinoamérica [31].

Categoría de impacto	Método de evaluación	Descripción
Escasez	Agua disponible remanente – AWARE	El factor de caracterización se basa en la relación entre la extracción de agua dulce para usos humanos y su disponibilidad total de agua en cierta región.
Disponibilidad	Huella de disponibilidad de agua	Cuantifica el consumo y contaminación de un proceso. Varía entre el valor positivo de la extracción y el valor negativo del vertimiento.
Ecotoxicidad en agua dulce	USEtox	Estima la disminución de biodiversidad acuática por emisiones al aire, agua y suelo.
Eutrofización en agua dulce	ReCiPe	Evalúa el 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.

Por otro lado, las categorías de daño y métodos de evaluación de punto final recomendados para Latinoamérica se presentan en la Tabla 4 [31]:

Tabla 4. Categorías de daño y métodos de evaluación de punto final más utilizado en Latinoamérica [31].

Área de protección	Categoría de impacto	Método de evaluación	Descripción
Salud humana	Toxicidad humana	USEtox	Determina efectos en la salud humana basado en USEtox los efectos cancerígenos de las sustancias.
Calidad de los ecosistemas	Escasez en los ecosistemas terrestres	Consumo equivalente -Índice de estrés hídrico	Se calcula como la ponderación entre el agua consumida, el índice de estrés hídrico y un factor relacionado con la limitación del crecimiento de plantas vasculares debido a la escasez de agua.
	Eutrofización en agua dulce	ReCiPe	Obtiene un factor de daño de las especies a partir de la concentración de nutrientes.
	Ecotoxicidad en agua dulce	USEtox	Estima la disminución de la biodiversidad acuática por emisiones al aire, agua y suelo.

A continuación, se detallarán los métodos de evaluación de agua disponible remanente (*AWARE*) y de huella de disponibilidad de agua, de las categorías de impacto de punto medio de escasez y de disponibilidad, respectivamente.

Método de evaluación de agua disponible (*AWARE*)

El método de evaluación de agua disponible es un indicador de punto medio que representa el agua disponible relativa restante por área en una cuenca, después de que se haya satisfecho la demanda de consumo de los seres humanos y de los ecosistemas [19]. Se calcula como el inverso de la disponibilidad de agua menos la demanda de la siguiente manera [32]:

$$\frac{1}{AMD} = \frac{S}{D - C_E - C_H} \quad (12)$$

Donde:

AMD	: Disponibilidad menos demanda	$[m^3 \cdot m^{-2} \cdot mes^{-1}]$
S	: Superficie de la región o cuenca estudiada	$[m^2]$
D	: Disponibilidad hídrica de la región o cuenca estudiada	$[m^3 \cdot mes^{-1}]$
C_E	: Consumo del ecosistema	$[m^3 \cdot mes^{-1}]$
C_H	: Consumo humano	$[m^3 \cdot mes^{-1}]$

Luego, este valor se normaliza con el inverso del promedio mundial (\overline{AMD}^{-1}) cuyo valor es $0,0136 [m^3 \cdot m^{-2} \cdot mes^{-1}]$, entregando como resultado el factor de caracterización [19]:

$$FC = \frac{AMD^{-1}}{\overline{AMD}^{-1}} \quad (13)$$

Donde:

FC	: Factor de caracterización	$[-]$
AMD	: Disponibilidad menos demanda	$[m^3 \cdot m^{-2} \cdot mes^{-1}]$
\overline{AMD}	: Promedio mundial de disponibilidad menos la demanda	$[m^3 \cdot m^{-2} \cdot mes^{-1}]$

El factor de caracterización está limitado a un rango entre 0,1 y 100. El valor 1 corresponde al promedio mundial y, por ejemplo, el valor 10 representa que una región posee 10 veces menos agua disponible por área que el promedio mundial. Por otra parte, el valor 100 busca representar que la demanda es mayor que la disponibilidad en la zona de estudio [19].

Finalmente, el factor de caracterización se pondera por el consumo de agua para obtener el indicador de consumo equivalente de un proceso dentro de una cuenca hidrográfica, según la siguiente fórmula [31]:

$$I_c = FC \cdot C_a \quad (14)$$

Donde:

I_c : Indicador de consumo equivalente de un proceso

FC : Factor de caracterización

C_a : Consumo de agua de una actividad

Método de evaluación de huella de disponibilidad de agua

La huella de disponibilidad de agua se basa en la pérdida de funcionalidad del recurso, ya sea cuantitativa o cualitativamente, que se origina por el consumo o degradación del agua [33].

Para medir la huella de disponibilidad de agua primero hay que ocupar el modelado de inventario por categorías del agua para caracterizar el afluente y efluente del proceso. Las categorías del agua se definen en términos de la funcionalidad con respecto a los usuarios, para mayor detalle de la definición de los usuario del agua, revisar Anexo A, y en términos de la calidad con respecto a los parámetros de calidad de agua escogidos [34]. Cada categoría está relacionada con una fuente de agua (superficial, subterránea o de lluvia) y una calidad determinada, la cual se basa en una combinación de parámetros utilizados en estándares nacionales e internacionales de calidad del agua, los que incluyen parámetros generales (sólidos en suspensión, coliformes fecales, pH, etc.), elementos orgánicos y elementos inorgánicos [33].

Como resultado se obtienen 17 categorías del agua (ocho para fuentes superficiales, ocho para fuentes subterráneas y una para agua de lluvia), las cuales se muestran en la Tabla 5. El afluente y el efluente de agua categorizados permiten la evaluación de los impactos de la degradación o el consumo del agua [34].

Tabla 5. Funcionalidades de categoría de agua por usuario [34].

Calidad	1	2a	2b	2c	2d	3	4	5	Lluvia
Fuente	Superficial o Subterránea								Agua de lluvia
Nivel de calidad	Excelente	Bueno	Promedio	Promedio – Tóxico	Promedio – Biológico	Pobre	Muy pobre	Inutilizable	
Contaminación	Microbiano bajo y tóxico bajo	Microbiano bajo y tóxico medio	Microbiano medio y tóxico medio	Microbiano bajo y tóxico alto	Microbiano alto y tóxico bajo	Microbiano alto y tóxico bajo	Microbiano alto y tóxico alto	Otro	N/A
Doméstico 1	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Doméstico 2	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Doméstico 3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Agrícola 1	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓
Agrícola 2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓
Pesquería	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓
Industria	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Refrigeración	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Recreacional	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓
Transporte	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hidro	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ funcional, ✗ no funcional

Posteriormente, se desarrolla un modelado de evaluación de impactos para punto medio y punto final, el que se presenta en la Figura 12. Este ilustra cómo se utilizan las categorías de agua presentadas anteriormente para desarrollar una evaluación de impacto [33].

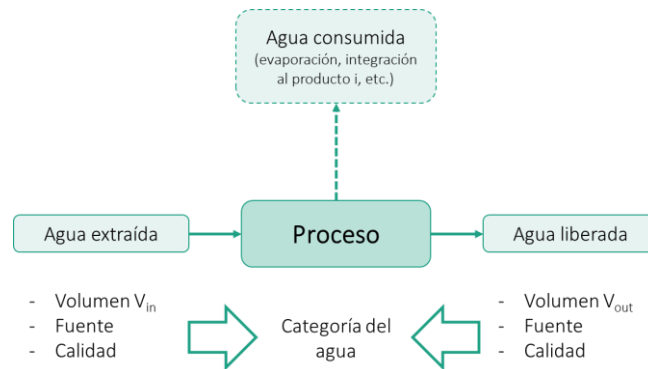


Figura 12. Evaluación de impactos de punto medio y punto final del uso de agua [33].

Para un modelado de evaluación de punto medio, los impactos deben caracterizarse considerando la escasez de agua local, la calidad y el tipo de recurso. Luego, la evaluación de impacto se realiza evaluando la diferencia de estrés entre el recurso retirado y liberado. Para esto es necesario conocer el volumen, la fuente y la calidad del agua que entra y sale del sistema o proceso, con el fin de identificar las categorías de agua relevantes, cada una asociada a un índice de estrés. Una vez que las categorías de agua han sido identificadas por su respectiva fuente y calidad, el indicador de estrés hídrico se calcula según la siguiente ecuación [33]:

$$IEH = \sum_i (\alpha_i \cdot V_{i,in}) - \sum_i (\alpha_i \cdot V_{i,out}) \quad (15)$$

Donde:

- IEH : Índice de estrés hídrico
- α_i : Índice de estrés de la categoría de agua i
- $V_{i,in}$: Volumen de entrada de la categoría de agua i
- $V_{i,out}$: Volumen de salida de la categoría de agua i

El índice de estrés de la categoría de agua i (α_i) expresa el nivel de competencia entre los usuarios debido al estrés físico del recurso. Aborda la calidad, la variación estacional y distingue entre aguas superficiales y subterráneas, ya que estos dos tipos de recursos a menudo no presentan el mismo nivel de escasez en una región. Este índice (α_i) se encuentra en un rango entre 0 y 1, basado en los umbrales de estrés hídrico aceptados [33]. Por otro lado, si el índice de estrés hídrico entrega un valor positivo quiere decir que se consume toda el agua que se extrae o ésta se devuelve en malas condiciones. En cambio, si el valor es negativo significa que la calidad del agua extraída es mala y se devuelve en mejores condiciones a la cuenca [31].

3.4.4. Interpretación de resultados

En la fase de interpretación de resultados se debe evidenciar cuáles son las etapas del ciclo de vida o procesos que tienen más contribución en la huella hídrica, identificando si es mayormente a partir de fuentes directas o indirectas de agua y si la contribución es mayor debido a la cantidad consumida o por la calidad del agua; y se deben identificar los principales impactos asociados a la huella hídrica. En esta fase también se consideran los controles de integridad, sensibilidad y coherencia, además de los aspectos geográficos y temporales. Finalmente, se deben declarar las conclusiones y limitaciones del estudio [24].

Por último, las limitaciones de la evaluación de huella hídrica pueden deberse a: limitaciones asociadas a la manera de definir unidad funcional; desarrollo limitado de los modelos de caracterización, análisis de sensibilidad y análisis de incertidumbre; y limitaciones asociadas al análisis de inventario [24, 29].

3.5. Comparación de las metodologías

A continuación, se presenta la Tabla 6 en la cual se desarrolla una comparación entre la Evaluación de Huella Hídrica (*Water Footprint Assessment*) y la norma internacional ISO 14.046 Gestión medioambiental sobre la Huella de Agua, basada en un enfoque de ACV.

Tabla 6. Comparación entre la Evaluación Huella Hídrica (*Water Footprint Assessment*) y la norma internacional ISO 14.046 Gestión medioambiental sobre la Huella de Agua.

	Evaluación de Huella Hídrica (<i>Water Footprint Assessment</i>)	ISO 14.046 Gestión medioambiental Huella de Agua
Entidad de estudio	<ul style="list-style-type: none"> • Nación/Región • Consumidor • Proceso productivo • Producto o servicio 	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso productivo • Producto o servicio
Tipo de flujo de agua analizado	<ul style="list-style-type: none"> • Flujos elementales <ul style="list-style-type: none"> - Agua superficial - Agua subterránea - Precipitaciones - Evapotranspiración • Flujos de la tecnósfera: <ul style="list-style-type: none"> - Agua residual 	<ul style="list-style-type: none"> • Flujos elementales <ul style="list-style-type: none"> - Agua superficial - Agua subterránea - Precipitaciones - Humedad del suelo - Agua salada - Evapotranspiración • Flujos de la tecnósfera: <ul style="list-style-type: none"> - Agua contaminada (insumos) - Agua potable - Agua contenida en producto - Agua residual
Cuantificación de huella hídrica	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de agua: <ul style="list-style-type: none"> - Agua azul - Agua verde • Contaminación del agua: <ul style="list-style-type: none"> - Agua gris 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de agua: <ul style="list-style-type: none"> - Evapotranspiración - Agua contenida en el producto
Evaluación de impacto	<ul style="list-style-type: none"> • Geográfica: <ul style="list-style-type: none"> - Escasez de agua azul - Escasez de agua verde - Grado de contaminación • Proceso: <ul style="list-style-type: none"> - Contribución al punto crítico - Consumo innecesario de agua y/o usurpación de la capacidad de asimilar contaminantes • Producto: <ul style="list-style-type: none"> - Índice de impacto de la huella hídrica azul - Índice de impacto de la huella hídrica verde - Índice de impacto de la huella hídrica gris 	<ul style="list-style-type: none"> • Categorías de punto medio: <ul style="list-style-type: none"> - Escasez - Disponibilidad - Ecotoxicidad en agua dulce - Eutrofización en agua dulce • Categorías de punto final: <ul style="list-style-type: none"> - Daño a la salud humana - Daño a la calidad de los ecosistemas

3.6. Discusiones de las metodologías

Las metodologías de huella hídrica estudiadas presentan una modalidad de trabajo similar, ya que cuentan con fases de planteamiento de objetivos, de cuantificación de agua, de evaluación de impactos y de análisis de los resultados. Se diferencian en que el Análisis de Ciclo de Vida, según la norma internacional ISO 14.046, se enfoca principalmente en el estudio de procesos, mientras que la Evaluación de Huella Hídrica puede abarcar diferentes entidades como, por ejemplo, la medición de huella hídrica que genera una persona.

Por otra parte, el ACV comprende tanto un análisis cuantitativo como cualitativo, ya que evalúa la cantidad de agua consumida y la calidad del recurso hídrico de los flujos, en comparación con la Evaluación de Huella Hídrica que solo corresponde a un análisis cuantitativo que contempla el consumo y la contaminación del agua, siendo este último más simple de implementar.

Cabe destacar que una Evaluación de Huella Hídrica que posea un enfoque de proceso o producto puede desarrollarse como un Análisis de Ciclo de Vida, utilizando como categoría de impacto de punto medio la escasez de huella azul. [31] Sin embargo, no se considera la escasez de huella verde ni el grado de contaminación hídrica, ya que dentro de los alcances de la metodología basada en un ACV no se incluye la cuantificación de las precipitaciones ni de la contaminación del agua. Esta última se evalúa por medio de categorías de impacto referentes a la degradación del agua como, por ejemplo, la ecotoxicidad y la eutrofización del agua dulce.

A modo de resumen, la metodología de Evaluación de Huella Hídrica posee solamente un enfoque volumétrico en el que se considera tanto el consumo como la degradación del agua, y luego realiza una evaluación de la sostenibilidad de las distintas huellas hídricas (azul, verde y gris). Por otro lado, la metodología basada en un Análisis de Ciclo de Vida, según la norma internacional ISO 14.046, desarrolla un inventario volumétrico del consumo de agua y, posteriormente, calcula los potenciales impactos ambientales a través de las diferentes categorías de impacto.

La evaluación de los impactos en una determinada zona geográfica es compleja de desarrollar, independiente de la metodología que se ocupe, ya que depende, generalmente, de todos los actores que se sitúan en el lugar del estudio.

Por un lado, en la Evaluación de Huella Hídrica se realiza una evaluación de sostenibilidad con un enfoque centrado en el consumo y contaminación del agua por parte de los distintos actores dentro de una cuenca, entregando una caracterización del nivel de escasez. Sin embargo, para obtener este valor es necesario conocer la huella hídrica de todas las actividades que se desarrollan en la cuenca, lo cual es complejo de determinar con precisión. Cabe desatacar que, mientras más pequeña sea la zona de análisis se va reduciendo la complejidad del cálculo.

Además, se cuestiona que los indicadores de las ecuaciones (6) y (7) representen escasez, ya que se definen como la demanda de todas las actividades dentro de una cuenca normalizado por la disponibilidad de agua. Si estos indicadores son cercanos a cero entonces existe una abundancia del recurso, si es uno entonces se consumió lo mismo que hay disponible, y si es mayor que uno entonces hay una demanda que no alcanza a ser cubierta por la disponibilidad. Por lo mismo se plantea que estos indicadores representan consumo relativo. Para poder definir escasez es necesario que exista un rango que indique los límites entre abundancia y carencia del recurso hídrico.

Por otra parte, los indicadores de impacto de la huella hídrica mostrados en las ecuaciones (9), (10) y (11) no explicitan en qué rango existe impacto significativo que implique generar medidas de mitigación de la huella hídrica del proceso. Además, en algunos casos se puede

obtener como resultado que el impacto depende mayormente del indicador de escasez o del grado de contaminación, por lo que se dificulta la implementación de medidas a nivel particular, ya que deberían realizarse a nivel de la zona geográfica estudiada.

Con respecto al Análisis de Ciclo de Vida, la evaluación de impactos depende directamente de las categorías de impacto que se quieran evaluar y los indicadores que se utilizan para llevarlo a cabo. En particular, se profundizará la discusión con respecto a los indicadores de agua disponible y de huella de disponibilidad de agua.

Por una parte, el método de evaluación de agua disponible se enfoca en determinar el agua que puede aprovecharse por área luego de que se haya satisfecho el consumo para las personas y los ecosistemas de la zona de estudio. Esta definición es interesante, ya que busca resguardar, de manera teórica, el derecho humano de las personas al acceso al agua y el equilibrio natural de los ecosistemas. Sin embargo, en la práctica pueden existir casos en los que lo anterior no se cumpla como, por ejemplo, en Petorca, donde la población se abastece a partir de camiones aljibe [14]

En cuanto al factor de caracterización, definido en la ecuación (13), se basa en una comparación de una cuenca hidrográfica con respecto al promedio mundial. Si este valor se encuentra entre 0,1 y 1, entonces existe una cantidad de agua disponible por área mayor o igual al valor mundial. Por otro lado, si el valor está entre 1 y 100, entonces la disponibilidad de agua es menor al promedio mundial. Se considera que esta comparación podría ser más idónea si se realizara con respecto a una cuenca que refleje un idealidad o realidad, ya sea nacional o que posea características similares (condiciones ambientales, tipos de ecosistemas, etc.). Se efectúa esta apreciación debido a que en el mundo existen distintas condiciones climáticas que varían de una zona a otra, lo cual será determinante en la cantidad de población y en los tipos de ecosistemas que se encuentren en ese lugar. Cambiar la figura de comparación permitiría dilucidar cuánto se desvía una cuenca de una idealidad esperada, en base a características acordes a lo que se desee representar.

Por otra parte, el método de huella de disponibilidad de agua se basa en la pérdida de funcionalidad del recurso hídrico considerando el nivel de escasez de agua local. Para ello es necesario conocer la categorización del agua de entrada y de salida de cada etapa, según la Tabla 5, para establecer el factor de caracterización por el cual ponderar estos flujos. Esta categorización entrega una relación entre la cantidad y calidad del agua, lo cual es complejo de definir, ya que involucra un análisis detallado por etapa. Sin embargo, en caso de realizarse, entrega información más íntegra del proceso.

Además, el indicador involucrado en este método (índice de estrés hídrico) es sencillo de comunicar, debido a como está definido, ya que si el valor es positivo representa que se consume toda el agua que se extrae o se devuelve en peores condiciones, en cambio, si es negativo significa que la calidad del agua a la entrada es mala y se devuelve en mejores condiciones a la salida.

El enfoque de este trabajo se centrará en evaluar la disponibilidad y/o escasez hídrica en las regiones de Chile, por lo que, los indicadores más apropiados para esto corresponderían a los de nivel de escasez de la Evaluación de Huella Hídrica y al método de evaluación de agua disponible (*AWARE*) de la norma internacional ISO 14.046 Gestión medioambiental sobre la Huella de Agua, basada en un enfoque de ACV. Se dejan fuera los indicadores de huella gris y de huella de disponibilidad de agua, debido a que involucran un análisis sobre la degradación del recurso hídrico.

Por último, se considera apropiado trabajar con el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida, según la norma internacional ISO 14.046, debido a que es una metodología que evalúa los impactos potenciales sobre el medio ambiente de un producto, proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida. Por lo mismo, se decide utilizarlo como metodología para la evaluación de la huella hídrica en los procesos productivos de Chile.

Además, la norma internacional ISO 14.046 se encarga realizar una cuantificación del agua que proviene de distintas fuentes de extracción, sin incluir el flujo proveniente de las precipitaciones, el cual sí se considera en la Evaluación de Huella Hídrica. Medir el consumo de agua proveniente de las precipitaciones es controversial, ya que corresponde a medir la apropiación humana de esta fuente y que, por lo tanto, no queda disponible para la naturaleza, porque se utilizó en procesos agrícolas. Sin embargo, se ha determinado que no existe una diferencia significativa en la pérdida de agua por evapotranspiración de los cultivos comparado con la vegetación natural, por lo mismo, varios autores sugieren que no es relevante considerarlo dentro del balance hídrico [30].

4. Propuesta de un indicador de huella de agua territorial para Chile

En este capítulo se definirá teóricamente un indicador de huella de agua territorial que evalúe el impacto de una actividad productiva con respecto al contexto hidrológico local en el que se sitúa. Esta definición se basará en las características de los indicadores de impacto presentados en el capítulo 3. Además, se determinará si el indicador propuesto cumple con las características esperadas y se evaluará su funcionalidad en base a los siguientes criterios: entendimiento, pragmatismo, relevancia y representación parcial de la sostenibilidad [35].

Posteriormente, se realizará una caracterización territorial de las cuencas hidrográficas de Chile considerando la disponibilidad de agua, el consumo de la población y la demanda hídrica de los ecosistemas, con el objetivo de sustentar la cuantificación del indicador propuesto.

4.1. Definición teórica del indicador de huella de agua territorial

Se plantea definir un indicador de huella de agua territorial capaz de cuantificar el impacto que genera una actividad productiva con respecto a la disponibilidad hídrica de una cuenca hidrográfica. Se espera que este indicador permita:

- Diagnosticar la situación hídrica de distintos contextos territoriales
- Entregar un resultado que sea simple de comprender
- Realizar comparaciones a nivel territorial y entre distintas actividades productivas

A continuación, se proponen dos indicadores de huella de agua territorial con el objetivo de evaluar cuál es más apropiado de implementar en una evaluación de impactos.

Primer indicador propuesto

El primer indicador propuesto se compone de dos variables principales: el uso específico de agua por área de una actividad y el agua disponible relativa restante por área en una cuenca, este último basado en el método de evaluación de agua disponible (*AWARE*).

El uso específico de agua por área busca evaluar cuánta agua consume una actividad a partir de la superficie en la que se encuentran sus instalaciones y se define de la siguiente manera:

$$U_a = \frac{C_a}{S_a} \quad (16)$$

Donde:

U_a	: Uso específico de agua de una actividad	$[m^3 \cdot m^{-2} \cdot mes^{-1}]$
C_a	: Consumo de agua mensual de una actividad	$[m^3 \cdot mes^{-1}]$
S_a	: Superficie de las instalaciones de una actividad	$[m^2]$

Por otro lado, la cantidad de agua disponible relativa restante por área en una cuenca se calcula a partir de la ecuación (12).

Finalmente, el primer indicador propuesto se define a partir de los inversos de disponibilidad menos demanda y de uso específico de agua de una actividad según la siguiente fórmula:

$$I_{H_1} = \frac{1}{\frac{AMD}{1} - U_a} \quad (17)$$

Donde:

I_{H_1}	: Indicador de impacto hídrico (primera propuesta)	$[-]$
AMD	: Disponibilidad menos demanda	$[m^3 \cdot m^{-2} \cdot mes^{-1}]$
U_a	: Uso específico de agua de una actividad	$[m^3 \cdot m^{-2} \cdot mes^{-1}]$

El numerador de este indicador ocupa de referencia una cuenca hidrográfica y define la superficie promedio de territorio que, en esa cuenca, es abastecida por un metro cúbico de agua al mes. A mayor valor $\frac{1}{AMD}$ entonces existe menos agua disponible en cada subárea de la cuenca. Por otro lado, el denominador cuantifica la superficie de terreno que es cubierta por un metro cúbico de agua al mes en una actividad determinada. A mayor valor de $\frac{1}{U_a}$ entonces es más eficiente el uso de agua de una actividad. Así, el valor del indicador de impacto hídrico (I_{H_1}) puede presentar los siguientes casos:

- $0 < I_{H_1} < 1$: La actividad ocupa menos agua que la que existe disponible en la cuenca por metro cuadrado.
- $I_{H_1} = 1$: La actividad ocupa la misma cantidad de agua que la que está disponible en la cuenca por metro cuadrado.
- $I_{H_1} > 1$: La actividad ocupa más agua que la que existe disponible en la cuenca por metro cuadrado.

Por ejemplo, si $I_{H_1} = 0,5$ entonces la actividad ocupa la mitad del agua que se encuentra disponible en la cuenca por metro cuadrado. De esta manera, sigue quedando agua disponible en esa zona. Por otra parte, si $I_{H_1} = 3$ entonces la actividad ocupa tres veces más agua de la existe disponible en la cuenca por metro cuadrado y, en consecuencia, se estaría ocupando agua correspondiente a otra sección de la cuenca. De lo anterior, se concluye que el consumo de agua de una actividad es sostenible en el tiempo si el valor del indicador es menor o igual a uno.

Segundo indicador propuesto

Se definirá la disponibilidad de agua remanente destinada a otras actividades que ocurren en una cuenca a partir de la diferencia entre la disponibilidad hídrica con el consumo domiciliario y el caudal ecológico mínimo según la siguiente ecuación:

$$D_{AR} = D - C_E - C_H \quad (18)$$

Donde:

D_{AR}	: Disponibilidad de agua remanente
D	: Disponibilidad hídrica de la cuenca
C_E	: Consumo del ecosistema
C_H	: Consumo humano

El segundo indicador propuesto se basa en realizar una comparación relativa sobre la superficie de la cuenca y la disponibilidad de agua después de evaluar la ocupación de superficie y el consumo de agua de una actividad. Este indicador se define de la siguiente manera:

$$I_{H_2} = 1 - \left(\frac{S - S_a}{S} \right) \cdot \left(\frac{D_{AR} - C_a}{D_{AR}} \right) \quad (19)$$

Donde:

- I_{H_2} : Indicador de impacto hídrico (segunda propuesta)
- S : Superficie de la región o de la cuenca estudiada
- S_a : Superficie abarcada por la actividad productiva
- D_{AR} : Disponibilidad de agua remanente
- C_a : Consumo de agua de una actividad

Tanto la relación de superficies $\left(\frac{S-S_a}{S}\right)$ como la relación de flujos $\left(\frac{D_{AR}-C_a}{D_{AR}}\right)$ poseen valores que se encontrarán entre 0 y 1. Cuando una actividad tiene una superficie más grande o su consumo de agua es mayor, entonces disminuye el valor de la relación correspondiente y existe un mayor impacto dentro de la cuenca estudiada según el resultado del indicador de impacto (I_{H_2}). Cabe destacar que este indicador también posee valores que se encuentran entre 0 y 1, si el valor se acerca a cero, el impacto es menor y, si se acerca a 1, entonces el impacto es mayor.

4.2. Discusiones sobre la definición del indicador de huella de agua territorial

Para partir, se analizará si los indicadores propuestos cumplen con las características esperadas. Se considera que la primera propuesta expone claramente el diagnóstico de la situación hídrica territorial, por medio del numerador en la ecuación (17), ya que muestra cómo se distribuye el agua disponible en una sección de área de la cuenca, lo que además permite realizar comparaciones entre los valores de los numeradores obtenidos para distintas cuencas hidrográficas. Por otro lado, la segunda propuesta no presenta explícitamente un diagnóstico hídrico territorial, ya que trabaja con la disponibilidad de agua y la superficie de la cuenca en términos separados en la ecuación (19), por lo que, esto no permite realizar una comparación directa entre distintos escenarios hídricos.

Con respecto a la segunda característica esperada, la primera propuesta entrega como resultado la cantidad de veces que una actividad consume agua con respecto al volumen que existe disponible en la cuenca por metro cuadrado, presentando dos escenarios posibles: que la actividad sea sostenible en el tiempo si el valor es menor o igual a uno, o que la actividad sea insostenible si el valor es mayor a uno. Por otro lado, en la segunda propuesta se obtiene un resultado del nivel de impacto con valores entre 0 y 1. Si bien, mientras el resultado vaya aproximándose a cero, va disminuyendo el impacto, no es posible cuantificar en cuánto se empeora el resultado del indicador si este varía, por ejemplo, de 0,1 a 0,2. Por consiguiente, el resultado del primer indicador propuesto es más comprensible que el segundo.

Por último, sobre la tercera característica esperada, se mencionó en el primer párrafo que la primera propuesta permite realizar comparaciones a nivel territorial, sin embargo, la segunda propuesta no logra esta característica. Por otro lado, ambas propuestas permitirían realizar comparaciones con respecto a diferentes actividades productivas para el mismo territorio de estudio, en el primer caso se contrasta cuántas veces consume más agua una actividad en relación con la otra y, en el segundo caso, se compara cuántas veces es mayor el impacto de una actividad con respecto a la otra.

Para continuar con el análisis de los indicadores, se contrastarán ambas propuestas a partir de los criterios de selección de indicadores de sostenibilidad para la evaluación de parques eco-industriales: entendimiento, pragmatismo, relevancia y representación parcial de la sostenibilidad [35]. Si bien los indicadores propuestos son aplicables a un contexto diferente, estos criterios son suficientemente genéricos para lograr una comparación crítica entre ellos.

El criterio de entendimiento se refiere a que el indicador debe ser sencillo de comprender tanto en su definición matemática como en el resultado que se obtiene [35]. Con respecto a la primera propuesta, esta se basa en el consumo de agua de una actividad en un área comparándolo con la distribución de la disponibilidad de agua remanente dentro de una cuenca hidrográfica, obteniendo un resultado fácil de interpretar, como se comentó en el párrafo referente a la segunda característica esperada. Por otro lado, la segunda propuesta desarrolla una comparación relativa de las superficies y los flujos (disponibles y consumidos) del territorio analizado y de la actividad que se encuentra ocupando agua dentro de ese territorio. Siendo la interpretación del resultado más compleja, ya que los valores no se encuentran parametrizados dentro de rangos sobre su nivel de impacto como, por ejemplo, bajo, medio, alto y extremadamente alto.

El criterio de pragmatismo se basa en que el indicador debe ser medible y su valor debe ser fácil de obtener [35]. En este caso, ambos indicadores propuestos poseen los mismos parámetros para el cálculo, siendo los relacionados al contexto territorial los más complejos de obtener, ya que dependen de que exista información disponible suficiente para caracterizar el territorio estudiado como, por ejemplo, medidores de caudal, censos poblacionales, modelaciones hidrológicas, entre otros. En consecuencia, se considera que ambos indicadores no cumplen a plenitud con el criterio de pragmatismo.

El criterio de relevancia se refiere a que el indicador debe ser relevante para el desarrollo del objetivo y para el futuro de la actividad analizada [35]. En base a lo discutido en el párrafo sobre la segunda característica esperada, se considera que posee mayor relevancia el primer indicador propuesto, ya que es capaz de entregar información cuantitativa concreta sobre el consumo de agua de una actividad dentro del territorio estudiado, facilitando la toma de decisiones al momento de implementar una gestión sobre los recursos hídricos.

El criterio de representación parcial de la sostenibilidad se refiere a que el indicador debe representar adecuadamente una o más dimensiones de la sostenibilidad [35]. En este caso, ambos indicadores están definidos con el objetivo de resguardar, teóricamente, el agua para el consumo de la población y el de los ecosistemas. Por lo tanto, ambos indicadores consideran tanto la dimensión social y como la medioambiental.

Se concluye, en base a las características esperadas y a los criterios de selección anteriormente expuestos, que es más apropiado trabajar con el primer indicador propuesto.

4.3. Síntesis del indicador de huella de agua territorial

Finalmente, se decide que el indicador de huella de agua territorial se definirá a partir de la primera propuesta según la siguiente ecuación:

$$H_t = \frac{1}{\frac{AMD}{U_a}} \quad (20)$$

Donde:

H_t	: Indicador de huella de agua territorial	$[-]$
AMD	: Disponibilidad menos demanda	$[m^3 \cdot m^{-2} \cdot mes^{-1}]$
U_a	: Uso específico de agua de una actividad	$[m^3 \cdot m^{-2} \cdot mes^{-1}]$

El término del numerador, en la ecuación (20), se encarga de representar el diagnóstico hídrico que posee la cuenca estudiada, por medio del cálculo de la superficie promedio de territorio en la cual se distribuye un metro cúbico de agua al mes. En la Figura 13 se muestra la interpretación física de $\frac{1}{AMD}$ para una cuenca hidrográfica. En el escenario A se observa que el valor de $\frac{1}{AMD}$ es igual a $1 [m^2 \cdot mes \cdot m^{-3}]$, es decir que $1 [m^3]$ de agua se distribuye en una superficie de $1 [m^2]$ al mes. Mientras que en el escenario B se obtiene un valor de $\frac{1}{AMD}$ igual a $5 [m^2 \cdot mes \cdot m^{-3}]$, dando cuenta que con $1 [m^3]$ de agua se tiene que abastecer un área cinco veces más grande en comparación al escenario A. Por lo tanto, a mayor valor $\frac{1}{AMD}$ entonces existe menos agua disponible en cada subárea de la cuenca.

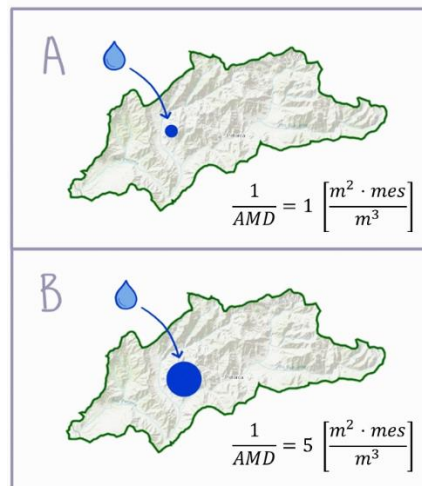


Figura 13. Interpretación física de $1/AMD$ para una cuenca hidrográfica mostrando dos escenarios.

Por otro lado, como se explicó anteriormente, el término del denominador en la ecuación (20) muestra la superficie de terreno en la que se consume un metro cúbico de agua al mes debido al funcionamiento de una actividad determinada. A mayor valor de $\frac{1}{U_a}$ entonces es más eficiente el uso de agua de una actividad.

Finalmente, como se muestra en la Figura 14, el resultado obtenido con el indicador de huella de agua territorial (H_t) es sostenible en el tiempo si posee un valor que se encuentra entre cero y uno. Mientras que es insostenible en el tiempo si se alcanzan valores mayores a uno; en este caso, la actividad estaría consumiendo el agua destinada a otros actores (población o ecosistemas) o el agua correspondiente a otra sección de la cuenca.

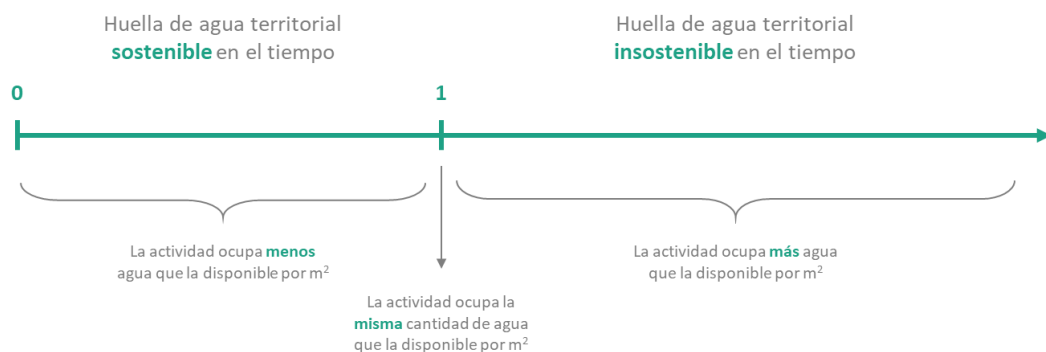


Figura 14. Esquema gráfico de los casos que puede tomar el resultado del indicador de huella de agua territorial.

4.4. Fundamentos territoriales para el indicador de huella de agua

Para cuantificar el indicador de huella de agua territorial es necesario realizar una caracterización de cada una de las cuencas hidrográficas de Chile. Para ello se implementará una metodología que considera 3 variables principales: la disponibilidad hídrica a nivel de cuenca, el requerimiento hídrico destinado al consumo domiciliario y la demanda hídrica para mantener el ecosistema. Con esto, se determinará la disponibilidad de agua remanente que puede ser destinada a otras actividades. Por último, se trabajará con el dato de la superficie de cada cuenca hidrográfica para determinar el indicador de huella de agua territorial.

El análisis se realizará con base en las cuencas hidrográficas y sus subdivisiones para poder agrupar la información recopilada según las regiones administrativas a las que corresponda cada cuenca, considerando un periodo de análisis anual.

4.4.1. Disponibilidad hídrica

La disponibilidad hídrica se entenderá como el flujo volumétrico de recurso hídrico que se encuentra disponible en una zona de estudio.

Como alcances de la metodología se definen los siguientes aspectos:

- Se analizará la disponibilidad hídrica de las fuentes de agua dulce superficiales.
- Se considerarán los cuerpos de agua que posean data histórica para realizar el análisis, los que corresponden principalmente a los caudales de los ríos de las diferentes cuencas hidrográficas.
- Se ocupará una data histórica considerando 25 años hidrológicos² [36, 37].
- Se limitará el análisis a las macrozonas norte, centro y sur, correspondiente a las regiones de Arica y Parinacota (XV región) hasta la región de Los Ríos (XIV región), según la división político-administrativa del año 2017, dejando fuera la macrozona austral.

Para partir, se trabajará con los datos disponibles del sitio "*CAMELS-CL explorer*", los que corresponden a estaciones de medición de caudal diario de las subsubcuencas [38]. Si existe más de una medición de caudal en una subsubcuenca, se promediarán para obtener un único valor.

Teniendo en cuenta que una subsubcuenca es la unidad de caudal que aporta agua a una subcuenca, entonces el cálculo del caudal de la subcuenca se realiza a partir de la sumatoria de los caudales de todas las subsubcuencas que la abastecen, como se presenta a continuación:

$$\text{Caudal subcuenca} = \sum_i \text{caudal subsubcuenca}_i \quad (21)$$

Por otra parte, como la subcuenca se define como la unidad de caudal que aporta agua a una cuenca, entonces el caudal de la cuenca hidrográfica se realiza a partir de la sumatoria de los caudales de todas las subcuencas pertenecientes a esa cuenca, como se presenta a continuación:

$$\text{Caudal cuenca} = \sum_i \text{caudal subcuenca}_i \quad (22)$$

² Año hidrológico: se define como el periodo en el cual se miden las precipitaciones de una cuenca hidrográfica, inicia el 1 de abril de un año y termina el 31 de marzo del año siguiente [37].

Como resultado se obtendrán los caudales diarios de cada cuenca hidrográfica. Para continuar con la metodología, se calculará el promedio anual de cada cuenca para los 25 años hidrológicos de análisis. Posteriormente, se agruparán los datos obtenidos para cada cuenca, según la región a la que pertenezcan. De esta manera, se obtiene la disponibilidad hídrica anual para cada región. Finalmente, se realiza una extrapolación de los datos ocupando la media móvil simple de los 5 años anteriores.

4.4.2. Consumo domiciliario

El consumo domiciliario se entenderá como el flujo volumétrico de agua necesaria para cubrir las necesidades hídricas de las personas.

Para este cálculo se considerará que una persona consume 170 litros de agua en un día [39]. Además, se tendrá en cuenta la cantidad de población de cada cuenca del país a partir de los datos obtenidos del censo del año 2017 [40, 41].

Por lo que, el consumo domiciliario que posee cada cuenca se calcula como:

$$\text{Consumo domiciliario} \left[\frac{m^3}{s} \right] = 170 \left[\frac{L}{p \cdot \text{día}} \right] \cdot N [p] \cdot \frac{1}{1.000} \left[\frac{m^3}{L} \right] \cdot \frac{1}{86.400} \left[\frac{\text{día}}{s} \right] \quad (23)$$

Donde N corresponde a la cantidad de población que existe en una cuenca.

Este cálculo se realiza para todas las cuencas del país. Posteriormente, se agruparán los datos obtenidos para cada cuenca, según la región a la que pertenezcan. De esta manera, se obtiene el consumo domiciliario para cada región.

Se supondrá que la cantidad de población por región se mantiene constante en el tiempo cuando se trabaje con la proyección de los datos. Esto que equivalente a decir que la tasa de natalidad es igual a la tasa de mortalidad.

4.4.3. Caudal ecológico mínimo

El caudal ecológico mínimo corresponde al agua mínima necesaria para preservar los valores ecológicos en el cauce de ríos u otros cauces de aguas superficiales [42].

Para el cálculo del caudal ecológico mínimo, la Dirección General de Aguas considera un porcentaje del caudal del río, establecido en forma constante, utilizando uno de los siguientes criterios:

- Caudal igual al 10% del caudal medio anual.
- Caudal igual al 50 % del nivel más bajo del caudal mensual considerando una probabilidad de excedencia³ del 95%.

La estadística hidrológica que se requiere para la aplicación de este método debe considerar un mínimo de 25 años hidrológicos, con una estadística a nivel medio mensual [36].

Debido a que esta metodología posee un enfoque anual, se ocupará el criterio correspondiente a calcular un caudal igual al 10% del caudal medio anual, considerando los datos calculados por cuenca en el apartado 4.4.1.

³ Probabilidad de excedencia: corresponde a la probabilidad de que un evento definido o un caudal de crecida, sea igualado o excedido. [43]

Posteriormente, se agruparán los datos obtenidos para cada cuenca, según la región a la que pertenezcan. De esta manera, se obtiene el caudal ecológico mínimo anual de cada región. Finalmente, se realiza una extrapolación de los datos ocupando la media móvil simple de los 5 años anteriores.

4.4.4. Disponibilidad de agua remanente para otras actividades

La disponibilidad de agua remanente para otras actividades se entenderá como el flujo volumétrico que queda disponible en la zona de estudio para que otros actores lo ocupen. Se calcula a partir de la ecuación (18), considerando los datos obtenidos de las proyecciones.

4.4.5. Agua disponible relativa restante por área

Dentro de esta metodología también se desarrollará el cálculo para el método de evaluación de agua disponible (*AWARE*) con el fin de realizar una comparación con el indicador de huella de agua territorial en este estudio. De esta manera, se trabajará con el método descrito en el apartado 3.4.3 para llevar esto a cabo.

4.5. **Discusión metodológica del análisis territorial**

En esta metodología se acotó el estudio dejando fuera las aguas subterráneas y algunas fuentes de agua superficiales como lagos, lagunas, salares, entre otros. Esto se debió a que, para poder trabajar con estos cuerpos de agua, era necesario tener una modelación hidrológica de cada uno para conocer la dinámica, cantidad, calidad y recarga de las aguas [44, 45]. La modelación y el tipo de datos para usar varían de un cuerpo de agua a otro, por lo que resultaba complejo para desarrollarlo dentro de los límites de este trabajo.

Por otro lado, también se acotó la zona de análisis pues se abarcó desde la región de Arica y Parinacota (XV región) hasta la región de Los Ríos (XIV región), dejando fuera las regiones de la zona austral. Se estableció de esta manera debido a que en las regiones de más al sur la geografía de las cuencas hidrográficas agrupa conglomerados de islas, lo que resulta en que, dentro de los límites de la cuenca, puedan existir zonas con agua de origen marino. Además, en el corto plazo no se proyecta que exista riesgo de escasez hídrica en estas regiones, como se observa en la Figura 15 [46].

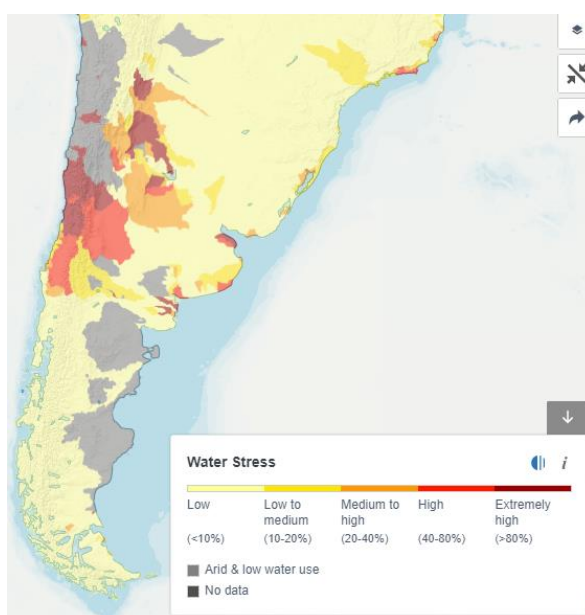


Figura 15. Estrés hídrico de Chile y Argentina proyectado al año 2030 [46].

Con respecto a los datos históricos analizados se puede decir que logran representar parcialmente la realidad hídrica de las fuentes superficiales, ya que se ocuparon las mediciones de caudal que estaba disponible para los ríos del país. Sin embargo, se desconoce si la cantidad de estaciones de medición presentes en cada cuenca hidrográfica es suficiente para un análisis completo de la cuenca fluvial.

Por otro lado, también se desconoce el estado que posean estas estaciones de medición y si sus sensores se encuentran funcionando correctamente. Para mejorar el estudio, teniendo en consideración lo anterior, sería necesario agregar a la metodología un análisis estadístico detallado para poder detectar las mediciones de caudal que pueden presentar un valor atípico y, posteriormente, filtrarlas para obtener una estimación más precisa. Un método estadístico que se puede ocupar es el criterio excluyente de Chauvenet, que se basa en calcular cuánto difiere un dato del valor de la media aritmética y luego determina la probabilidad de que ese valor sea atípico a partir de la función de distribución normal del conjunto de datos [47].

Con respecto a los cálculos desarrollados a partir de los datos históricos, estos se abordaron considerando un enfoque anual, sin embargo, este abarcó desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre del mismo año, en vez de ocupar el periodo correspondiente a un año hidrológico. El estudio se desarrolló de esta manera ya que facilitaba la programación de la data y no restaba información para el objetivo del estudio.

En relación con el método de cálculo ocupado para estimar el caudal de las microcuencas, se considera apropiado ocupar el promedio de las diferentes estaciones de medición que se encuentren situados en la misma microcuenca, esto debido a que todas deberían estar realizando mediciones del mismo flujo. Sin embargo, hay factores que pueden provocar que los valores reportados por las estaciones de medición cambien de un punto a otro en la misma microcuenca, estos factores pueden ser salidas o entradas de agua desde el flujo. Las salidas de agua pueden deberse a la evaporación, la infiltración, el consumo de agua desde la flora o fauna, o algún punto de extracción de agua de forma antropogénico. Por otro lado, las entradas de agua pueden ser debido a la precipitación o al ingreso desde otra fuente de agua, ya sea de manera natural o antropogénica.

Uno de los supuestos considerados dentro del cálculo del caudal es que, si un río se bifurca, debería seguir estando dentro de la misma cuenca. El objetivo de este supuesto es que se conserve el balance de masa en la zona de análisis.

Otro supuesto corresponde a que, cuando se realiza la división territorial a partir de las regiones político-administrativas, se asume que el flujo del agua en cada cuenca es homogéneo, por lo que la división se hace a partir de la proporcionalidad de la superficie que posee cada cuenca dentro de las regiones. Este supuesto puede contradecirse según el relieve y la cantidad de caudal que posean las distintas partes de una cuenca.

Con respecto al cálculo del consumo domiciliario se considera que la población registrada en el censo del 2017 se mantiene constante en el tiempo para facilitar el análisis. Sin embargo, según el anuario de estadística vitales del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) para el año 2017, la tasa de natalidad (11,9) correspondía al doble de la tasa de mortalidad (5,8) [48]. Además, en los últimos años ha existido un aumento de los habitantes inmigrantes en el país, en el año 2017 correspondían a un 2,7% del total de la población, valor que aumentó al doble en el año 2019 [49]. Por lo mismo, para realizar una estimación más precisa del cálculo de la demanda de agua a nivel domiciliario es necesario desarrollar un estudio con respecto al crecimiento poblacional de Chile.

Sobre el cálculo del caudal ecológico, se abordó con una estadística a nivel medio anual y no a nivel medio mensual, ya que este último enfoque implicaba un tratamiento de los datos más complejo. Por lo mismo, se escogió trabajar con el primer criterio para definir el caudal ecológico en una cuenca, el que correspondía a considerar un caudal igual al 10% del caudal medio anual. Sin embargo, al comparar ambos criterios, como se muestra en la Figura 16, es posible percatarse que el criterio del 10%, mostrado con la línea punteada verde, permite resguardar un caudal ecológico mínimo en los periodos críticos del año, donde existe una disminución del flujo de los ríos; pero en los periodos donde aumenta el flujo, por temas estacionales, la fauna del ecosistema puede requerir un mayor consumo hídrico que el que se asegura con el criterio del 10% del caudal. Por lo mismo, es preferible trabajar con el criterio que considera un caudal ecológico igual al 50 % del nivel más bajo del caudal mensual, mostrado con la línea continua celeste en la Figura 16, ya que es un criterio que va cambiando el caudal según la estacionalidad en la que se analice.

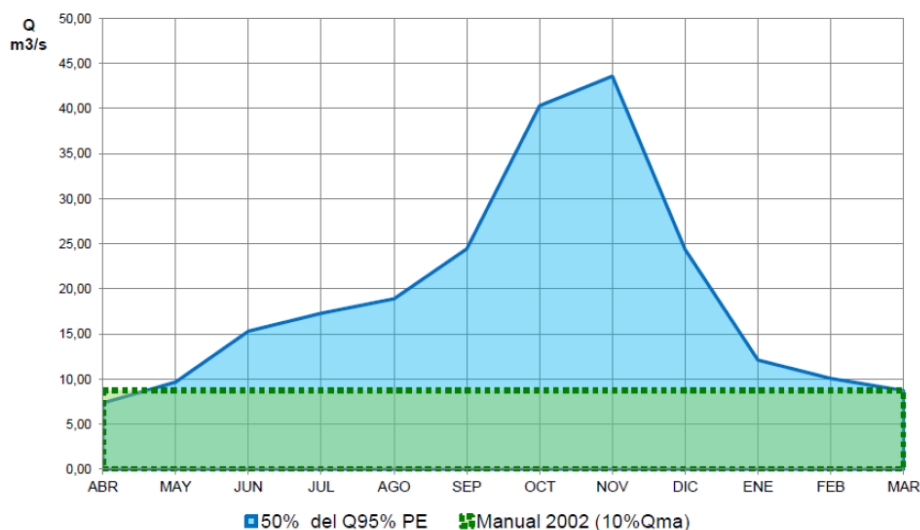


Figura 16. Comparación de los criterios para definir el caudal ecológico mínimo [42].

Considerando lo anterior, es recomendable cambiar el enfoque temporal de uno anual a uno mensual, esto permitiría tener una mayor precisión en el cálculo del caudal ecológico, además de evidenciar las diferencias estacionales y los periodos críticos para la extracción y/o consumo de agua en la cuenca hidrológica.

De igual modo, se discute si las definiciones de caudal ecológico son suficientes para asegurar el agua de la demanda hídrica de los ecosistemas, porque este parámetro se define en base al caudal que posee un cuerpo de agua en una cuenca hidrográfica, siendo que es más apropiado analizar las necesidades hídricas de los organismos que habitan en la cuenca para determinar cuánta agua necesitan y, de este modo, no alterar sus ciclos de vida.

En relación con el periodo histórico de 25 años hidrológicos ocupados para esta metodología, se considera apropiado acotarlo a 5 años, debido a que, como consecuencia del cambio climático, en los últimos años los procesos hidrológicos se han visto afectados significativamente por las alzas térmicas que van alterando el ciclo del agua [50]. A partir de lo anterior se decide realizar una extrapolación de los datos considerando la media móvil de los últimos 5 años, debido a que esto permite estimar la realidad hídrica futura teniendo en cuenta el efecto de los cambios sostenidos que ocurrieron en ese periodo de tiempo, dejando fuera los cambios que fueron repentinos.

Por último, producto de las limitaciones actuales de la metodología, esta no debería implementarse en una evaluación hídrica para procesos productivos que ocupan agua extraída de recursos subterráneos o proveniente de otras fuentes hídricas superficiales.

4.6. Caracterización por cuenca hidrográfica para el cálculo del indicador de huella hídrica territorial

Para calcular la disponibilidad hídrica de las cuencas hidrográficas se ocupó el programa *Python* y se guardaron los datos en una planilla *Excel*, posteriormente se trabajó a partir de estos datos en la misma planilla y se realizó el cálculo de consumo domiciliario, caudal ecológico y disponibilidad hídrica enfocada a los procesos productivos. Para mayor detalle de la implementación de la metodología de análisis territorial revisar el Anexo B.

Entre la región de Arica y Parinacota (XV) y la región de los Ríos (XIV) existen 75 cuencas hidrográficas, en las que se encuentran 128 subcuencas y 666 microcuencas. Los datos entregaban información para 277 microcuencas, equivalente a un 42% del total en la zona de estudio. Sin embargo, no todas las estaciones de medición presentan información para el periodo de análisis, en particular, existen 49 microcuencas que no poseen uno o más datos durante los últimos 5 años.

Se trabajó con datos históricos desde 1993 hasta 2017 y se realizó un análisis estadístico correspondiente a calcular la desviación estándar para un periodo de 25 años y de 5 años de data. El detalle de la desviación estándar por cuenca hidrográfica se puede revisar el Anexo C. Posteriormente, se realizó una extrapolación de los datos a partir del cálculo de la media móvil considerando los últimos 5 años de data. Con esto se obtuvo información del caudal disponible y del caudal ecológico por cuenca hidrográfica para los años 2018, 2019, 2020 y 2021. Por otro lado, el consumo domiciliario se consideró constante en el tiempo.

Se clasificaron las cuencas según los siguientes criterios de nivel de caudal disponible:

- Caudal bajo: entre 0 y 1 [m^3/s].
- Caudal medio bajo: entre 1 y 15 [m^3/s].
- Caudal medio: entre 15 y 100 [m^3/s].
- Caudal alto: entre 100 y 2.500 [m^3/s].

Según este criterio se graficó el caudal disponible, el consumo domiciliario y el caudal ecológico por cada cuenca para la proyección del año 2020, obteniendo como resultado la Figura 17, Figura 18, Figura 19 y Figura 20. Para mayor detalle de los valores obtenidos para el año 2020 revisar el Anexo D.

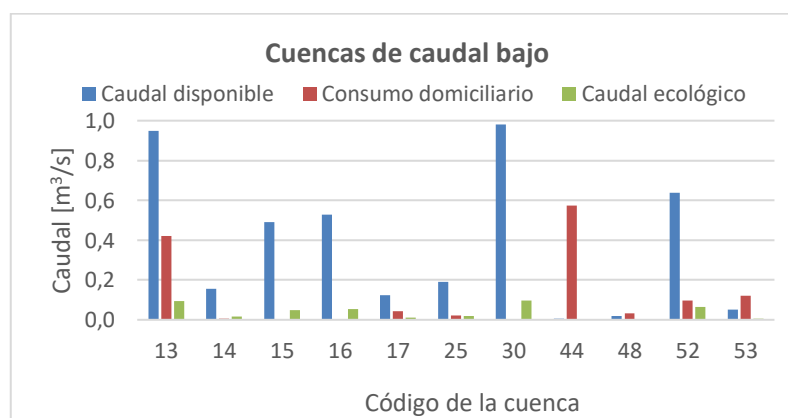


Figura 17. Medición de caudal disponible, consumo domiciliario y caudal ecológico de las cuencas de caudal bajo para la proyección al año 2020.

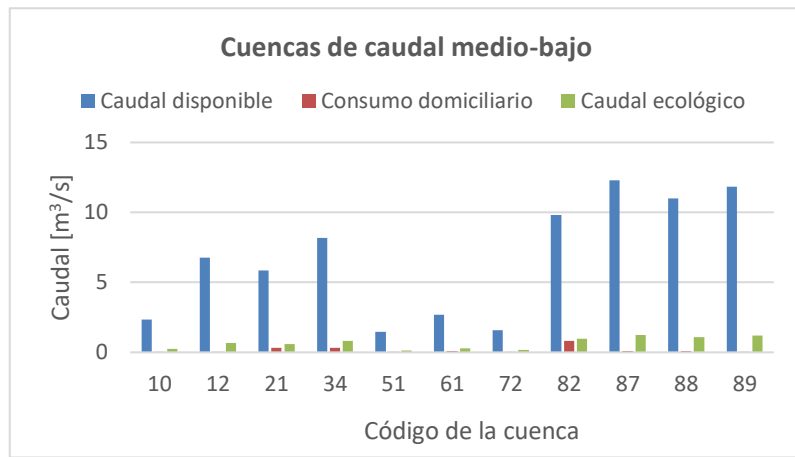


Figura 18. Medición de caudal disponible, consumo domiciliario y caudal ecológico de las cuencas de caudal medio-bajo para la proyección al año 2020.

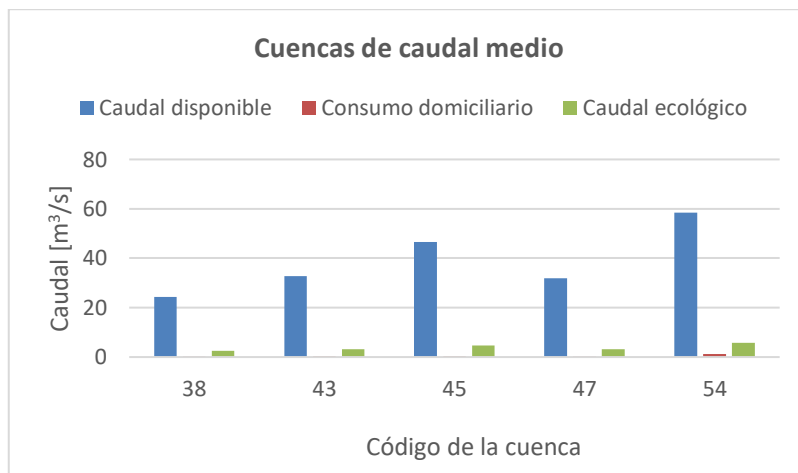


Figura 19. Medición de caudal disponible, consumo domiciliario y caudal ecológico de las cuencas de caudal medio para la proyección al año 2020.

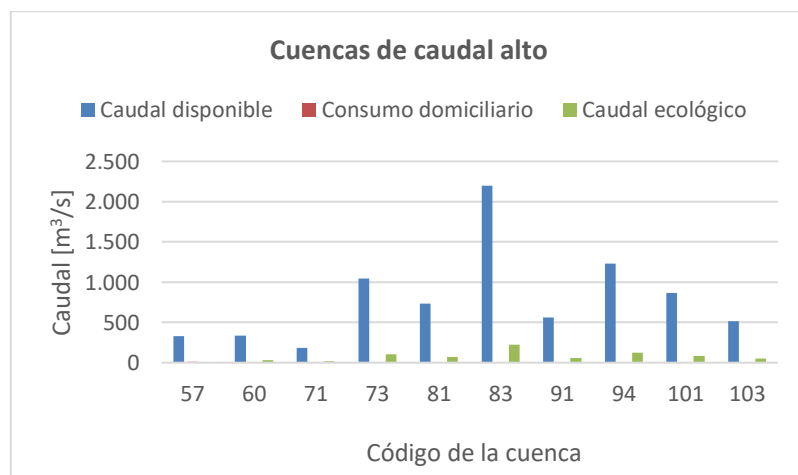


Figura 20. Medición de caudal disponible, consumo domiciliario y caudal ecológico de las cuencas de caudal alto para la proyección al año 2020.

Del total de cuencas estudiadas, en 30 de ellas se cumple que el consumo domiciliario representa un porcentaje igual o menor al 10% del caudal disponible, y en 3 de ellas no se alcanza a cubrir el consumo domiciliario a partir del caudal disponible, esto ocurre para las cuencas: 44 - Costeras entre Elqui y Limarí (IV región), 48 - Costeras entre río Choapa (IV región) y río Quilimari, y 53 - Costeras Ligua-Aconcagua (V región). Para mayor detalle del análisis del consumo domiciliario revisar el Anexo D.

Finalmente, se calcula la disponibilidad de agua remanente mensual para otras actividades (D_{AR}) y el factor de caracterización del método de evaluación de agua disponible ($AWARE$). En la Tabla 7 se presenta los valores de los datos para el año 2020. Para mayor detalle revisar el Anexo D.

Tabla 7. Disponibilidad de agua remanente y factor de caracterización del método de evaluación de agua disponible para el año 2020.

Código cuenca	Cuenca	Disponibilidad de agua remanente (D_{AR}) [m ³ /mes]	Factor caracterización $AWARE$ [-]
10	Altiplánicas	5.420.120	28,53
12	Rio Lluta	15.732.993	2,97
13	Rio San Jose	1.123.401	38,67
14	Costeras R. San Jose-Q. Camarones	344.397	105,66
15	Q. Rio Camarones	1.140.930	55,81
16	Costeras R. Camarones-Pampa del Tamarugal	1.227.509	42,17
17	Pampa del Tamarugal	177.140	1.332,34
21	Rio Loa	12.735.861	35,33
25	Salar de Atacama	391.756	540,75
30	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacifico	2.284.589	92,98
34	R. Copiapó	18.235.904	13,95
38	Rio Huasco	56.427.477	2,37
43	Rio Elqui	75.415.542	1,77
44	Costeras entre Elqui y Limarí	-1.473.625	-21,22
45	Rio Limarí	107.644.929	1,48
47	Rio Choapa	74.165.772	1,40
48	Costeras entre R. Choapa y R. Quilimari	-37.327	-471,24
51	Rio Petorca	3.388.141	7,98
52	Rio Ligua	1.242.488	21,67
53	Costeras Ligua-Aconcagua	-191.440	-60,42
54	Rio Aconcagua	133.217.592	0,75
57	Rio Maipo	809.339.206	0,26
60	Río Rapel	773.710.642	0,24
61	Costeras Rapel-E. Nilahue	6.090.255	7,59
71	Rio Mataquito	425.499.531	0,20
72	Costeras Mataquito-Maule	3.694.845	4,00
73	Rio Maule	2.427.882.659	0,12
81	Rio Itata	1.702.233.357	0,09
82	Costeras e Islas entre Rio Itata y Rio Bio-Bio	20.722.802	0,99
83	Rio Bio-Bio	5.129.091.797	0,06
87	Rio Lebu	28.389.834	0,41

Continuación Tabla 7. Superficie de la cuenca, disponibilidad de agua remanente mensual e indicador del método de evaluación de agua disponible para el año 2020.

Código cuenca	Cuenca	Disponibilidad de agua remanente (D_{AR}) [m ³ /mes]	Factor caracterización AWARE [-]
88	Costeras Lebu-Paicavi	25.400.006	0,91
89	Costeras e Islas entre R. Paicavi y Limite Región	27.492.030	0,69
91	Rio Imperial	1.308.229.647	0,13
94	Rio Toltén	2.866.078.547	0,04
101	Rio Valdivia	2.015.327.515	0,07
103	Rio Bueno	1.203.938.292	0,17

4.7. Discusión de la caracterización por cuenca hidrográfica

En la Figura 17, Figura 18, Figura 19 y Figura 20 se muestra que las cuencas hidrográficas que presentan menores caudales se sitúan principalmente en la zona norte del país y las con mayores caudales se encuentran en la zona sur. Cabe destacar que, aunque no se haya podido trabajar con información para la totalidad de los cuerpos de agua superficiales que abastecen cada cuenca hidrográfica, de todas maneras, se logra cubrir el consumo domiciliario de la mayoría de las zonas de análisis. De esta manera, con los datos analizados se puede resguardar la seguridad hídrica de las personas. Los casos en los que no es posible asegurar esto corresponden a cuencas ubicadas en la IV y V región del país, por lo que habría que desarrollar un estudio más exhaustivo de los cuerpos de agua de estas regiones para evaluar si se encuentra o no en riesgo la seguridad hídrica de la población.

Además, los valores de los factores de caracterización del método de evaluación de agua disponible, mostrados en la Tabla 7, reafirman lo anterior, ya que las cuencas hidrográficas que poseen factores de caracterización mayores a 1 se encuentran en el norte de Chile, mientras que las que poseen valores menores a 1 se sitúan hacia el sur del país.

Finalmente, si bien existe información de los últimos 5 años para un tercio de las microcuencas, se desconoce el nivel de aporte de estas a sus respectivos cuerpos de agua, por lo que no es posible cuantificar su influencia dentro de la cuenca hidrográfica. Además, es necesario contar con información proveniente de otros cuerpos de agua, como lagos, acuíferos, entre otros, para determinar la totalidad de recursos hídricos disponibles para otras actividades.

5. Caso de estudio: Producción de paltas en la región de Valparaíso

En este capítulo se desarrollará un caso de estudio con el objetivo de ilustrar la aplicación de los indicadores propuestos de huella hídrica territorial y, en base a los resultados obtenidos, discutir su aporte en una evaluación de impactos y en la toma de decisiones para la gestión hídrica local. Para ello se estudiará el proceso de producción de paltas en la región de Valparaíso considerando un Análisis de Ciclo de Vida desde la cuna hasta la puerta, correspondiente a las etapas de cultivo de paltas y post cosecha, mostradas en la Figura 21. En la evaluación de impactos se ocuparán los indicadores, definidos en el capítulo 4, para determinar la huella hídrica territorial de las etapas mencionadas.

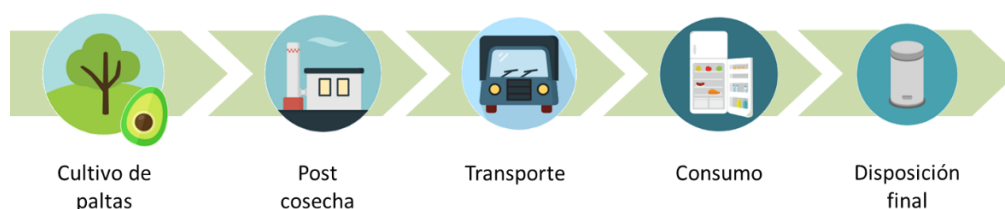


Figura 21. Diagrama de ciclo de vida de la palta.

5.1. Definición de objetivos y alcances

5.1.1. Descripción del proceso productivo

En la Figura 22 se detallan las cuatro etapas de la vida de un palto dependiendo de la edad que este posea. En la etapa de formación ocurre la germinación de la semilla y el principal desarrollo vegetal de la planta, en general existe una baja formación de frutos. En la etapa de producción creciente el palto termina de desarrollarse como un árbol adulto y la presencia de frutos suele ir aumentando año a año. En la etapa de plena producción el palto ya se encuentra desarrollado y tiene una formación de frutos constante en el tiempo. Por último, en la etapa de producción decreciente existe un decaimiento en la presencia de frutos debido a la edad del árbol [51, 52].

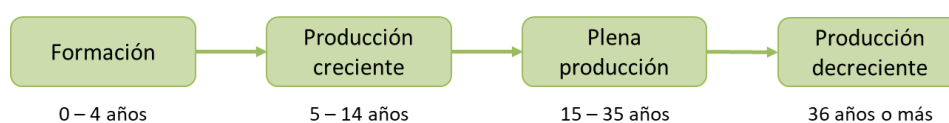


Figura 22. Etapas de la vida de un palto según la edad que posea [52].

Entre las etapas de producción (creciente, plena y decreciente) se origina el ciclo de formación de frutos. Como se muestra en la Figura 23, este proceso se inicia en primavera con la floración. Cuando las flores se polinizan y fecundan, el fruto empieza su desarrollo y se conoce como la fase de cuaja o fruto cuajado. Luego, se presenta un máximo de crecimiento de frutos entre el fin del verano y comienzo del otoño, seguido de un crecimiento lento en invierno, para después dar paso a otro crecimiento exponencial en primavera. Finalmente, se lleva a cabo la cosecha de paltas en la época de verano del año siguiente [51, 53].



Figura 23. Ciclo de formación de frutos de un palto [53].

Posterior a la cosecha, las paltas son procesadas para preservar su calidad e integridad física por tiempos prolongados [54]. El proceso de postcosecha, mostrado en la Figura 24, se realiza principalmente la selección, embalaje y almacenado de las frutas para enviarlas tanto al mercado nacional como a la exportación [55]. Para asegurar la calidad de la palta es importante conservarla y trasladarla en un ambiente refrigerado, de modo de ralentizar su maduración e impedir la aparición de patógenos. También se requiere mantener una humedad relativa de hasta el 90% para evitar la pérdida de agua por transpiración y una atmósfera controlada con un baja para que el fruto no madure durante varias semanas [56].

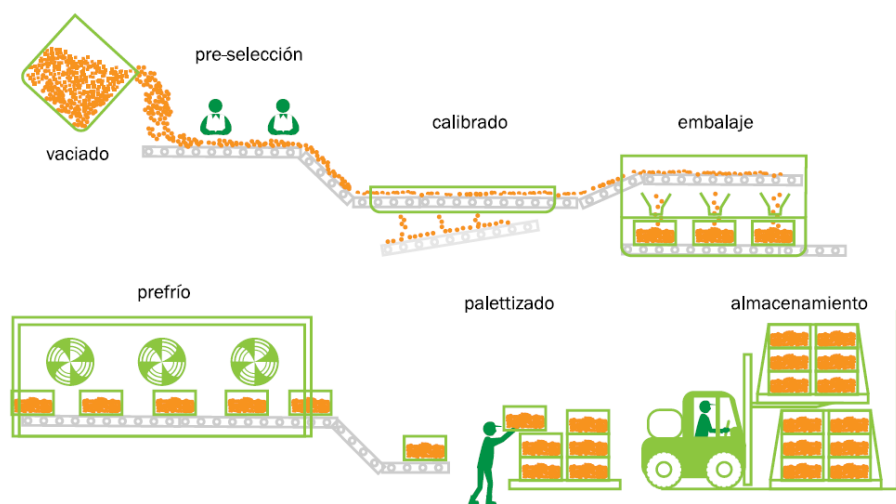


Figura 24. Esquema del proceso de postcosecha de las paltas [55].

5.1.2. Objetivos y alcances del estudio

El objetivo de este estudio consiste en determinar el consumo hídrico que posee la producción de paltas en la región de Valparaíso, para ello se considerará el uso de agua directa y se evaluará el impacto en las cuencas hidrográficas de la región.

A continuación, se determinan los alcances del trabajo y algunos supuestos sobre la producción de palta:

- Este estudio se limita a trabajar con datos correspondientes al cultivo de palta en la región de Valparaíso. Se excluye del trabajo el análisis de la postcosecha debido a que no existe un uso directo de agua durante sus etapas.
- Los cultivos de paltos tienen un nivel tecnológico alto y poseen un riego por microaspersión [51, 52].
- Se establece para el análisis un marco de plantación de los paltos de 6x4, que equivale a un rendimiento de aproximadamente 10 [t_{palta}/ha] por año en huertos adultos [57]. Para mayor detalle revisar el Anexo E.
- Se define como unidad funcional, para este estudio, una tonelada de palta cosechada.

5.2. **Análisis del inventario**

5.2.1. Parámetros hídricos

El cultivo de palto se abastece del agua proveniente tanto del riego como de la precipitación. Por otro lado, las salidas del balance hídrico corresponden a la evapotranspiración del cultivo (ET_c), la infiltración de agua en el suelo y la escorrentía del recurso en la superficie.

La evapotranspiración del cultivo se refiere al agua que se evapora desde el suelo y que se transpira desde las hojas del palto. En los árboles maduros se considera que la evaporación del suelo es menor al 5% de la evapotranspiración del cultivo [58]. Por otra parte, la infiltración corresponde al agua que se absorbe por el suelo y que queda retenida como humedad. Mientras que la escorrentía representa el agua que se encuentra en la superficie del suelo, ya que esta no se evaporó ni se infiltró en la tierra.

5.2.2. Balance hídrico

Para desarrollar el balance hídrico del cultivo de palto se tienen en cuenta los siguientes supuestos:

- El balance posee una temporalidad mensual para el cálculo.
- El balance se desarrolla para las comunas La Ligua, Petorca y Quillota de la región de Valparaíso [57].
- Se considera un riego por microaspersión que tiene una eficiencia del 85% [59].
- Se considera que todos los paltos se encuentran en la etapa de plena producción [52]. Por lo que, se asume que el agua que consume la planta es constante en el tiempo.
- En la etapa de cultivo de palto las entradas corresponden al riego y a la precipitación mensual acumulada; y las salidas son la evapotranspiración del cultivo, la humedad del suelo y la escorrentía superficial. Las dos últimas se agruparán en un mismo valor.

Cabe destacar que los datos utilizados son de origen bibliográfico, ya que no se realizaron mediciones in situ en la zona de estudio.

Cultivo de paltas

En la Figura 25 se presenta el esquema del balance hídrico de la etapa de cultivo de paltas, el cual posee como entradas el riego efectivo y las precipitaciones mensuales acumuladas, y como salidas a la evapotranspiración del cultivo y la humedad junto a la escorrentía.



Figura 25. Esquema de las entradas y salidas para el balance hídrico de la etapa de cultivo de paltas.

Considerando lo anterior, se plantea el siguiente balance para el agua:

$$F_{riego} + F_{PP} = F_{ETc} + F_{H/E} \quad (24)$$

Donde:

- F_{riego} : Flujo volumétrico de agua proveniente del riego
 F_{PP} : Flujo volumétrico de agua proveniente de la precipitación
 F_{ETc} : Flujo volumétrico de agua debido a la evapotranspiración del cultivo
 $F_{H/E}$: Flujo volumétrico de agua debido a la humedad y/o escorrentía

Como resultado se obtiene la Tabla 8:

Tabla 8. Balance hídrico de un cultivo de patatas en la cuenca hidrográfica Río Aconcagua.

	Entradas		Salidas	
	Precipitaciones [mm/mes]	Riego [mm/mes]	ETc [mm/mes]	H y/o E [mm/mes]
Ene	1,1	128,0	128,3	0,9
Feb	1,2	132,5	132,8	1,0
Mar	3,7	103,3	103,5	3,5
Abr	19,8	74,1	74,3	19,7
May	33,8	47,2	47,3	33,8
Jun	50,4	21,4	21,5	50,4
Jul	42,5	15,6	15,6	42,5
Ago	38,0	21,4	21,5	38,0
Sept	24,1	40,8	41,0	24,0
Oct	21,9	64,3	64,4	21,8
Nov	4,4	103,3	103,5	4,2
Dic	10,4	123,6	123,8	10,2
Total [mm/año]	251,3	875,7	877,1	250,0

Cabe destacar que se consumen 876 $[m^3]$ en el riego por tonelada de palta producida. Para mayor detalle del cálculo del balance hídrico revisar el Anexo F.

Factor de consumo

El factor de consumo se define como el agua efectivamente utilizada de la cuenca hidrográfica analizada, en este caso se refiere al agua del riego durante el cultivo de las patatas equivalente a $876 [m^3/t_{palta}]$.

5.3. Evaluación de impactos

Para el caso de estudio se trabajará con el grupo de palteros HIGERPAL ubicado en la comuna de La Ligua, Región de Valparaíso. Esta organización cuenta con un predio de 26 hectáreas y posee un rendimiento anual de 8 $[t_{palta}/ha]$ [60]. A partir de lo anterior, se determinan los datos del grupo de palteros HIGERPAL que se ocuparán en la evaluación de impacto, resumidos en Tabla 9. Para mayor detalle revisar el Anexo G.

Tabla 9. Datos del grupo de palteros HIGERPAL.

Dato	Valor	Unidad
Superficie del predio	26	[ha]
Consumo hídrico mensual	15.179	$[m^3]$

Para la evaluación de impactos se trabajará con el indicador de huella de agua territorial, explicado en el apartado 4.3, y con el método de evaluación de disponibilidad de agua (AWARE), descrito en el apartado 3.4.3.

Si bien, la ubicación de esta organización es en la comuna de La Ligua, se realizará la evaluación de impactos considerando las cuencas hidrográficas Río Petorca, Río Ligua y Río Aconcagua para poder comparar los valores de los indicadores en cada una de ellas. En la Tabla 10 se muestran los resultados de los indicadores de impacto para las principales cuencas hidrográficas de la región de Valparaíso. Para mayor detalle revisar el Anexo H.

Tabla 10. Resultados de los indicadores de impacto para el grupo de palteros HIGERPAL, evaluados en las principales cuencas hidrográficas de la región de Valparaíso.

Código cuenca	Cuenca	Huella de agua territorial	Método de evaluación de disponibilidad de agua	
		Indicador de huella de agua territorial [-]	Factor de caracterización [-]	Indicador de consumo mensual [m^3]
51	Rio Petorca	34	7,98	121.139
52	Rio Ligua	93	21,67	328.991
54	Rio Aconcagua	3	0,75	11.365

5.4. Interpretación de resultados del proceso de producción de paltas

5.4.1. Objetivos y alcances

Con respecto a los alcances, se escoge como ubicación para el análisis la región de Valparaíso debido a que 37 de sus 38 comunas se encuentran declaradas como zonas de escasez hídrica [61]. Además, dentro de esta región se desarrolla la mayor parte de la producción de paltas del país, que corresponde a una actividad cuestionada por los habitantes de la región debido a que se cree que el uso de agua en los predios de paltos es uno de los factores de la escasez hídrica en la zona [62, 63].

Por otro lado, se decide considerar para el análisis hídrico solo la etapa de plena producción, ya que el 51% de los árboles se encuentran en esta fase en la región de Valparaíso. Sin embargo, un 33% los paltos están en producción creciente, que corresponde a una etapa con una alta demanda hídrica, debido a que con un mayor consumo de agua se permite que los árboles puedan aumentar su nivel de producción en edades tempranas [52, 59]. Por lo que, al no considerar este tercio de la población de paltos, es posible que la huella hídrica directa esté subdimensionada. Cabe destacar, que no se encontró información que estableciera las diferencias cuantitativas en el volumen de riego para poder realizar un balance hídrico considerando más etapas del proceso de los paltos.

En relación al marco de plantación escogido, corresponde a uno de los más utilizados para el cultivo de paltos y posee un nivel de producción de 10 [t_{palta}/ha]. En general, los predios de paltos en Chile tienen una producción entre las 7 a las 10 toneladas por hectárea cultivada, por lo que este alcance representa una realidad usual del cultivo de paltas en el país [51, 59].

Por último, cabe destacar que dentro del análisis de inventario de consumo de agua directa en el proceso de postcosecha pudo haberse considerado el uso de agua para el mantenimiento de los equipos o para el funcionamiento general de las instalaciones, por ejemplo, el uso de servicios higiénicos. Sin embargo, estos consumos se dejaron fuera de los alcances del estudio debido a la complejidad para estimar estos valores a partir de información bibliográfica.

5.4.2. Análisis de inventario

Con respecto a los supuestos para el balance hídrico, se consideran los datos de infiltración y escorrentía del agua dentro del mismo parámetro, ya que, para estimar sus valores por separado, era necesario realizar un análisis del tipo de suelo (granulometría y textura) para determinar el volumen de agua que se retiene como humedad.

Por otro lado, se considera el riego por microaspersión porque es el más usado en las plantaciones de paltos en la región, sin embargo, no es el de mayor nivel tecnológico [52, 59]. En el caso que Chile aumente la producción de paltas para poder exportar una mayor cantidad,

entonces es probable que se mejore la tecnología de riego y cambien las dimensiones de los marcos de plantación. Al modificar estas condiciones se debería desarrollar nuevamente el balance hídrico y el cálculo del factor de consumo.

Con respecto a la calidad de los datos ocupados para el balance hídrico cabe destacar que se trabajó con información de origen bibliográfico y no con datos medidos directamente en la zona de análisis, por lo mismo, se considera que el caudal de riego y la evapotranspiración de referencia pueden tener mayor precisión si se realizan las respectivas mediciones en el lugar de estudio. Además, estos datos bibliográficos no especifican las condiciones de medición ni los supuestos del cálculo, por lo que se desconoce el tipo de riego que analizaban y el método de cálculo de la evapotranspiración de referencia. Esta última puede determinarse a partir de la medición de la evapotranspiración de bandeja o de una estimación matemática considerando los parámetros climáticos de la zona de estudio [64].

Por último, con respecto al factor de consumo se obtuvo como resultado que se ocupan 876 [m^3/t_{palta}], debido al uso del agua destinada al riego. Existe un estudio del año 2013 que realiza una evaluación de la huella hídrica de la producción de palta basada en la *Water Footprint Network* que puede contrastarse con este resultado. Para la zona media de la cuenca del Río Aconcagua este estudio reporta un valor de 404 [m^3/t_{palta}] [65]. Por lo que, el resultado obtenido en este trabajo corresponde a más del doble comparándolo con el valor resultante del estudio para la misma zona de análisis. Sin embargo, hay que considerar que ambos resultados se lograron considerando metodologías diferentes.

5.4.3. Evaluación de impactos

En la Tabla 10 se observa que, para todas las cuencas, el resultado del indicador de huella de agua territorial es mayor a 1, lo que indica que la huella de la producción de paltas es insostenible en el tiempo en las principales cuencas hidrográficas de la región de Valparaíso. Sin embargo, al analizar cada escenario, se observa que el cultivo de paltas es menos sostenible en términos hídricos en la cuenca del Río Ligua al compararlo con los otros casos, ya que el indicador muestra que existe un consumo de agua 93 veces mayor que el caudal disponible para ese territorio, mientras que, para la cuenca del Río Aconcagua, este valor es de 3.

En el caso en que se decida cambiar las prácticas de consumo de agua en el cultivo de paltas, se destaca que existiría un cambio menos exigente para una producción ubicada en la cuenca del Río Aconcagua, ya que solo se necesitaría una reducción del 300% en el uso del recurso para esa zona. En cambio, para las otras cuencas, es posible que esta gestión se encuentre fuera de los márgenes factibles.

Considerando lo anterior, la solución más práctica para el resguardo de la seguridad hídrica en la región de Valparaíso corresponde a trasladar los cultivos de paltas a otras cuencas en las que esta actividad pueda ser sostenible en el tiempo.

Por otro lado, con respecto al método de evaluación de disponibilidad de agua, en la Tabla 10 se observa que el mayor consumo equivalente de agua mensual es el correspondiente a la cuenca del Río Ligua y el menor es el de la cuenca del Río Aconcagua. Esta diferencia se explica a partir del factor de caracterización, el cual busca corregir el consumo de una actividad según la realidad hídrica de la zona. De esta manera, se obtiene que el uso de agua en el cultivo de paltas se ve perjudicado para las cuencas del Río Petorca y Río Ligua, ya que se empeora en 8 veces y 22 veces, respectivamente, el consumo de agua de esta actividad. Por otro lado, para la cuenca del Río Aconcagua se favorece el uso del recurso, ya que se reduce en un 25% el consumo real para esta zona.

De todas formas, este método no entrega información relevante sobre el impacto territorial de una actividad dentro de la cuenca, ya que el resultado se basa en un factor de corrección obtenido a partir de la realidad hídrica del promedio mundial, sin entregar información que permita dar lineamientos para una gestión hídrica por parte de la actividad desarrollada. Por ejemplo, si la actividad está situada en una cuenca donde el factor de caracterización posee un valor mayor a 1, independiente de la gestión hídrica que realice esa actividad, siempre se verá empeorado su consumo de agua por encontrarse en una zona de vulnerabilidad hídrica.

Por otra parte, debido a que se trabajó con datos de fuentes bibliográficas, no es posible asegurar que el agua que ocupa el grupo de palteros HIGERPAL provenga de la cuenca hidrográfica Río La Ligua o si posee un origen distinto como, por ejemplo, aguas subterráneas, desaladas u otras. Por lo que este estudio no tendría validez en caso de que el agua proviniera de otra fuente.

Por último, dentro de las medidas que podría tomar el grupo HIGERPAL para mejorar su gestión del agua dentro de la cuenca se encuentran: mejorar el sistema de riego a uno más eficiente, buscar otras opciones para el origen del agua como, por ejemplo, agua desalada, u ocupar una especie de palto que demande menos agua. Estos cambios en las prácticas de consumo hídrico generarán modificaciones a los valores del indicador de huella de agua territorial, pudiendo transitar de un escenario insostenible a uno que sí sea sostenible en el tiempo. Mientras que, para el método de evaluación de disponibilidad, solo se apreciará una disminución en el consumo equivalente de agua mensual, pero el factor de caracterización seguirá siendo el mismo.

6. Reflexiones finales

Se considera que el indicador de huella de agua territorial posee una comprensión sencilla y una interpretación concreta, según lo analizado a partir de las características esperadas, los criterios de selección y de la interpretación de resultados del caso de estudio, por lo que este indicador sería el más apropiado de utilizar en una evaluación de impactos de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida al compararlo con los otros indicadores analizados en este trabajo. Las características que se destacan del indicador de huella de agua territorial son:

- Es específico para Chile, ya que desarrolla un análisis territorial a partir de los datos de las cuencas hidrográficas: disponibilidad de agua, cantidad poblacional y caudal ecológico.
- Logra caracterizar el consumo de agua de la actividad y su nivel de impacto dentro de la cuenca hidrográfica en la que se sitúa. Por ejemplo, en zonas de baja disponibilidad hídrica, el indicador refleja cuántas veces más se consume el agua con respecto a lo que se encuentra disponible y, mientras mayor sea el valor del indicador, más insostenible en el tiempo es el uso del recurso por parte de la actividad.
- El resultado obtenido es comprensible por sí mismo, por lo que no es necesario tener un punto de comparación para interpretarlo, en contraste con lo que ocurre con los otros indicadores planteados. Además, este resultado se encuentra directamente ligado a la realidad territorial, lo que puede facilitar la toma de decisiones en caso de realizar una gestión sobre los recursos hídricos.
- Busca resguardar, de manera teórica, el agua para las necesidades de las personas y de los ecosistemas, por lo que, si una actividad utiliza más agua de la se encuentra disponible, el indicador puede reflejar que se está sustrayendo el recurso destinado al ámbito social o al ambiental.

Por otro lado, se reflexiona sobre la definición teórica del indicador en base a dos perspectivas: la distribución geográfica del agua y la asignación del recurso para una actividad según el tamaño que esta posea. Con respecto a la primera, el indicador entrega un resultado basado en que la distribución del recurso es homogénea dentro de un territorio, sin embargo, en la realidad esto no suele ocurrir, ya que existe una facilidad en el acceso al recurso cuando el consumidor se encuentra próximo a una fuente de agua. Además, en el caso de que la fuente corresponda a un río, existe una mayor disponibilidad si el consumidor está situado en una zona cercana a dónde se este se origina, ya que poseerá un caudal mayor y el agua será de mejor calidad, en comparación con la zona en la que el río está próximo a la desembocadura. Por lo que, el resultado del indicador se puede adaptar mejor a la realidad territorial si, al momento de definirlo, se consideran las características geográficas que influyen sobre la distribución del agua dentro de un territorio.

Con respecto a la segunda perspectiva, se reflexiona que la asignación del recurso puede depender del tamaño que posea la actividad analizada. Si bien, al momento de calcular el uso específico de agua de una actividad, mostrado en la ecuación (16), se considera la superficie que ocupan sus instalaciones, la cual tiene asociada un flujo de agua disponible, puede darse el caso en que esta cantidad no sea suficiente para cubrir el consumo de una empresa grande. Para esta situación se pueden analizar dos opciones, la primera es que la actividad modifique sus condiciones de operación con el objetivo de consumir, a lo más, el agua que le corresponde según la superficie que ocupa. La otra opción correspondería a adaptar la definición del indicador para que considere el tamaño de una empresa al momento de asignar el flujo de agua del territorio en el que se encuentra la actividad. Para implementar esta última alternativa sería

necesario analizar todas las empresas que se sitúan en la misma localidad y clasificarlas según el tamaño que éstas posean para poder determinar un factor que pondere al indicado.

Se concluye que el indicador de huella de agua entrega un resultado basado en una distribución homogénea del agua en un territorio y en un consumo del recurso por parte de una actividad, ligado a la disponibilidad que existe en la superficie en la que esta se encuentra. Para la primera situación no existiría una asignación justa del agua, ya que habrá localidades que dispondrán de menos agua según su ubicación y puede darse el caso en que una actividad posee un consumo de agua sostenible en el tiempo, sin embargo, si en esa localidad existe realmente menos disponibilidad de agua que la estimada, entonces esa misma actividad debería ser insostenible en el tiempo. Por otro lado, se considera justa la asignación del agua según la superficie que ocupa una actividad, si bien, van a existir empresas que consuman mayor volumen de agua, éstas debiesen ajustar su producción para ocupar la cantidad de recurso asignada para ese territorio o desplazarse a otra localidad donde exista una mayor disponibilidad de agua.

Por último, con respecto al análisis territorial se plantean algunos aspectos que permitirían mejorar la calidad del indicador propuesto en la evaluación de impactos. Los cuales se señalan a continuación:

- Determinar la demanda hídrica de los ecosistemas a partir de un estudio exhaustivo de las necesidades de estos, en vez de ocupar la definición de caudal ecológico, ya que esto entregaría una comprensión más certera de las necesidades hídricas, lo que permitiría asegurar el agua suficiente para mantener los equilibrios naturales de los organismos que habitan la cuenca.
- Evaluar el indicador en una zona geográfica más reducida, por ejemplo, en una subdivisión de la cuenca hidrográfica, debido a que con esto se puede trabajar con información más específica de la localidad.
- A nivel nacional, se vuelve necesario contar con sistemas de obtención de datos de distintas fuentes de agua para poder realizar un correcto diagnóstico de los recursos hídricos de cada región y que, en base a estos, se pueda desarrollar una gestión informada en cada territorio.

7. Conclusiones

El indicador de huella de agua territorial se basa en realizar una distribución equitativa de los recursos hídricos y evaluar el impacto de una actividad a partir del caudal asignado a la superficie en la que se sitúan las instalaciones. Concretamente, cuantifica la cantidad de veces que un proceso utiliza agua, con respecto a lo que existe disponible en ese territorio.

Los principales atributos de este indicador son: (a) posee especificidad territorial, ya que diagnostica la situación hídrica de distintas localidades; (b) es físicamente interpretable, porque mide el nivel de déficit o superávit hídrico ligado al consumo de agua de una actividad; y (c) permite obtener conclusiones rápidas y concretas que facilitan la toma de decisiones para la gestión hídrica en un territorio.

Por otra parte, en este trabajo se generó una metodología de análisis territorial para representar la realidad hídrica de las cuencas hidrográficas de Chile. A partir de ella, se logró sintetizar la información necesaria para el cálculo del indicador de huella de agua territorial para las distintas zonas del país.

Con respecto al caso de estudio, se analizó el proceso de producción de paltas en la región de Valparaíso ocupando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida. Específicamente, se estudió al grupo de palteros HIGERPAL, quienes utilizan 876 [m^3] de agua por tonelada de palta cosechada. Al evaluar el indicador de huella de agua territorial se obtuvo que el consumo de agua es 93 veces mayor que la disponibilidad hídrica de la cuenca del Río Ligua, por lo que, se concluyó que la operación actual de la actividad es insostenible en el tiempo. A pesar de lo anterior, al estudiar los valores para las otras cuencas de la región se observó que la producción de paltas puede tener una huella de agua menor si la actividad se situara en otra zona y que, inclusive, esta huella podría gestionarse si la actividad se ubicara en la cuenca del Río Aconcagua.

A modo de resumen, el indicador de huella de agua territorial permite evaluar el impacto de una actividad por sí sola dentro de un territorio, sin necesidad de realizar comparaciones con otras entidades para determinar el nivel de impacto. A diferencia de lo que ocurre con otros indicadores como, por ejemplo, el método de evaluación de agua disponible.

Por otro lado, de la discusión sobre la definición del indicador se cuestiona el criterio para determinar el caudal ecológico, ya que este se define en base al caudal que posee un cuerpo de agua y se considera más apropiado que se determine a partir las necesidades hídricas del ecosistema. De la discusión sobre los resultados que entrega el indicador se destaca que se enfoca en resguardar la sostenibilidad hídrica tanto en el ámbito social y como en el medioambiental a nivel territorial, ya que este indicador permite que la actividad productiva evaluada sea capaz de evidenciar si el agua que están ocupando, en caso de ser más que la que existe disponible, puede afectar las necesidades hídricas de las personas o de los ecosistemas que habitan en su misma localidad.

Además, se evidencian las principales limitaciones que posee el indicador corresponden a que la distribución hídrica real dentro de un territorio es heterogénea y depende de la proximidad del consumidor con la fuente de agua y de la ubicación geográfica (Aguas arriba o aguas abajo) donde se esté extrayendo el recurso. Otra limitante es que, en el contexto nacional, solo fue posible evaluar las fuentes de aguas superficiales correspondientes a ríos, principalmente. Por lo que, se vuelve necesario poder caracterizar los cuerpos de aguas que no se analizaron en este trabajo, para obtener un resultado del indicador que sea íntegro con respecto a la realidad hídrica nacional.

Finalmente, se considera que existe potencial para poder implementar este indicador en planes de regulación hídrica a nivel nacional. Sin embargo, para lograr aquello, primero es necesario realizar una evaluación interdisciplinaria que valide la funcionalidad de este indicador, en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, para representar los impactos hídricos territoriales considerando el ámbito social y el medioambiental.

8. Bibliografía

- [1] UNESCO. 2018. Soluciones Basadas en La Naturaleza. 1–202 p. ISBN 9789233000582.
- [2] GORMAZ-CUEVAS, Daniela, RIFFO-RIVAS, Javiera, MONTASTRUC, Ludovic, BRÜNING-GONZÁLEZ, Mariana y DÍAZ-ALVARADO, Felipe A. 2021. A multi-objective optimization model to plan city-scale water systems with economic and environmental objectives: A case study in Santiago, Chile. *Journal of Cleaner Production* [en línea]. 279: 123737. ISSN 09596526. 10.1016/j.jclepro.2020.123737
- [3] UNESCO. 2018. Progresos en el nivel de estrés hídrico. 58 p. ISBN 9789251309889.
- [4] MADDOCKS, Andrew, YOUNG, Robert y REIG, Paul. Ranking the World's Most Water-Stressed Countries in 2040 | World Resources Institute [en línea]. <<https://www.wri.org/blog/2015/08/ranking-world-s-most-water-stressed-countries-2040>> 26. agosto 2015 [consulta: 15 junio 2020].
- [5] CASSELLA, Carly. Nearly 25% of The World's Population Faces a Water Crisis, And We Can't Ignore It [en línea]. <<https://www.sciencealert.com/17-countries-are-facing-extreme-water-stress-and-they-hold-a-quarter-of-the-world-s-population>> 7. agosto 2019 [consulta: 15 junio 2020].
- [6] MINISTERIO DE JUSTICIA. Código de Aguas [en línea]. <https://www.leychile.cl/Consulta/m/norma_plana?idNorma=5605&org=cdm> 13. agosto 1981 [consulta: 2 julio 2020].
- [7] MOP. 2012. Estrategia nacional de recursos hídricos 2012-2025 [en línea]. : 40. <http://www.mop.cl/Documents/ENRH_2013_OK.pdf>
- [8] SANIBAÑEZ, Fernando. 2017. El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. *Agricultura chilena, reflexiones y desafíos al 2030* [en línea]. : 147–178. <<https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/cambioClim12parte.pdf>>
- [9] ESCENARIOS HÍDRICOS 2030 - EH2030. 2019. Transición Hídrica: El futuro del agua en Chile. Fundación Chile [en línea]. 230 p. ISBN 9789568200497. <<https://www.escenarioshidricos.cl/wp-content/uploads/2019/07/FUTURO-DEL-AGUA.pdf>>
- [10] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Plan de adaptación para los recursos hídricos – MMA [en línea]. <<https://mma.gob.cl/cambio-climatico/plan-de-adaptacion-para-los-recursos-hidricos/>> 2020 [consulta: 4 julio 2020].
- [11] FUNDACIÓN CHILE. 2019. Escenarios Hídricos 2030: MAS Seguridad Hídrica [en línea]. 1–476 p. ISBN 9788578110796. 10.1017/CBO9781107415324.004
- [12] MUÑOZ, Ariel, KLOCK-BARRÍA, Karin, ÁLVAREZ-GARRETON, Camila, AGUILERA-BETTI, Isabella, GONZÁLEZ-REYES, Álvaro, LASTRA, José A, CHÁVEZ, Roberto O, BARRÍA, Pilar, CHRISTIE, Duncan y ROJAS-BADILLA CARLOS LEQUESNE, Moises. 2020. Crisis hídrica en la cuenca de Petorca: una combinación entre la megasequía y el manejo del agua. *Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia* [en línea]. <www.cr2.cl>
- [13] FAÚNDEZ, Rodrigo y MUNDACA, Rodrigo. 2019. Situación del agua en la Región de Valparaíso: Encuentros participativos por la recuperación democrática del agua. : 1–27.

- [14] Petorca: Habitantes deben vivir con 50 litros diarios de agua debido a severa sequía [en línea]. <<https://www.infinita.cl/noticias/2019/06/20/petorca-habitantes-deben-vivir-con-50-litros-diarios-de-agua-debido-a-severa-sequia.html>> 2019 [consulta: 15 marzo 2021].
- [15] MCGLADE, Jacqueline. 2012. Measuring Water use in a Green Economy United Nations Environment Programme. ISBN 9789280732207.
- [16] LOVARELLI, Daniela, BACENETTI, Jacopo y FIALA, Marco. 2016. Water Footprint of crop productions: A review. *Science of the Total Environment* [en línea]. 548–549: 236–251. ISSN 18791026. 10.1016/j.scitotenv.2016.01.022
- [17] CHENOWETH, J., HADJIKAKOU, M. y ZOUMIDES, C. 2014. Quantifying the human impact on water resources: A critical review of the water footprint concept. *Hydrology and Earth System Sciences* [en línea]. 18(6): 2325–2342. ISSN 16077938. 10.5194/hess-18-2325-2014
- [18] HOEKSTRA, Arjen, CHAPAGAIN, Ashok, ALDAYA, Maite y MEKONNEN, Mesfin. 2012. The Water Footprint Assessment Manual. The Water Footprint Assessment Manual [en línea]. 10.4324/9781849775526
- [19] WATER USE IN LIFE CYCLE ASSESSMENT. What is AWARE? - WULCA [en línea]. <<https://wulca-waterlca.org/aware/what-is-aware/>> [consulta: 26 abril 2021].
- [20] FUSTER, Rodrigo, GONZÁLEZ, Luis, MORALES, Luis, CERDA, Claudia, HERNÁNDEZ, Jaime, SOTOMAYOR, Diego, LILLO, GLoria, GONZÁLES, Meliza, ESCOBAR, Cristian, MALDONADO, Matías y VALDEBENITO, Julio. 2009. Estudio “Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Chile”. Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Universidad de Chile.
- [21] CARRIÓN, Marta. ¿Cuánta agua hay en el planeta? - EL ÁGORA DIARIO [en línea]. <<https://www.elagoradiario.com/agorapedia/cuanta-agua-planeta/>> 20. marzo 2020 [consulta: 11 enero 2021].
- [22] ORDOÑEZ, J.J. 2011. Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas - Acuíferos. Sociedad Geografica de Lima. : 2–44.
- [23] MINISTERIO DEL INTERIOR Y SEGURIDAD PÚBLICA. 2015. Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015. Gobierno de Chile. : 104.
- [24] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 2014. Environmental management — Water footprint — Principles, requirements and guidelines (ISO 14.046).
- [25] Aquabook [en línea]. <http://aquabook.agua.gob.ar/377_0> [consulta: 11 enero 2021].
- [26] DGA. 2016. Atlas del Agua. Atlas del Agua Chile 2016. 1(1): 1–24.
- [27] DGA, Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas. 2014. Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel Nacional. Gobierno de Chile. : 37.
- [28] PROVOSTE, Yasna. sin fecha. Cuaderno 1: Zonificación para la planificación territorial.
- [29] FUNDACIÓN CHILE y AGUALIMPIA. 2016. Manual de Aplicacion para evaluacion

- de la huella hídrica norma iso 14046 [en línea]. : 112. <<https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/manual-aplicacion-iso-14-046-suizagua-1.pdf>>
- [30] COLÓN, Joan y ARENA, Alejandro. 2016. Guías metodológicas : análisis de ciclo de vida y huella hídrica [en línea]. (September): 54. 10.13140/RG.2.2.28162.58563
- [31] MARTINEZ, Andres, CHARGOY, Juan Pablo, PUERTO, Maly, SUPPEN, Nydia y ROJAS, Diana. 2016. Huella de Agua (ISO 14046) en América Latina Análisis y recomendaciones para una coherencia regional. Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable CADIS, Embajada de Suiza en Colombia, Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo COSUDE [en línea]. (Iso 14046): 90. <https://www.shareweb.ch/site/Suiz-Agua-Colombia/Documents/Huella_Agua_ISO_14046_America_Latina.pdf>
- [32] HÉLIAS, Arnaud. 2020. Comments on the international consensus model for the water scarcity footprint (AWARE) and proposal for an improvement. Science of the Total Environment [en línea]. 709: 136189. ISSN 18791026. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136189>>
- [33] BOULAY, Anne Marie, BULLE, Cecile, DESCHÊNES, Louise y MARGNI, Manuele. 2011. LCA Characterisation of Freshwater Use on Human Health and Through Compensation. Towards Life Cycle Sustainability Management [en línea]. : 193–204. DOI 10.1007/978-94-007-1899-9
- [34] BOULAY, Anne Marie, BOUCHARD, Christian, BULLE, Cecile, DESCHÊNES, Louise y MARGNI, Manuele. 2011. Categorizing water for LCA inventory. International Journal of Life Cycle Assessment [en línea]. 16(7): 639–651. ISSN 09483349. 10.1007/s11367-011-0300-z
- [35] VALENZUELA-VENEGAS, Guillermo, SALGADO, J. Cristian y DÍAZ-ALVARADO, Felipe A. 2016. Sustainability indicators for the assessment of eco-industrial parks: classification and criteria for selection. Journal of Cleaner Production [en línea]. 133: 99–116. ISSN 09596526. 10.1016/j.jclepro.2016.05.113
- [36] DGA-MOP. 2008. Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos. : 147.
- [37] Hidrología - Sistema Interconectado Central [en línea]. <<https://sic.coordinador.cl/informes-y-documentos/hidrologia/>> [consulta: 18 enero 2021].
- [38] ALVAREZ-GARRETON, Camila, MENDOZA, Pablo A., PABLO BOISIER, Juan, ADDOR, Nans, GALLEGUILLOS, Mauricio, ZAMBRANO-BIGIARINI, Mauricio, LARA, Antonio, PUELMA, Cristóbal, CORTES, Gonzalo, GARREAUD, Rene, MCPHEE, James y AYALA, Alvaro. 2018. The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. Hydrology and Earth System Sciences [en línea]. 22(11): 5817–5846. ISSN 16077938. 10.5194/hess-22-5817-2018
- [39] SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS SANITARIOS DE LAS NACIONES UNIDAS. sin fecha. El por qué de un consumo responsable. : 1–44.
- [40] GEONODE CEDEUS. Cuencas de Chile y su poblacion - 2017 — GeoNode Cedeus [en línea]. <http://datos.cedeus.cl/layers/geonode:cuencas_bna_pob> 2020 [consulta: 18

- diciembre 2020].
- [41] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. Resultados CENSO 2017 [en línea]. <<http://resultados.censo2017.cl/Home/Download>> [consulta: 2 diciembre 2020].
- [42] BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. 2016. Concepto , normativa asociada y críticas al establecimiento del Caudal Ecológico en Chile. : 1–14.
- [43] ARRAU, Luis. 2010. Curso de Ingeniería de Riego. Apuntes de Clases. Curso: Proyecto de Ingeniería de Riego.
- [44] SUBSECRETARIA DE DESARROLLO REGIONAL Y ADMINISTRATIVO (SUBDERE). 2013. Guía Análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial. 43 p. ISBN 9789568468422.
- [45] MIJARES, Javier Aparicio y CONTRERAS, Jaqueline Lafragua. 2006. Evaluación de los recursos hídricos Elaboración del balance hídrico integrado por Evaluación de los recursos hídricos Elaboración del balance hídrico integrado por. 95 p. ISBN 9290890908.
- [46] Aqueduct Water Risk Atlas [en línea]. <https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/#/?advanced=false&basemap=hydro&indicator=w_awr_def_tot_cat&lat=-39.01406231413387&lng=-71.4199197292328&mapMode=view&month=1&opacity=0.5&ponderation=DEF&predefined=false&projection=absolute&scenario=optimistic&scope=baseline&timeScale=annual&year=baseline&zoom=4> [consulta: 15 junio 2020].
- [47] HERRERA, Felipe. sin fecha. Capítulo 2 – Estadística básica aplicada. : 1–33.
- [48] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS. 2018. ANUARIO DE ESTADÍSTICAS VITALES.
- [49] DATOS MACRO. Chile - Inmigración 2019 | datosmacro.com [en línea]. <<https://datosmacro.expansion.com/demografia/migracion/inmigracion/chile>> [consulta: 23 enero 2021].
- [50] BAEZA, Eduardo. 2017. Cambio climático y efectos actuales y potenciales sobre los recursos Eduardo Baeza Gómez.
- [51] INSTITUTO DE DESARROLLO AGROPECUARIO. 2005. Paltas, producción y mercado.
- [52] CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES. 2017. Principales resultados catastro frutícola región de Valparaíso. : 28–164.
- [53] LOVATT, Carol. Producción alternada o añerismo en paltos Hass [en línea]. <<https://www.redagricola.com/cl/produccion-alternada-o-anerismo-en-paltos-hass/>> septiembre 2019 [consulta: 10 febrero 2021].
- [54] SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. ¿Qué es la poscosecha y por qué es importante? | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx [en línea]. <<https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/que-es-la-poscosecha-y-por-que-es-importante>> 14. noviembre 2019 [consulta: 9 junio 2021].

- [55] AIGUASOL y PIPARTNER. 2017. Informe final. Análisis del sector de Packing e identificación de posibilidades para ERNC.
- [56] PALTA-HASS. Manipulación, patología y tratamientos poscosecha de Palta. | Palta Hass Chile [en línea]. <<http://www.paltahass.cl/noticias-palta/25/07/2019/manipulacion-patologia-y-tratamientos-poscosecha-de-palta/>> 25. julio 2019 [consulta: 9 junio 2021].
- [57] LEMUS, Gamalier, RERREYRA, Raúl, GIL, Pilar, MALDONADO, Patricio, TOLEDO, Carlos, BARRERA, Cristian y CELEDON, Jose M. 2005. El Cultivo del Palto. Boletín INIA. 129: 81.
- [58] CARDEMIL, Gustavo Marcos. 1999. Aproximación a los requerimientos hídricos del Palto Hass para la provincia de Quillota [en línea]. <http://www.avocadosource.com/papers/Chile_Papers_A-Z/A-B-C/CardemilGustavo1999.pdf>
- [59] SALVO, Jaime, TORRES, Andrea, OLIVARES, Natalia, RIQUELME, Jorge, LERIS, Luis, RODRÍGUEZ, Fernando y ABARCA, Patricio. 2017. Manual del cultivo del palto. Boletín INIA. 13.
- [60] BECERRA, Cristian y KLEIS, Henning. 2003. Análisis de la Cadena Productiva de la Palta en la provincia de Petorca, V Región de Valparaíso, Chile.
- [61] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS - DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Escasez Hídrica en la Región de Valparaíso [en línea]. <<https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=677>> 2020 [consulta: 3 marzo 2021].
- [62] MUNDOAGRO. Estas son las regiones productoras de palta en Chile [en línea]. <<https://www.mundoagro.cl/estas-son-las-regiones-productoras-de-palta-en-chile/>> 2014 [consulta: 3 marzo 2021].
- [63] CARRERE, Michelle. Chile: la expansión de paltos continúa pese a la sequía [en línea]. <<https://es.mongabay.com/2020/01/chile-expansion-de-paltos-sequia/>> [consulta: 3 marzo 2021].
- [64] ALLEN, Richard, PEREIRA, Luis, RAES, Dirk y SMITH, Martin. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- [65] VILLAVICENCIO, Abelardo, TAPIA, Francisco, OSORIO, Alfonso, SELLÉS VAN SCHOUWEN, Gabriel, FERREYRA, Raúl, ANTÚNEZ, Alejandro, FELMER, Sofía, URIBE, Hamil, SALAZAR, Francisco, ELIZALDE, Hernán, MARTÍNEZ-LAGOS, Josué, POBLETE, Rodolfo, PÉREZ, Alexis, RIQUELME, Paula, RIQUELME, Felipe y CAMPOS, Cristóbal. 2013. Determinación de la huella del agua y estrategias de manejo de recursos hídricos. Serie Actas INIA. 50(Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Intihuasi, La Serena, Chile.): 211.
- [66] CENTER FOR CLIMATE AND RESILIENCE RESEARCH. Datos de Precipitación | Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia - CR2 [en línea]. <<http://www.cr2.cl/datos-de-precipitacion/>> [consulta: 15 febrero 2021].

9. Anexos

Anexo A. Descripción de los usuarios en la huella de disponibilidad de agua

En la Tabla A1 se detallan las distintas categorías de usuarios del agua y su definición para el método de huella de disponibilidad de agua [34].

Tabla A1. Tipos de usuarios del agua [34].

Usuario	Definición
Doméstico 1	Usuario doméstico que no realiza ningún tratamiento o una simple desinfección química del 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 un 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, desalación, etc.) o desalación al agua antes de usar.
Agrícola 1	Agricultura que requiere agua de riego de buena calidad.
Agrícola 2	Agricultura que solo requiere agua de riego de mala calidad.
Pesquería	Acuicultura de agua dulce y captura de peces.
Industria	Usuario industrial (fabricante) que extrae el agua disponible y la trata al nivel requerido.
Refrigeración	Agua de refrigeración de un solo paso para la producción de energía.
Recreacional	Actividades recreativas como natación y deportes acuáticos.
Transporte	Transporte de mercancías por aguas interiores.
Energía Hidroeléctrica	Producción hidroeléctrica

Anexo B. Implementación de la metodología de análisis territorial

Para calcular la disponibilidad hídrica para las cuencas hidrográficas se ocupó la base de datos de CAMELS-CL que posee registros de los caudales diarios desde el 01-01-1913 hasta el 09-03-2018 [38].

A partir de la información disponible en la carpeta “Archivos y código de programación”, se trabajó con el programa *Python* para acotar los datos considerando solo el periodo desde el 01-01-1993 hasta el 31-12-2017. Posteriormente, el programa calcula el promedio de los caudales para las diferentes estaciones de medición con el objetivo de obtener un dato anual para cada microcuenca.

Teniendo en cuenta que una microcuenca es la unidad de caudal que aporta agua a una subcuenca, entonces se realiza el cálculo del caudal de la subcuenca a partir de la sumatoria de los caudales de todas las microcuencas que la abastecen, como se presenta a continuación:

$$\text{Caudal subcuenca} = \sum_i \text{caudal microcuenca}_i \quad (25)$$

Por otra parte, la subcuenca se define como la unidad de caudal que aporta agua a una cuenca, entonces el caudal de la cuenca hidrográfica se realiza a partir de la sumatoria de los caudales de todas las subcuencas pertenecientes a esa cuenca, como se presenta a continuación:

$$\text{Caudal cuenca} = \sum_i \text{caudal subcuenca}_i \quad (26)$$

Finalmente, los datos calculados anteriormente se guardan en el archivo *Excel* “Disponibilidad hídrica.xlsx”, organizando esta información en cinco hojas distintas:

- “1 – Caudales diarios”: caudales diarios para el periodo desde 1993 hasta 2017.
- “2 – Estación medición”: promedios de caudales anuales por estación de medición.
- “3 – Microcuencas”: caudales anuales por cada microcuenca.
- “4 – Subcuencas”: caudales anuales por cada subcuenca.
- “5 – Cuencas”: caudales anuales por cada cuenca.

El detalle del código ejecutado en *Python* se muestra a continuación:

```
1. # -*- coding: utf-8 -*-
2. """
3. Created on Sat Jan 9 12:00:58 2021
4.
5. @author: Andrea Montenegro Araneda
6. """
7.
8. """ Importar bibliotecas
9. import pandas as pd
10.
11.
12. """ Funciones necesarias
13. #Funcion para agrupar por código las estaciones de medicion, las subcuencas y las
    cuencas
14. def agrupar_por_codigo(df):
15.     columnas = df.columns
16.     n = 0
17.     lista_de_listas = []
18.     lista_de_listas.append([])
19.     k = 0
20.
```

```

21.     while n < len(columnas)-1:
22.
23.         if columnas[n][:-1] == columnas[n+1][:-1]: #Si soy igual a la siguiente agrego
la siguiente a mi lista
24.             lista_de_listas[k].append(columnas[n+1])
25.         else: #Si no soy igual, la agrego a otra
26.             lista_de_listas.append([])
27.             k = k+1
28.             lista_de_listas[k].append(columnas[n+1])
29.         #Avanzar en el ciclo
30.         n = n+1
31.
32.     return lista_de_listas
33.
34.
35. """ Importar y ordenar data
36. print('Importando la data')
37.
38. data = pd.read_csv('2_CAMELScl_streamflow_m3s.txt', sep = '\t', low_memory=(False))
39.
40. #Cambiar el titulo de la data por la fecha
41. data = data.rename(columns = {'gauge_id': 'fecha'})
42.
43. #Pasar las fechas a formato fecha
44. data['fecha'] = pd.to_datetime(data['fecha'])
45.
46.
47. #Acotar por fechas
48. print('Acotando la data por fechas')
49. #Definir fecha inicial para acotar la data
50. fecha_inicial = pd.Timestamp(year=1993, month=1, day =1, hour=0) #Desde 1 de enero de
1993
51.
52. #Definir fecha final para acotar la data
53. fecha_final = pd.Timestamp(year=2018, month=1, day =1, hour=0) #Hasta 31 diciembre de
2017
54.
55. #Acotamos sobre el limite inferior de la fecha
56. data = data.loc[data['fecha'] >= fecha_inicial]
57.
58. #Acotar sobre el limite superior de la fecha
59. data = data.loc[data['fecha'] < fecha_final]
60.
61.
62. #Pasar el formato de la data desde string a numero
63. columnas = data.columns
64.
65. for i in columnas[1:]:
66.     data[i] = pd.to_numeric(data[i], errors='coerce')
67.
68.
69. """ Calcular promedio de las estaciones de medición por año
70.
71. print('Calculando los promedios anuales por estación de medición')
72.
73. #Valor inicial para el ciclo while
74. j = fecha_inicial
75.
76. #Paso del ciclo while
77. deltaT = pd.offsets.DateOffset(years=1)
78.
79. #Variable auxiliar para guardar la info
80. lista_data_fechas = []
81. lista_promedios = []
82.
83. #Ciclo para guardar la data
84. while j < fecha_final:
85.     #crear un sub data frame con la data del año en que corresponde
86.     aux_data = data.loc[data['fecha'] >= j]
87.     aux_data = aux_data.loc[aux_data['fecha'] < (j+deltaT) ]
88.
89.     #Calcular los promedios de los flujos
90.     prom_flujos = aux_data.mean()
91.
92.     #Agregarles la fecha a la serie resultante del promedio

```

```

93.     prom_con_fecha = pd.Series([j], index = ['fecha'])
94.
95.     prom_con_fecha = prom_con_fecha.append(prom_flujos)
96.
97.     #Guardar la data en listas de dataframes
98.     lista_data_fechas.append(aux_data)
99.     lista_promedios.append(prom_con_fecha)
100.
101.         #Avanzar el ciclo while
102.         j = j + deltaT
103.
104.
105.     #Crear un solo dataframe con los promedios de los flujos por estación de
medición
106.     #Caso base para el dataframe
107.     df_estaciones = lista_promedios[0].to_frame().transpose()
108.
109.     i = 1
110.     while i <= len(lista_promedios[1:]):
111.         #Crear variable auxiliar para guardar la data del año correspondiente
112.         aux_promedios = lista_promedios[i].to_frame().transpose()
113.
114.         #agregar la data al dataframe completo
115.         df_estaciones = pd.concat([df_estaciones,aux_promedios])
116.
117.         #Avanzar con el ciclo while
118.         i = i+1
119.
120.
121.     %% Calcular promedios y eliminar las filas que están duplicadas
122.
123.     print('Calculando los promedios anuales por microcuenca')
124.
125.     estaciones = agrupar_por_codigo(df_estaciones)[1:] #El [1:] es porque el primer
valor estaba vacío
126.     df_microcuencas = df_estaciones
127.
128.     for m in estaciones:
129.         #Columnas que seran promediadas
130.         col = df_estaciones[m]
131.         #Definimos el nombre de la nueva columna promediada
132.         nombre_colom_prom = m[0][:-3]
133.
134.         #Calcular la columna promediada
135.         col_prom = col.mean(axis=1)
136.         #Agregamos la columna al dataframe
137.         df_microcuencas[nombre_colom_prom] = col_prom
138.
139.         #Eliminar columnas que se promediaron
140.         df_microcuencas = df_microcuencas.drop(m, axis=1)
141.
142.
143.     %% Calcular sumatoria de caudales anuales para la subcuenca
144.
145.     print('Calculando la sumatoria de los caudales anuales para la subcuenca')
146.
147.     subcuencas = agrupar_por_codigo(df_microcuencas)[1:] #El [1:] es porque el
primer valor estaba vacío
148.     df_subcuencas = df_microcuencas
149.
150.     for m in subcuencas:
151.         #Columnas que seran sumadas
152.         col_sub = df_microcuencas[m]
153.         #Definimos el nombre de la columna de la sumatoria
154.         nombre_col_sum_sub = m[0][:-1]
155.
156.         #Calcular las columnas sumadas
157.         col_sum_sub = col_sub.sum(axis=1)
158.         #Agregamos la columna al dataframe
159.         df_subcuencas[nombre_col_sum_sub] = col_sum_sub
160.
161.         #Eliminamos las columnas que se sumaron
162.         df_subcuencas = df_subcuencas.drop(m, axis=1)
163.

```

```

164.     %% Calcular sumatoria de caudales anuales para la cuenca
165.
166.     print('Calculando la sumatoria de los caudales anuales para la cuenca')
167.
168.     cuencas = agrupar_por_codigo(df_subcuencas)[1:] #El [1:] es porque el primer
valor estaba vacío
169.     df_cuencas = df_subcuencas
170.
171.     for m in cuencas:
172.         #Columnas que seran sumadas
173.         col_cuen = df_subcuencas[m]
174.         #Definimos el nombre de la columna de la sumatoria
175.         nombre_col_sum_cuen = m[0][:-1]
176.
177.         #Calcular las columnas sumadas
178.         col_sum_cuen = col_cuen.sum(axis=1)
179.         #Agregamos la columna al dataframe
180.         df_cuencas[nombre_col_sum_cuen] = col_sum_cuen
181.
182.         #Eliminamos las columnas que se sumaron
183.         df_cuencas = df_cuencas.drop(m, axis=1)
184.
185.
186.     %% Guardar la info en formato excel
187.     print('Guardando la data en Excel')
188.     #Nombre del archivo de salida
189.     Nombre_archivo_salida = 'Disponibilidad Hidrica.xlsx'
190.     #Crear el archivo excel para almacenar la data
191.     excel_salida = pd.ExcelWriter(Nombre_archivo_salida)
192.
193.     #Creamos las distintas hojas del producto
194.     df_cuencas.to_excel(excel_salida, '5 - Cuencas')
195.     df_subcuencas.to_excel(excel_salida, '4 - Subcuencas')
196.     df_microcuencas.to_excel(excel_salida, '3 - Microcuencas')
197.     df_estaciones.to_excel(excel_salida, '2 - Estación medición')
198.     data.to_excel(excel_salida, '1 - Caudales diarios')
199.
200.     #Guardar el archivo excel
201.     excel_salida.save()
202.

```

Se continuó el trabajo ocupando el archivo *Excel* “Caracterización Hídrica Cuencas.xlsx”. Este se basa en el archivo *Excel* “Disponibilidad hídrica.xlsx”, por lo que, a continuación, se detallará de la hoja 6 en adelante.

En la hoja “6 – Cuencas por región” se agruparon las cuencas según región político-administrativa y se calculó el caudal anual correspondiente a cada región a partir del porcentaje de la superficie de la cuenca presente en cada una. Para esto se consideró el supuesto de que la distribución del caudal es homogénea en toda la cuenca. Además, se realiza una proyección hasta el año 2021 ocupando la media móvil simple para los 5 años anteriores.

En la hoja “7 – Consumo domiciliario” se registra la información del CENSO 2017 agrupada según las distintas cuencas hidrográficas y se calcula el consumo domiciliario que existe en cada una de ellas a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo domiciliario} \left[\frac{m^3}{s} \right] = 170 \left[\frac{L}{p \cdot día} \right] \cdot N [p] \cdot \frac{1}{1.000} \left[\frac{m^3}{L} \right] \cdot \frac{1}{86.400} \left[\frac{día}{s} \right] \quad (27)$$

Donde N corresponde a la cantidad de población que existe en una cuenca hidrográfica.

En la hoja “8 – Caudal ecológico” se calcula el caudal ecológico mínimo según el criterio que considera un caudal igual al 10% del caudal medio anual (este dato se encuentra registrado en la hoja “5 – Cuencas”). Además, se realiza una proyección hasta el año 2021 ocupando la media móvil simple para los 5 años anteriores.

En la hoja “9 – Disp. Hídrica remanente” se calcula la disponibilidad hídrica remanente para el periodo 2018 – 2021, considerando las proyecciones del caudal disponible y del caudal ecológico, y asumiendo que el consumo domiciliario es constante en el tiempo. Además, se grafica la disponibilidad hídrica remanente que existe en las distintas cuencas hidrográficas para los cuatro años analizados.

En la hoja “10 – AWARE” se calcula el inverso del indicador de disponibilidad menos demanda (*AMD*) para cada una de las cuencas hidrográficas. Además, se grafica la disponibilidad hídrica remanente para las macrozonas norte, centro y sur.

En la hoja “11 – Resumen estadístico” se calcula la desviación estándar considerando un periodo de 25 años y uno de los últimos 5 años para cada una de las cuencas hidrográficas.

En la hoja “12 – Resumen caudal 2020” se realiza un recuento de la información obtenida para el año 2020 sobre el caudal disponible, el consumo domiciliario y el caudal ecológico. Además, se calcula el porcentaje del caudal disponible que es destinado al consumo domiciliario. Por último, se grafican las disponibilidades de caudal según el nivel que estos posean: bajo, medio-bajo, medio y alto.

En la hoja “13 – Resumen indicador 2020” se agrupa la información de la superficie de la cuenca, disponibilidad de agua remanente, inverso del indicador de disponibilidad menos demanda (*AMD*) y factor de caracterización del método de evaluación de agua disponible (*AWARE*). Los dos últimos ítems se obtuvieron según lo enunciado en el apartado 3.4.3.

Anexo C. Resumen estadístico de los resultados del análisis territorial

En la Tabla A2 se presenta la desviación estándar de los datos históricos de caudal de las cuencas hidrográficas, considerando dos periodos de análisis: uno de 25 años (1993 – 2017) y uno de 5 años (2013 – 2017).

Tabla A2. Desviación estándar de los datos de cada cuenca hidrológica, considerando un periodo histórico de 25 años (1993 - 2017) y uno de 5 años (2013 - 2017).

Código cuenca	Cuenca	Desviación estándar (25 años)	Desviación estándar (5 años)
10	Altiplánicas	1,44	0,46
12	Rio Lluta	5,73	5,47
13	Rio San Jose	2,07	0,56
14	Costeras R. San Jose-Q. Camarones	0,07	0,06
15	Q. Rio Camarones	0,47	0,13
16	Costeras R. Camarones-Pampa del Tamarugal	0,28	0,29
17	Pampa del Tamarugal	0,16	0,15
21	Rio Loa	1,65	1,13
25	Salar de Atacama	0,79	0,34
30	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacifico	0,20	0,26
34	R. Copiapó	5,16	6,69
38	Rio Huasco	15,32	15,82
43	Rio Elqui	23,67	19,21
44	Costeras entre Elqui y Limarí	0,22	0,01
45	Rio Limarí	45,27	33,21
47	Rio Choapa	37,14	17,88
48	Costeras entre R. Choapa y R. Quilimari	0,20	0,01
51	Rio Petorca	8,46	0,99
52	Rio Ligua	3,05	0,33
53	Costeras Ligua-Aconcagua	0,18	0,03
54	Rio Aconcagua	35,93	21,01
57	Rio Maipo	152,78	71,06
60	Rio Rapel	155,19	74,43
61	Costeras Rapel-E. Nilahue	9,20	2,47
71	Rio Mataquito	110,48	31,35
72	Costeras Mataquito-Maule	1,28	2,26
73	Rio Maule	568,76	284,81
81	Rio Itata	360,81	315,14
82	Costeras e Islas entre Rio Itata y Rio Bio-Bio	3,85	4,09
83	Rio Bio-Bio	804,17	827,22
87	Rio Lebu	16,39	34,74
88	Costeras Lebu-Paicavi	4,46	1,88
89	Costeras e Islas entre R. Paicavi y Limite Región	7,14	6,39
91	Rio Imperial	226,43	147,46
94	Rio Toltén	271,83	163,55
101	Rio Valdivia	261,89	242,49
103	Rio Bueno	322,26	266,29

A partir de este análisis estadístico, mostrado en la Tabla A2, se refuerza la decisión metodológica de realizar una extrapolación de los datos considerando la media móvil de los últimos 5 años de estudio, ya que con este se demuestra que existe una menor variación del caudal al considerar un tiempo de análisis más reciente y acotado. Sin embargo, la medición de la desviación estándar se puede mejorar al realizar un filtrado de las microcuencas que no posean información suficiente para los años 2013 al 2017, ya que, como el caudal de la cuenca hidrográfica proviene de sumatoria de las microcuencas, al no presentar datos en uno o más años dentro de este periodo existen variaciones en el cálculo de caudal, lo que resulta en una mayor desviación estándar y en una extrapolación de menor precisión.

Por otra parte, las cuencas hidrológicas que presentan mayor desviación estándar corresponden a las mismas que poseen mayores caudales y que se encuentran en las zonas de mayor disponibilidad hídrica. Por lo mismo, aunque presenten una menor precisión en la extrapolación, no correspondería a una variable determinante al momento de evaluar el riesgo de la seguridad hídrica de la zona.

Anexo D. Resumen de los resultados del análisis territorial para el año 2020

En la Tabla A3 se muestran los datos de superficie, caudal disponible, consumo domiciliario y caudal ecológico estimados para el año 2020 para cada cuenca hidrográfica.

Tabla A3. Superficie, caudal disponible, consumo domiciliario y caudal ecológico por cuenca hidrológica para el año 2020.

Código cuenca	Cuenca	Superficie [km ²]	Caudal disponible [m ³ /s]	Consumo domiciliario [m ³ /s]	Caudal ecológico [m ³ /s]
10	Altiplánicas	11.369	2,34	0,01	0,23
12	Rio Lluta	3.437	6,75	0,01	0,68
13	Rio San Jose	3.194	0,95	0,42	0,09
14	Costeras R. San Jose-Q. Camarones	2.676	0,15	0,01	0,02
15	Q. Rio Camarones	4.682	0,49	0,00	0,05
16	Costeras R. Camarones-Pampa del Tamarugal	3.806	0,53	0,00	0,05
17	Pampa del Tamarugal	17.354	0,12	0,04	0,01
21	Rio Loa	33.083	5,84	0,34	0,58
25	Salar de Atacama	15.577	0,19	0,02	0,02
30	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacifico	15.619	0,98	0,00	0,10
34	R. Copiapó	18.704	8,18	0,33	0,82
38	Rio Huasco	9.814	24,34	0,14	2,43
43	Rio Elqui	9.826	32,77	0,39	3,28
44	Costeras entre Elqui y Limarí	2.300	0,01	0,57	0,00
45	Rio Limarí	11.696	46,50	0,32	4,65
47	Rio Choapa	7.654	31,94	0,13	3,19
48	Costeras entre R. Choapa y R. Quilimari	1.293	0,02	0,03	0,00
51	Rio Petorca	1.988	1,49	0,03	0,15
52	Rio Ligua	1.980	0,64	0,10	0,06
53	Costeras Ligua-Aconcagua	851	0,05	0,12	0,01
54	Rio Aconcagua	7.334	58,36	1,13	5,84
57	Rio Maipo	15.274	327,72	14,16	1,31
60	Río Rapel	13.676	333,53	1,67	33,35
61	Costeras Rapel-E. Nilahue	3.397	2,70	0,08	0,27
71	Rio Mataquito	6.332	183,01	0,55	18,30
72	Costeras Mataquito-Maule	1.088	1,60	0,01	0,16
73	Rio Maule	21.054	1.042,37	1,45	104,24
81	Rio Itata	11.327	730,69	0,90	73,07
82	Costeras e Islas entre Rio Itata y Rio Bio-Bio	1.503	9,81	0,84	0,98
83	Rio Bio-Bio	24.371	2200,60	1,73	220,06
87	Rio Lebu	858	12,28	0,10	1,23
88	Costeras Lebu-Paicavi	1.696	11,01	0,11	1,10
89	Costeras e Islas entre R. Paicavi y Limite Región	1.391	11,82	0,03	1,18
91	Rio Imperial	12.669	562,14	1,21	56,21
94	Rio Toltén	8.449	1.228,98	0,35	122,90
101	Rio Valdivia	10.245	864,57	0,60	86,46
103	Rio Bueno	15.367	516,46	0,33	51,65

En la Tabla A4 se presenta el porcentaje del caudal de la cuenca hidrográfica que se destina al consumo domiciliario para los datos estimados para el año 2020.

Tabla A4. Porcentaje del caudal de la cuenca hidrológica que se destina al consumo domiciliario para el año 2020.

Código cuenca	Cuenca	Porcentaje del caudal destinado al consumo domiciliario
10	Altiplánicas	0,5%
12	Río Lluta	0,1%
13	Río San Jose	44%
14	Costeras R. San Jose-Q. Camarones	4,2%
15	Q. Río Camarones	0,4%
16	Costeras R. Camarones-Pampa del Tamarugal	0,4%
17	Pampa del Tamarugal	35%
21	Río Loa	5,8%
25	Salar de Atacama	11%
30	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacífico	0,1%
34	R. Copiapó	4,0%
38	Río Huasco	0,6%
43	Río Elqui	1,2%
44	Costeras entre Elqui y Limarí	10162%
45	Río Limarí	0,7%
47	Río Choapa	0,4%
48	Costeras entre R. Choapa y R. Quilimari	166%
51	Río Petorca	2,0%
52	Río Ligua	15,0%
53	Costeras Ligua-Aconcagua	234%
54	Río Aconcagua	1,9%
57	Río Maipo	4,3%
60	Río Rapel	0,5%
61	Costeras Rapel-E. Nihue	2,8%
71	Río Mataquito	0,3%
72	Costeras Mataquito-Maule	0,7%
73	Río Maule	0,1%
81	Río Itata	0,1%
82	Costeras e Islas entre Río Itata y Río Bio-Bio	8,5%
83	Río Bio-Bio	0,1%
87	Río Lebu	0,8%
88	Costeras Lebu-Paicavi	1,0%
89	Costeras e Islas entre R. Paicavi y Límite Región	0,2%
91	Río Imperial	0,2%
94	Río Toltén	0,0%
101	Río Valdivia	0,1%
103	Río Bueno	0,1%

Se desarrollará una memoria de cálculo con los datos de la cuenca hidrográfica Río Maipo.

Primero, se calcula la disponibilidad de agua remanente destinada a otras actividades que ocurren dentro de la cuenca ocupando los datos de la Tabla A3:

$$D_{AR} = D - C_E - C_H \quad (28)$$

Donde:

- D_{AR} : Disponibilidad de agua remanente
- D : Disponibilidad hídrica de la cuenca
- C_E : Consumo del ecosistema
- C_H : Consumo humano

$$\Rightarrow D_{AR} = (327,72 - 1,31 - 14,16) \left[\frac{m^3}{s} \right] = 312,25 \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (29)$$

Con este dato se calcula el indicador de disponibilidad menos demanda:

$$\frac{1}{AMD} = \frac{S}{D_{AR}} \quad (30)$$

Donde:

- AMD : Disponibilidad menos demanda
- S : Superficie de la región o cuenca estudiada
- D_{AR} : Disponibilidad de agua remanente

$$\Rightarrow \frac{1}{AMD} = \frac{15.274 [km^2]}{312,25 [m^3/s]} \cdot \frac{1.000.000 [m^2]}{1 [km^2]} \cdot \frac{1 [mes]}{2.592.000 [s]} \quad (31)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{AMD} = 18,9 \left[\frac{m^2 \cdot mes}{m^3} \right] \quad (32)$$

Finalmente, se calcula el factor de caracterización considerando el valor inverso de la disponibilidad menos la demanda del promedio cuyo valor es $1/\overline{AMD} = 73,53 [m^2 \cdot mes/m^3]$.

Con esto, el factor de caracterización se calcula de la siguiente manera:

$$FC = \frac{AMD^{-1}}{\overline{AMD}^{-1}} \quad (33)$$

Donde:

- FC : Factor de caracterización
- AMD : Disponibilidad menos demanda
- \overline{AMD} : Promedio mundial de la disponibilidad menos la demanda

$$\Rightarrow FC = \frac{18,9 \left[\frac{m^2 \cdot mes}{m^3} \right]}{73,53 \left[\frac{m^2 \cdot mes}{m^3} \right]} = 0,26 [-] \quad (34)$$

En la Tabla A5 se presentan los valores calculados para la disponibilidad de agua remanente, el indicador de disponibilidad menos demanda (*AMD*) y el factor de caracterización del método de evaluación de agua disponible (*AWARE*).

Tabla A5. Disponibilidad de agua remanente, indicador de disponibilidad menos demanda y factor de caracterización del método de evaluación de agua disponible.

Código cuenca	Cuenca	Disponibilidad de agua remanente [m ³ /s]	1/AMD [m ² mes/m ³]	Factor caracterización AWARE [-]
10	Altiplánicas	2,09	2.098	28,53
12	Río Lluta	6,07	218	2,97
13	Río San Jose	0,43	2.843	38,67
14	Costeras R. San Jose-Q. Camarones	0,13	7.769	105,66
15	Q. Río Camarones	0,44	4.104	55,81
16	Costeras R. Camarones-Pampa del Tamarugal	0,47	3.100	42,17
17	Pampa del Tamarugal	0,07	97.966	1.332,34
21	Río Loa	4,91	2.598	35,33
25	Salar de Atacama	0,15	39.761	540,75
30	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacífico	0,88	6.837	92,98
34	R. Copiapó	7,04	1.026	13,95
38	Río Huasco	21,77	174	2,37
43	Río Elqui	29,10	130	1,77
44	Costeras entre Elqui y Limarí	-0,57	-1.560	-21,22
45	Río Limarí	41,53	109	1,48
47	Río Choapa	28,61	103	1,40
48	Costeras entre R. Choapa y R. Quilimari	-0,01	-34.650	-471,24
51	Río Petorca	1,31	587	7,98
52	Río Ligua	0,48	1.594	21,67
53	Costeras Ligua-Aconcagua	-0,07	-4.443	-60,42
54	Río Aconcagua	51,40	55	0,75
57	Río Maipo	312,25	19	0,26
60	Río Rapel	298,50	18	0,24
61	Costeras Rapel-E. Nihue	2,35	558	7,59
71	Río Mataquito	164,16	15	0,20
72	Costeras Mataquito-Maule	1,43	294	4,00
73	Río Maule	936,68	9	0,12
81	Río Itata	656,73	7	0,09
82	Costeras e Islas entre Río Itata y Río Bio-Bio	7,99	73	0,99
83	Río Bio-Bio	1.978,82	5	0,06
87	Río Lebu	10,95	30	0,41
88	Costeras Lebu-Paicaví	9,80	67	0,91
89	Costeras e Islas entre R. Paicaví y Límite Región	10,61	51	0,69
91	Río Imperial	504,72	10	0,13
94	Río Toltén	1.105,74	3	0,04
101	Río Valdivia	777,52	5	0,07
103	Río Bueno	464,48	13	0,17

Anexo E. Nivel de producción de un cultivo de paltos

Para calcular el nivel de producción se considera un marco de plantación de 6x4, debido a que permite un distanciamiento tanto en superficies con pendiente como en plano. Dentro de este marco de plantación existen 416 paltos por hectárea [51, 57].

Por otra parte, en huertos que se encuentran en la etapa de plena producción se cosechan 24 kilogramos de palta por cada palto [51].

Por lo tanto, el nivel de producción se calcula de la siguiente manera:

$$Producción = 416 \left[\frac{\text{paltos}}{\text{ha}} \right] \cdot 24 \left[\frac{\text{kg}}{\text{palto}} \right] = 9.984 \left[\frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right] \approx 10 \left[\frac{\text{tpalta}}{\text{ha}} \right] \quad (35)$$

Como resultado se obtiene una producción de aproximadamente 10 toneladas de paltas por hectárea cultivada.

Anexo F. Balance hídrico de un cultivo de palto en la región de Valparaíso

Para el balance hídrico se consideran dos entradas (riego y precipitaciones acumuladas) y una salida (evapotranspiración del cultivo), como se muestra en la Figura 26.

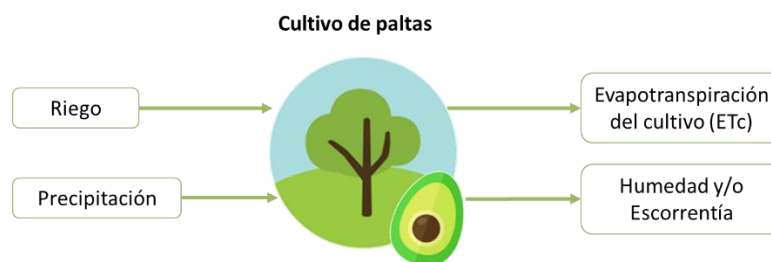


Figura 26. Esquema de las entradas y salidas para el balance hídrico de la etapa del cultivo de paltos.

Con respecto al riego se considera que se realiza por microaspersión debido a que un 61% de las plantaciones de paltos de la región de Valparaíso ocupan este método de riego. El segundo mecanismo más utilizado en la región es el riego por goteo que cubre un 30% de las plantaciones [52].

Además, el riego por microaspersión posee una eficiencia de aplicación del 85%, por lo que se considera que este valor corresponde al riego efectivo que recibe la planta [59].

En la Tabla A6 se muestra el volumen de agua promedio a aplicar en los cultivos de paltos adultos que poseen un marco de plantación de 6x4 y que se encuentran en los valles de Quillota, Petorca y La Ligua [57].

Tabla A6. Volumen de agua de riego promedio a aplicar cada mes en paltos adultos de los valles de Quillota, Petorca y La Ligua (V Región) para un marco de plantación de 6x4 considerando el riego total y el riego efectivo [57].

	Riego total $\left[\frac{L}{\text{planta-día}} \right]$	Riego efectivo $\left[\frac{L}{\text{planta-día}} \right]$
Enero	120,7	102,6
Febrero	124,9	106,2
Marzo	97,4	82,8
Abril	69,9	59,4
Mayo	44,5	37,8
Junio	20,2	17,2
Julio	14,7	12,5
Agosto	20,2	17,2
Septiembre	38,5	32,7
Octubre	60,6	51,5
Noviembre	97,4	82,8
Diciembre	116,5	99,0

Por otro lado, los datos de la precipitación acumulada mensual se obtuvieron desde la base de datos de Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) y se trabajó con una data histórica desde el año 2014 hasta el año 2019 [66].

Las estaciones de medición que registran las precipitaciones acumuladas están clasificadas según la subcuenca en la que se encuentran. A partir de esto, se promediaron los datos de cada año para las cuencas Río Petorca, Río Ligua y Río Aconcagua porque se encuentran en la V Región, obtienen como resultados los datos de la Tabla A7.

Tabla A7. Datos de precipitación mensual acumulada para las cuencas Río Petorca, Río Ligua y Río Aconcagua calculados a partir del promedio mensual para los años 2014 al 2019 [66].

Cuenca		Río Petorca	Río Ligua	Río Aconcagua
Precipitaciones [mm/mes]	Ene	0,4	0,2	1,1
	Feb	0,0	0,0	1,2
	Mar	2,4	2,0	3,7
	Abr	9,5	12,8	19,8
	May	30,5	26,2	33,8
	Jun	45,1	46,9	50,4
	Jul	33,2	34,2	42,5
	Ago	32,2	37,8	38,0
	Sept	15,6	14,6	24,1
	Oct	13,7	17,6	21,9
	Nov	0,2	0,6	4,4
	Dic	2,0	2,5	10,4

Por último, la evapotranspiración del cultivo se calcula según la siguiente fórmula:

$$ET_C = K_C \cdot ET_0 \quad (36)$$

Donde:

ET_C : Evapotranspiración del cultivo [mm/día]

K_C : Coeficiente de cultivo de palto [-]

ET_0 : Evapotranspiración de referencia [mm/día]

Los datos de evapotranspiración de referencia (ET_0) y coeficiente de cultivo (K_C) se obtuvieron del registro que existe para los valles de Quillota, Petorca y La Ligua mostrados en la Tabla A8 [57]. A partir de estos datos se calcula la evapotranspiración del cultivo (ET_C). Para ejemplificar se desarrolla el cálculo para el mes de junio:

$$\Rightarrow ET_C = 0,65 \left[\frac{mm}{dia} \right] \cdot 1,1 [-] = 0,72 \left[\frac{mm}{dia} \right] \quad (37)$$

Como resultado se obtuvieron los datos presentados en Tabla A8.

Tabla A8. Datos mensuales de evapotranspiración de referencia y coeficiente de cultivo del palto, y cálculo de la evapotranspiración del cultivo para los valles de Quillota, Petorca y La Ligua [57].

	ET_0 [mm/día]	K_C palto [-]	ET_C [mm/día]
Enero	5,7	0,75	4,28
Febrero	5,9	0,75	4,43
Marzo	4,6	0,75	3,45
Abril	3,3	0,75	2,48
Mayo	2,1	0,75	1,58
Junio	1,1	0,65	0,72
Julio	0,8	0,65	0,52
Agosto	1,1	0,65	0,72
Septiembre	2,1	0,65	1,37
Octubre	3,3	0,65	2,15
Noviembre	4,6	0,75	3,45
Diciembre	5,5	0,75	4,13

El balance hídrico se realizará en unidades de milímetros de agua al mes, esta unidad representa el espesor de una lámina de agua que se forma sobre una superficie determinada, por lo que es equivalente a las unidades de litros de agua por metro cuadrado de terreno.

Cabe destacar que los resultados mostrados en la memoria de cálculo corresponden a los obtenidos en la planilla Excel “ACV paltas - Balance hídrico.xlsx”, por lo que, en algunos casos, pueden no coincidir con el resultado de la expresión matemática.

La conversión a estas unidades se lleva a cabo para el riego considerando que dentro del marco de plantación existen 416 plantas por hectárea. Entonces la conversión se desarrolla a partir de la siguiente fórmula:

$$1 [mm] = 1 \left[\frac{L}{m^2} \right] \quad (38)$$

$$\Rightarrow 1 \left[\frac{L}{planta} \right] \cdot 416 \left[\frac{plantas}{ha} \right] \cdot \frac{1 [ha]}{10.000 [m^2]} = 0,0416 [mm] \quad (39)$$

Por ejemplo, para el riego de junio, mostrado en la Tabla A6, considerando una eficiencia del 85% para el riego por aspersión y haciendo la conversión para obtener unidades mensuales considerando que un mes tiene 30 días, se obtiene:

$$\Rightarrow 20,2 \left[\frac{L}{plant \cdot dia} \right] \cdot 416 \left[\frac{plant}{ha} \right] \cdot \frac{1 [ha]}{10.000 [m^2]} \cdot 0,85 [-] \cdot \frac{30 [dia]}{1 [mes]} = 21,4 \left[\frac{mm}{mes} \right] \quad (40)$$

Finalmente, se define el balance hídrico como se muestra a continuación:

$$Acumulación = Entradas - Salidas \quad (41)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial t} C_{planta} = F_{riego} + F_{PP} - F_{ET_c} - F_{H/E} \quad (42)$$

Donde:

- C_{planta} : Consumo de agua de la planta
- F_{riego} : Flujo volumétrico de agua proveniente del riego
- F_{PP} : Flujo volumétrico de agua proveniente de la precipitación
- F_{ET_c} : Flujo volumétrico de agua debido a la evapotranspiración del cultivo
- $F_{H/E}$: Flujo volumétrico de agua debido a la humedad y/o escorrentía

Teniendo en cuenta el supuesto de que el agua que consume la planta es constante en el tiempo, entonces la acumulación es cero y el balance de masa queda de la siguiente manera:

$$\Rightarrow F_{riego} + F_{PP} = F_{ET_c} + F_{H/E} \quad (43)$$

Considerando que ya se obtuvieron los datos de riego, precipitación y evapotranspiración del cultivo, se procede a calcular el flujo de la humedad y/o escorrentía de la siguiente forma:

$$\Rightarrow F_{H/E} = F_{riego} + F_{PP} - F_{ET_c} \quad (44)$$

Se realiza la memoria de cálculo considerando el mes de junio y las precipitaciones de la cuenca Río Ligua, como se muestra a continuación:

$$\Rightarrow F_{H/E} = (21,4 + 46,9 - 21,5) \left[\frac{mm}{mes} \right] = 46,9 \left[\frac{mm}{mes} \right] \quad (45)$$

Los resultados para la cuenca del Río Petorca se observan en la Tabla A9:

Tabla A9. Balance hídrico de un cultivo de paltas en la cuenca hidrográfica Río Petorca.

	Entradas		Salidas	
	Precipitaciones [mm/mes]	Riego [mm/mes]	ETc [mm/mes]	H y/o E [mm/mes]
Ene	0,4	128,0	128,3	0,2
Feb	0,0	132,5	132,8	0,0
Mar	2,4	103,3	103,5	2,2
Abr	9,5	74,1	74,3	9,4
May	30,5	47,2	47,3	30,5
Jun	45,1	21,4	21,5	45,0
Jul	33,2	15,6	15,6	33,2
Ago	32,2	21,4	21,5	32,2
Sept	15,6	40,8	41,0	15,5
Oct	13,7	64,3	64,4	13,6
Nov	0,2	103,3	103,5	0,0
Dic	2,0	123,6	123,8	1,8
Total [mm/año]	184,8	875,7	877,1	183,7

Los resultados para la cuenca del Río Ligua se observan en la Tabla A10:

Tabla A10. Balance hídrico de un cultivo de paltas en la cuenca hidrográfica Río Ligua.

	Entradas		Salidas	
	Precipitaciones [mm/mes]	Riego [mm/mes]	ETc [mm/mes]	H y/o E [mm/mes]
Ene	0,2	128,0	128,3	0,0
Feb	0,0	132,5	132,8	0,0
Mar	2,0	103,3	103,5	1,8
Abr	12,8	74,1	74,3	12,7
May	26,2	47,2	47,3	26,2
Jun	46,9	21,4	21,5	46,9
Jul	34,2	15,6	15,6	34,2
Ago	37,8	21,4	21,5	37,8
Sept	14,6	40,8	41,0	14,5
Oct	17,6	64,3	64,4	17,5
Nov	0,6	103,3	103,5	0,4
Dic	2,5	123,6	123,8	2,3
Total [mm/año]	195,3	875,7	877,1	194,3

Los resultados para la cuenca del Río Aconcagua se observan en la Tabla A11:

Tabla A11. Balance hídrico de un cultivo de paltas en la cuenca hidrográfica Río Aconcagua.

	Entradas		Salidas	
	Precipitaciones [mm/mes]	Riego [mm/mes]	ETc [mm/mes]	H y/o E [mm/mes]
Ene	1,1	128,0	128,3	0,9
Feb	1,2	132,5	132,8	1,0
Mar	3,7	103,3	103,5	3,5
Abr	19,8	74,1	74,3	19,7
May	33,8	47,2	47,3	33,8
Jun	50,4	21,4	21,5	50,4
Jul	42,5	15,6	15,6	42,5
Ago	38,0	21,4	21,5	38,0
Sept	24,1	40,8	41,0	24,0
Oct	21,9	64,3	64,4	21,8
Nov	4,4	103,3	103,5	4,2
Dic	10,4	123,6	123,8	10,2
Total [mm/año]	251,3	875,7	877,1	250,0

Por último, el riego corresponde al volumen de agua extraído directamente desde la cuenca hidrográfica. Al año se ocupan 876 [mm] de agua destinados al riego. Si se considera que la plantación posee un rendimiento del 10 [t_{palta}/ha] y haciendo la conversión de unidades mostrada en la ecuación (38), entonces se obtiene lo siguiente:

$$\text{Factor de consumo} = \text{Agua de riego} \quad (46)$$

⇒ Factor de consumo

$$= 876 [mm] \cdot \frac{1 \left[\frac{L}{m^2} \right]}{1 [mm]} \cdot \frac{1 [m^3]}{1.000 [L]} \cdot \frac{1}{10 \left[\frac{t_{\text{palta}}}{ha} \right]} \cdot \frac{10.000 [ha]}{1 [m^2]} \quad (47)$$

$$\Rightarrow \text{Factor de consumo} = 876 \left[\frac{m^3}{t_{\text{palta}}} \right] \quad (48)$$

Como resultado se obtiene que se ocupan 876 [m^3] en el riego por tonelada de palta cosechada al año.

Anexo G. Datos del grupo de palteros HIGERPAL

Primero se calcula el nivel de producción del grupo de palteros HIGERPAL considerando que poseen una plantación de 26 [ha] y un rendimiento al año de 8 [t_{palta}/ha] [60]:

$$\text{Nivel de producción} = \text{Área plantada} \cdot \text{Rendimiento} \quad (49)$$

$$\Rightarrow \text{Nivel de producción} = 26 [ha] \cdot 8 \left[\frac{t_{palta}}{ha} \right] = 208 [t] \quad (50)$$

Posteriormente, se calcula el consumo de agua a partir del factor de consumo y del nivel de producción anual:

$$\text{Consumo de agua} = \text{factor de consumo} \cdot \text{nivel de producción} \quad (51)$$

$$\Rightarrow C_{a,año} = 876 \left[\frac{m^3}{t_{palta}} \right] \cdot 208 [t_{palta}] = 182.144 [m^3] \quad (52)$$

Donde:

$C_{a,año}$: Consumo de agua anual de la actividad de HIGERPAL

A partir de este valor se estima un consumo hídrico mensual del grupo HIGERPAL:

$$\Rightarrow C_{a,mes} = \frac{C_{a,año}}{n_{mes}} = \frac{182.144 [m^3]}{12} = 15.179 [m^3] \quad (53)$$

Donde:

$C_{a,mes}$: Consumo de agua mensual de la actividad de HIGERPAL

n_{mes} : Cantidad de meses en un año

Los datos del grupo de palteros HIGERPAL que se ocuparán en la evaluación de impacto, se resumen en la Tabla A12.

Tabla A12. Datos del grupo de palteros HIGERPAL.

Dato	Valor	Unidad
Superficie del predio	26	[ha]
Consumo hídrico mensual	15.179	[m^3]

Anexo H. Evaluación de impacto del grupo de palteros HIGERPAL

Para la evaluación de impactos se trabajará con el indicador de huella de agua territorial explicado en el apartado 4.3; y con el método de evaluación de disponibilidad de agua (*AWARE*) descrito en el apartado 3.4.3.

Si bien, la ubicación de esta organización es en la comuna de La Ligua, se realizará la evaluación de impactos considerando las cuencas hidrográficas Río Petorca, Río Ligua y Río Aconcagua para poder comparar cada indicador de impacto por sí mismo.

Cabe destacar que los resultados mostrados en la memoria de cálculo corresponden a los obtenidos en la planilla Excel “ACV paltas - Balance hídrico.xlsx”, por lo que, en algunos casos, pueden no coincidir con el resultado de la expresión matemática.

Huella de agua territorial

El indicador de huella de agua territorial se compone de dos variables principales: el uso específico de agua por área de una actividad y el agua disponible relativa restante por área en una cuenca, este último basado en el método de evaluación de agua disponible (*AWARE*).

Se parte calculando el uso específico de agua mensual por área, para ello se ocupan los datos calculados en la Tabla A12 del grupo de paltero HIGERPAL:

$$\frac{1}{U_{a,mes}} = \frac{S_a}{C_{a,mes}} \quad (54)$$

Donde:

- $U_{a,mes}$: Uso específico de agua mensual de una actividad
- S_a : Superficie de las instalaciones de una actividad
- $C_{a,mes}$: Consumo de agua mensual de una actividad

$$\Rightarrow \frac{1}{U_{a,mes}} = \frac{26 [ha]}{15.179 \left[\frac{m^3}{mes} \right]} \cdot \frac{10.000 [m^2]}{1 [ha]} = 17,1 \left[\frac{m^2 \cdot mes}{m^3} \right] \quad (55)$$

Por otro lado, la cantidad de agua disponible relativa restante por área en una cuenca se calcula a partir de la ecuación (59), ocupando los datos presentados en la Tabla A3.

Con esto, el indicador de huella de agua territorial se define de la siguiente manera:

$$H_t = \frac{\frac{1}{AMD}}{\frac{1}{U_{a,mes}}} \quad (56)$$

Donde:

- H_t : Indicador de huella de agua territorial
- AMD : Disponibilidad menos demanda
- $U_{a,mes}$: Uso específico de agua mensual de una actividad

A continuación, se detallará la memoria de cálculo basándose en los datos de la cuenca hidrográfica Río Ligua:

$$\Rightarrow H_t = \frac{1.594 \left[\frac{m^2 \cdot mes}{m^3} \right]}{17,1 \left[\frac{m^2 \cdot mes}{m^3} \right]} = 93 [-] \quad (57)$$

Los resultados obtenidos para las tres cuencas hidrográficas evaluadas se presentan en la Tabla A13.

Tabla A13. Resultados para el indicador de huella de agua territorial evaluado para las cuencas hidrográficas Río Petorca, Río Ligua y Río Aconcagua para el año 2020.

Código cuenca	Cuenca	1/AMD [m ² mes/m ³]	1/U _a [m ² mes/m ³]	Huella de agua territorial [-]
51	Río Petorca	587	17,1	34
52	Río Ligua	1.594	17,1	93
54	Río Aconcagua	55	17,1	3

Método de evaluación de disponibilidad de agua (AWARE)

Para este método se parte calculando el indicador de disponibilidad menos demanda (AMD), a partir de los parámetros de superficie de la cuenca hidrográfica, caudal disponible, consumo domiciliario y caudal ecológico mostrados en la Tabla A14.

Tabla A14. Superficie de la cuenca, caudal disponible, consumo domiciliario y caudal ecológico para las cuencas hidrográficas Río Petorca, Río Ligua y Río Aconcagua para el año 2020.

Código cuenca	Cuenca	Superficie de la cuenca [ha]	Caudal disponible [m ³ /s]	Consumo domiciliario [m ³ /s]	Caudal ecológico [m ³ /s]
51	Río Petorca	198.827	1,49	0,03	0,15
52	Río Ligua	198.018	0,64	0,10	0,06
54	Río Aconcagua	733.427	58,36	1,13	5,84

A continuación, se detallará la memoria de cálculo basándose en los datos de la cuenca hidrográfica Río Ligua:

$$\frac{1}{AMD} = \frac{S}{D - C_E - C_H} \quad (58)$$

Donde:

AMD	: Disponibilidad menos demanda	[m ³ · m ⁻² · mes ⁻¹]
S	: Superficie de la región o cuenca estudiada	[m ²]
D	: Disponibilidad hídrica de la región o cuenca estudiada	[m ³ · mes ⁻¹]
C _E	: Consumo del ecosistema	[m ³ · mes ⁻¹]
C _H	: Consumo humano	[m ³ · mes ⁻¹]

$$\Rightarrow \frac{1}{AMD} = \frac{198.018 [ha]}{(0,64 - 0,06 - 0,1) \left[\frac{m^3}{s} \right]} \cdot \frac{10.000 [m^2]}{1 [ha]} \cdot \frac{1 [mes]}{2.592.000 [s]} \quad (59)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{AMD} = 1.594 \left[\frac{m^2 \cdot mes}{m^3} \right] \quad (60)$$

Posteriormente, se calcula el factor de caracterización considerando el valor inverso de la disponibilidad menos la demanda del promedio cuyo valor es:

$$\frac{1}{\overline{AMD}} = 73,53 \left[\frac{m^2 \cdot mes}{m^3} \right] \quad (61)$$

Con esto, el factor de caracterización se calcula de la siguiente manera:

$$FC = \frac{AMD^{-1}}{\overline{AMD}^{-1}} \quad (62)$$

Donde:

FC : Factor de caracterización

AMD : Disponibilidad menos demanda

\overline{AMD} : Promedio mundial de la disponibilidad menos la demanda

$$\Rightarrow FC = \frac{1.594 \left[\frac{m^2 \cdot mes}{m^3} \right]}{73,53 \left[\frac{m^2 \cdot mes}{m^3} \right]} = 21,7 [-] \quad (63)$$

Finalmente, el factor de caracterización se pondera por el consumo de agua mensual para obtener el indicador de consumo equivalente de un proceso:

$$I_{C,mes} = FC \cdot C_{a,mes} \quad (64)$$

Donde:

$I_{C,mes}$: Indicador de consumo equivalente mensual de una actividad

FC : Factor de caracterización

$C_{a,mes}$: Consumo de agua mensual de una actividad

$$\Rightarrow I_{C,mes} = 21,7 [-] \cdot 15.179 [m^3] = 328.991 [m^3] \quad (65)$$

Los resultados obtenidos para las tres cuencas hidrográficas evaluadas se presentan en la Tabla A15:

Tabla A15. Resultados de los indicadores del método de evaluación de disponibilidad para las cuencas hidrográficas Río Petorca, Río Ligua y Río Aconcagua para el año 2020.

Código cuenca	Cuenca	1/AMD [$m^2 \text{ mes}/m^3$]	Factor caracterización [-]	Indicador de consumo mensual [m^3]
51	Río Petorca	587	7,98	121.139
52	Río Ligua	1.594	21,67	328.991
54	Río Aconcagua	55	0,75	11.365