

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN ECO-EFICIENCIA DE LOS PROCESOS
INDUSTRIALES

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA WATER FOOTPRINT NETWORK PARA EL
CÁLCULO DE HUELLA HÍDRICA EN EL AÑO 2021 EN LAS INSTALACIONES
DE UNA CERVECERÍA ARTESANAL

PARA OPTAR AL GRADO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

CÉSAR ALEJANDRO REYES POLANCO

JAVIER ALEJANDRO ESQUIVEL GÓMEZ

JONATHAN EDUARDO GARCÍA PORTILLO

Ciudad Universitaria, Enero 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO

DR. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTORA

ING. SARA ELISABETH ORELLANA CLAROS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de graduación previo a la opción de Grado de:
INGENIERO QUÍMICO

CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN
ECO-EFICIENCIA DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES

Título:

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA WATER FOOTPRINT NETWORK PARA
EL CÁLCULO DE HUELLA HÍDRICA EN EL AÑO 2021 EN LAS
INSTALACIONES DE UNA CERVECERÍA ARTESANAL**

Presentado por:

JAVIER ALEJANDRO ESQUIVEL GÓMEZ

JONATHAN EDUARDO GARCÍA PORTILLO

CÉSAR ALEJANDRO REYES POLANCO

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente asesor:

ING. NELSON MAURICIO VAQUERO ANDRADE

Ciudad Universitaria, Enero 2023

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director:

ING. NELSON MAURICIO VAQUERO ANDRADE

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, le agradezco a Dios, por llenarme de bendiciones a lo largo de mi camino como estudiante y por haberme ayudado a culminar mi carrera de manera exitosa.

Le agradezco a mi madre y a mi padre, que creyeron y se esforzaron día a día por mí y que gracias a ellos hoy culmino mis estudios. Este logro también es fruto de su esfuerzo y su paciencia.

Le agradezco a mis hermanos menores por haberme alegrado en momentos de adversidad y, sobretodo, le agradezco infinitamente a mi perro Coco, que fue mi acompañante fiel durante la etapa más difícil de esta aventura.

Le agradezco a mi abuela Gloria, que siempre ha estado atenta y a la expectativa de este momento.

Le agradezco a mis compañeros de tesina, mis amigos, por haberme acompañado durante toda la carrera y de quienes aprendí que para todo hay tiempo.

Al Ing. Nelson y a la Ing. Rosmery, por sus aportes en la elaboración del trabajo y durante el desarrollo del curso como tal.

A todas aquellas personas que en algún momento aportaron en mi formación académica y como apoyo moral, muchas gracias.

- *Javier A. Esquivel*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre por haberme apoyado en toda mi formación académica y animarme a continuar con mis estudios en todo momento, a mi familia por estar siempre presente en los buenos y malos momentos que se me presentaron durante toda mi etapa universitaria.

También agradezco a mis compañeros de tesina, con quiénes compartí muchos buenos momentos a lo largo de la carrera y de quienes aprendí mucho. Además, hacer especial mención a mi mascota y fiel amigo Boyka, quien me acompañó desde el inicio hasta el final de toda mi carrera universitaria.

- *Jonathan García*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis maestros de bachillerato, Raúl Valdivieso y Alberto Pocasangre, por haberme inspirado el amor a la ciencia y a la literatura.

Agradezco a mi abuela Teresita, por siempre tenerme en sus pensamientos y en sus oraciones.

Agradezco a mis amigos, hoy compañeros de tesina, por siempre haber estado en las risas y en las desesperaciones.

Agradezco a mi hermano, por llenarme de orgullo y por ser el mejor hermano que pude pedir.

Y agradezco a mis padres, no sólo por haber sido mi soporte a lo largo de toda mi vida académica, sino por siempre haberme apoyado en la búsqueda de mi felicidad...

... Y una pequeña pero especial mención a Chuby y a mis gatos.

- César Reyes

RESUMEN

El presente trabajo de investigación comprende un estudio como parte del Curso de Especialización: Ecoeficiencia de Procesos Industriales en el cual se aplica la metodología Water Footprint Network para calcular la huella hídrica de una cervecería artesanal durante el año 2021. Dicha cervecería artesanal está particionada en una sección destinada a la fabricación de la cerveza y otra sección que cumple las funciones de un restaurante, por lo que se calcularon las huellas hídricas de ambas secciones por separado para obtener la huella hídrica total de la empresa.

La metodología empleada está dada, como se mencionó anteriormente, por la Water Footprint Network, la cual consta de cuatro etapas: definición de objetivos y alcance, contabilidad de la huella hídrica, análisis de sostenibilidad de la huella hídrica y formulación de respuestas a la huella hídrica. Para el desarrollo de dicha metodología, se categorizaron las distintas actividades, tanto del restaurante como de la fábrica de cerveza, en las que se lleva a cabo un consumo de agua y se realizaron balances hídricos para caracterizar el afluente y el efluente de ambas secciones.

Como resultado, se calcularon las huellas hídricas azul ($35 \text{ m}^3/\text{año}$), gris ($454.63 \text{ m}^3/\text{año}$) e indirecta ($17,908.89 \text{ m}^3/\text{año}$) del establecimiento, se analizó el impacto de dichas huellas, en concreto la azul y gris, sobre la cuenca hídrica de la cual se abastece la empresa. Dicho impacto se calculó que es prácticamente nulo. Además, se evaluaron las siguientes opciones para la reducción de las huellas hídricas: instalación de inodoros eco-eficientes, adquisición de una hidrolavadora e instalación de una PTAR, determinándose que las primeras dos opciones no son factibles económicamente, pero que de igual forma pueden ser implementadas con fines meramente ecológicos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL	2
1.1. CONTEXTO.....	2
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.5. BENEFICIOS ESPERADOS.....	5
1.6. DELIMITACIÓN Y LIMITACIÓN.....	5
1.6.1. Alcances.....	5
1.6.2. Limitaciones.....	5
1.7. ANTECEDENTES	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1. AGUA: DEFINICIÓN Y RECURSO HÍDRICO	7
2.2. CICLO HIDROLÓGICO	8
2.3. CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	9
2.3.1. Fuentes de Contaminación	9
2.3.2. Principales Contaminantes del Agua.....	10
2.3.3. Eutrofización.....	11
2.4. PRODUCCIÓN DE LA CERVEZA.....	12
2.4.1. Malteado	13
2.4.2. Obtención del Mosto	13
2.4.3. Cocción del Mosto	14
2.4.4. Fermentación de la Cerveza.....	14
2.5. LA HUELLA HÍDRICA (HH) Y SU CONCEPTO	15
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	17
3.1. METODOLOGÍA WFN.....	17
3.2. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE	17
3.3. CONTABILIDAD DE LA HH.....	19

3.3.1.	Recolección de Datos	19
3.3.2.	Balance Hídrico.....	21
3.3.3.	Metodología de Contabilidad de HH.....	22
3.4.	ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD DE LA HH.....	25
3.5.	FORMULACIÓN DE RESPUESTAS.....	28
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		30
4.1.	CÁLCULO DE LA HH AZUL	37
4.2.	CÁLCULO DE LA HH GRIS.....	38
4.3.	CÁLCULO DE LA HH INDIRECTA.....	42
4.4.	ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD	45
4.5.	FORMULACIÓN DE RESPUESTAS.....	46
4.5.1.	Oportunidades de Mejora.....	46
4.5.2.	Acciones Correctivas	49
4.5.3.	Acciones Preventivas.....	53
CONCLUSIONES		56
RECOMENDACIONES:		58
BIBLIOGRAFÍA		59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Enfoque y tipo de HH contabilizada por unidad	19
Tabla 3.2: Información y fuentes para cada HH.....	20
Tabla 3.3: Rango de evaluación de impactos sobre los requerimientos ambientales de la cuenca	27
Tabla 4.1: Consumo de agua relacionado a la fabricación de cerveza.....	32
Tabla 4.2: Consumo de agua relacionado al restaurante.	34
Tabla 4.3: Afluentes, efluentes, volúmenes evaporados e incorporados.	35
Tabla 4.4: Datos para C_{max}	39
Tabla 4.5: Datos para C_{afl}	39
Tabla 4.6: Datos para C_{eff}	40
Tabla 4.7: Resumen de variables para cálculo de HH gris	40
Tabla 4.8: Datos para C_{eff}	41
Tabla 4.9: Resumen de variables para cálculo de HH gris	42
Tabla 4.10: Consumo semanal de productos en restaurante	42
Tabla 4.11: Datos para cálculo de la HH Indirecta del restaurante.....	43
Tabla 4.12: Datos de consumo por lote de fabricación.....	43
Tabla 4.13: Resumen de datos para cálculo de HH Indirecta de la producción ...	44
Tabla 4.14: Resumen de HH contabilizadas.....	44
Tabla 4.15: Propuestas para la reducción de la HH	46
Tabla 4.16: Parámetros de diseño y operación del tren de tratamiento.....	53
Tabla 4.17: Propuesta de formato para el mantenimiento preventivo de las trampas de grasa	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Distribución del agua.....	9
Figura 3.1: Balance hídrico para la HH	22
Figura 3.2: Sistema de Información Hídrica – SIHI. Reporte de dato de disponibilidad natural de la cuenca río Lempa para el año 2022, en millones de metros cúbicos.....	27
Figura 3.3: Flujograma de la metodología WFN para el cálculo de Huella Hídrica de una empresa	29
Figura 4.1: Representación gráfica de los usos de agua en la fabricación de la cerveza	32
Figura 4.2: Representación gráfica de los usos de agua en el restaurante.....	34
Figura 4.3: Flujos volumétricos relacionados a la fabricación de cerveza.....	36
Figura 4.4: Flujos volumétricos relacionados al restaurante	36
Figura 4.5: Flujos volumétricos totales.....	37
Figura 4.6: Composición de la HH de la empresa	45
Figura 4.7: Imagen de carácter no comercial de inodoro ecoeficiente	47
Figura 4.8: Imagen de carácter no comercial de hidrolavadora.....	48
Figura 4.9: Digestor anaerobio convencional	51

SIGLAS

DBO₅:	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO:	Demanda química de oxígeno
HH:	Huella hídrica
PTAR:	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
SS:	Sólidos sedimentables
WFP:	Water Footprint Network

INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso natural más importante para la vida, desde las plantas, animales y nosotros los seres humanos necesitamos de este recurso para poder llevar a cabo la vida como la conocemos. Partiendo del hecho de que este recurso es de tal importancia, surge la necesidad de cuidar de manera responsable y adecuada del recurso hídrico.

La huella hídrica mide la cantidad de agua utilizada para producir cada uno de los bienes y servicios que utilizamos. Se puede medir para un solo proceso, para un producto o para toda una empresa multinacional. La huella hídrica es un parámetro de control, que nos permite visualizar el costo del recurso hídrico de nuestro estilo de vida y por ende poder tomar decisiones en cómo poder reducirla y preservar el recurso hídrico con la finalidad de avanzar hacia un estilo de vida sostenible donde no se comprometa el recurso hídrico.

La industria cervecera tanto industrial como artesanal tiene como base de su producto, la cerveza, al recurso hídrico, por lo que es de mucha importancia conocer algún parámetro que nos indique qué tanta agua es utilizada por una empresa para la elaboración de sus productos.

El parámetro de la huella hídrica es de mucha ayuda para poder tomar decisiones y trazar metas con la finalidad de ir avanzando hacia una producción sostenible con el medio ambiente para poder preservar el recurso hídrico y no comprometer los recursos naturales de las futuras generaciones.

CAPÍTULO 1: MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL

1.1. CONTEXTO

La producción de cerveza artesanal implica el uso de agua como uno de sus componentes principales, lo que lleva a cuestionarse: ¿se está usando éste recurso de manera óptima? Con la finalidad de reducir costos de operación, aumentar ganancias y sin olvidar el mantener un equilibrio con el medio ambiente, el uso eficiente del agua es un problema de índole ambiental, pero que se refleja tanto en la economía de la empresa como en aspectos normativos, ya que además de utilizar el agua como componente del producto, también se generan grandes cantidades de aguas residuales, por lo que la caracterización de la huella hídrica de la empresa es un indicador que podrá orientar las medidas a tomar con la finalidad de optimizar el uso del recurso hídrico.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El agua es un recurso vital para los seres humanos y para la vida en la Tierra en general, quizá el más importante de todos. Los ciclos hidrológicos se encargan de su disponibilidad, su depuración y su distribución, haciendo importante su estabilidad. Sin embargo, el mal uso del recurso hídrico puede tener graves consecuencias en este ciclo, desordenándolo o reduciendo su eficiencia. Estas consecuencias son apreciables hoy en día en fenómenos como la irregularidad de las lluvias, el agotamiento de fuentes hídricas naturales, la desviación y secado de los ríos, incluso eventos extremos como los huracanes cada vez más frecuentes. Tan solo en el año 2015, el MARN registró una sequía hidrológica como resultado del fenómeno El Niño, observando una reducción en los caudales de los ríos, con respecto a los valores históricos, de entre el 20 y el 60% en la mayor parte del país y hasta un 90% en la zona oriental (MARN, 2015). Es por esto que es importante asegurar y vigilar el buen uso del agua, de manera que no se perjudique más el ciclo hidrológico.

El Salvador es un caso de particular vulnerabilidad en cuanto al agua se refiere. Sólo el 56.7% de la población total del país tiene acceso al agua potable; 78.3% en el sector urbano y 25.5% en el sector rural (Ibarra et. al., 2001). La escasez del agua es evidente desde el hecho de que, incluso en el área urbana, esta tiene que ser distribuida por horarios. La regulación legal del uso de este recurso en el país es deficiente, lo que da paso a que las grandes empresas puedan acceder y disponer de ella con la mayor libertad y a un muy bajo costo económico. Es por esto que es importante concientizar a dichas empresas a no abusar del recurso hídrico y disponer de él responsablemente.

Las industrias cerveceras naturalmente hacen un uso importante del recurso hídrico para elaborar sus productos. Para la elaboración de un litro de cerveza se suele emplear entre 2.8 y 10 litros de agua (SMILE, 2017). Esto aunado al alto consumo de cerveza en El Salvador resultan en grandes cantidades de agua destinadas a esta industria. Se estima que el 56.3% de la población salvadoreña es consumidora de cerveza, siendo este el mayor porcentaje en América (Fabeiro, 2017). Es por esto que se ha decidido realizar el cálculo de la huella hídrica según el Manual de Evaluación de la Huella Hídrica, de la Water Footprint Network, para evaluar opciones de mejora para el uso del agua de una cervecería artesanal del país.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Calcular la huella hídrica de las instalaciones de una cervecería artesanal durante el año 2021 mediante la metodología Water Footprint Network e identificar oportunidades de mejora.

1.3.2. Objetivos específicos

- I. Identificar y cuantificar los usos de agua de la cervecería artesanal.
- II. Calcular las huellas azul y gris de la cervecería artesanal, mediante datos de uso, consumo y contaminación del agua.
- III. Evaluar opciones de reducción de la huella hídrica.
- IV. Analizar la relación costo-beneficio de las opciones de reducción de la huella hídrica planteadas.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Estudiar la huella hídrica de la cervecería artesanal tiene el potencial de revelar fallos o ineficiencias en el proceso productivo, en el uso de agua de servicio y en el uso del agua en general dentro de la empresa. Conocer esta información permitirá proponer y analizar opciones para un uso más eficiente del recurso hídrico, además de concientizar potencialmente a la empresa y sus empleados sobre el uso adecuado del agua. Al mejorar la eficiencia en el uso del agua se lograría no sólo un beneficio ambiental, sino también un beneficio económico al reducir los gastos implicados por un alto consumo de agua (aunque el agua resulte barata para las empresas, su uso desmedido aún representa un gasto innecesario).

El estudio de la huella hídrica se llevará a cabo usando como guía el Manual de Evaluación de la Huella Hídrica de la Water Footprint Network, contabilizando el uso del agua utilizada tanto en la elaboración de la cerveza como el agua de proceso y de servicios durante el año 2021 en una cervecería artesanal. Una vez obtenida esta información, se contará con las herramientas para proponer soluciones hacia un uso más eficiente del recurso hídrico.

1.5. BENEFICIOS ESPERADOS

Se enlistan a continuación los beneficios esperados:

- I. Establecer las bases metodológicas para el cálculo de la Huella Hídrica en procesos de producción no solo de la cerveza artesanal, sino también para producción de bebidas en general.
- II. Conocer el impacto medioambiental relacionado con la producción de cerveza artesanal en un lugar y tiempo específico.
- III. Proyectar reducciones de la Huella Hídrica de acuerdo a las alternativas que se generen para este propósito.
- IV. Sentar las bases para la correcta gestión del agua por parte de la cervecería; desde el manejo hasta la optimización en el uso del recurso hídrico.

1.6. DELIMITACIÓN Y LIMITACIÓN

1.6.1. Alcances

A través de la metodología Water Footprint Network se pretende contabilizar la huella hídrica de la empresa de una cervecería artesanal ubicada en Calle Circunvalación, plan de la Laguna, San Salvador. En un periodo de tiempo comprendido de enero a diciembre del año 2021.

1.6.2. Limitaciones

La empresa no nos pudo proporcionar recibos y demás información que nos hubiera permitido ser más precisos con la situación real de la empresa, además no se nos permitió poder tomar una muestra de las aguas residuales para tener una caracterización de las mismas, y, por último, se presentaron dificultades para poder coordinar las horas para visitar la planta productora de cerveza.

1.7. ANTECEDENTES

En El Salvador, el concepto de Huella Hídrica no es desconocido. En el año 2019, se registró un trabajo de investigación titulado “DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LOS PROCESOS PRODUCTIVOS DE LA LECHE Y SU NIVEL TECNOLÓGICO EN DOS GANADERÍAS DEL OCCIDENTE DE EL SALVADOR”, donde se habla precisamente sobre este indicador medioambiental. Como resultados de la investigación, se tiene la contabilidad de la Huella Hídrica a partir de sus componentes (Azul, Verde y Gris), junto con sus respectivas conclusiones asociadas a los resultados.

Además, instituciones como el Centro Nacional de Producción Más Limpia (CNPML) brinda servicios para la cuantificación de la Huella Hídrica, ya sea para empresas manufactureras o de servicios. Sin embargo, pues, se cuenta con muy poca información sobre empresas en El Salvador que determinen este indicador medioambiental como parte de sus tareas habituales o cotidianas.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. AGUA: DEFINICIÓN Y RECURSO HÍDRICO

El agua es un recurso fundamental para la vida y los ecosistemas, y está directamente relacionado con el desarrollo social y económico de una nación. Las aguas continentales (ríos, lagunas, humedales, aguas subterráneas) están entre los más importantes recursos del planeta. Hoy se encuentran amenazadas por la urbanización descontrolada, el desarrollo industrial, la deforestación, la conversión de ecosistemas para uso agrícola y ganadero, por el uso excesivo y por la contaminación. Procesos globales como el cambio climático afectan directamente la disponibilidad del recurso de decenas de millones de personas en el mundo, por el impacto en los glaciares, inundaciones, sequías. Los recursos de agua continentales no constituyen solamente una riqueza en biodiversidad, sino que conforman un recurso esencial para la sustentabilidad de las sociedades humanas. Sin embargo, una parte importante de las fuentes de agua superficial y subterránea ya no provee agua de calidad suficiente para el consumo humano, y las consecuencias para la salud y la calidad de la vida que tiene esta degradación de las fuentes de agua dulce son tremendas (Hernández, 2010).

En El Salvador, según la Mesa de Agua (2013), el mal manejo del medio ambiente ha incrementado los niveles de vulnerabilidad y ha acelerado la contaminación de los recursos hídricos. Esto afecta en primer lugar a las familias más pobres, porque tienen que emplear una parte importante de su tiempo para obtener agua de calidad. Por otro lado, el sector productivo cada vez tiene que generar mayores niveles de inversión para disponer de agua de calidad para el desarrollo de sus productos y servicios.

Para comprender los riesgos específicos de su escasez, es importante saber que el agua tiene características distintivas en comparación con otros recursos naturales. En principio, según Fernández (2011), la disponibilidad de agua a corto y a largo plazo es incierta. Por ello, los riesgos operativos y estratégicos son diferentes de los de otros recursos naturales más estáticos, como minerales y

bosques. Además, es un recurso finito pero renovable y su disponibilidad está limitada físicamente por la infraestructura actual y legal en varios lugares. Otro rasgo significativo, es que no es fácilmente sustituible en la mayoría de las actividades productivas ni en los hogares. Los riesgos que comporta su escasez son cruciales, particularmente a nivel local.

2.2. CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico es el proceso continuo de la circulación del agua, en sus diversos estados, en la esfera terrestre. Sucede bajo la influencia de la radiación solar, la acción de la gravedad y la dinámica de la atmósfera, la litósfera y la biósfera. Las diferentes fases del ciclo son el marco de referencia para el estudio del estado y del comportamiento del agua. El ciclo hidrológico y el balance de agua global son el modelo básico para entender el funcionamiento del sistema hídrico atmosférico movido básicamente por la energía solar, el cual es el enlace vital entre el océano y el continente, mediante la circulación y transformación del agua a través de la atmósfera, la hidrósfera, la litósfera y la biósfera (García et. al., 2001).

El agua cubre más del 70 % de la superficie del planeta; se la encuentra en océanos, lagos, ríos; en el aire, en el suelo. Es la fuente y el sustento de la vida, contribuye a regular el clima del mundo y con su fuerza formidable modela la Tierra. Los océanos dan cuenta de casi el 97.5 % del agua del planeta. Únicamente un 2.5% es agua dulce. Los glaciares, la nieve y el hielo de los cascos polares representan casi el 80% del agua dulce, el agua subterránea 19% y el agua de superficie accesible rápidamente sólo el 1%. Esta baja cantidad de agua de superficie fácilmente accesible, se encuentra principalmente en lagos (52%) y humedales (38%) (Cirelli, 2012). La Figura 2.1 resume la información mencionada.

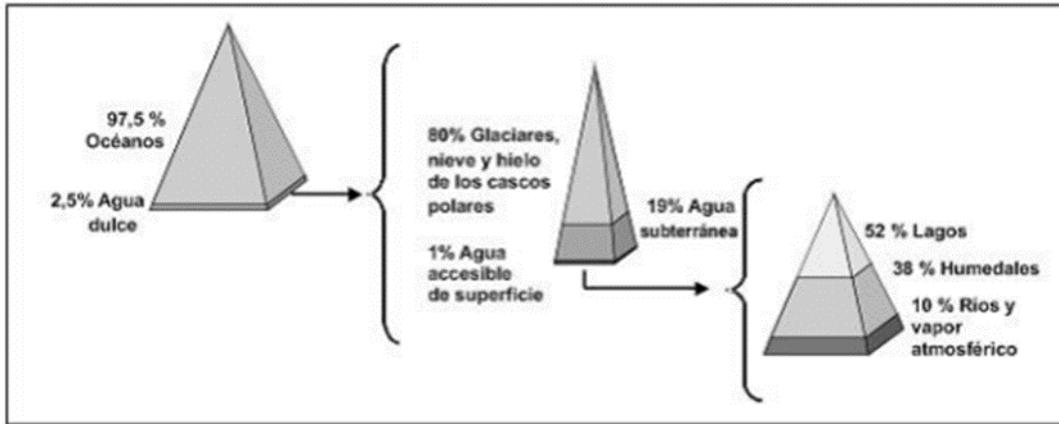


Figura 2.1: Distribución del agua (Cirelli, 2012)

2.3. CONTAMINACIÓN DEL AGUA

El ciclo natural del agua tiene una gran capacidad de purificación. Pero esta misma facilidad de regeneración y su aparente abundancia hace que sea el vertedero habitual de residuos: pesticidas, desechos químicos, metales pesados, residuos radiactivos, etc. La degradación de las aguas es un problema que viene desde hace años, pero ha sido en este siglo cuando se ha extendido este problema a ríos y mares de todo el mundo.

2.3.1. Fuentes de Contaminación

Fuentes naturales. Dependiendo de los terrenos que atraviesa el agua puede contener componentes de origen natural procedentes del contacto con la atmósfera y el suelo (Ej. Sales minerales, calcio, magnesio, hierro etc.). Aunque pueden ser nocivos para la salud, en general son sustancias que se pueden identificar fácilmente y eliminar.

Fuentes artificiales. Producidas como consecuencia de las actividades humanas. El desarrollo industrial ha provocado la presencia de ciertos componentes que son peligrosos para el medio ambiente y para los organismos y difíciles de eliminar.

2.3.2. Principales Contaminantes del Agua

Hay un gran número de contaminantes del agua que se pueden clasificar en los siguientes ocho grupos:

- I. **Microorganismos patógenos.** Son los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, tifus, gastroenteritis diversas, hepatitis, etc. En los países en vías de desarrollo las enfermedades producidas por estos patógenos son uno de los motivos más importantes de muerte prematura, sobre todo de niños. Normalmente estos microbios llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas. Por esto, un buen índice para medir la salubridad de las aguas, en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes en el agua. La OMS recomienda que en el agua para beber haya 0 colonias de coliformes por 100 ml de agua.
- II. **Desechos orgánicos.** Son el conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, ganado, etc. Incluyen heces y otros materiales que pueden ser descompuestos por bacterias aeróbicas, es decir en procesos con consumo de oxígeno. Cuando este tipo de desechos se encuentran en exceso, la proliferación de bacterias agota el oxígeno, y ya no pueden vivir en estas aguas peces y otros seres vivos que necesitan oxígeno. Buenos índices para medir la contaminación por desechos orgánicos son la cantidad de oxígeno disuelto, OD, en agua, o la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno).
- III. **Sustancias químicas inorgánicas.** En este grupo están incluidos ácidos, sales y metales tóxicos como el mercurio y el plomo. Si están en cantidades altas pueden causar graves daños a los seres vivos, disminuir los rendimientos agrícolas y corroer los equipos que se usan para trabajar con el agua.
- IV. **Nutrientes vegetales inorgánicos.** Nitratos y fosfatos son sustancias solubles en agua que las plantas necesitan para su desarrollo, pero si se

encuentran en cantidad excesiva inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos provocando la eutrofización de las aguas. Cuando estas algas y otros vegetales mueren, al ser descompuestos por los microorganismos, se agota el oxígeno y se hace imposible la vida de otros seres vivos. El resultado es un agua maloliente e inutilizable.

- V. Compuestos orgánicos.** Muchas moléculas orgánicas como petróleo, gasolina, plásticos, plaguicidas, disolventes, detergentes, etc. acaban en el agua y permanecen, en algunos casos, largos períodos de tiempo, porque, al ser productos fabricados por el hombre, tienen estructuras moleculares complejas difíciles de degradar por los microorganismos.
- VI. Sedimentos y materiales suspendidos.** Muchas partículas arrancadas del suelo y arrastradas a las aguas, junto con otros materiales que hay en suspensión en las aguas son, en términos de masa total, la mayor fuente de contaminación del agua. La turbidez que provocan en el agua dificulta la vida de algunos organismos, y los sedimentos que se van acumulando destruyen sitios de alimentación o desove de los peces, rellenan lagos o pantanos y obstruyen canales, ríos y puertos.
- VII. Sustancias radiactivas.** Isótopos radiactivos solubles pueden estar presentes en el agua y, a veces, se pueden ir acumulando al largo de las cadenas tróficas, alcanzando concentraciones considerablemente más altas en algunos tejidos vivos que las que tenían en el agua.
- VIII. Contaminación térmica.** El agua caliente liberada por centrales de energía o procesos industriales eleva, en ocasiones, la temperatura de ríos o embalses con lo que disminuye su capacidad de contener oxígeno y afecta a la vida de los organismos.

2.3.3. Eutrofización

La Eutrofización es el enriquecimiento excesivo del agua en determinados nutrientes (Fósforo y Nitrógeno) originando el crecimiento de las algas. El problema está en que si hay exceso de nutrientes crecen en abundancia las plantas y otros organismos. Más tarde, cuando mueren, se pudren y llenan el agua

de malos olores, dándoles un aspecto nauseabundo y disminuyendo drásticamente su calidad. El proceso de putrefacción consume una gran cantidad del oxígeno disuelto y las aguas dejan de ser aptas para la mayor parte de los seres vivos. Los vertidos humanos aceleran el proceso de eutrofización hasta convertirlo, muchas veces, en un grave problema de contaminación. Las principales fuentes de eutrofización son:

- I. Los vertidos urbanos, que llevan detergentes y desechos orgánicos
- II. Los vertidos ganaderos y agrícolas, que aportan fertilizantes, desechos orgánicos y otros residuos ricos en fosfatos y nitratos.

2.4. PRODUCCIÓN DE LA CERVEZA

Históricamente, no se sabe con exactitud cuándo y dónde comenzó a fabricarse la cerveza (aunque se cree los primeros en elaborarla fueron los pueblos mesopotámicos, en la actual región de Irán e Irak, alrededor del 9,000 a.C., cuando recién se comienzan a cultivar cereales), pero se sabe que es una de las prácticas más antiguas de la humanidad. Anteriormente a la Revolución Industrial, se producía mayoritariamente de manera artesanal y orientada al consumo doméstico, pero tras dicha revolución aparecieron grandes fábricas cerveceras y el proceso tomó un carácter industrial y orientado al consumo en masa (UNLP, 2020).

Cuantitativamente el agua es la materia prima utilizada en mayor proporción en la elaboración de la cerveza, no sólo por constituir la mayor parte del producto final, sino porque se emplea también en cantidades importantes durante etapas como el malteado y el macerado de la malta, además la limpieza y desinfección de materias primas y utensilios. La elaboración de la cerveza consiste de las siguientes operaciones:

2.4.1. Malteado

El malteado consiste en la germinación y secado del cereal o mezcla de cereales a utilizar, tras la cual estos cereales reciben el nombre de *malta*. El proceso requiere el uso de agua para el lavado previo de los cereales y posteriormente para el germinado. Esto requiere remojar los cereales con suficiente agua para que los granos tengan una humedad del 40 al 45% (Olmedo,1965). A veces se alcaliniza ligeramente el agua para lograr una limpieza más completa y para eliminar sustancias ácidas no deseadas presentes en la cubierta del grano.

Durante la germinación, los granos consumen oxígeno, agotando rápidamente el oxígeno disuelto en el agua, lo que hace necesario que se renueve el suministro de oxígeno. Esto puede lograrse con una aireación constante y uniforme del agua o el reemplazo de ésta. La segunda opción, sin embargo, representa un gasto adicional del recurso hídrico. Industrialmente, se hace uso de una segunda etapa de germinación, en la que los granos son expuestos a aireación saturada de humedad a temperaturas controladas (no superiores a los 16°C) (Olmedo,1965), simulando el efecto del rocío, periódicamente removiendo los granos para lograr una aireación homogénea. Los granos se dejan germinar hasta obtener la denominada *malta verde*, que luego se seca en hornos para detener el proceso de germinación y para eliminar la humedad del grano hasta alcanzar un contenido de humedad adecuado (inferior al 5%).

Cabe mencionar que, aunque ciertas cervecerías realizan el proceso de malteado en sus propias instalaciones, otras compran los cereales ya malteados (ahorrando los consumos de agua mencionados en sus instalaciones). Este último es el caso de la cervecería en estudio, la cual adquiere la malta ya preparada.

2.4.2. Obtención del Mosto

La malta es molida y macerada a diferentes temperaturas dependiendo de los cereales por los cuáles está compuesta (las temperaturas varían entre los 50 y los 80°C, entre 60 y 65°C para el caso de la cebada) (Gisbert 2016). La maceración

suele tomar entre 45 minutos y varias horas, utilizando cantidades de agua que varían entre 2.5 y 3.5 litros por kilogramo de malta (SMILE, 2017). El líquido obtenido tras este proceso es el que se denomina *mosto*, el cual es filtrado posteriormente, para eliminar cualquier partícula sólida que pueda molestar la fermentación. El bagazo de la malta puede ser utilizado para la elaboración de alimento para animales o para compostaje.

2.4.3. Cocción del Mosto

En esta etapa se hierva el mosto con el objetivo de inactivar las enzimas de la malta, coagular las proteínas y formar turbidez, esterilizar y aumentar la concentración del mosto, fijar el color del producto, disminuir el pH y volatilizar compuestos azufrados no deseados. Durante este proceso, se evapora entre el 10 y 15% del agua contenida en el mosto (aunque algunas cervecerías suelen buscar tasas de evaporación del 6 al 8%) (SMILE, 2017). Si la velocidad de evaporación es demasiado baja, se corre el riesgo de que los cambios deseados no se alcancen satisfactoriamente. Si por el lado contrario resulta ser demasiado alta, se está desperdiciando energía. Los restos generados tras la cocción son eliminados por medio de filtración, centrifugado, o *whirlpooling*. Posteriormente el mosto se enfría hasta la temperatura adecuada dependiendo del tipo de levadura a utilizar (entre 5 y 15°C para levadura *lager* y entre 15 y 25°C para levadura *ale*) (UNLP, 2020).

2.4.4. Fermentación de la Cerveza

Una vez enfriado el mosto a la temperatura adecuada, se agregan las levaduras para convertir los azúcares en alcohol etílico y dióxido de carbono. El proceso puede ser dividido en las siguientes etapas:

Adaptación o latencia: Período de alto crecimiento inmediatamente después añadir la levadura al mosto. La levadura utiliza cualquier oxígeno disponible en el mosto para facilitar sus procesos de crecimiento, y suele llevarse a cabo en un lapso de 12 horas.

Fermentación primaria o atenuación: Período de fermentación intensa cuando se produce la mayor parte de la fermentación. La fermentación suele ser bastante intensa para la levadura *ale*, durando de 2 a 6 días, y es más moderada para la levadura *lager*, durando de 4 días a 3 semanas.

Fermentación secundaria o acondicionamiento: Período en el que la levadura trabaja sobre los azúcares más pesados como la *maltotriosa* y elimina algunos de los subproductos producidos durante la fase primaria. Suele tomar por lo menos dos semanas para la cerveza *ale* y más de cuatro semanas para la cerveza *lager*. Esta etapa también se le conoce como *maduración*.

Tras esta etapa, la cerveza es envasada y está lista para su distribución. Al final del proceso completo de producción, contabilizando el agua de proceso y la contenida en el producto, para la elaboración de un litro de cerveza se emplean entre 2.8 y 10 litros de agua (SMILE, 2017).

2.5. LA HUELLA HÍDRICA (HH) Y SU CONCEPTO

El índice “Huella Hídrica” es una herramienta de evaluación de la sostenibilidad de los recursos hídricos, utilizado para cuantificar el volumen total de agua utilizada por los habitantes de una determinada región. Este índice es útil para cuantificar los flujos de agua virtual, de las importaciones y de las exportaciones, y su estudio a niveles geográficos inferiores y específicos permite conocer exactamente cuánta agua, y en qué condiciones, se utiliza de los sistemas de agua locales, y cuánta agua sería necesaria para contrarrestar las corrientes contaminadas (Tolón Becerra, 2013).

Según Hoekstra et. al. (2011), la huella hídrica es un indicador del uso de agua dulce que no se centra únicamente en el uso directo del agua por parte de un consumidor o un grupo consumidor, sino que se centra también en su uso indirecto. La huella hídrica puede considerarse un indicador integral de la apropiación de los recursos hídricos frente a la medida tradicional y restrictiva de

la extracción de agua. Es el volumen de agua dulce usado para elaborar el producto, medido a lo largo de la cadena de suministro completa. Se trata de un indicador multidimensional que muestra los volúmenes de consumo por origen y los volúmenes de contaminación por tipo de contaminación; todos los componentes del agua dulce total están geográfica y temporalmente especificados.

La **huella hídrica azul** se refiere al consumo de los recursos de agua azul (aguas superficiales y subterráneas) a lo largo de la cadena de suministro de un producto. El consumo se refiere a una pérdida de agua de una masa de agua disponible en una zona de captación o cuenca hidrográfica. Las pérdidas ocurren cuando el agua se evapora, regresa a otra cuenca hidrográfica o al mar, o se incorpora a un producto. Asimismo, **la huella hídrica verde** se refiere al consumo de los recursos de agua verde (el agua de lluvia en la medida en que no se convierte en escorrentía); por último, **la huella hídrica gris** se refiere a la contaminación y se define como el volumen de agua dulce requerida para asimilar la carga de contaminantes dadas las concentraciones de fondo y las normas de la calidad ambiental (Hoekstra et. al., 2011, pp 28-29).

Además de estas tres huellas hídricas mencionadas, también se tiene la HH indirecta. Mientras que la HH directa se refiere al consumo y a la contaminación relacionados con el uso de agua por parte del consumidor, la HH indirecta se refiere al consumo y contaminación del agua relacionados con la producción de bienes y servicios utilizados por el consumidor. Por ejemplo, comida, ropa, papel, energía y bienes industriales.

Esta última definición es la que está asociada directamente con la metodología Water Footprint Network (WPN), empleada en el Manual de evaluación de la HH.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. METODOLOGÍA WFN

La metodología para el cálculo de la HH consta de 4 etapas:

- I. Definición de objetivos y alcance
- II. Contabilidad de la HH
- III. Análisis de sostenibilidad de la HH
- IV. Formulación de respuestas a la HH

La fase de la contabilidad de la HH es aquella en la que se recolectan datos y se desarrollan las cuentas. El alcance y el nivel de detalle de la contabilidad depende de las decisiones tomadas en la fase anterior. Tras la fase de contabilidad viene la fase de análisis de sostenibilidad, en la que se evalúa la HH desde una perspectiva medioambiental, así como social y económica. En la fase final, se formulan opciones de respuesta, estrategias o políticas. No es necesario incluir todas las etapas en un mismo estudio. En la primera fase de definición de los objetivos y alcance se puede decidir centrarse solo en la evaluación o parar después de la fase del análisis de sostenibilidad, aplazando el debate sobre la respuesta (Hoekstra et. al., 2011).

3.2. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

El primer paso para la evaluación de la HH es identificar los límites y alcances, que serán parte de la etapa de contabilidad. Se deben hacer los siguientes cuestionamientos:

- I. ¿Cuál es el objeto de estudio?
- II. ¿Para qué se está realizando la evaluación de la HH?
- III. ¿Cuál es la información que se puede obtener?

La HH puede tener varios objetivos y ser aplicada a diversos contextos, y en cada uno de ellos puede tener diferentes alcances y con ello se podrán realizar distintas recomendaciones. Por ello, el paso más importante al iniciar el cálculo es especificar a qué se le calculará la HH, ya que podría ser: la Huella de una parte de un proceso, producto, grupo de consumidores, personas de un país, entre otros. Una vez delimitado el objetivo de la Huella se delimitará su alcance geográfico y temporal y con ello las unidades en estudio, luego se define qué tipo de Huellas serán cuantificadas, es decir, qué incluir y qué excluir tomando en cuenta el objetivo del cálculo (Hernández, 2019).

En relación al alcance, es necesario definirlo en cada etapa del proceso. Cuando se plantea la contabilidad de la HH, hay que identificar los límites del inventario. Por límites del inventario, de acuerdo a Hoekstra et. al. (2011), se refiere a lo que hay que incluir y excluir de las cuentas. Para este fin, se deben tener en cuenta la siguiente serie de preguntas:

- I. ¿Qué huellas se van a medir? (azul, verde, gris)
- II. ¿Qué nivel de resolución espaciotemporal?
- III. ¿Qué periodo de datos?
- IV. ¿Considerar la HH directa o indirecta?

Se continúa con la fase del análisis de sostenibilidad, donde la cuestión principal es si se toma la perspectiva geográfica o la de un proceso, producto, consumidor o productor. En el presente trabajo de investigación, el interés recae en la segunda perspectiva, y lo que se busca con el alcance es conocer la contribución de la HH del proceso en relación con el panorama general. Finalmente, el alcance de la formulación de respuestas también depende del tipo de HH que se desee calcular. En el caso de una empresa, se puede comenzar respondiendo preguntas como quiénes pueden ser los responsables de reducir la HH, cómo, en qué cantidad y en qué marco temporal.

Según las características de las actividades realizadas en una cervecería artesanal, se contabilizarán las huellas hídricas con un enfoque orientado a

consumidores y a procesos. Para este caso, la cervecería artesanal está compuesta por un restaurante, que será evaluado desde el enfoque de consumidor, y de una unidad operativa, que será evaluada desde el enfoque de proceso identificado. Asimismo, se tomará en cuenta que las huellas hídricas a calcular serán las Azul, Gris e Indirecta en todos los casos. En la Tabla 3.1 se visualiza la información recién mencionada:

Tabla 3.1: Enfoque y tipo de HH contabilizada por unidad

Unidad	Enfoque de contabilidad		Huella Hídrica a contabilizar		
	Consumidor	Procesos	Azul	Gris	Indirecta
Restaurante	X		X	X	X
Producción		X	X	X	X

3.3. CONTABILIDAD DE LA HH

Para la contabilidad de la HH, se debe seguir una serie de pasos. Se inicia con la recolección de datos e identificación de fuentes, y se continúa con la aplicación de mecanismos de contabilidad para la HH. Para esto último, se refiere a que es importante tener identificadas las metodologías que se utilizarán para la contabilidad de las Huellas.

3.3.1. Recolección de Datos

La recolección de datos de las unidades identificadas dentro de los límites es, posiblemente, la etapa que demanda más tiempo. Se deben identificar las fuentes de datos para obtener la información más confiable posible. Asimismo, se debe identificar fuentes bibliográficas que apoyen los datos obtenidos y permitan estimar datos faltantes. En la Tabla 3.2 se encuentran los datos base que se deben incluir para la evaluación de la HH a nivel de Empresa:

Tabla 3.2: Información y fuentes para cada HH

HH	Información	Fuente	Forma de estimación
Azul	Factura mensual de agua (m ³)	Facturas emitidas mensualmente por la empresa de agua potable y saneamiento	Consumo mensual de agua en las instalaciones de la cervecería.
	Identificación y uso de fuentes por parte de los empleados	Datos bibliográficos, visitas, consultas directas a empleados	Las fuentes a tomar en cuenta serán siempre lavamanos, inodoros, duchas. Valor promedio de uso por empleado según datos obtenidos.
	Uso de agua en procesos de producción, así como el porcentaje de evaporación e incorporación	Datos propios de los procesos, datos bibliográficos, visitas	Características técnicas de equipos utilizados. Características propias de cada proceso de producción.
Gris	Concentración de afluente por parámetros	Datos monitoreados por las empresas de agua potable. Resultado de laboratorios, datos bibliográficos.	Datos bibliográficos de calidad de agua potable.
	Concentración de efluente por parámetros	Resultado de laboratorios, datos bibliográficos.	Datos bibliográficos de calidad de efluentes administrativos o de procesos.

Continúa...

Tabla 3.2: Información y fuentes para cada HH (Continuación)

HH	Información	Fuente	Forma de estimación
Gris	Concentración máxima establecida por ley por parámetros	Normativa local en cuestión hídrica	Concentración de parámetros establecidos por bibliografía local.
	Concentración natural de afluente por parámetros	Informes de monitoreo en cuerpo receptor evaluado	Concentración de parámetros establecidos por bibliografía local.
Indirecta	Consumo de materiales por parte de las unidades a evaluar	Datos de las unidades (administrativas, almacenes)	En función de la demanda de los consumidores.
	Equivalencias hídricas de los materiales consumidos	Base de datos de Water Footprint Network	Recopilación de datos de consumo hídrico.

Los datos exactos que no puedan conseguirse directamente deben ser estimados.

3.3.2. Balance Hídrico

El paso más importante para el cálculo de la HH es la determinación del balance hídrico por unidad, que posteriormente se sumarán para obtener el balance hídrico total de todo el sistema analizado, en este caso, de la empresa cervecera.

Se deben tener identificados los datos de volumen y concentración de afluente y efluente, correspondientes a las unidades evaluadas, además de identificar los procesos en que se consume agua; así como aquellos en que se escurre, regresando a la cuenca sin ser contaminada. En la figura 3.1, se puede observar el balance hídrico que se debe realizar para identificar el uso y consumo de agua.

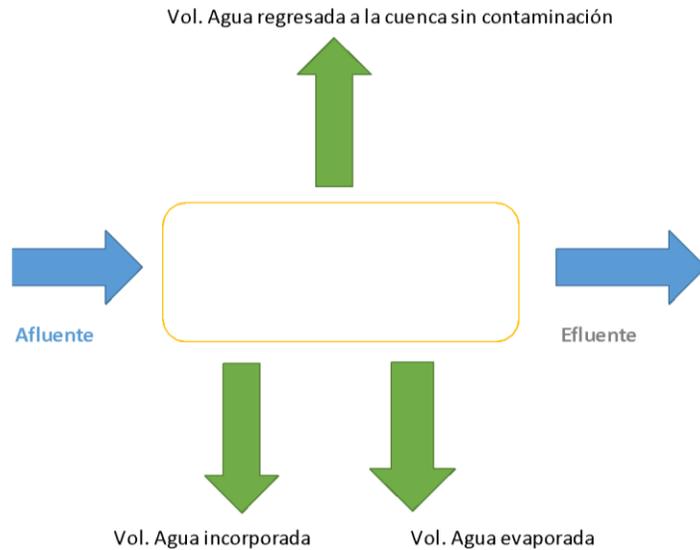


Figura 3.1: Balance hídrico para la HH

Donde:

- I. **Afluente:** Volumen de agua que se utiliza para las actividades evaluadas. Es el volumen facturado de agua.
- II. **Efluente:** Volumen de agua contaminada y descargada al cuerpo receptor o alcantarillado público, después de ser utilizada en las actividades evaluadas.

3.3.3. Metodología de Contabilidad de HH

La HH de una empresa equivale a la suma de la HH de cada uno de los procesos que la componen y que han sido identificados y seleccionados dentro de los límites de la evaluación. La HH de la empresa está compuesta por la huella del producto que se elabora en la cervecería más la huella que aporte el restaurante, como lo describe la ecuación 1:

$$HH_E = HH_P + HH_R \quad (1)$$

A su vez, la HH de cada unidad proviene de la sumatoria de la HH azul, gris e indirecta, como se observa en las ecuaciones 2 y 3:

$$HH_P = HH_{azulP} + HH_{grisP} + HH_{indP} \quad (2)$$

$$HH_R = HH_{azulR} + HH_{grisR} + HH_{indR} \quad (3)$$

3.3.3.1. HH Azul

De manera general, la HH azul es el volumen de agua consumida por incorporación o evaporación en el proceso evaluado, y está definida por la ecuación 4:

$$HH_{azul} = \text{evaporación agua azul} + \text{incorporación agua azul} + \text{flujo de retorno perdido} \quad (4)$$

El último componente se refiere a la parte del flujo de retorno que no está disponible para su uso en la misma zona de captación de la que fue extraída, ya sea porque regresa a otra zona de captación (o vertida al mar) o porque regresa en un período de tiempo distinto. Si se conocen con exactitud los volúmenes de incorporación y evaporación, la ecuación 4 puede utilizarse para contabilizar la HH Azul. Sin embargo, si no se contaran con datos exactos del volumen de agua incorporada o evaporada, se puede utilizar la siguiente ecuación 5:

$$HH_{azul} = Vol_{afl} - Vol_{efl} \quad (5)$$

Las ecuaciones 4 y 5 reflejan el volumen de agua que se pierde, que se incorpora o que se evapora, con variables diferentes.

3.3.3.2. HH Gris

La ecuación 6 es la utilizada para calcular la HH gris, y se aplica para todos los casos:

$$HH_{gris} = \frac{(Vol_{efl} * C_{efl}) - (Vol_{afl} * C_{afl})}{C_{max} - C_{nat}} \quad (6)$$

Donde:

- I. **Vol_{efl}**: Volumen del efluente
- II. **Vol_{afl}**: Volumen del afluente

- III. **C_{eff}**: Concentración en el efluente del parámetro a medir
- IV. **C_{aff}**: Concentración en el afluente del parámetro a medir
- V. **C_{max}**: Concentración máxima permisible del parámetro a medir según normas ambientales
- VI. **C_{nat}**: Concentración natural libre de impactos antropogénicos del parámetro medido

La HH gris puede medirse con diferentes parámetros de calidad. La HH gris total será la máxima entre las HH grises calculadas en función de distintos parámetros. Se contabilizará la HH gris en función de 3 parámetros, que son: DBO5, DQO y Sólidos Sedimentables (SS). El mayor resultado que se obtenga será el que se mantendrá como resultado final, mientras que los otros dos resultados de los otros dos parámetros se descartan. A continuación, se enlistan una serie de consideraciones:

- I. Los volúmenes del afluente y efluente son los mismos para las ecuaciones 5 y 6.
- II. La concentración del afluente se refiere a la calidad de agua potable que es distribuida en la unidad tomando en cuenta el parámetro estudiado.
- III. La concentración en el efluente se refiere a la calidad de agua del efluente con respecto al parámetro estudiado.

3.3.3.3. HH Indirecta

Para la contabilidad de la HH Indirecta se necesita la cantidad de productos consumidos y sus equivalencias hídricas respectivas. La ecuación que se debe aplicar es la 7:

$$HH_{ind} = \sum_p (C_p * HH_p) \quad (7)$$

Donde:

- I. **C_p**: Consumo de un producto p
- II. **HH_p**: Huella hídrica del producto p

Es decir, la HH Indirecta total, es la suma de la multiplicación de los materiales y productos consumidos por sus respectivas equivalencias hídricas. Un ejemplo de producto consumido son los materiales de escritorio. También es importante hacer hincapié que la selección de los materiales que son contabilizados depende de la existencia de las equivalencias hídricas.

Los resultados de las ecuaciones correspondientes al cálculo de las huellas hídricas se colocan en las ecuaciones 2 y 3, y con estos resultados se obtiene la HH de la empresa, que es el resultado de la investigación, aplicando la ecuación 1.

3.4. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD DE LA HH

Para poder hacerse una idea de lo que significa el tamaño de la HH, es necesario compararla con los recursos disponibles de agua dulce. El análisis de sostenibilidad consiste básicamente en comparar la HH y lo que la Tierra puede soportar de manera sostenible. El análisis contempla distintas dimensiones tales como sociales, ambientales o económicas y los niveles de impacto pueden ser formulados como primarios o secundarios.

La HH de una empresa es la suma de todas las huellas hídricas de los productos finales elaborados por ella. Por tanto, en primer lugar, hay que analizar la sostenibilidad de las huellas hídricas de los productos elaborados y, en segundo lugar, analizar la sostenibilidad de la HH de la empresa. Esta es una etapa secundaria, puesto que los resultados sobre la sostenibilidad de la HH de los productos de las empresas por separado pueden ofrecer una conclusión inmediata sobre la sostenibilidad de la HH de la misma (Hoekstra et. al., 2011).

Para el análisis de sostenibilidad de la HH Azul y Gris se requieren los datos del escurrimiento natural de la cuenca que dota de agua a la empresa evaluada. Estos datos deben ser mensuales y pueden ser obtenidos de las organizaciones municipales o gubernamentales responsables de la disponibilidad de agua en la

cuenca, o de organizaciones relacionadas con la gestión de agua en las cuencas que abastecen a la zona donde se sitúa la empresa (WFP, 2009).

El requerimiento natural del ecosistema está definido como el 80% (WFP, 2009) del volumen total de escurrimiento de agua en la cuenca, dejando la disponibilidad real de agua para el uso y consumo de agua. Se deben aplicar las ecuaciones 8 y 9:

$$\text{Requerimiento natural} = \text{Disponibilidad natural} * 0.8 \quad (8)$$

$$\text{Disponibilidad real de agua} = \text{Disponibilidad natural} - \text{Requerimiento natural} \quad (9)$$

La HH Azul total de la empresa es la suma de las HH contabilizadas de las unidades evaluadas. Su sostenibilidad es cuantificada comparando la disponibilidad de agua azul anual (agua disponible real) de la cuenca de la que se extrae agua para el uso en la empresa.

Para determinar la escasez de agua y la sostenibilidad de agua, se debe dividir la HH Azul contabilizada de la empresa por el volumen de agua disponible real (agua azul) (ecuación 10):

$$\text{Sostenibilidad HH Azul} = \frac{\sum HH_{\text{azul}}}{\text{Disponibilidad real de agua}} \quad (10)$$

La Sostenibilidad de la HH Gris se cuantifica con el volumen de agua natural y la HH Gris total de la empresa; este valor se denomina índice de contaminación hídrica, según ecuación 11:

$$\text{Sostenibilidad HH Gris} = \frac{\sum HH_{\text{gris}}}{\text{Disponibilidad natural}} \quad (11)$$

Si la relación es menor a 1, entonces se puede concluir que el impacto ambiental en cuanto al consumo de agua no existe o no es significativo, en el caso de la sostenibilidad de la HH azul; para la sostenibilidad de la HH gris, un valor menor a 1 significa que la cuenca natural es completamente capaz de depurar la contaminación hídrica por sí sola. Cuanto mayor sea a 1, en cualquiera de los casos, la situación es peor, como se puede ver en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3: Rango de evaluación de impactos sobre los requerimientos ambientales de la cuenca

Mayor a 4		Mayor a 1.5	
Mayor a 2		Mayor a 1	

Fuente: Manual para la Evaluación de la Huella Hídrica, 2009

En base a la Tabla 3.3 se puede determinar el nivel del impacto ambiental sobre la cuenca.

Se utilizará el Sistema de Información Hídrica – SIHI para obtener los datos de disponibilidad natural, utilizando el río Lempa como cuenca natural, ya que es la que abastece la zona donde está ubicada la empresa. El programa no reporta datos mensuales para la disponibilidad natural de la cuenca, por lo que se utilizará el dato anual reportado para el año 2022, que se observa en la figura 3.2.

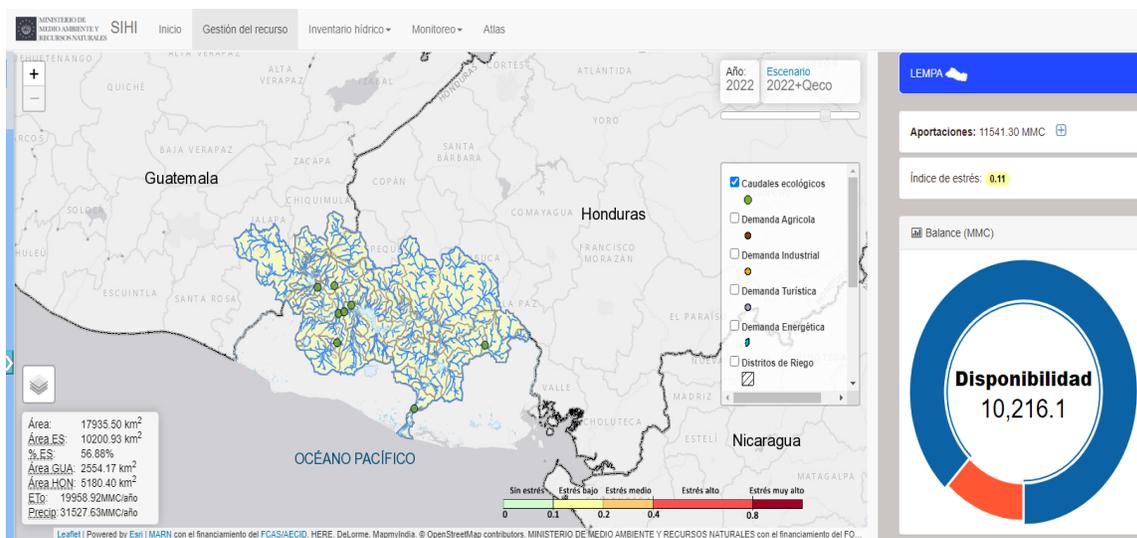


Figura 3.2: Sistema de Información Hídrica – SIHI. Reporte de dato de disponibilidad natural de la cuenca río Lempa para el año 2022, en millones de metros cúbicos. **Fuente:** <http://srt.snet.gob.sv/sihi/public/>

3.5. FORMULACIÓN DE RESPUESTAS

Una estrategia de HH de una empresa incluye una variedad de objetivos y actividades. Las empresas pueden reducir su HH operacional por medio de la disminución del consumo de agua en sus operaciones propias y disminuir la contaminación hídrica a cero. Las palabras clave son: evitar, reducir, reciclar y tratar antes de eliminar. Evitando cualquier tipo de evaporación, la HH azul puede reducirse a cero. Reduciendo la producción de aguas residuales lo máximo posible y tratando la que sigue produciéndose, la HH gris también se puede reducir a cero. El tratamiento se puede llevar a cabo en las propias instalaciones de la empresa o en instalaciones públicas de tratamiento de aguas residuales; la calidad del agua vertida al sistema de agua ambiente es lo que determinará la HH gris (Hoekstra et. al., 2011).

Como parte de la formulación de respuestas, dependiendo de la realidad de la empresa en términos económicos y operacionales, se pueden proponer las opciones para la optimización del uso del recurso hídrico. Las opciones incluyen:

- I. Automatización de procesos
- II. Reemplazo de tecnología actual por una más eficiente
- III. Reemplazo de metodologías actuales por unas más eficientes
- IV. Promover las buenas prácticas del personal en cuanto al manejo del agua
- V. Mantenimiento preventivo para la maquinaria que ocupe de agua

Una vez identificadas las opciones que se pueden implementar desde el punto de visto técnico, se tiene que evaluar también la parte económica. Con este propósito, se puede utilizar la ecuación 12, que es la del periodo simple de retorno de la inversión:

$$PSRI = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorros}} \quad (12)$$

En la figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo del proceso descrito:

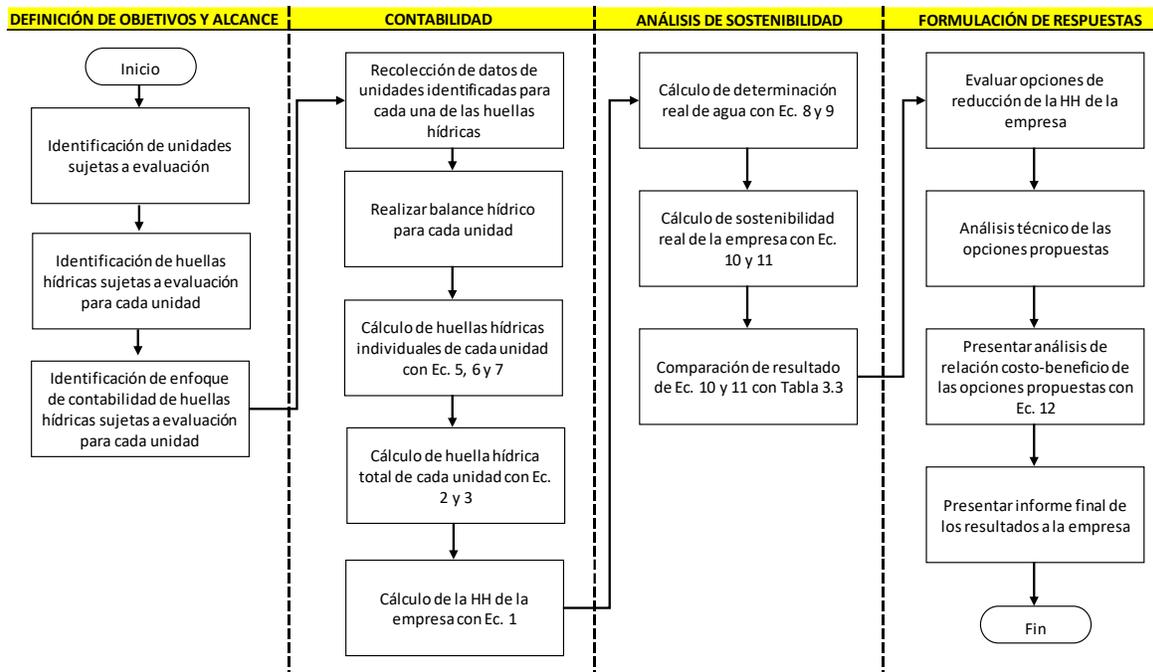


Figura 3.3: Flujoograma de la metodología WFN para el cálculo de Huella Hídrica de una empresa

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante las visitas a la cervecería artesanal, se pretendía recabar información relacionada al consumo de agua en forma de documentos como facturas mensuales de ANDA, además de tomar muestras de agua del efluente para someter a análisis de laboratorio y determinar datos importantes para el cálculo de la huella gris (como los niveles de DQO y DBO). No fue posible conseguir dichos documentos ni se permitió tomar dichas muestras; sin embargo, Roca C. (2022), Maestro Cervecerero del establecimiento, brindó de manera verbal la información relativa a los consumos de agua en las distintas etapas de la fabricación de cerveza, así como los consumos de agua realizados en el restaurante. Dicha información se usó para calcular los balances hídricos presentados en esta sección. La información obtenida verbalmente y los balances obtenidos se resumen en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

Al año, se produce un aproximado de 20 lotes de cerveza, cada lote conteniendo un total de 1 m³ de agua (Roca C., 2022), para un total de 20 m³ al año.

$$(1 \text{ m}^3/\text{lote}) \cdot (20 \text{ m}^3/\text{lote}) = (20 \text{ m}^3/\text{año})$$

Esta cantidad representa alrededor de una sexta parte del consumo total de agua de todo el establecimiento (Roca C., 2022), por lo que se calculó que el consumo total de agua al año es de 120 m³.

$$(20 \text{ m}^3/\text{año}) \cdot 6 = (120 \text{ m}^3/\text{año})_{\text{(consumo total del establecimiento)}}$$

A partir de aquí, es importante recordar que el establecimiento consta de una sección dedicada a la producción de cerveza y otra cumple las funciones de un restaurante, y el consumo total de agua queda dividido entre ambas partes. A continuación, se desglosa la información relativa al consumo de agua de la fábrica de cerveza.

En el proceso de producción de la cerveza, existen cuatro etapas entre las que se puede dividir el consumo de agua: la elaboración del mosto, el enfriamiento del

mosto, el envasado de la cerveza y la limpieza de equipos. La elaboración del mosto es la parte donde se agrega toda el agua contenida en el producto final. Sin embargo, durante este proceso y otra etapa conocida como *cocción* (etapa en la que NO se agrega más agua) se evapora una cantidad importante de agua, alrededor de 0.15 m^3 por cada lote (Roca C., 2022). Considerando que el lote contiene una cantidad de 1 m^3 , se calculó que para la elaboración del mosto se emplean 1.15 m^3 de agua por lote, resultando en 23 m^3 al año.

$$1 \text{ m}^3/\text{lote} + 0.15 \text{ m}^3/\text{lote (evaporados)} = 1.15 \text{ m}^3/\text{lote (elaboración del mosto)}$$

$$1.15 \text{ m}^3/\text{lote} \times 20 \text{ lotes/año} = 23 \text{ m}^3/\text{año}$$

Para el enfriamiento del mosto, se emplean 0.8 m^3 para enfriar un lote entero (Roca C., 2022), por lo que al año esta etapa requiere 16 m^3 .

$$0.8 \text{ m}^3/\text{lote} \times 20 \text{ lotes/año} = 16 \text{ m}^3/\text{año}$$

Para el envasado de la cerveza, cada lote requiere un total de 0.15 m^3 (Roca C., 2022), es decir, 3 m^3 al año.

$$0.15 \text{ m}^3/\text{lote} \times 20 \text{ lotes/año} = 3 \text{ m}^3/\text{año}$$

Finalmente, la limpieza de los equipos se realiza al final de la fabricación de cada lote. Para esto, se requiere un volumen de 0.2 m^3 para la fabricación de una solución básica detergente, 0.15 m^3 de solución ácida (para neutralizar) y 0.3 m^3 de agua caliente para esterilizar (Roca C., 2022). En total: 0.65 m^3 por lote y 13 m^3 al año.

$$0.2 \text{ m}^3/\text{lote (det.)} + 0.15 \text{ m}^3/\text{lote (ac.)} + 0.3 \text{ m}^3/\text{lote (est.)} = 0.65 \text{ m}^3/\text{lote}$$

$$0.65 \text{ m}^3/\text{lote} \times 20 \text{ lotes/año} = 13 \text{ m}^3/\text{año}$$

Sin embargo, es necesario mencionar que la totalidad del agua destinada a la limpieza de equipos es agua reutilizada del proceso de enfriado del mosto, por lo que no constituye un consumo nuevo de agua. En la tabla 4.1 se observa los usos

del agua relacionados a la fabricación de la cerveza y en la figura 4.1 una representación gráfica:

Tabla 4.1: Consumo de agua relacionado a la fabricación de cerveza.

Consumo de Agua en Fábrica de Cerveza	
Actividad consumidora de agua	Agua consumida (m³/año)
Elaboración del mosto	23
Enfriamiento del mosto	16
Envasado de la cerveza	3
Limpieza de equipos (fermentadores, maceradores, enfriador, barriles, etc.)	(13)*
Consumo total	42

**El agua destinada a la limpieza de equipos es agua recuperada y reutilizada del enfriador, por lo que no incurre en un consumo adicional.*

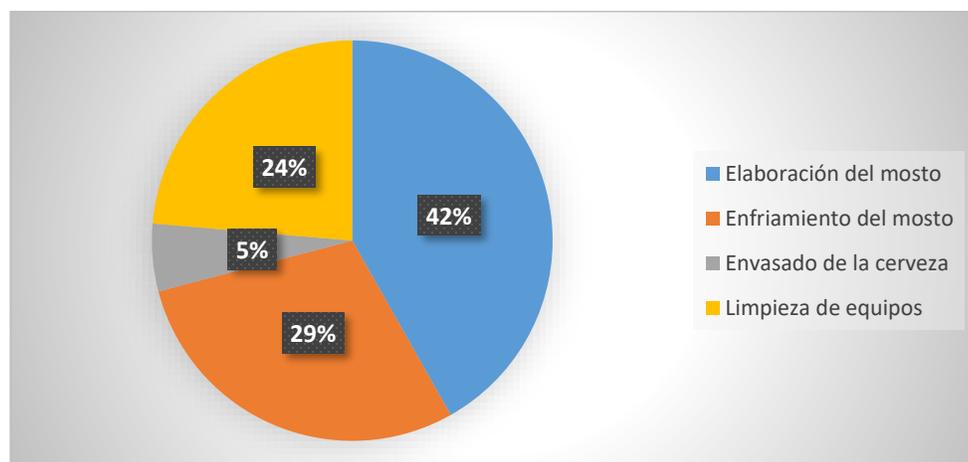


Figura 4.1: Representación gráfica de los usos de agua en la fabricación de la cerveza

Cabe mencionar que una vez completado el lote, este pasa por un proceso de control de calidad, en el cuál suelen perderse alrededor del 10% del total del lote (Roca C., 2022), lo que representa 0.1 m³ por lote y 2 m³ al año.

El agua de enfriamiento, el agua usada para el envasado y el agua perdida por control de calidad se consideran entonces los constituyentes del efluente relacionado a la fabricación de cerveza (recordar que el agua usada para la limpieza de equipos es agua reutilizada del enfriador). A continuación, se muestran los datos y cálculos relacionados al consumo de agua del restaurante.

Considerando el consumo total del establecimiento (120 m^3 al año) y el consumo únicamente de la producción de cerveza (42 m^3 al año), se calculó que el consumo del restaurante al año es de 78 m^3 .

$$120 \text{ m}^3/\text{año (total)} - 42 \text{ m}^3/\text{año (cerveza)} = 78 \text{ m}^3/\text{año (restaurante)}$$

Un tercio de este consumo lo representa el uso de los tres inodoros instalados en el establecimiento (Roca C., 2022).

$$(78 \text{ m}^3/\text{año})/3 = 26 \text{ m}^3/\text{año (inodoros)}$$

Otro tercio está representado por el uso en lavabos sanitarios y lavatrastos, estos últimos ocupando alrededor de 2 m^3 más que los lavabos sanitarios (Roca C., 2022). Como resultado, los lavatrastos representan 14 m^3 al año y los lavabos sanitarios 12 m^3 .

$$(78 \text{ m}^3/\text{año})/3 = 26 \text{ m}^3/\text{año (lavabos sanitarios y lavatrastos)}$$

$$26 \text{ m}^3/\text{año} = 14 \text{ m}^3/\text{año (lavatrastos)} + 12 \text{ m}^3/\text{año (lavabos)}$$

El último tercio se reparte entre la limpieza de los alimentos, la limpieza del local y la elaboración de la comida. Para la limpieza de la comida, se usa una cantidad de agua similar a la usada en los lavabos sanitarios (Roca C., 2022), es decir, 12 m^3 al año. Para la elaboración de los alimentos, se usa la mitad del agua usada en los lavatrastos (Roca C., 2022), lo que constituye 7 m^3 al año. El resto del agua (7 m^3 al año) es destinada a la limpieza del local (Roca C., 2022). En tabla 4.2 se encuentra resumida la información sobre el restaurante y en figura 4.2 una representación gráfica:

$(78 \text{ m}^3/\text{año})/3 = 26 \text{ m}^3/\text{año}$ (limp. del local, limp. y elaboración de alimentos)

$12 \text{ m}^3/\text{año}$ (lavabos) = $12 \text{ m}^3/\text{año}$ (limpieza de alimentos)

$(14 \text{ m}^3/\text{año}$ (lavatrastos))/2 = $7 \text{ m}^3/\text{año}$ (elaboración de alimentos)

$26 \text{ m}^3/\text{año} - 19 \text{ m}^3/\text{año}$ (limp. elab. alimentos) = $7 \text{ m}^3/\text{año}$ (limp. local)

Tabla 4.2: Consumo de agua relacionado al restaurante.

Consumo de Agua en Restaurante	
Actividad consumidora de agua	Agua consumida (m ³ /año)
Servicios inodoros	26
Lavabos sanitarios	12
Lavatrastos	14
Limpieza alimentos a preparar	12
Elaboración de la comida	7
Limpieza del local	7
Consumo total	78

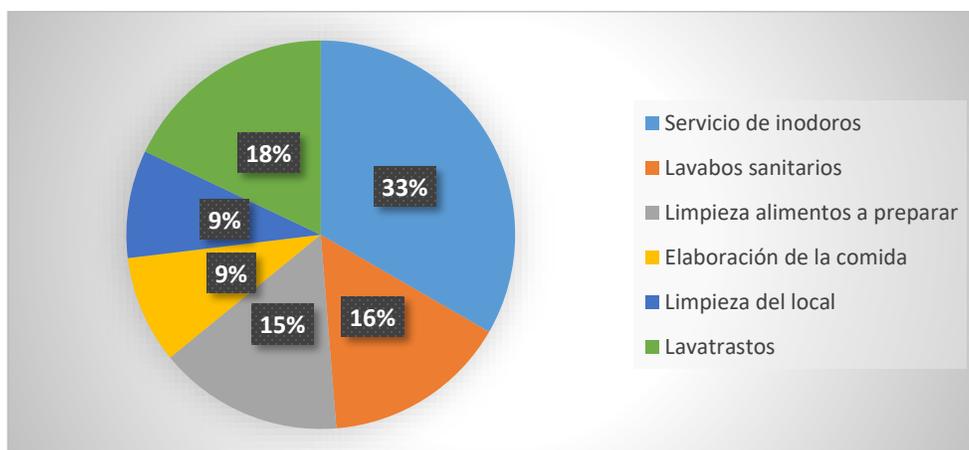


Figura 4.2: Representación gráfica de los usos de agua en el restaurante

El efluente del restaurante está constituido por el agua consumida en los servicios inodoros, los lavabos sanitarios, los lavatrazos y la limpieza de alimentos. El agua usada para la elaboración de comidas es considerada agua incorporada al producto para consumo y el agua usada para la limpieza del local se considera agua evaporada.

Con estos datos podemos caracterizar los afluentes y efluentes relacionados a la fábrica de cerveza y al restaurante, así como las corrientes que se evaporan y que se incorporan en productos para consumo. Estos datos se ven resumidos en la siguiente tabla 4.3:

Tabla 4.3: Afluentes, efluentes, volúmenes evaporados e incorporados.

Flujos Hídricos	Fábrica de Cerveza	Restaurante	Complejo entero
Afluente (m ³ /año)	42	78	120
Volumen evaporado (m ³ /año)	3	7	10
Volumen incorporado en productos (m ³ /año)	18	7	25
Efluente (m ³ /año)	21	64	85

Los siguientes diagramas esquematizan los flujos volumétricos resumidas en la tabla 4.3:

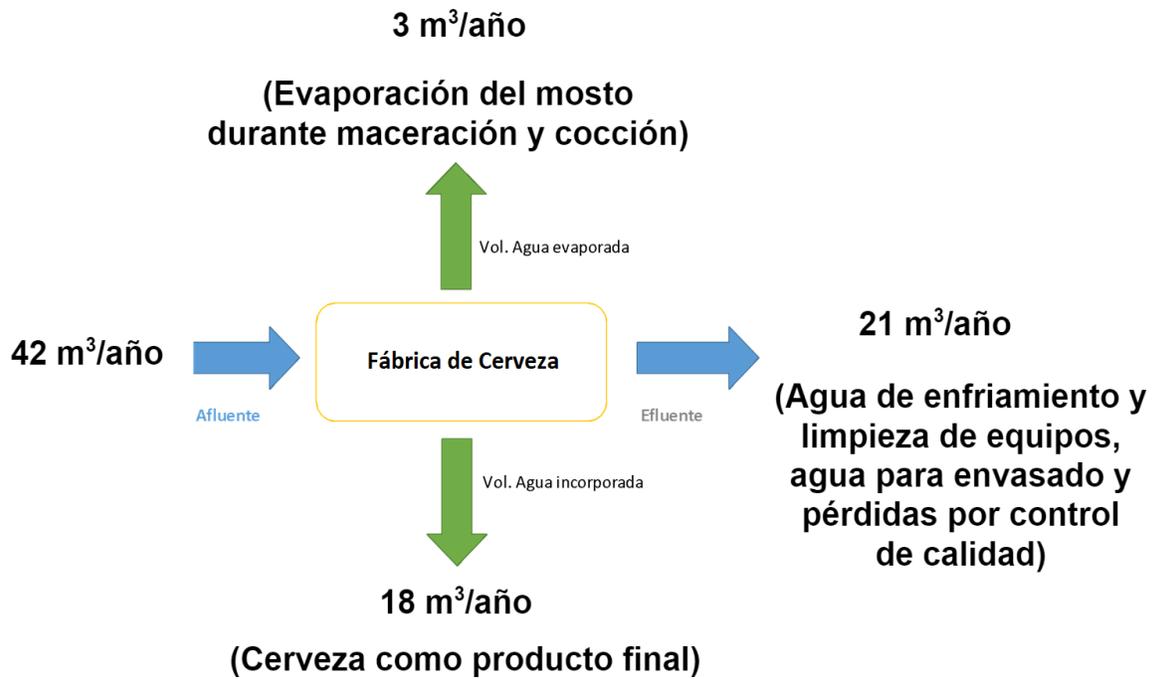


Figura 4.3: Flujos volumétricos relacionados a la fabricación de cerveza.

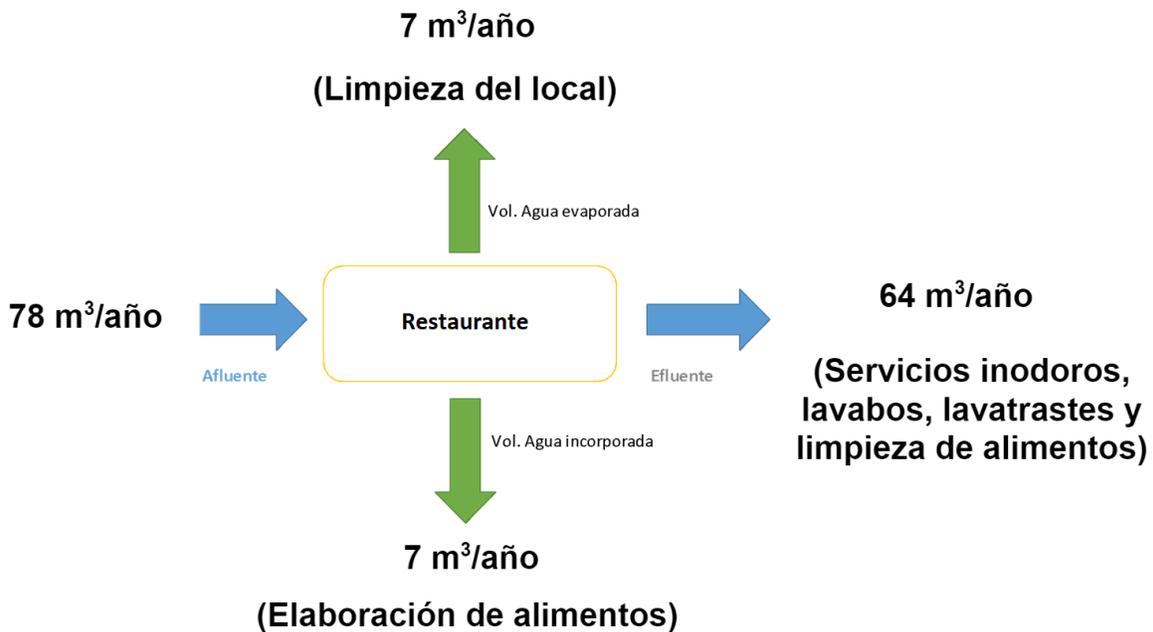


Figura 4.4: Flujos volumétricos relacionados al restaurante

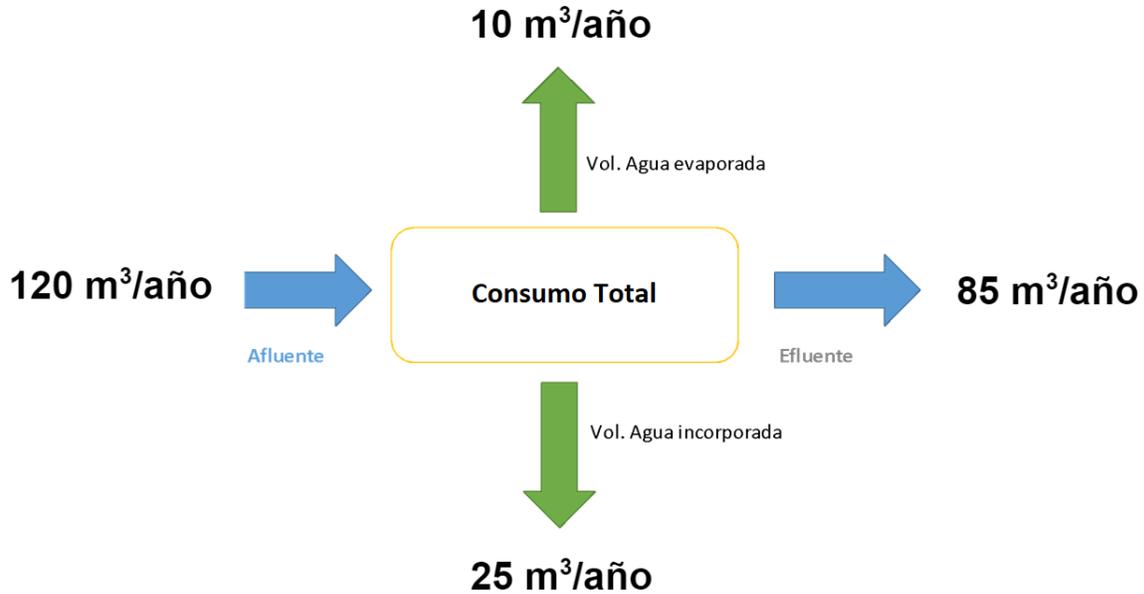


Figura 4.5: Flujos volumétricos totales.

Con estos datos, se procede a calcular la HH azul.

4.1. CÁLCULO DE LA HH AZUL

Para el cálculo de la huella hídrica azul, se puede hacer uso tanto de la ecuación (4) como de la ecuación (5), pero por conveniencia se usará la ecuación (5):

$$HH_{azul} = Vol_{afl} - Vol_{efl} \quad (5)$$

Se realizará el cálculo para las huellas individuales de la fábrica de cerveza y del restaurante y posteriormente se calculará la huella hídrica total de todo el complejo.

De la Tabla 4.3 se obtienen los datos para el volumen de afluente y efluente de la fábrica de cerveza, que son respectivamente $42 \text{ m}^3/\text{año}$ y $21 \text{ m}^3/\text{año}$. Con estos datos se procede a calcular la huella hídrica azul de la fábrica de cerveza:

$$HH_{azulP} = 42 \text{ m}^3/\text{año} - 21 \text{ m}^3/\text{año} = 21 \text{ m}^3/\text{año}$$

De la Tabla 4.3 también se obtienen los datos para el volumen de afluente y efluente del restaurante, siendo estos respectivamente 78 m³ y 64 m³. Ahora se procede a calcular la huella hídrica azul del restaurante:

$$HH_{azul R} = 78 \text{ m}^3/\text{año} - 64 \text{ m}^3/\text{año} = 14 \text{ m}^3/\text{año}$$

Ahora, se procede a calcular la huella hídrica azul del complejo entero, usando nuevamente datos de la Tabla 4.3 para el afluente y efluente (120 m³/año y 85 m³/año respectivamente):

$$HH_{azul total} = 120 \text{ m}^3/\text{año} - 85 \text{ m}^3/\text{año} = 35 \text{ m}^3/\text{año}$$

4.2. CÁLCULO DE LA HH GRIS

Retomando la ecuación 6:

$$HH_{gris} = \frac{(Vol_{efl} * C_{efl}) - (Vol_{afl} * C_{afl})}{C_{max} - C_{nat}} \quad (6)$$

Los volúmenes del afluente y del efluente son valores conocidos determinados por el balance hídrico. La empresa cervecera es abastecida por el servicio de agua potable proporcionado por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) y las descargas de las aguas residuales de tipo especial provenientes de la fabricación de la cerveza y las de tipo ordinario se realizan en el alcantarillado sanitario.

Los parámetros a evaluar son los Sólidos sedimentables (SS), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), como se mencionó en el capítulo anterior. Para el caso de la concentración máxima permisible para cada parámetro, nos remitimos a la NORMA PARA REGULAR CALIDAD DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL DESCARGADAS AL ALCANTARILLADO SANITARIO (2009). En la Tabla 4.4 se resumen los límites permisibles para cada parámetro extraídos de la norma.

Tabla 4.4: Datos para C_{max}

Parámetro	Unidades	Valor máximo permisible
Sólidos sedimentables	mg/L	20
DQO	mg/L	1000
DBO ₅	mg/L	400

Para el caso de los parámetros solicitados en el afluente, se refiere siempre al agua potable que brinda el servicio de ANDA para abastecer a la empresa. De acuerdo a la NSO 13.07.01:08. AGUA. AGUA POTABLE, no se especifican límites permisibles para los parámetros en cuestión. Dicho esto, se toma como referencia el Compendio de Estadísticas Ambientales (2009), resumiendo la información en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5: Datos para C_{af1}

Parámetro	Unidades	Valor máximo permisible
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	25
DQO	mg/L	10
DBO ₅	mg/L	3

Estos valores corresponden a la de agua con calidad excelente. Para efecto de cálculo, se utilizará el valor de los Sólidos suspendidos totales al no tener un valor exacto para los Sólidos sedimentables. Además, es completamente desconocida la concentración de estos parámetros en el efluente que se descarga al alcantarillado sanitario, por lo que se recurre a información bibliográfica. De acuerdo a la Escuela de Organización Industrial de Sevilla (2008), los datos medios básicos de estas aguas residuales, procedentes de varias fábricas europeas, se muestran en la Tabla 4.6:

Tabla 4.6: Datos para C_{efl}

Parámetro	Unidades	Valor máximo promedio
Sólidos sedimentables (SS)	mg/L	1,500
DQO	mg/L	5,000
DBO ₅	mg/L	4,500

Por último, sobre la concentración natural libre de impactos antropogénicos del parámetro medido, Hoekstra et. al. (2011) nos dice lo siguiente: “La concentración natural en una masa de agua receptora es la concentración en dicho medio que tendrá lugar si en su zona de captación no existe intervención por parte del hombre. Para sustancias de origen antrópico que de forma natural no están presentes en el agua, $C_{nat} = 0$. Cuando no se conocen con precisión las concentraciones naturales, pero se estima que sean bajas, para simplificar se puede asumir que $C_{nat} = 0$ ”. Se encuentra de manera resumida la información para el cálculo de la HH gris en la Tabla 4.7:

Tabla 4.7: Resumen de variables para cálculo de HH gris

PRODUCCIÓN DE CERVEZA			
Variable	DQO	DBO ₅	SS
Vol_{afl}	42 m ³ /año	42 m ³ /año	42 m ³ /año
Vol_{efl}	21 m ³ /año	21 m ³ /año	21 m ³ /año
C_{afl}	10 ppm	3 ppm	25 ppm
C_{efl}	5,000 ppm	4,500 ppm	1,500 ppm
C_{max}	1,000 ppm	400 ppm	20 ppm
HH_{grisP}	104.58 m ³ /año	235.94 m ³ /año	1,522.5 m ³ /año

De la Tabla 4.7 se observa que con el parámetro de Sólidos sedimentables se obtiene una HH gris mayor, con un valor de 1,522.5 m³/año. Sin embargo, se

considerará como real el valor obtenido de la HH gris para la demanda biológica de oxígeno. Hay que recordar que la huella hídrica gris se define como el volumen de agua dulce que se necesita para asimilar la carga de contaminantes, por lo que el valor de 235.94 m³/año es el que se ajusta más a la realidad si se compara con el volumen de efluente de 21 m³/año. También, la producción, al ser del tipo artesanal, no recurre a la elaboración del malteado de la cebada dentro de las instalaciones, ya que la malta se compra en el mercado, por lo que el valor de los Sólidos sedimentables de la tabla 4.7 no es representativo para el trabajo. Por lo tanto:

$$HH_{grisP} = 235.94 \text{ m}^3/\text{año}$$

Para el caso del restaurante, siguen aplicando las concentraciones en el afluente de la tabla 4.5 y las concentraciones máximas de acuerdo a la Norma. Para la concentración de los parámetros en el efluente del restaurante, que también son completamente desconocidos, se recurre a información bibliográfica. Según el trabajo de investigación de Ayala, Quezada y Rodríguez (2018) titulado como *Calidad de las aguas residuales del tipo especial en la ciudad La Libertad, El Salvador*, para el año 2018, se reportan valores promedio para la caracterización fisicoquímica de aguas residuales provenientes de restaurantes. Los datos de interés se resumen en la tabla 4.8:

Tabla 4.8: Datos para C_{eff}

Parámetro	Unidad	Valor promedio
DBO ₅	ppm	1,370.48
DQO	ppm	2,356.14
SS	ppm	12.01

Completada la información necesaria para el cálculo de la HH gris del restaurante, se resume la información en la tabla 4.9:

Tabla 4.9: Resumen de variables para cálculo de HH gris

RESTAURANTE			
Variable	DQO	DBO₅	SS
Vol _{afl}	78 m ³ /año	78 m ³ /año	78 m ³ /año
Vol _{efl}	64 m ³ /año	64 m ³ /año	64 m ³ /año
C _{afl}	10 ppm	3 ppm	25 ppm
C _{efl}	2,356.14 ppm	1,370.48 ppm	12.01 ppm
C _{max}	1,000 ppm	400 ppm	20 ppm
HH _{grisP}	150.01 m ³ /año	218.69 m ³ /año	-59.07 m ³ /año

Para el caso de los Sólidos sedimentables, se obtiene un valor negativo ya que la concentración en el afluente, según la referencia, es de 25 ppm de Sólidos totales. Se decidió utilizar ese valor para los cálculos ya que no se cuenta con más información sobre la concentración de Sólidos sedimentables en agua con calidad potable. De igual manera que para la producción de la cerveza, se tomará como resultado final la HH gris proveniente de la concentración de la demanda biológica de oxígeno:

$$HH_{grisR} = 218.69 \text{ m}^3/\text{año}$$

4.3. CÁLCULO DE LA HH INDIRECTA

La tabla 4.10 establece la cantidad de ingredientes consumidos semanalmente en el restaurante, proporcionadas verbalmente por Roca C. (2022).

Tabla 4.10: Consumo semanal de productos en restaurante

Ingrediente	Cantidad (libras)
Chicharrón	15
Harina	5
Carne de res	10
Tomate	6
Cebolla	6
Aceite (de maíz)	6

Empleando la ecuación 7, $HH_{ind} = \sum_p(C_p * HH_p)$, y considerando los ingredientes más significativos en la cocina del restaurante, se calcula la HH Indirecta del restaurante. Se presenta resumida la información en tabla 4.11, donde los datos de huella hídrica equivalente fueron obtenidos de la base de datos de la Water Footprint Network y las cantidades de producto han sido convertidas de libras a toneladas.

Tabla 4.11: Datos para cálculo de la HH Indirecta del restaurante

Productos	Cantidad de producto al año (ton)	Huella hídrica equivalente (m ³ /ton)	HH indirecta (m ³)
Harina	0.125	5	1
Carne de cerdo	0.375	5,117	1,919
Carne de res	0.25	22,247	5,562
Tomate	0.15	108	16
Cebolla	0.15	176	26
Aceite (de maíz)	0.15	1,956	293
Total			7,817

Por lo tanto, la HH Indirecta asociada al restaurante es de 7,817 m³/año. Para el caso de la producción de la cerveza, se resumen los siguientes datos por lote de fabricación en tabla 4.12, información también brindada verbalmente por Roca C. (2022).

Tabla 4.12: Datos de consumo por lote de fabricación

Ingrediente	Cantidad (kg)
Malta	225
Lúpulo	5
Levadura	0.5
Aluminio (1 lata pesa 13.6 g)	34.48

La cantidad de aluminio por lote se obtiene dividiendo el tamaño del lote entre el volumen de cada lata (355 mL), cuyo resultado se multiplica por lo que pesa una lata. Con estos valores, se procede al cálculo de la HH Indirecta de la producción,

resumida en la tabla 4.13 (donde las cantidades han sido convertidas de kilogramos a toneladas):

Tabla 4.13: Resumen de datos para cálculo de HH Indirecta de la producción

Productos	Cantidad de producto al año (ton)	Huella hídrica equivalente (m³/ton)	HH indirecta (m³)
Malta	4.5	2,078	9,351
Lúpulo	0.1	2,382	238.2
Levadura	0.01	51	0.51
Aluminio	0.69	18.2	12.55
Total			9,602.26

La HH Indirecta de la producción de cerveza es de 9,602.26 m³/año. En tabla 4.14 se muestra el valor para cada HH y el total para la empresa:

Tabla 4.14: Resumen de HH contabilizadas

Tipo de Huella Hídrica	Restaurante	Producción
HH Azul (m ³ /año)	14	21
HH Gris (m ³ /año)	218.69	235.94
HH Indirecta (m ³ /año)	7,817	9,602.26
Total (m³/año)	8,049.69	9,859.20

Siendo la Huella Hídrica total de la empresa para el año 2021:

$$HH = 17,908.89 \text{ m}^3/\text{año}$$

La composición de la HH de la empresa se puede observar en Figura 4.6, siendo la producción de la cerveza la que más contribuye a la misma:

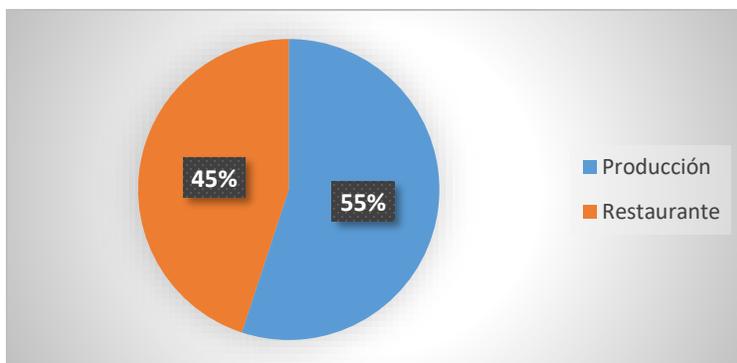


Figura 4.6: Composición de la HH de la empresa

4.4. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD

Con las ecuaciones 8 y 9 y con el dato reportado en la Figura 3.2, se calcula la disponibilidad real anual de la cuenca:

$$\text{Requerimiento natural} = 10,216.1 \text{ MMC} * 0.8$$

$$\text{Requerimiento natural} = 8,172.88 \text{ MMC}$$

$$\text{Disponibilidad real de agua} = 10,216.1 \text{ MMC} - 8,172.88 \text{ MMC}$$

$$\text{Disponibilidad real de agua} = 2,043.22 \text{ MMC}$$

Con el valor obtenido para la disponibilidad real de agua y la HH azul de la empresa, se calcula la sostenibilidad de agua, empleando la ecuación 10:

$$\text{Sostenibilidad HH Azul} = \frac{35 \text{ m}^3}{2,043.22 \times 10^6 \text{ m}^3}$$

Obteniendo como resultado un valor que es aproximadamente 0. Por lo tanto, no existe un impacto ambiental en cuanto al consumo de agua. Para el índice de contaminación, se aplica la ecuación 11:

$$\text{Sostenibilidad HH Gris} = \frac{454.63 \text{ m}^3}{10,216.1 \times 10^6 \text{ m}^3}$$

De igual manera, se obtiene un resultado que es aproximadamente 0. Es decir, la cuenca es capaz de depurar por sí sola la contaminación hídrica generada por la empresa.

4.5. FORMULACIÓN DE RESPUESTAS

Como parte de la metodología WFP, la formulación de respuestas se divide en oportunidades de mejora, acciones preventivas y acciones correctivas, resumidas en la tabla 4.15:

Tabla 4.15: Propuestas para la reducción de la HH

HH	Acciones a tomar para su reducción
HH azul de restaurante	Implementación de baños ecoeficientes
HH azul de cervecería	Adquisición de una hidrolavadora
HH gris de cervecería	Planta de tratamiento de aguas residuales
HH gris de restaurante	Implementación de un plan de mantenimiento preventivo a las trampas de grasa instaladas.

La HH indirecta del restaurante está directamente relacionada con su menú, y la HH indirecta de la producción de cerveza con su formulación, por lo que no se toman en cuenta en la toma de acciones para su respectiva reducción.

4.5.1. Oportunidades de Mejora

Como primera propuesta se tiene la implementación de baños ecoeficientes. Las especificaciones de la Figura 4.7 se toman en cuenta para realizar los cálculos:



Inodoro elongado blanco hueso 1 pieza RICHFORD
SKU#80497
\$ 160.00 / PZA

- Retiro en tienda 2HRS
- Envío a domicilio (Express) Siguiendo día hábil LUN - VIE
- Envío a domicilio (Estandar) 3 - 5 días hábiles

1

Figura 4.7: Imagen de inodoro ecoeficiente. **Fuente:** Cotizado en tienda virtual de Vidrí El Salvador: <https://acortar.link/uHc1L6>

Datos para análisis:

- I. Costo: \$160.00
- II. Gasto de agua inodoro común: 6 L/descarga (dato impreso en los inodoros del local).
- III. Gasto de agua inodoro ecológico: 3 L/descarga (dato especificado en la página de Vidrí).
- IV. Costo de agua: \$0.90/ m³ (dato especificado en la parte trasera de cualquier factura de agua).

$$\text{Ahorro de agua} = \left(\frac{6 \text{ L/desc} - 3 \text{ L/desc}}{6 \text{ L/desc}} \right) \times 100\% = 50\%$$

Cabe mencionar que no se considera la cantidad de inodoros en la ecuación *ahorro de agua* debido a que este número se cancela por factor común.

$$\text{Ahorro económico anual} = (26 \text{ m}^3/\text{año})(\$0.9/\text{m}^3)(0.5) = \$11.70/\text{año}$$

La adquisición de inodoros ecoeficientes le permitirá a la empresa ahorrar el 50% de agua utilizada en los servicios sanitarios, representando a su vez un ahorro de 11.70 US\$/año. El periodo simple de retorno de la inversión se calcula dividiendo el costo de los inodoros entre el ahorro generado:

$$\frac{\$160}{\$11.70/\text{año}} = 13.7 \text{ años}$$

Como segunda propuesta se tiene la adquisición de una hidrolavadora, representada en Figura 4.8:

Inicio / Automotriz / Limpieza y protección / Hidrolavadoras y limpiadoras a vapor / Hidrolavadoras



**Hidrolavadora 1600psi 1.4gpm
AR BLUE CLEAN**

SKU#405350

\$ 132.00 / PZA

Regular: \$155.00
Ahorro: \$23.00 (15%)

Vigencia: 07/10/2022 - 31/12/2022

- Retiro en tienda 2HRS
- Envío a domicilio (Express)
Siguiendo día hábil LUN - VIE
- Envío a domicilio (Estandar)
3 - 5 días hábiles

1

Figura 4.8: Imagen de hidrolavadora. **Fuente:** Cotizado en tienda virtual de Vidri El Salvador: <https://acortar.link/uHc1L6>

Datos para análisis:

- I. Costo: \$132.00
- II. Caudal de hidrolavadora: 1.4 gal/min (dato especificado en la página de Vidri).
- III. Caudal de manguera: 4.8 gal/ min (EEA, 2015).
- IV. Costo de agua: \$0.90/ m³

$$\text{Ahorro de agua} = \left(\frac{4.8 \text{ gal/min} - 1.4 \text{ gal/min}}{4.8 \text{ gal/min}} \right) \times 100\% = 71\%$$

$$\text{Ahorro económico anual} = (13 \text{ m}^3/\text{año})(\$0.9/\text{m}^3)(0.71) = \$8.30/\text{año}$$

La adquisición de la hidrolavadora le permitirá a la empresa ahorrar el 71% de agua utilizada en lavado y un ahorro de 8.30 US\$/año. Nuevamente, se calcula el periodo simple de retorno de la inversión:

$$\frac{\$132}{\$8.30/\text{año}} = 16 \text{ años}$$

4.5.2. Acciones Correctivas

Como parte de las acciones correctivas, se recomienda la instalación de una planta de tratamiento de aguas residuales para depurar el efluente proveniente de la producción de cerveza. Anualmente, se descargan 21 m³ provenientes de estas actividades. Considerando que anualmente se fabrican 20 lotes de 1,000 litros de cerveza cada uno, se puede obtener como relación que se generan 1.05 m³ de agua residual por lote fabricado (1,050 litros). Es una cantidad poca de agua residual que, como se menciona en el análisis de sostenibilidad, la cuenca puede depurar de manera natural. Por lo tanto, se justifica la implementación de la planta de aguas residuales para evitar problemas legales que se puedan tener con la autoridad regulatoria, ya que, independientemente de la cantidad de agua a depurar, siempre existe un incumplimiento de las normas ambientales relacionadas a la calidad del agua que entra al relleno sanitario. El diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales nace de la caracterización del agua a depurar. Como se ha mencionado anteriormente, no se cuenta con los parámetros reales de calidad del agua residual, por lo que se tomarán como base los parámetros en la tabla 4.6:

Tabla 4.6: Datos para C_{eff}

Parámetro	Unidades	Valor máximo promedio
Sólidos sedimentables (SS)	mg/L	1,500
DQO	mg/L	5,000
DBO ₅	mg/L	4,500

Tomando en cuenta la relación $DBO_5/DQO = 0.8$, se concluye que las aguas son fácilmente biodegradables, por lo que es recomendable el empleo de un sistema anaerobio buscando como objetivo principal la disminución significativa de estos valores.

Como parte del pre-tratamiento, se sugiere emplear un tanque neutralizador, ya que es importante controlar el pH para que en la etapa del tratamiento anaerobio los microorganismos puedan actuar de manera óptima sobre la materia orgánica. En las operaciones de limpieza de los equipos y barriles, se utiliza una solución básica y una solución ácida, que se neutralizarían al entrar al tanque. Es importante mantener el pH medido y controlado en esta etapa, por lo que se recomienda dosificar con la misma solución limpiadora ya sea básica o ácida, según sea el caso, si se necesitara estabilizar el caudal a depurar.

Luego se ingresa por un digestor de lodo convencional, que es la operación central de la planta de tratamiento, el cual es un contenedor herméticamente cerrado y dentro del cual se deposita la materia orgánica. Estos digestores trabajan a flujo discontinuo, y debido a que no son agitados, están estratificados: una capa superior de nata, relativamente inactiva; una capa intermedia de la que sedimentan los sólidos; y una capa inferior de sólidos digeridos. Se requiere de altos tiempos de retención. Los materiales orgánicos fermentan con cierta cantidad de agua, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en fósforo, potasio y nitrógeno. El proceso de biodigestión se da porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos en la carga que cuando interaccionan

con el material orgánico produce una mezcla de gases llamada biogás. El biogás es utilizado como combustible y como resultado de este proceso se generan residuos con una alta concentración de nutrientes que pueden ser utilizados como fertilizantes y tal cual como salen del tratamiento, ya que por el tratamiento anaerobio los malos olores son eliminados. En la Figura 4.9 se tiene un ejemplo de este equipo:



Figura 4.9: Digestor anaerobio convencional (Menéndez y Pérez, 2007).

A la salida del biodigestor, se dirige el agua residual a una etapa de coagulación-floculación, para reducir parámetros como sólidos sedimentables, suspendidos, turbidez. El agua se deberá someter a una agitación violenta en una unidad denominada de mezcla rápida, en la que, con ayuda de algunos agentes químicos llamados coagulantes, se propicia la desestabilización de la materia suspendida y/o acción de puentes químicos que permiten la formación de pequeños microflóculos, los cuales son aglutinados en partículas de mayor tamaño en unidades denominadas de mezcla lenta (en un proceso llamado floculación) en los que se propicia su adherencia, con ayuda de un polímero. Posteriormente, las partículas ya desestabilizadas y aglutinadas poseen el tamaño y densidades suficientes para poder ser removidas por acción de la gravedad en un sedimentador. Los coagulantes más comunes utilizados son la alúmina, policloruro de aluminio (PAC), sulfato férrico y cloruro férrico. El producto de esta etapa de

tratamiento es agua relativamente libre de materia orgánica y lodos no estabilizados que son la suma de la materia orgánica, disuelta y suspendida, removida del agua y los coagulantes añadidos.

La determinación de las dosis óptimas de coagulante y de polímero se hace mediante una prueba de jarras. Este proceso requiere como datos previos mínimos los valores de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda. (Romero Rojas, 2002). En la prueba de jarras se utilizan variaciones en la dosis del coagulante y/o polímero en cada jarra (generalmente se usan equipos de seis (6) jarras), permitiendo la reducción de los coloides en suspensión y materia orgánica a través del proceso de floculación; es decir, simula los procesos unitarios de coagulación, floculación y sedimentación, permitiendo además realizar el ajuste en el pH de cada muestra hasta llegar a los valores en los que la floculación alcanza sus mejores resultados, los cuales dependen del tipo de reactivo a utilizar, aunque generalmente se maneja un pH entre 7,3 a 7,6. (Navarro, 2015) El principal objetivo del test de jarras es encontrar la dosis ideal para el proceso unitario que produzca la mejor calidad de agua posible a los menores costos.

Del sedimentador, saldrá agua clarificada que pasará por una última etapa de filtración, y se obtendrán también lodos, que necesitarán su debida gestión. La etapa de filtración puede ser a través de filtros multimedia compuestos generalmente por antracita, grava o arena. El agua filtrada tendrá como destino final el alcantarillado sanitario. En la tabla 4.16 se encuentra los parámetros de diseño y operación para cada etapa ya mencionada:

Tabla 4.16: Parámetros de diseño y operación del tren de tratamiento

Etapa	Parámetro de diseño	Parámetro de operación
Tanque neutralizador	Caudal a tratar	Agitación constante, ya sea por medio de aireadores o aspas mezcladoras
	Volumen del tanque	pH
Sistema anaerobio (biodigestor)	Flujo volumétrico del afluente	Temperatura
	Bacterias anaerobias a emplear (biomasa)	
	Caracterización fisicoquímica y biológica del afluente	pH
	Tiempo de retención hidráulico	
	Volumen del reactor	
Coagulación	Volumen del reactor	Agitación mecánica rápida
	Caudal a tratar	
	Concentración de coagulante	pH
	Dosis de coagulante	
Floculación	Volumen del reactor	Agitación mecánica lenta
	Caudal a tratar	
	Concentración de polímero	pH
	Dosis de polímero	
Sedimentación	Tiempo de retención	Sólidos suspendidos totales
	Caudal a tratar	
	Volumen del tanque	
Filtración final	Media filtrante	Presión de trabajo
	Presión de trabajo	
	Caudal a tratar	

4.5.3. Acciones Preventivas

Para el correcto mantenimiento y funcionamiento de las trampas de grasas instaladas en el restaurante, se propone el siguiente *plan de mantenimiento preventivo a las trampas de grasa*, que se conforma por dos partes, las recomendaciones y el control documentado de las limpiezas realizadas a las trampas de grasas.

Recomendaciones:

1. Colocar avisos en la cocina, especialmente sobre el lavaplatos, explicando a los colaboradores lo que se puede y no se puede dejar ir por las tuberías.
2. Desechar los residuos de comida de las ollas, sartenes y platos en un basurero antes de ponerlos en el lavaplatos.
3. Colocar un filtro o colador de rejilla fina en el fregadero para contener las sustancias sólidas e igualmente en la salida del lavavajillas para retener los elementos sólidos como el arroz, maíz y otros.
4. Instalar un interceptor especial de sólidos al comienzo de la trampa de grasa para retener las partículas sólidas. Los sólidos ocupan espacio y dificultan la separación de los aceites y grasas. Además, los residuos alimenticios sólidos que se reúnen en una trampa de grasa se descomponen y crean problemas de olor.
5. No vaciar granos de café ni hojas de té en las tuberías.

Control documentado de limpiezas realizadas:

Todas las trampas de grasa deben ser limpiadas con regularidad para que operen de manera eficiente en todo momento.

La frecuencia de la extracción de las grasas depende de diversos factores, el tipo de alimentos que se sirve en el establecimiento, la capacidad de la trampa de grasa y la cantidad de grasa en el agua. La profundidad máxima de los sólidos que se permita acumularse en el fondo de la trampa no deberá ser superior a 2.5 cm.

La profundidad máxima de grasa que se permita acumularse antes de hacer el servicio de limpieza no deberá presentar más del 25% del volumen de líquido de la trampa de grasa.

Debe llevarse un registro escrito de todas las actividades de mantenimiento, limpieza e inspecciones efectuadas en la trampa de grasa del restaurante, para lo cual se recomienda el formulario que se presenta a continuación:

Tabla 4.17: Propuesta de formato para el mantenimiento preventivo de las trampas de grasa

Fecha	Mantenimiento (Sí / No)	Limpieza (Sí / No)	Inspección (Sí / No)

CONCLUSIONES

- I. Con la información obtenida durante las visitas al establecimiento, se calculó que el consumo total estimado de la cervecería artesanal fue de 120 m³ para el año 2021, de los cuales 42 m³ (35% del consumo total) fueron destinados a la fabricación de cerveza y 78 m³ (65% del consumo total) fueron destinados a las actividades del restaurante. Las actividades específicas a las que se dedica este consumo, tanto en la fabricación de cerveza como en el restaurante, están representadas en las tablas 4.1 y 4.2 respectivamente. Cabe mencionar que, en la elaboración de cerveza, el mayor consumo de agua se realiza durante la elaboración del mosto (54.76% del agua dedicada a la cervecería), seguido por el agua utilizada para el enfriamiento del mosto (38.1%); sin embargo, el agua utilizada para el enfriamiento se reutiliza posteriormente para la limpieza de los equipos de producción. En el restaurante, en cambio, los mayores consumos de agua se dan en el uso de los servicios inodoros (33.33% del agua dedicada al restaurante).

- II. Se determinó que los valores de DQO y DBO para el efluente del proceso de producción son de 5,000 mg/L y 4,500 mg/L respectivamente. A su vez, estos valores representan una huella gris de 104.58 m³/año para el caso de la DQO y 235.94 m³/año para la DBO₅. Siguiendo la metodología Water Footprint Network, se considera la HH gris del DBO₅ (235.94 m³/año) como la HH gris real por ser la mayor. Para el caso de la HH gris del restaurante, esta se calculó en 218.69 m³/año, nuevamente relacionada al DBO₅, obteniendo un total de 454.63 m³/año para el complejo entero. En cuanto a la HH azul, la relacionada a la producción de cerveza fue de 21 m³ y la relacionada al restaurante fue de 14 m³, para un total de 35 m³ en la enteridad del complejo.

- III. Se evaluaron las siguientes opciones para la reducción de la huella hídrica del establecimiento: adquisición de servicios inodoros eco-eficientes, adquisición de una hidrolavadora para el lavado de los equipos de producción de cerveza y la instalación de una PTAR para el tratamiento del efluente de la fábrica de cerveza. Sin embargo, aunque las primeras dos opciones contribuirían a un ahorro considerable del recurso hídrico, el bajo costo del agua imposibilita obtener también ahorro económico significativo. Como resultado, el periodo simple de recuperación de la inversión es de 13.7 años para la opción de los inodoros eco-eficientes y 16 años para la opción de la hidrolavadora. Por lo tanto, de aplicarse estas medidas, deberá hacerse considerando nada más el beneficio ecológico. En cuanto a la PTAR, al ser una acción correctiva, su objetivo no es brindar beneficios económicos, nada más ecológicos.
- IV. En los análisis de sostenibilidad para la huella hídrica azul y gris se calculó, con base en los datos brindados por la empresa, que el impacto que la cervecería tiene sobre la cuenca hidrográfica es prácticamente nulo, lo que quiere decir que la cuenca es capaz de reponer el agua consumida y de depurar la contaminación hídrica generada por la cervecería.
- V. Se calculó además la huella hídrica indirecta de los insumos adquiridos por la cervecería para la fabricación de sus productos, la cual resultó ser mucho mayor que las huellas azul y gris. Para la fábrica de cerveza, se estima que la huella hídrica indirecta es de 9,602.26 m³/año, mientras que para el restaurante se estima que es de 7,817 m³/año.

RECOMENDACIONES:

- I. Implementar y dar seguimiento a un programa de concientización del correcto uso del agua a los colaboradores de la cervecería artesanal, ya que el control de la huella hídrica en la empresa debe de trascender a los colaboradores para alcanzar el objetivo final que es la preservación del recurso hídrico para las futuras generaciones.

- II. Con el objetivo de no comprometer de ninguna manera la imagen del establecimiento, se acordó no utilizar su nombre a lo largo de este trabajo. Aun así, no se permitió tomar muestras de agua del efluente para análisis ni disponer de documentos verídicos como facturas mensuales de ANDA, elementos que hubieran contribuido a una investigación más certera y precisa y por consiguiente información útil para la mejora continua de la empresa. En caso de futuras investigaciones, se recomienda una mayor apertura en cuanto a dicha información.

- III. Para un diseño óptimo de la PTAR, se recomienda realizar una caracterización de los efluentes generados durante la producción de cerveza.

- IV. Si bien el impacto que la empresa tiene sobre la cuenca fue calculado como prácticamente nulo, esto no significa que la instalación de una PTAR sea obvia. Es importante recordar que los volúmenes y características fisicoquímicas del efluente podrían variar con respecto a los calculados en este estudio, por lo que el impacto real de la empresa también podría ser mayor. Por lo tanto, siempre se recomienda la instalación de una PTAR.

BIBLIOGRAFÍA

1. Buxmann, K., Koehler, A. y Thylmann, D. (2016). Water scarcity footprint of primary aluminium. *Int J Life Cycle Assess* 21, 1605–1615. Berlín, Alemania.
<https://doi.org/10.1007/s11367-015-0997-1>
2. Cirelli, A. (2012) El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, (11)3, 147-170. Buenos Aires, Argentina. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>
3. European Environment Agency (EEA). (2015). Consejos verdes. Unión Europea. Bélgica. <https://onx.la/93485>
4. Fernández, A. (2011) Huella hídrica. Análisis de la potencialidad de aplicación de la herramienta en la realidad empresarial argentina. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Luján]. <https://acortar.link/mawFsk>
5. Ferretería Vidrí El Salvador. Tienda virtual. Departamento de automotriz: hidrolavadoras y limpiadoras a vapor. Consultado en septiembre de 2022.
<https://acortar.link/y84sx8>
6. Ferretería Vidrí El Salvador. Tienda virtual. Departamento de baños: inodoros. Consultado en septiembre de 2022. <https://acortar.link/uHc1L6>
7. Franzén, Linda (2014). Water flow analysis of Jästbolaget – An assessment of the yeast production's environmental impact, caused by its water consumption. [Bachelor's thesis, Royal Institute of Technology]. Estocolmo, Suecia.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:732743/FULLTEXT01.pdf>
8. García Olmedo, F. (1965). El Malteo de la Cebada. Madrid, España.
https://oa.upm.es/8007/1/Olmedo_171.pdf

9. Girbau García. Enfermería Comunitaria I. Salud Pública. Masón 2002. Barcelona, España. <https://acortar.link/IVyeR>
10. Gisbert Verdú, M. (2016). Diseño del Proceso Industrial para la Elaboración de Cerveza. Valencia, España. <https://onx.la/abe9a>
11. Guamán, D., Illares, F. (2019) Análisis de la huella hídrica en el campus de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca mediante el uso de redes de telemetría. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17729/1/UPS-CT008404.pdf>
12. Hernández, A., Hernández, J. (2019) Determinación de la huella hídrica en los procesos productivos de la leche y su nivel tecnológico en dos ganaderías del occidente de El Salvador. [Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador]. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/20392/1/13101706.pdf>
13. Hernández, E. (2010) Importancia del agua para los seres vivos. *Elementalwatson la revista*, 1(1), 9-17. Buenos Aires, Argentina. <https://n9.cl/uk0hb>
14. Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., Mekonnen, M. (2011) The Waterfoot Print Assesment Manual: Setting the Global Standard. Washington DC, Estados Unidos. 228p. <https://onx.la/0bc79>
15. Ibarra Turcios, A. M., Campos Jarquín, U., Y Rivera, F. J. (2001). Hacia la Gestión Sustentable del Agua en El Salvador. San Salvador, El Salvador. <https://onx.la/70205>
16. Laboratorio de Investigación en Productos, Universidad Nacional de La Plata. (2020). Introducción a la Elaboración de Cerveza Artesanal. La Plata, Argentina. <https://onx.la/7f510>

17. Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. (2010) The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, Value of Water Research Report Series No. 47, UNESCO-IHE, Delft, Países Bajos. <https://n9.cl/vrv28>
18. Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. (2010) The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products, Value of Water Research Report Series No. 48, UNESCO-IHE, Delft, Países Bajos.
19. Mesa de Agua. (2013) Sin agua, El Salvador no puede sobrevivir. [Archivo PDF]. <http://www.funde.org/sin-agua-el-salvador-no-puede-sobrevivir>
20. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2015). Informe Sobre Sequia Hidrológica Mayo – Agosto 2015. San Salvador, El Salvador. <https://onx.la/08e65>
21. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). Sistema de Información Hídrica (SIHI). Reporte de dato de disponibilidad natural de la cuenca río Lempa para el año 2022. <http://srt.snet.gob.sv/sihi/public/>
22. Roca C. (Agosto 2022). Entrevista personal con el Ingeniero y Maestro Cervecerero de la Cervecería Artesanal en Estudio. San Salvador. El Salvador.
23. Rosales-Ayala, Francisco, Rovira-Quezada, Dolores, & Campos-Rodríguez, Roel. (2019). Calidad de las aguas residuales de tipo especial en la ciudad La Libertad, El Salvador. Revista Tecnología en Marcha, 32(3), 135-145. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v32i3.4504>
24. Semarnat, Dirección General de Estadística e Información Ambiental (2009). Compendio de Estadísticas Ambientales, 1ra edición, México. <https://onx.la/ae2b2>

25. Sotelo, M. (2018) Aspectos económicos, sociales y territoriales de la huella hídrica española. [Tesis de pregrado, Universidad Complutense de Madrid].
<https://eprints.ucm.es/id/eprint/47991/1/T40003.pdf>
26. Sustainable Microbrewers Learning Network (SMILE). (2017). Principios de la industria cervecera y de la producción de cerveza. Bélgica. <https://onx.la/b9534>
27. Tolón Becerra, A., Lastra, X., Fernández, V. (2013) Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. *Revista Electrónica de Medioambiente*, 14(1), 56-86. Almería, España. <https://n9.cl/12xqc>
28. Trigueros Fabeiro, G. (2017). El Salvador es el país más cervecero de América. Diario El Salvador. San Salvador, El Salvador. <https://acortar.link/Z9MUzV>
29. WFP, España (2009) Manual para la evaluación de la Huella Hídrica. [Archivo PDF]. <https://waterfootprint.org/media/downloads/ManualEvaluacionHH.pdf>