

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**APLICACIÓN DE PRINCIPIOS DE CIRCULARIDAD DEL AGUA EN LA GESTIÓN DEL
RECURSO HÍDRICO EN EL BENEFICIADO DE CAFÉ**

TESIS SOMETIDA A LA CONSIDERACIÓN DE LA COMISIÓN DEL PROGRAMA DE
POSGRADO EN GEOGRAFÍA PARA OPTAR AL GRADO Y TÍTULO DE MAESTRÍA
ACADÉMICA EN GESTIÓN INTEGRADA DEL RECURSO HÍDRICO PARA
LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE

DANIEL ULLOA OVARES

CARNÉ: B37065

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO, COSTA RICA

Agradecimiento

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este proyecto.

A mi pareja, Carolina, por su apoyo incondicional, paciencia y motivación constante durante todo el proceso. A mi familia, por estar siempre presentes y brindar soporte emocional y moral, siendo una base fundamental en cada etapa de este proyecto.

A Camila Charpentier, por su invaluable guía en el uso del software de análisis de ciclo de vida y por compartir su conocimiento de manera generosa y paciente. Al profesor Christian, por su apoyo y orientación que me permitieron retomar el proyecto con confianza y claridad.

Al ICAFE, por su colaboración a través del aporte de datos, múltiples visitas al campo y explicaciones detalladas, que enriquecieron la calidad y alcance de esta investigación.

Al comité de tesis, conformado por sus tres miembros, por su disposición, paciencia y valiosas observaciones durante la revisión del trabajo, contribuyendo significativamente a su mejora.

A todos ustedes, mi sincero reconocimiento y gratitud.

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Posgrado en Geografía de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de de Maestría Académica en Gestión Integrada del Recurso Hídrico para Latinoamérica y el Caribe

Dr. Christian Birkel
Representante de la Decana
Sistema de Estudios de Posgrado

Dr. Edgar Espinoza
Director de Tesis

M.Eng. Rolando Chacón
Asesor

Dr. Roberto Quirós
Asesor

DEA Pascal Girot Pignot
Representante Programa de Posgrado en Geografía

Daniel Ulloa Ovares
Sustentante

Índice

Agradecimiento.....	iii
Índice.....	v
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tablas.....	ix
Resumen.....	xi
1. Introducción.....	1
2. Problemática.....	3
3. Justificación.....	5
4. Marco Referencial.....	7
4.1. Economía Circular.....	7
4.2. Huella hídrica.....	8
4.3. ISO 14046:2014 Gestión medioambiental - Huella hídrica - Principios, requisitos y directrices.....	8
4.4. Métrica de circularidad del agua WCM.....	10
4.5 Otros enfoques de circularidad del agua.....	11
4.6. Beneficio de Café.....	13
5. Objetivos y metodología.....	15
5.1. Objetivo General.....	15
5.2. Objetivo Específico 1.....	15
5.3. Objetivo Específico 2.....	18
5.4. Objetivo Específico 3:.....	22
6. Resultados y discusión.....	23
6.1. Aspectos generales.....	23
6.2. Objetivo del estudio.....	23
6.2.1 Razones para llevar a cabo el estudio.....	23
6.2.2 Aplicación deseada de los resultados.....	23
6.2.3 Público objetivo.....	24
6.2.4 Enfoque independiente en la evaluación de la huella hídrica en la industria de beneficiado de café.....	24
6.2.5 Enfoque singular sin aseveraciones comparativas.....	24
6.3. Alcance.....	25
6.3.1 Unidad funcional.....	25
6.3.2 Dimensión temporal y geográfica.....	26

6.3.3	Límites del sistema	26
6.3.4	Reglas de asignación	27
6.3.5	Criterios de corte	27
6.3.6	Datos de inventario.....	28
6.3.7	Supuestos.....	28
6.3.8	Impactos relacionados con el recurso hídrico	29
6.3.9	Análisis de calidad de datos.....	32
6.4.	Análisis de inventario.....	33
6.4.1	Levantamiento de la información y determinación de agua consumida por usos directos	33
6.4.2	Entradas, salidas y balance de masa.....	35
6.4.3	Calidad del agua.....	37
6.4.4	Determinación del consumo de agua indirecto	39
6.5.	Evaluación de impactos relacionados con el uso del recurso hídrico.....	42
6.5.1	Impacto por eutrofización de agua dulce.....	42
6.5.2	Potencial de consumo de agua (WCP)	44
6.5.3	Impacto por escasez de agua	46
6.6.	Análisis de circularidad del agua	50
7.	Limitaciones del estudio	56
8.	Conclusiones y recomendaciones.....	58
9.	Referencias.....	61
Anexo A. Guía práctica para el cálculo de huella hídrica e indicadores de circularidad en beneficios de café		69
1.	Introducción.....	69
2.	Requisitos previos	69
2.1.	Medición de caudales	69
2.2.	Puntos de muestreo de calidad de agua	71
2.3.	Registro y control de datos	71
2.4.	Equipo técnico básico.....	71
2.5.	Herramientas de análisis	71
3.	Evaluación de la Huella Hídrica (INTE/ISO 14046).....	71
Pasos para la evaluación de la huella hídrica		72
Paso 1: Definir el objetivo y el alcance del estudio.....		72
Paso 2: Recopilación de datos.....		79
Paso 3. Análisis del inventario		83

Paso 4. Evaluación de impactos	87
Paso 5. Análisis de circularidad del agua (WCM).....	94
Paso 6. Conclusiones y recomendaciones.....	100
4. Referencias:	101
Anexo B. Datos sin procesar de la medición de caudal.....	103
Anexo C. Informes de calidad de agua	116

Índice de Figuras

Figura 1. Árbol de decisión para evaluar circularidad de la fuente (World Business Council for Sustainable Development, 2021)	20
Figura 2. Criterios de decisión para evaluar circularidad del efluente (World Business Council for Sustainable Development, 2021)	21
Figura 3. Diagrama de flujo del Macro beneficio (Elaboración propia).....	26
Figura 4. Diagrama de flujo del Micro beneficio (Elaboración propia).....	27
Figura 5. Entradas y salidas del proceso de beneficiado de café (Elaboración propia) ...	36
Figura 6. Captura de pantalla del programa Google Earth con la capa de CF (AWARE20_Native_CFs_geospatial.kmz) para identificar el ID de la cuenca donde se ubica el ICAFE, ID 49686 (Seitfudem, et al., 2025).	48
Figura A1. Diagrama de flujo del Macro beneficio en el ICAFE (Elaboración propia)	74
Figura A2. Diagrama de flujo del Micro beneficio en el ICAFE (Elaboración propia)	74
Figura A3. Entradas y salidas del proceso de beneficiado de café (Elaboración propia). ..	84
Figura A4. Árbol de decisión para evaluar circularidad de la fuente (World Business Council for Sustainable Development, 2021)	95
Figura A5. Criterios de decisión para evaluar circularidad del efluente (World Business Council for Sustainable Development, 2021)	96

Índice de Tablas

Tabla 1. Producción de grano oro a partir del café fruta por tipo de partida	25
Tabla 2. Composición del grano de café (Vargas & Mazón, 2004).....	29
Tabla 3. Composición de la pulpa del café (Gómez Mora, 2019).....	29
Tabla 3. Consumo de café fruta	33
Tabla 4. Composición del café.....	34
Tabla 5. Consumos de electricidad, leña, cascarilla, y GLP para ambos procesos	34
Tabla 6. Consumo mensual de agua por medidor.....	34
Tabla 7. Consumo directo de agua por proceso, micro beneficio y macro beneficio	35
Tabla 8. Consumo directo de agua por tipo de partida.....	35
Tabla 9. Entradas de consumos por tonelada de Café Grano Oro	36
Tabla 10. Salidas de residuos y subproductos por tonelada de Café Grano Oro	37
Tabla 11. Resultados de los análisis de calidad de agua en la entrada (agua de pozo)...	38
Tabla 12. Resultados de los análisis de calidad de en la salida del proceso (agua residual)	39
Tabla 13. Agua consumida y fósforo equivalente por uso indirecto de la leña, GLP, electricidad, agua de pozo, vapor y agua residual.	41
Tabla 14. Potencial de eutrofización del agua dulce	43
Tabla 15. Potencial de consumo de agua	44
Tabla 16. Factor de Caracterización (CF) del método AWARE para cada entrada o salida del proceso (Seitfudem, et al., 2025).	47
Tabla 17. Impacto de escasez de agua (AWARE) calculado con el método AWARE.	50
Tabla 18. Circularidad en las fuentes.....	52
Tabla 19. Cálculo del agua recirculada por ton de grano oro en el macro beneficio.....	53
Tabla 20. Indicador de circularidad en el proceso.....	54
Tabla 21. Circularidad en los efluentes	56
Tabla A1. Cálculo del agua recirculada por ton de grano oro en un beneficio.....	70

Tabla A2. Composición del grano de café (Vargas & Mazón, 2004).....	78
Tabla A3. Composición de la pulpa del café (Gómez Mora, 2019).....	78
Tabla A4. Consumo de café fruta en el periodo de estudio en distintas unidades de masa y volumen	81
Tabla A5. Consumos de electricidad, leña, cascarilla, y GLP, en el periodo de estudio ..	81
Tabla A6. Consumo de agua por medidor, en el periodo de estudio (ajuste según su número de medidores y periodo de estudio)	81
Tabla A7. Consumo directo de agua por proceso, en el periodo de estudio (ajuste al número de líneas de proceso de su beneficio).....	82
Tabla A8. Consumo directo de agua por tipo de partida (ajuste al número de partidas de su beneficio)	82
Tabla A9. Resultados de los análisis de calidad de agua en la entrada (agua de pozo)..	82
Tabla A10. Resultados de los análisis de calidad de en la salida del proceso (agua residual)	83
Tabla A11. Composición del café.....	85
Tabla A12. Entradas de consumos por tonelada de Café grano oro	86
Tabla A13. Salidas de residuos y subproductos por tonelada de Café Grano Oro	86
Tabla A14. Agua consumida y fósforo equivalente por uso indirecto de la leña, GLP, electricidad, agua de pozo, vapor y agua residual.....	90
Tabla A15. Potencial de consumo de agua (WCP)	92
Tabla A16. Potencial de eutrofización del agua dulce (FEP)	92
Tabla A17. Indicador de escasez (impacto de escasez de agua) calculado con el método AWARE.....	93
Tabla A18. Circularidad en las fuentes.....	98
Tabla A19. Indicador de circularidad en el proceso.....	98
Tabla A20. Circularidad en los efluentes	99
Tabla B1. Datos sin procesar Medidor 1, caudal total.	103
Tabla B2. Datos sin procesar Medidor 2, caudal del micro beneficio.....	111

Resumen

El proceso de beneficiado del café implica un uso intensivo de agua y genera efluentes con cargas contaminantes, lo que representa un reto para la sostenibilidad hídrica del sector cafetalero. Este estudio se planteó como objetivo principal analizar la circularidad del agua y la huella hídrica en el beneficiado de café del Beneficio Experimental del Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE), con el propósito de proponer estrategias que optimicen la gestión del recurso hídrico. La investigación se realizó bajo el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), aplicando la norma INTE/ISO 14046:2015 para la evaluación de huella hídrica y la herramienta Water Circularity Metric (WCM) del World Business Council for Sustainable Development para determinar indicadores de circularidad en el uso del agua.

Se recopilaron datos primarios de consumo y calidad del agua durante los meses de noviembre y diciembre de 2022, así como datos de producción, insumos y salidas del proceso. Para el análisis ambiental se empleó el software SimaPro junto con la base de datos Ecoinvent v3.11 y el método AWARE, modelando el sistema de beneficiado según los consumos y efluentes.

Los resultados del beneficio (incluyendo ambas líneas de procesamiento) muestran un impacto de escasez de agua (AWARE) total de 8.25 m³ world-eq/ton, lo que indica una presión hídrica moderada asociada al proceso, un Potencial de Consumo de Agua (WCP) de 6.10 m³/tonelada de grano oro y un Potencial de Eutrofización del Agua Dulce (FEP) de 5.9×10^{-2} kg P-eq/tonelada de grano oro. Las métricas de circularidad del agua (WCM) revelan una circularidad en las fuentes del 24.8 %, un indicador de circularidad en el proceso de 14 ciclos en el macro beneficio y 1 ciclo en el micro beneficio, y una circularidad en los efluentes del 12.3 %.

El estudio evidencia oportunidades de mejora en la recirculación interna de agua y en el monitoreo del reúso externo. Además, se elaboró una guía práctica para replicar el cálculo de huella hídrica y circularidad en otros beneficios, promoviendo la adopción de estas herramientas ambientales en el sector cafetalero. Se concluye que es viable avanzar hacia un modelo de gestión hídrica más circular mediante el fortalecimiento del control operativo, la medición de flujos y la integración de criterios de calidad y cantidad del agua en las decisiones del proceso productivo.

En conclusión, para avanzar hacia una gestión hídrica verdaderamente circular, además de implementar sistemas de monitoreo continuo y formalizar protocolos de reúso, es clave

reducir el aporte de agua virtual, mediante la optimización de insumos y fuentes energéticas. Con este enfoque, se consolidará un modelo de largo plazo de gestión integral del recurso hídrico.

Palabras clave: ISO 14046, Economía circular, Water Circularity Metric, aguas residuales, reúso de agua, circularidad, huella hídrica, huella de agua, café, beneficio de café, Potencial de Consumo de Agua (WCP).

1. Introducción

En muchas regiones del mundo el cambio climático muestra efectos tangibles sobre la cantidad, calidad y disponibilidad del recurso hídrico, y se han observado cada vez más frecuentemente casos de escasez de agua tanto por contaminación de las fuentes como por la explotación del recurso (UNESCO WWAP, 2020). Entre las causas relacionadas con la escasez de agua dulce están el crecimiento de la población, la industrialización, la sobreexplotación y la urbanización (Mohan et al., 2021). Además, el crecimiento en el consumo de agua y alimentos a nivel mundial, y el consumo de energía asociado, según el nexo agua-energía-alimento, tiene efecto en el cambio climático y por consecuencia en el ambiente (Walsh et al. 2015).

A nivel mundial el sector industrial consume el 19% del agua dulce que se extrae del ecosistema. Para el caso de Costa Rica este valor es de 7,5%, o el equivalente a $2,4 \times 10^8$ m³/año (FAO, 2017) y se espera que continúe en aumento, contribuyendo a la escasez hídrica. Una propuesta que ha tomado vigencia en años recientes y puede aplicarse en el sector industrial es la economía circular. Este concepto basado en la reducción de los residuos a través de su valorización, permite reducir el consumo de agua y energía en un proceso, y al mismo tiempo las emisiones de carbono (Del Borghi et al.,2020).

El cálculo de la huella de agua es una herramienta de la economía circular desarrollada para que las empresas puedan medir el consumo de agua en sus productos o procesos y así mismo el impacto de estos en el recurso hídrico (Ibáñez et al, 2017). En Costa Rica uno de los productos con más historia e importancia para la economía es el café, cuyas exportaciones en 2020 alcanzaron el 7,97% de PIB agrícola y un 0,27 % del PIB nacional (ICAFE, 2020), se ubica en la posición número cuatro en divisas generadas después del banano, la piña y los jugos y concentrados (SEPSA, 2021). La huella de agua de una taza de café, según Chapagain & Hoekstra (2007), es de 140 L.

Por otra parte, las métricas de circularidad son un recurso de la economía circular que permite diagnosticar cuantitativamente la sostenibilidad de los procesos productivos (Vinante et al., 2020). Un indicador de esta índole que facilita el estudio del consumo de agua y se puede aplicar al beneficiado de café es la Métrica de Circularidad del Agua “*Water Circularity Metric*” (WCM) del World Business Council for Sustainable Development. Este instrumento ayuda a las empresas a obtener datos específicos para medir su circularidad, mapeando el agua en el contexto de las características hídricas del lugar y

calculando la circularidad del recurso (World Business Council for Sustainable Development, 2021).

En este contexto, la presente investigación tiene como propósito analizar la circularidad del agua y la huella hídrica en el beneficiado de café del Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE), con el fin de identificar oportunidades de mejora en la gestión del recurso hídrico. Para ello se aplican herramientas, como la norma INTE/ISO 14046:2015 para la evaluación de huella de agua y la Métrica de Circularidad del Agua (WCM) del World Business Council for Sustainable Development. Se busca no solo cuantificar los impactos asociados al consumo y contaminación del agua en el beneficiado de café, sino también proponer estrategias prácticas, como una guía de aplicación, que promuevan un modelo de gestión hídrica más sostenible y circular en el sector cafetalero costarricense.

2. Problemática

Existen muchos lugares en el mundo en los que hay una grave escasez o contaminación del agua (UNESCO WWAP, 2020). Estos fenómenos se observan como ríos que se secan por periodos más largos (Schreckinger et al., 2022), un descenso del nivel de las aguas subterráneas (Gleeson et al., 2011) y una gran cantidad especies en peligro de extinción a causa del agua contaminada (WWF, 2018).

Latinoamérica y el Caribe es una de las regiones del mundo con más abundancia de recurso hídrico. No obstante, hay datos regionales contrastantes que evidencian que una parte importante de la región sufre de escasez de agua (Mahlknecht & González-Bravo, 2018). Además, la escasez de agua provocada por la coincidencia geográfica del crecimiento demográfico con zonas de moderada a escasa pluviosidad se verá agravada por condiciones climáticas cada vez más secas y variables (Mahlknecht et al., 2020), debido al cambio climático (Desbureaux & Rodella, 2019).

En el caso de Costa Rica se espera que la disponibilidad de recurso hídrico se mantenga relativamente constante en el tiempo. Sin embargo, en las cuencas del Pacífico y el valle central hay proyecciones de un aumento en el estrés hídrico y la escasez del recurso (Stan et al., 2022). En la región del valle central, la principal cuenca es la del río Tárcoles. Dentro de esta cuenca se encuentra el acuífero de Barva, una de las principales fuentes de agua del Gran Área Metropolitana.

Este acuífero está siendo afectado negativamente por grandes presiones de consumo (Castro Peinador et al., 2011), el abastecimiento a las poblaciones urbanas en crecimiento y los cambios en el uso del suelo para aumentar las actividades agropecuarias. Estas presiones a su vez generan contaminación que afecta al acuífero de Barva y las aguas superficiales de la cuenca del río Tárcoles (Chavarría, 2014).

Una de las actividades que ejerce presión por consumo y contaminación sobre el acuífero de Barva es el cultivo de café y su respectivo beneficiado (Madrigal-Solís et al., 2014), como ocurre en el Beneficio Experimental del ICAFE. En el sector cafetalero, el aporte del beneficiado a la huella de agua representa solamente un 0,34 % del agua utilizada para el crecimiento de la planta. No obstante, esta cantidad adquiere relevancia porque corresponde a agua azul, es decir, agua extraída de fuentes superficiales y subterráneas, como el propio acuífero de Barva, que enfrenta presiones crecientes por múltiples usos. A

esto se suma que el beneficiado en húmedo genera aguas residuales con alta carga orgánica y nutrientes, lo que puede deteriorar la calidad del agua si no se manejan adecuadamente (Chapagain & Hoekstra, 2007).

Estudios recientes en Costa Rica confirman la magnitud de este impacto. Fonseca-Sánchez et al. (2019) documentaron en una finca cafetalera de Cartago que el beneficio descarga aguas residuales hacia una laguna de oxidación. Los efluentes del tratamiento se vierten en el río Maravilla y aumentan su carga orgánica, identificándose como una fuente de contaminación para la cuenca. De forma similar, investigaciones en otros países de la región han evidenciado los efectos negativos de este proceso sobre los cuerpos de agua. Pérez-Osorio et al. (2025) encontraron en México que, al iniciar el lavado del café, los valores de parámetros críticos se dispararon: la demanda química de oxígeno aumentó en un 84 %, los sólidos suspendidos totales en un 39 % y la turbidez en un 1 317 %, reflejando un fuerte arrastre de sólidos y materia orgánica hacia los ríos receptores. Asimismo, el aporte de nutrientes fue considerable, con incrementos del 233 % en el nitrógeno total y del 1,336 % en el fósforo total, condiciones que favorecen procesos de eutrofización. Finalmente, los parámetros microbiológicos mostraron un deterioro crítico de la calidad del agua: los coliformes totales aumentaron en un 322 % y los coliformes fecales en un 46 014 %, confirmando una grave contaminación biológica asociada al vertido de aguas residuales del beneficiado húmedo.

En conjunto, estos resultados demuestran que, aunque el volumen de agua empleado en el beneficiado es pequeño en comparación con el requerido para el cultivo, su extracción directa de fuentes estratégicas y la generación de efluentes contaminados lo convierten en un factor crítico para la sostenibilidad hídrica del sector cafetalero costarricense.

3. Justificación

Costa Rica es un país reconocido tanto por la calidad de su café como por sus avances en sostenibilidad ambiental. Ejemplo de ello es que la cooperativa Coopedota fue la primera a nivel mundial en certificarse como carbono neutral (Birkenberg & Birner, 2018). Asimismo, las eco-certificaciones en el cultivo de café costarricense, como la denominación de café orgánico, han demostrado beneficios ambientales (Blackman & Naranjo, 2012). Sin embargo, a pesar de estos avances, la gestión del agua en el beneficiado de café aún carece de investigaciones aplicadas que permitan evaluar integralmente sus impactos y oportunidades de mejora en términos de circularidad y eficiencia hídrica.

La huella de agua es un indicador ampliamente reconocido a nivel internacional, que permite visibilizar la presión de los procesos productivos sobre el recurso hídrico y generar estrategias de reducción de impactos (Water Footprint Network, 2022). Aunque este enfoque se ha aplicado en múltiples industrias, en Costa Rica el beneficiado de café no ha sido estudiado sistemáticamente bajo esta metodología. Esto representa un vacío de conocimiento relevante, considerando que el café es uno de los principales productos de exportación del país y que el beneficiado emplea agua azul extraída de acuíferos estratégicos como el de Barva, sometido a crecientes presiones (Madrigal-Solís et al., 2014; Chavarría, 2014).

A nivel mundial, aunque el café es uno de los productos más consumidos y comercializados, la literatura científica sobre sus impactos en la escasez de agua es aún limitada (Usva et al., 2020), lo que refuerza la necesidad de abordar esta temática desde un enfoque local y aplicado.

De forma complementaria, la Métrica de Circularidad del Agua (WCM) desarrollada por el World Business Council for Sustainable Development (2021) ofrece un marco para diagnosticar no solo el consumo y la descarga de agua, sino también las oportunidades de reúso interno y externo en cada proceso productivo. Su aplicación en el beneficiado de café permite, por primera vez en Costa Rica, cuantificar cuán circular es el uso del agua en este sector y orientar mejoras prácticas. Más allá de describir el desempeño actual, esta herramienta brinda un camino hacia la optimización hídrica y hacia el cumplimiento de estándares de sostenibilidad cada vez más exigidos en los mercados internacionales.

El Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE) es un actor clave para impulsar esta agenda. Como parte de su estrategia de sostenibilidad, ya ha trabajado en carbono neutralidad y

eficiencia energética, y cuenta con las instalaciones necesarias para generar información de calidad. Este proyecto, al aplicar metodologías robustas como la INTE/ISO 14046:2015 y la WCM en el Beneficio Experimental del ICAFE, no solo le permitirá al Instituto fortalecer su liderazgo, sino también ofrecer una guía replicable a las 304 firmas beneficiadoras del país (ICAFE, 2021). Finalmente, el sector de beneficiado de café obtendría una serie de herramientas para conocer la magnitud de su impacto sobre los recursos hídricos, identificar y proponer soluciones a puntos críticos de consumo o contaminación en su proceso productivo (Martínez-Arce et al., 2018) y reducir los riesgos reputacionales asociados al agua.

4. Marco Referencial

4.1. Economía Circular

La economía circular es un modelo de producción y consumo que se basa en la minimización de residuos y la maximización del valor de los recursos. Se trata de un enfoque que busca diseñar sistemas en los que los materiales y los recursos se mantienen en la economía durante el mayor tiempo posible, reduciendo así el impacto ambiental y fomentando la sostenibilidad (Nautiyal & Goel, 2021).

Para lograr la economía circular, es necesario implementar estrategias como la reutilización, el reciclaje, la reparación y la regeneración (Majerník, et al., 2021). De esta manera, se pueden reducir los desechos y el uso de materias primas, aumentando la eficiencia en el uso de los recursos.

La economía circular está estrechamente relacionada con la sostenibilidad y el análisis de ciclo de vida. La sostenibilidad se refiere a la capacidad de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (Newman, 2015). Por su parte, el análisis de ciclo de vida es una herramienta que permite evaluar el impacto ambiental de un producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta la disposición final (Rivela, et al., 2022).

Para medir el impacto de la economía circular, se utilizan diversas métricas de circularidad, como el consumo de materiales, el uso de energía y la emisión de gases de efecto invernadero. Estas métricas permiten evaluar la eficacia de las estrategias de economía circular y la contribución de las empresas y organizaciones a la sostenibilidad (Brändström & Saidani, 2022).

En cuanto a la aplicación de la economía circular en procesos que utilizan agua, se pueden mencionar varios ejemplos. Uno de ellos es la reutilización de agua en procesos industriales, como la producción de papel (Karthik, et al., 2011) o el tratamiento de aguas residuales para consumo (Kim, et al., 2023). Otra estrategia es la implementación de sistemas de gestión de agua que permitan la captación y el aprovechamiento de agua de lluvia (Bui, et al., 2021) y otras fuentes no convencionales.

En el sector del cultivo de café, la economía circular puede aplicarse de diversas maneras, como la reutilización de aguas residuales en el riego de las plantaciones (Alemayehu, et

al., 2021), el uso de técnicas de compostaje para la gestión de residuos orgánicos (Hoseini, et al., 2021), y la implementación de prácticas de agricultura regenerativa que fomenten la biodiversidad, reduzcan el uso de pesticidas y aumenten la captura de carbono (Tan & Kuebbing, 2023)

4.2. Huella hídrica

La huella hídrica es un indicador de uso del agua que se utiliza para medir la cantidad de agua que se utiliza directa o indirectamente en la producción de bienes y servicios. Fue desarrollada en 2002 por el Profesor Arjen Hoekstra de la Universidad de Twente en los Países Bajos y otros autores, quien se centró en la importancia del agua dulce como recurso limitado y la necesidad de gestionarlo adecuadamente (Hoekstra, 2009).

La metodología de Hoekstra y Chapagain para la evaluación de la huella hídrica se basa en la idea de que la huella hídrica de un producto es el volumen total de agua dulce utilizado para producirlo, desde la extracción de agua hasta la eliminación de los efluentes. La metodología se divide en tres componentes: la huella hídrica azul, la huella hídrica verde y la huella hídrica gris. La huella hídrica azul es el agua dulce que se extrae de los ríos, lagos y acuíferos. La huella hídrica verde es el agua de lluvia que se almacena en el suelo y se utiliza por las plantas. La huella hídrica gris es la contaminación del agua causada por la producción de un producto (Hoekstra et al., 2011). Luego se crearon otras herramientas como la norma ISO 14046:2014 que es un marco más completo y proporciona un mayor nivel de detalle.

Se han realizado numerosos estudios para medir la huella hídrica de diferentes productos y procesos. Un ejemplo es un estudio donde se evaluó la huella hídrica global de la sociedad holandesa en relación a su consumo de café y té, concluyendo que la población mundial requiere aproximadamente 140 mil millones de metros cúbicos de agua al año para poder disfrutar de estas bebidas. En los Países Bajos, una taza de café representa unos 140 litros de agua y una taza de té unos 34 litros, siendo la mayor parte del consumo atribuible al cultivo de las plantas (Chapagain & Hoekstra, 2007).

4.3. ISO 14046:2014 Gestión medioambiental - Huella hídrica - Principios, requisitos y directrices

La norma ISO 14046:2014 es una norma internacional que proporciona un marco para la evaluación de la huella hídrica de los productos. La norma se basa en la metodología de Hoekstra y Chapagain, pero incluye algunas mejoras. Por ejemplo, la norma ISO

14046:2014 proporciona un mayor nivel de detalle en la recopilación de datos y el análisis de los resultados. La norma establece un marco para la evaluación de la huella hídrica de un producto, proceso o servicio a lo largo de su ciclo de vida. Proporciona principios, requisitos y directrices para la evaluación de la huella hídrica, así como para la comunicación de los resultados de la evaluación (INTE/ISO14046, 2015).

La norma define los siguientes pasos para la evaluación de la huella hídrica (INTE/ISO14046, 2015):

- Definir el objetivo y el alcance de la evaluación
- Identificar las fuentes de agua utilizadas en el ciclo de vida del producto, proceso o servicio
- Cuantificar la cantidad de agua utilizada en cada etapa del ciclo de vida
- Evaluar el impacto del uso de agua en la calidad y cantidad del agua
- Interpretar los resultados y comunicarlos de manera clara y transparente

La Norma ISO 14046:2014 es una herramienta importante para las empresas y organizaciones que buscan evaluar y reducir su huella hídrica. Permite a las empresas identificar las áreas donde se puede reducir el uso de agua, mejorar la eficiencia en el uso del agua y gestionar mejor los riesgos de impacto ambiental relacionados con el agua (Li et al., 2022).

Otra norma importante relacionada con la evaluación del ciclo de vida es la Norma ISO 14044:2006. Esta norma establece los principios y requisitos para llevar a cabo una evaluación del ciclo de vida de un producto o servicio. Proporciona un marco sistemático para evaluar el impacto ambiental de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta el final de su vida útil (INTE/ISO 14044:2007/ENM 1:2018, 2018).

La norma ISO 14044 se divide en cuatro etapas principales (INTE/ISO 14044:2007/ENM 1:2018, 2018):

- Definición del objetivo y alcance de la evaluación del ciclo de vida
- Análisis del inventario del ciclo de vida, que implica la recopilación de datos sobre los insumos y las emisiones de cada etapa del ciclo de vida del producto o servicio.
- Evaluación del impacto del ciclo de vida, que implica la evaluación del impacto ambiental de los insumos y emisiones identificados en la etapa anterior.

- Interpretación de los resultados, que implica la evaluación de las implicaciones ambientales de los resultados de la evaluación del ciclo de vida.

La norma ISO 14044 proporciona una guía detallada para llevar a cabo una evaluación del ciclo de vida, lo que permite a las empresas y organizaciones identificar las áreas donde pueden reducir su impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad de sus productos y servicios (Toniolo, et al., 2020).

La combinación de la Norma ISO 14046 y la Norma ISO 14044 permite a las empresas evaluar su impacto ambiental en términos de uso de agua y otros impactos ambientales, y mejorar su sostenibilidad a lo largo de todo el ciclo de vida de sus productos y servicios.

4.4. Métrica de circularidad del agua WCM

El Water Circularity Metrics (WCM) o Métrica de Circularidad del Agua es una herramienta de evaluación de la sostenibilidad del agua que permite a las empresas medir y gestionar su uso de agua de manera más sostenible y circular. El WCM se centra en la medición de la cantidad y calidad del agua utilizada por una empresa y su capacidad para recuperar y reutilizar el agua en su proceso productivo (WBCSD, 2021).

La métrica se basa en el concepto de "circularidad del agua", que se refiere a la capacidad de un sistema para cerrar el ciclo del agua a través de la recuperación y reutilización de agua en su proceso productivo (WBCSD, 2023). El WCM mide la circularidad del agua a través de tres indicadores principales:

- Indicador de entrada: Este indicador mide la circularidad del agua que se utiliza en un sitio. Se define como la suma de toda el agua circular utilizado en el sitio, en comparación con el total de agua utilizado, incluyendo tanto agua circular como lineal. El objetivo es utilizar agua de fuentes no frescas (reciclada/reutilizada) de calidad adecuada para el propósito requerido. Se requiere documentación específica para evaluar la vulnerabilidad de la fuente y los niveles de estrés hídrico en la zona (WBCSD, 2021).
- Indicador en el sitio: Este indicador mide la cantidad de agua que se reutiliza dentro del sitio. Se define como la cantidad total de agua reutilizada en el sitio, dividida por la cantidad total de agua utilizada. El objetivo es reutilizar o reciclar el agua tantas veces como sea posible dentro de las instalaciones (WBCSD, 2021).

- **Indicador de salida:** Este indicador mide la circularidad del agua que se devuelve al medio ambiente. Se define como la suma de toda el agua circular que se descarga del sitio, en comparación con el total de agua utilizado, incluyendo tanto agua circular como lineal. El objetivo es descargar agua de calidad adecuada para otros fines ambientales, sociales, agrícolas o industriales. Se requiere documentación específica para evaluar las regulaciones locales y los estándares de la industria para mantener la integridad del ecosistema (WBCSD, 2021).

La métrica de circularidad del agua WCM es una herramienta útil para las empresas que buscan mejorar la sostenibilidad de su uso de agua. Permite a las empresas identificar las áreas donde se puede mejorar la eficiencia en el uso del agua, recuperar y reutilizar agua y reducir la cantidad de agua que se descarga al medio ambiente. Además, el WCM también ayuda a las empresas a reducir los costos relacionados con el uso del agua, como el costo de la energía necesaria para bombear, tratar y transportar el agua (WBCSD, 2021).

El WCM ha sido desarrollado por el grupo de trabajo de Sostenibilidad del Agua del Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés) en colaboración con el grupo Beverage Industry Environmental Roundtable (BIER). El WBCSD es una organización global que reúne a empresas líderes para acelerar la transición hacia un futuro sostenible (WBCSD, 2002). Por su parte, el BIER es un grupo de trabajo global de empresas del sector de bebidas que colaboran para mejorar la sostenibilidad de sus operaciones (BIER, 2023). El desarrollo y aplicación del WCM ha sido liderado por estas organizaciones, en colaboración con otras empresas y expertos en sostenibilidad del agua.

El WCM es una herramienta valiosa que puede ser utilizada por empresas y organizaciones para medir y mejorar la circularidad del agua en sus operaciones. Por ejemplo, Anheuser-Busch InBev ha reducido su consumo de agua en un 20% comparado a su línea base mediante el uso de tecnologías de ahorro de agua y sistemas de riego automatizados (Anheuser-Busch InBev., 2022).

4.5 Otros enfoques de circularidad del agua

Además de la Métrica de Circularidad del Agua (WCM), se han desarrollado y aplicado diversos enfoques para evaluar la circularidad del recurso hídrico en sistemas agrícolas y agroindustriales. Estos estudios aportan evidencia empírica sobre cómo la recirculación, el

tratamiento y el reúso del agua pueden cuantificarse mediante indicadores de circularidad adaptados al contexto productivo.

En el proyecto piloto HYDROUSA, implementado en Creta, Grecia, se evaluó un sistema integrado de tratamiento de aguas residuales y reúso agrícola a través de un marco de circularidad hídrica llamado Evaluación de la Circularidad del Agua Multisectorial (MSWCA por sus siglas en inglés). Los resultados mostraron un incremento del 75 % en la circularidad del agua y del 76 % al 80 % en la circularidad de nutrientes respecto al escenario lineal, además de una reducción de la huella de carbono en 14 %, evidenciando la eficacia de estrategias de reúso y regeneración en contextos mediterráneos (Nika et al., 2022).

En Corleone, Italia, Bhambhani et al. (2023) aplicaron indicadores de circularidad, usando el método del Indicador de Circularidad de Materiales (MCI por sus siglas en inglés) y una versión del MCI modificado, en una finca productora de tomate irrigada con aguas residuales domésticas tratadas. El estudio observó niveles de circularidad del agua de entre 42% y 50 % cuando se utiliza la fertirrigación, en comparación con valores considerablemente menores en escenarios lineales usando agua dulce “nueva”. Este caso demuestra cómo la recuperación de agua residual y nutrientes del agua residual puede mejorar significativamente la circularidad hídrica en sistemas agrícolas.

En el sector lácteo, Rebolledo-Leiva et al. (2024) aplicaron un índice integrado de circularidad del agua, energía y alimentos (WEF + CEi por sus siglas en inglés) en 30 granjas lecheras de Galicia, España. Los resultados indicaron niveles de circularidad de aproximadamente 51 % a escala de finca y hasta 80 % al considerar la gestión conjunta dentro de cooperativas, destacando la importancia de la coordinación sectorial para optimizar el uso circular del agua en la agroindustria.

A nivel regional, la adopción de prácticas y métricas de circularidad del agua en América Latina avanza de manera desigual. El informe *The Circular Water Economy in Latin America* (OECD, 2025) identifica experiencias piloto e implementación de políticas públicas en países como México, Chile, Brasil y Costa Rica, centradas en la reutilización agrícola de aguas residuales, la recuperación de nutrientes y la eficiencia hídrica en agroindustrias. Sin embargo, el estudio señala que aún existen brechas metodológicas y regulatorias para estandarizar la medición de circularidad en el sector agrícola. Estas iniciativas reflejan una tendencia regional hacia la incorporación de principios circulares en la gestión del agua,

aunque su consolidación depende de la generación de evidencia técnica y del fortalecimiento de políticas públicas.

4.6. Beneficio de Café

El beneficio del café es el proceso por el cual las semillas de café se transforman de una fruta a una semilla seca y lista para su comercialización. Este proceso se divide en varias etapas, que incluyen la recolección, el despulpado, el fermentado, el lavado, el secado y el almacenamiento (Febrianto & Zhu, 2023).

El proceso de beneficio comienza con la recolección de las frutas de café, que generalmente se lleva a cabo a mano (Febrianto & Zhu, 2023). Luego, las frutas se separan de las hojas y ramas y se llevan a la estación de beneficio. En la estación de beneficio, las frutas se transportan utilizando un caudal de agua del punto de recolección a un proceso de despulpado, en el que se elimina la pulpa externa de la fruta. Después del despulpado, las semillas de café aún están recubiertas por una capa de mucílago, que puede eliminarse mediante un proceso de fermentación (Elhalis et al., 2022).

Durante la fermentación, las semillas de café se colocan en tanques de agua y se dejan fermentar durante un período de tiempo determinado. Después de la fermentación, las semillas de café se lavan para eliminar el mucílago restante. Luego, las semillas de café se colocan en patios o en máquinas de secado para eliminar parte de la humedad llegando a un (11 -12) %. Finalmente, las semillas de café se clasifican según su tamaño y calidad antes de ser envasadas para su envío (Lee, et al., 2015).

El proceso de beneficio del café puede ser muy intensivo en el uso de agua, especialmente durante la etapa de transporte y lavado. Sin embargo, existen tecnologías y estrategias que se pueden utilizar para reducir el consumo de agua y mejorar la calidad del agua residual en el proceso de beneficio del café.

- Tecnología de desmucilaginado seco: utiliza una máquina llamada "desmucilaginador seco" para eliminar el mucílago sin la necesidad de agua (Ferreira et al., 2023), reduciendo así el consumo de agua en el proceso.
- Tecnologías de reúso de agua (Garnier et al., 2022): utiliza sistemas de recirculación de agua que permite el uso múltiple del agua para reducir el consumo de agua en el proceso.

- Tecnologías de microorganismos eficientes: utiliza microorganismos eficientes para degradar los residuos orgánicos del proceso de beneficio del café, mejorando la calidad del agua residual (Pires et al., 2021).
- Estrategias de manejo de agua: incluyen prácticas como el uso de agua de lluvia (Richards et al., 2021) para el proceso de lavado y transporte, el monitoreo del consumo de agua y la implementación de un sistema de gestión de agua para asegurar que el agua se utiliza de manera eficiente (ISO 46001, 2019).

Al implementar estas tecnologías y estrategias, se puede mejorar la sostenibilidad ambiental del proceso de beneficio del café y reducir los costos de producción para los beneficios de café.

5. Objetivos y metodología

5.1. Objetivo General

El objetivo general del proyecto es:

“Analizar la circularidad del agua y la huella de agua en el beneficiado de café con el propósito de proponer estrategias para optimizar la gestión del recurso hídrico”.

El sitio de estudio del proyecto es el Beneficio Experimental del Instituto Costarricense del Café (ICAFE), ubicado en San Pedro de Barva de Heredia. El sitio de estudio se encuentra dentro de la cuenca del río Tárcoles y se abastece de agua proveniente del acuífero de Barva. A continuación, se detallan los objetivos específicos del proyecto y su respectiva metodología.

5.2. Objetivo Específico 1

Evaluar la huella de agua del beneficiado en el Beneficio Experimental del ICAFE según la norma INTE/ISO 14046:2015

Para la ejecución de este objetivo se siguió la metodología asociada a la norma internacional INTE/ISO 14046:2015 Gestión Ambiental-Huella de Agua que especifica y proporciona los principios, requisitos y directrices para realizar e informar de una evaluación de huella de agua, basada en el análisis de ciclo de vida (INTE/ISO14046, 2015).

Datos primarios

Al utilizar herramienta INTE/ISO 14046:2015 se definieron los datos primarios como los caudales de entrada a la planta del proceso de beneficiado y la calidad del agua tanto a la entrada como a la salida del proceso.

Se realizaron mediciones del caudal de entrada a la planta y al Micro beneficio, de modo que al restarlos se obtuvo también el caudal de entrada al Beneficio. Para esta medición el ICAFE instaló 2 medidores de agua Ultrasonicos LoRaWan Viewshine con un diámetro de $\frac{3}{4}$ pulgadas, y puso a disposición su respectivo software de procesamiento de datos llamado Enhanced Meter Reading Cloud v.1.1.0 (EMRC). En este programa se obtienen las

lecturas de volumen de agua utilizado cada vez que el sensor detecta flujo, el programa entrega un dato resumen en litros en cada periodo en que estuvo detectando flujo.

Los datos primarios de caudal se tomaron por un periodo de dos meses durante la época de cosecha y procesamiento del café que tiene lugar aproximadamente de setiembre a enero cada año. Los meses escogidos y donde se tomaron los datos fueron noviembre y diciembre de 2022.

Para obtener los datos de calidad del agua se realizaron distintos análisis a la entrada y a la salida del proceso en coordinación con el Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA), quienes tomaron las muestras y las analizaron en su laboratorio ubicado en la Ciudad de la Investigación en la Universidad de Costa Rica.

El agua de consumo que entra al proceso se muestreo por el Ing. Melvin Alpízar M. (funcionario del CICA) de un tubo del área de despulpado del beneficio ICAFE el 20 de enero de 2023 a las 10:52 am. Posteriormente, se analizó la muestra bajo el alcance del Decreto N° 41499-S Reforma y Adición Al Decreto Ejecutivo No.38924-S Del 12 De enero Del 2015 “Reglamento para la Calidad Del Agua Potable”, publicado en el Alcance No.15 a La Gaceta No.15 del 22 de enero del 2019 en Costa Rica. Los parámetros analizados fueron los siguientes: color, conductividad, olor pH, temperatura, turbiedad, coliformes fecales y *Escherichia coli*.

El agua residual que sale del proceso se muestreo por el mismo funcionario del tanque de monitoreo del sistema de tratamiento de aguas residuales del beneficio del ICAFE el 20 de enero de 2023, entre las 8:30 am y las 10:30 am. Posteriormente, se analizó la muestra bajo el alcance del Decreto 33601- MINAE-S Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, publicado en el Alcance No. 8 a La Gaceta No. 55 del 19 de marzo del 2007. Los parámetros analizados fueron los siguientes: demanda bioquímica de oxígeno (DBO_{5,20}), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total, grasas y aceites, nitrógeno total, pH, sólidos sedimentables (S. SED.), sólidos suspendidos totales (SST), sustancias activas al azul de metileno (SAAM) y temperatura*

INTE/ISO 14046:2015

El documento INTE/ISO 14046:2015 establece los requisitos y el procedimiento para evaluar la huella de agua. Esta norma consta de dos partes principales, el estudio de inventario de la huella de agua y la evaluación de la misma.

Para realizar **el estudio del inventario** se consideraron tres elementos y sus subelementos:

1. Definir el objetivo y alcance del estudio.
 - Aplicaciones previstas
 - Razones para el estudio
 - Público meta
 - Tipo de evaluación: independiente o parte de un análisis de ciclo de vida
 - Alcance y límites del sistema
 - Categorías de impacto a estudiar
2. Análisis del inventario de la huella de agua
 - Cálculo del inventario, se debe realizar de acuerdo a la INTE/ISO 14044.
 - Flujos elementales: entradas y salidas de cada proceso unitario
 - Asignación, en caso que sea necesario por multiplicidad de productos y subproductos
3. Interpretación de los resultados
 - Identificación de cuestiones de importancia
 - Evaluación de la calidad de los datos
 - Consideraciones temporales y geográficas
 - Conclusiones
 - Limitaciones
 - Incertidumbre

La **evaluación de la huella** de agua incluye los mismos puntos del inventario más una etapa de evaluación del impacto de la huella de agua que incluye los siguientes puntos:

- Categorías de impacto
- Caracterización
- Resultado del inventario
- Indicadores según categoría de impacto

- Interpretación de la huella de agua

Se tomaron en cuenta y recopilaron los siguientes datos:

- Cantidades de agua utilizada
- Tipos de recursos de agua utilizados
- Datos de calidad del agua
- Formas de uso del agua
- Lugares de uso del agua
- Aspectos temporales en el uso del agua (procesamiento solo en cosecha en este estudio)
- Criterios de decisión (por ejemplo, requisitos legales)

Además, los datos a utilizar en la evaluación de la huella hídrica cumplen con la serie de requisitos siguientes:

- Se priorizo la recopilación de datos primarios frente a los secundarios
- Periodo de tiempo mínimo de recopilación que sea representativo
- Cobertura geográfica
- Tipo de tecnología utilizada
- Coherencia de los datos
- Integridad
- Representatividad
- Reproducibilidad
- Fuentes confiables de los datos

Finalmente se realizó un informe del estudio siguiendo los requisitos establecidos en la norma INTE/ISO 14046:2015, como se observa en la sección de resultados.

El producto de este objetivo es la evaluación de la huella hídrica del beneficiado de café en el Beneficio experimental del ICAFE.

5.3. Objetivo Específico 2

Determinar métricas de circularidad del agua del beneficiado en el Beneficio Experimental del ICAFE según la herramienta Métrica de Circularidad del Agua (WCM) del Consejo Mundial de Empresas para el Desarrollo Sostenible (WBCSD)

Para ejecutar este objetivo se utilizó la herramienta Métrica de Circularidad del Agua “*Water Circularity Metric*” (WCM) del Consejo Mundial de Empresas para el Desarrollo Sostenible

“*World Business Council for Sustainable Development*” (WBCSD) que permite calcular la circularidad del agua en distintas categorías como circularidad en las fuentes de entrada, circularidad en el proceso o sitio y la circularidad en los efluentes. Además de la cantidad del agua utilizada, toma en cuenta aspectos locales de la cuenca y de calidad, en el proceso estudiado, para estimar la circularidad.

El primer paso fue definir el sitio en estudio y su ubicación a nivel de cuenca. En segunda instancia se define la documentación base del sitio que incluye:

- Definir la cantidad y calidad de agua requerida en cada proceso unitario
- Determinar la cantidad y calidad de la fuente de agua actual
- Determinar la cantidad y calidad del agua después de su uso (antes del tratamiento o descarga)
- Determinar la cantidad y calidad del agua necesaria para uso o descarga

La WCM describe tres métricas principales. Primero, la circularidad en las fuentes, que representa la circularidad combinada de todas las fuentes de agua y se describe según la ecuación 1. Se estimó la circularidad de cada fuente siguiendo el árbol de decisión de la Figura 1 y tomando en consideración el uso anterior de la fuente de agua, la disponibilidad y demanda (incluida la variabilidad), la gobernanza y la conectividad con las redes de aguas residuales/alcantarillado.

$$\% \text{ Circularidad en las fuentes} = \frac{Q_{tc}}{Q_t} * 100 \quad (1)$$

Donde:

Q_{tc} : Suma de todas las aguas circulares extraídas

Q_t : Suma de todas las fuentes de agua circulares y lineales extraídas

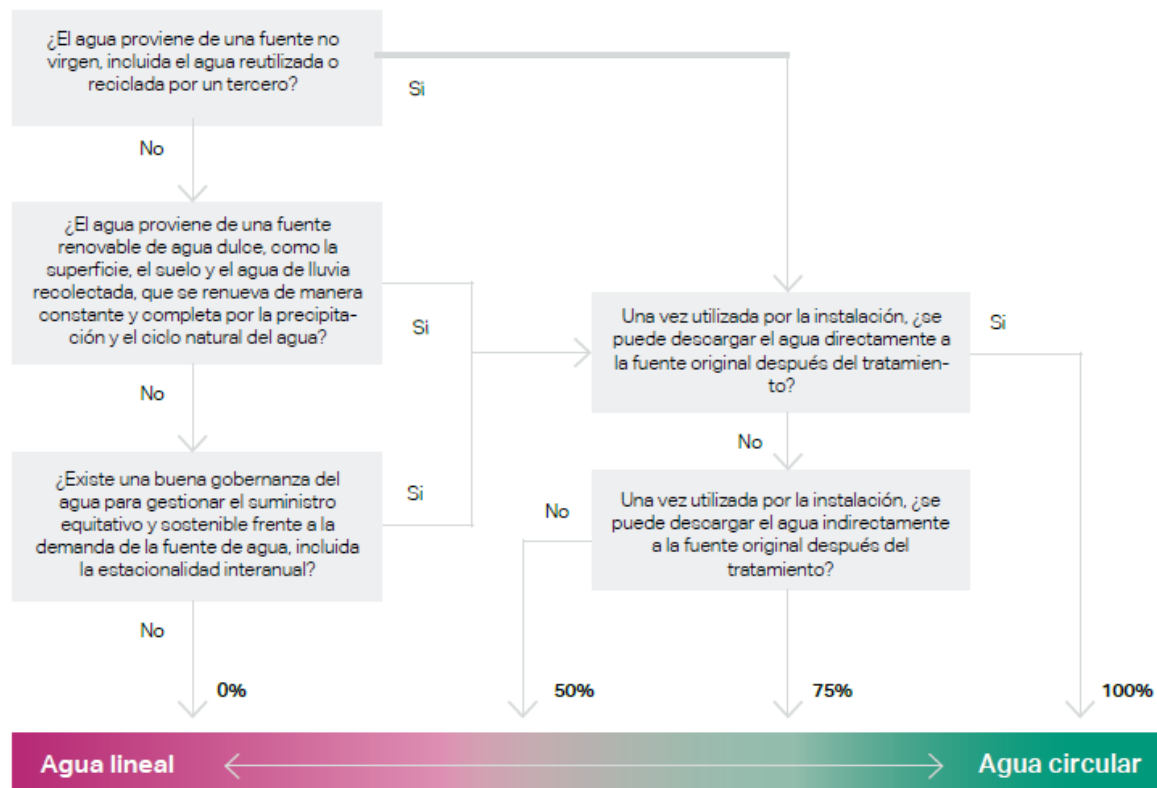


Figura 1. Árbol de decisión para evaluar circularidad de la fuente (World Business Council for Sustainable Development, 2021)

En segunda instancia, el indicador de circularidad en el proceso o sitio de estudio, permite conocer la cantidad de veces que se reutiliza la totalidad de agua en el proceso, se describe según la ecuación 2.

$$X = \frac{Qwu - Qt}{Qt} + 1 \quad (2)$$

Donde:

Qwu : Suma de toda el agua de proceso necesaria (incluye el agua recirculada internamente)

Qt : Suma de todas las fuentes de agua circulares y lineales extraídas

El tercer indicador es el de circularidad de los efluentes, para el cual se requiere conocer y estudiar los requisitos regulatorios que aplican a la calidad del agua residual generada en el sitio de estudio. Representa la circularidad combinada de todas las aguas vertidas y esta

descrito por la ecuación 3. Se estima la circularidad de cada vertido según los criterios de la Figura 2.

$$\% \text{ Circularidad de los efluentes} = \frac{Q_{wd}}{Q_t} * 100 \quad (3)$$

Donde:

Q_{wd} : Suma de todas las aguas circulares vertidas

Q_t : Suma de todas las fuentes de agua circulares y lineales extraídas

CARACTERÍSTICAS DEL RETORNO CIRCULAR	SEGÚN LA INFORMACIÓN DISPONIBLE	CARACTERÍSTICAS DE RETORNO LINEAL
<ul style="list-style-type: none"> El agua está siendo reciclada (fuera del sitio) por otros sitios para un uso beneficioso tales como, para fines agrícolas, municipales o industriales 	<p style="text-align: center;">← ————— →</p> <p style="text-align: center;">Reciclar (fuera del sitio) / aumentar la duración del ciclo del agua gestionada por humanos dentro de la cuenca</p>	<ul style="list-style-type: none"> El agua que sale del depósito como producto transportado o se pierde dentro del proceso (evaporación, contenida en productos de desecho (es decir, lodos, etc.)
<ul style="list-style-type: none"> El agua descargada se devuelve a la misma cuenca hidrográfica local con una calidad adecuada (incluyendo los requisitos jurídicos) que la hace fácilmente disponible para fines ambientales, sociales, agrícolas o industriales. 	<p style="text-align: center;">← ————— →</p> <p style="text-align: center;">Retorno / reposición al sistema natural / cuenca local</p>	<ul style="list-style-type: none"> El agua se vierte con una calidad inadecuada a las masas de agua superficiales o subterráneas: el agua no está fácilmente disponible con una calidad de agua adecuada para otras demandas / usos del agua (por ejemplo, difícil de tratar) y / o, por lo tanto, tiene un impacto negativo en el medio ambiente y la sociedad. El agua se descarga en un acuífero
<ul style="list-style-type: none"> Agua producida que permanece dentro de la cuenca local al ser devuelta (suministro local de agua potable u otros productos que contienen agua que se devuelve conscientemente a la cuenca local (por ejemplo, a través del tratamiento de aguas residuales)) 	<p style="text-align: center;">← ————— →</p> <p style="text-align: center;">Reciclar (no controlado por el sitio / retorno / reponer al sistema natural</p>	<ul style="list-style-type: none"> Agua que se descarga en el mar: El sitio se encuentra al final de una cuenca de agua (por ejemplo, cerca del mar, con solo receptores de agua salobre o de mar en las inmediaciones del sitio) y no se podría agregar ningún valor adicional, mediante el uso en otro proceso, sitio o dentro del medio ambiente (por ejemplo, recarga de acuíferos contra la intrusión de agua salada; uso de humedales, etc.). Puede ser sostenible hacerlo, pero es un flujo lineal.

Figura 2. Criterios de decisión para evaluar circularidad del efluente (World Business Council for Sustainable Development, 2021)

Al igual que la norma INTE/ISO 14046:2015, esta herramienta busca optimizar el uso del agua y comparte datos con la herramienta del objetivo 1. Ambas herramientas pueden ser insumo una de la otra y complementarse para dar un análisis de situación en el beneficio de café y tener bases firmes sobre las cuales proponer estrategias de optimización del uso, reúso y consumo del agua. El producto de este objetivo son las métricas de circularidad del agua en el beneficiado de café en el ICAFE.

5.4. Objetivo Específico 3:

Elaborar una guía del procedimiento para calcular métricas de circularidad de agua y determinar la huella de agua en beneficios de café

Este objetivo pretende darle al sector cafetalero una guía específica para las empresas de beneficiado de café, que les permita adoptar las herramientas INTE/ISO 14046 y WCM en sus respectivas instalaciones. Se busca fuera una guía con vocabulario común al sector de beneficiado y que contuviera ejemplos concretos de la implementación de las herramientas en el Beneficio Experimental del ICAFE, por ejemplo, una recomendación de las categorías de impacto más relevantes para el inventario de huella de agua.

Para la redacción de esta guía se consideró la información cuantitativa y cualitativa recopilada en la elaboración de los objetivos anteriores, investigación bibliográfica y opiniones de expertos. Se propuso que la guía abarcara todos los aspectos a cubrir en una evaluación de huella de agua según INTE/ISO 14046:2015 (elementos en Objetivo 1), de una breve explicación sobre cada aspecto, su propósito en el estudio y que cada requisito se ejemplifique con un caso real tomado de la elaboración del Objetivo Específico 1. Además, que contenga una sección sobre el cálculo de métricas de circularidad según la WCM donde se defina cada métrica, se dé una breve explicación de su propósito y se ejemplifique con los resultados del Objetivo Específico 2.

El Manual de aplicación de evaluación de huella hídrica acorde a la norma ISO 14046, elaborado en conjunto por Fundación Chile y la ONG Agualimpia bajo el marco del proyecto Suizagua Andina Chile y Perú para la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) (Fundación Chile & Agualimpia, 2017), fue una referencia de la estructura del documento que se va a elaborar. Además, el artículo de Nieuwlaat et al. (2021) da recomendaciones e incluso una plantilla sobre como elaborar guías (en el sector de la salud) que se tomó en cuenta para la redacción de la guía, adaptándolas para el sector cafetalero.

6. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al seguir la metodología descrita anteriormente. Se realiza siguiendo los requisitos de la estructura de un informe de “Huella de Agua” establecidos por la INTE/ISO 14046:2015.

6.1. Aspectos generales

El presente informe fue encargado por el Beneficio Experimental del Instituto Costarricense del Café (ICAFE) y fue realizado por Daniel Ulloa Ovarés, ingeniero químico y estudiante de la Maestría en Gestión Integrada del Recurso Hídrico para Latinoamérica y el Caribe de la Universidad de Costa Rica.

La toma de datos para la elaboración del informe se realiza entre el 1ro de noviembre del 2022 y el 31 de diciembre del 2022. El informe se publica el 25 de febrero de 2026.

El estudio se ha realizado siguiendo de acuerdo a los requisitos establecidos por la norma internacional INTE/ISO 14046:2015.

6.2. Objetivo del estudio

6.2.1 Razones para llevar a cabo el estudio

El estudio de Huella Hídrica en el Beneficio Experimental del ICAFE surge en consonancia con el plan estratégico general del ICAFE. En línea con los objetivos del departamento de industrialización y la implementación de nuevas tendencias en dicho sector, se busca ampliar el enfoque más allá de la huella de carbono, en la que ya se han realizado análisis de Ciclo de Vida (ACV). Además, el programa NAMA (Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación) respalda la iniciativa de trabajar en la medición de la Huella Hídrica como un paso fundamental para comprender y mitigar el impacto ambiental asociado a la producción de café.

6.2.2 Aplicación deseada de los resultados

Una de las principales carencias identificadas en el sector cafetalero es la falta de una medición precisa del consumo de recursos hídricos. En este contexto, el objetivo primordial de este estudio es generar una herramienta integral que permita medir de manera efectiva el consumo real de agua en los procesos de beneficio del café.

Se pretende que esta herramienta sea de acceso sencillo y utilidad práctica para el sector beneficiador externo, así como para la gerencia técnica y ejecutiva dentro de las empresas

cafetaleras. La aplicación práctica de los resultados permitirá a terceros utilizar sus datos y obtener análisis y conclusiones relevantes sobre su impacto en el recurso hídrico, contribuyendo así a una gestión más sostenible y eficiente de los recursos naturales.

6.2.3 Público objetivo

Los resultados obtenidos de este estudio estarán dirigidos a dos audiencias clave. En primer lugar, se busca beneficiar a la gerencia técnica y ejecutiva del ICAFE, brindándoles una herramienta de medición y análisis que les permita evaluar y mejorar el desempeño ambiental del sector cafetalero en relación con el consumo de agua.

Además, se orientará a las empresas beneficiadoras externas, proporcionándoles información valiosa para la toma de decisiones informadas en sus operaciones y estrategias de negocio. De esta manera, se pretende impactar positivamente en la sostenibilidad ambiental del sector cafetalero en su conjunto y promover prácticas responsables en el uso de los recursos hídricos.

6.2.4 Enfoque independiente en la evaluación de la huella hídrica en la industria de beneficiado de café

El presente estudio de Huella Hídrica se desarrolla como una evaluación única e independiente, en línea con las directrices de la norma INTE/ISO 14046:2015. Cabe resaltar que no se persigue realizar comparaciones con investigaciones previas ni formar parte de un análisis más amplio del ciclo de vida.

La atención exclusiva a la Huella Hídrica en el contexto del beneficiado de café garantiza la confiabilidad y la validez de los resultados obtenidos, brindando una comprensión detallada y específica de las implicaciones medioambientales asociadas al uso del agua en esta fase de la cadena productiva.

6.2.5 Enfoque singular sin aseveraciones comparativas

El estudio se enfoca de manera singular en la evaluación de la Huella Hídrica en la industria de Beneficiado de Café en el Beneficio Experimental del ICAFE, excluyendo aseveraciones comparativas con otras industrias o actividades. Esta aproximación se sustenta en la independencia del análisis, con el objetivo de mantener la autenticidad de los hallazgos.

Al mantener la exclusividad del enfoque, se asegura la aplicabilidad directa y relevante de los resultados al ámbito específico del beneficiado de café. Este enfoque, exento de

comparaciones, contribuye a preservar la validez de las conclusiones y proporciona información confiable y pertinente para la toma de decisiones informadas en pro de la sostenibilidad y la gestión responsable de los recursos hídricos en la industria de beneficiado de café.

6.3. Alcance

6.3.1 Unidad funcional

Se define la unidad funcional a partir del total de toneladas de café en grano oro por tipo de partida¹ producidas en el periodo de noviembre y diciembre del 2022. Es decir, las toneladas de producto final por tipo de partida. Se hará referencia en el texto como tonelada de grano oro (total o por tipo de partida). Todos los consumos (entradas), subproductos (salidas), impactos ambientales y otras serán referenciados a las toneladas de grano oro de la siguiente manera *unidad/ton grano oro*.

En la Tabla 1 se observa la producción de grano oro a partir del café fruta por tipo de partida:

Tabla 1. Producción de grano oro a partir del café fruta por tipo de partida

Partida	Café Fruta (Ton)	Grano oro (Ton)
A	16.0	2.98
B	10.8	2.00
C	0.1	0.02
D	79.5	14.8
E	53.5	11.2
D	20.0	3.73
Total	180.0	33.5

¹ La partida es la clasificación que le da el ICAFE a la materia prima (café fruta) y su respectivo producto según sea la razón por la cual se recibió el café fruta. Es importante diferenciar por tipo de partida ya que según sea el tipo, se procesa en el micro beneficio o el macro beneficio y el producto final puede tener un porcentaje de humedad distinto.

6.3.2 Dimensión temporal y geográfica

El periodo temporal del estudio es de dos meses, noviembre y diciembre del 2022. El sitio de estudio del proyecto es el Beneficio Experimental del Instituto Costarricense del Café (ICAFFE), ubicado en San Pedro de Barva de Heredia en Costa Rica.

6.3.3 Límites del sistema

El estudio analiza dos sistemas separados dentro del beneficio, un micro-beneficio y un beneficio que se llamara macro-beneficio para evitar confusiones. Ambos tienen las mismas etapas de procesamiento, sin embargo, varían en el tamaño de los equipos, la capacidad de producción, equipos no elementales y la recirculación de aguas y otros subproductos. El estudio para ambas líneas de producción inicia en la recepción del café y finaliza en el pelado de la cascarilla del café. Las Figuras 3 y 4 muestran un diagrama de flujo de los equipos de las operaciones unitarias que forman parte del estudio.

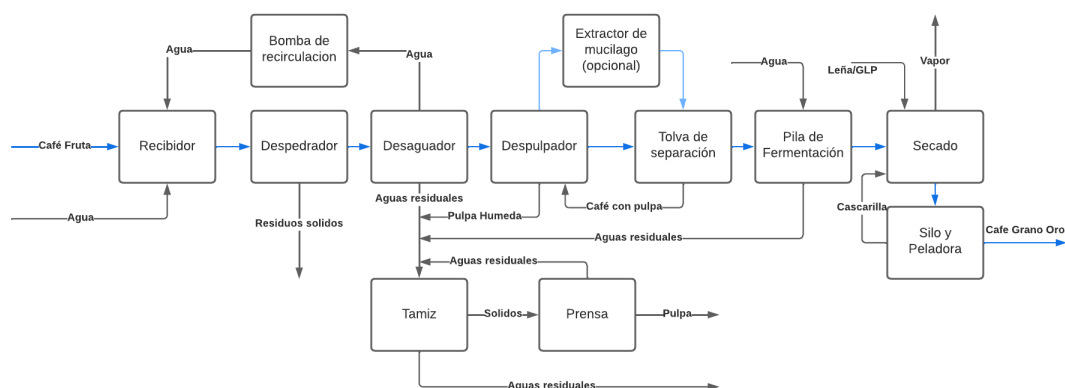


Figura 3. Diagrama de flujo del Macro beneficio (Elaboración propia)

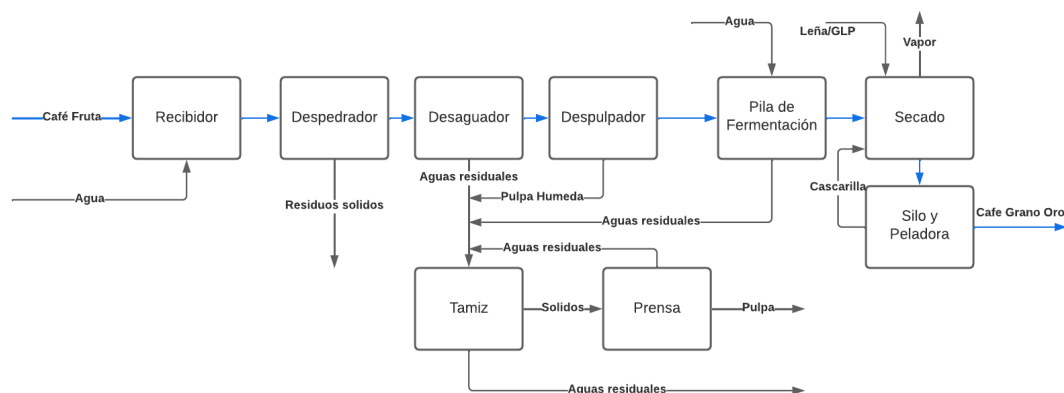


Figura 4. Diagrama de flujo del Micro beneficio (Elaboración propia)

6.3.4 Reglas de asignación

Dado que el beneficio de café genera diversas categorías de café en grano oro, en función del lote de origen (Partida), se procede a asignar a cada lote un porcentaje correspondiente de los consumos asociados, tales como el consumo eléctrico en kilovatios-hora (kWh), el consumo de leña en kilogramos (kg), el consumo de cascarilla en kilogramos (kg) y el consumo de gas licuado de petróleo en litros (L), de acuerdo con su proporción en masa con respecto al conjunto total. A modo de ejemplo, si el lote A representa el 50% del total de la masa de café fruto procesada, se le asignará un 50% de cada uno de los mencionados consumos.

Además, se procede a asignar el consumo de agua de acuerdo con la proporción en masa con respecto al conjunto total en cada tipo de sistema, ya sea en el Macro beneficio o el Micro beneficio. La distinción radica en que en esta instancia se ha realizado una medición independiente del consumo en cada sistema, y se cuenta con un registro que identifica el sistema en el cual se procesó cada partida.

Finalmente, las salidas del sistema fueron calculadas para cada partida por separado y el cálculo de los impactos ambientales se realiza de manera individual y se asigna a cada partida el valor correspondiente.

6.3.5 Criterios de corte

En el contexto de este estudio, se excluyen determinados insumos, como los productos de limpieza utilizados en la higienización de los equipos, como desinfectantes, así como los materiales destinados al mantenimiento de los equipos, como lubricantes. Esta exclusión

se basa en el hecho de que estos insumos no suponen un consumo de entidad significativa en comparación con los demás elementos utilizados. Además, el personal del Beneficio no lleva a cabo un seguimiento riguroso de su uso y consumo.

6.3.6 Datos de inventario

Todas las entradas y salidas relevantes al análisis de la huella hídrica fueron cuantificadas. Toda la información recolectada de consumo de agua, suministros, energía y combustibles fue obtenida en base al consumo mensual de noviembre y diciembre de 2022. La información recolectada son datos medidos y entregados por el personal del ICAFE por medio de correo electrónico, llamadas, visitas al sitio y entrevistas presenciales, excepto los análisis de calidad de agua que fueron realizados por el Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA) de la Universidad de Costa Rica.

Se consideran datos primarios todos los que fueron medidos y recolectados por el personal del ICAFE, el CICA y el encargado de elaborar este reporte, se especifican más adelante en la sección de análisis de inventario. Mientras que se consideran datos secundarios aquellos que fueron estimados a partir de datos primarios, así como características de insumos y procesos obtenidos de literatura especializada.

6.3.7 Supuestos

Para poder realizar el análisis del inventario y de los impactos ambientales se realizan una serie de suposiciones como se describe a continuación.

Se asume que las entradas y las salidas de materia y energía se distribuyen según la proporción másica de café fruta de cada partida, tal y como se explica en la sección de reglas de asignación.

Se supone que la composición del café es tal y como la describen Vargas & Mazón (2004) (Tabla 2). Se toma que la composición de la pulpa es tal y como la describe Gómez Mora (2019) (Tabla 3) y que la pulpa se deshidrata por completo en el proceso, por lo que todo el contenido de humedad pasa a ser parte de la salida de agua residual.

Tabla 2. Composición del grano de café (Vargas & Mazón, 2004)

Componente	Porcentaje de un grano de fruta (%)
Pulpa	41.6
Mucilago	15.6
Pergamino	4.3
Grano Oro (12% de humedad)	18.6
Agua libre	19.9

Tabla 3. Composición de la pulpa del café (Gómez Mora, 2019)

Componente	Porcentaje de la pulpa (%)
Pulpa seca	20%
Agua	80%

Se supone que los volúmenes de salida de aguas residual se asumen son el resultado de un balance de masa del sistema, ya que no había capacidad de medición de flujo de aguas residuales en el sitio, debido al alto costo de inversión en los equipos de medición necesarios.

6.3.8 Impactos relacionados con el recurso hídrico

En este estudio, el impacto por escasez de agua (estimado a partir del Potencial de Consumo de Agua (WCP)) y el impacto por eutrofización de agua dulce (representado por el Potencial de Eutrofización del Agua Dulce (FEP)) fueron los dos impactos de interés seleccionados por el ICAFE. Estos indicadores permiten identificar y comprender los efectos del consumo de agua y la contaminación por nutrientes, facilitando la toma de decisiones para una gestión más sostenible del recurso hídrico.

El indicador de uso del agua o Potencial de consumo de agua (WCP) se refiere a la cantidad de agua que se consume a lo largo del ciclo de vida de un producto, proceso o servicio. Se expresa generalmente en metros cúbicos (m³) y se calcula sumando todos los flujos de agua extraídos de los recursos hídricos durante las distintas etapas de producción (desde la extracción de materias primas hasta la disposición final), considerando además el agua perdida por evaporación o aquella incorporada al producto y no reintegrada al sistema (Hoekstra & Chapagain, 2007).

Su importancia radica en varios aspectos:

1. El agua es un recurso limitado y, en muchas regiones, su uso excesivo puede contribuir a la escasez, afectando tanto a comunidades humanas como a ecosistemas (Mekonnen & Hoekstra, 2011).
2. Al cuantificar el consumo de agua, este indicador ayuda a identificar “hotspots” o puntos críticos en los procesos productivos, lo que permite implementar medidas para optimizar el uso del recurso y reducir impactos negativos (Mekonnen & Hoekstra, 2020).
3. En estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), como el que se aplica en la metodología ReCiPe 2016, el WCP permite comparar distintos productos o tecnologías, facilitando la toma de decisiones para el diseño de procesos más sostenibles. Por ejemplo, un alto valor de WCP indicaría que un proceso consume grandes volúmenes de agua, lo que podría ser crítico en zonas con estrés hídrico. Este análisis es fundamental para desarrollar estrategias de eficiencia y, en algunos casos, compensar el consumo mediante proyectos de restauración o generación de agua (por ejemplo, mediante la reutilización) (Chapagain, et al., 2006).

La categoría escasez de agua, asociada al Potencial de Consumo de Agua (WCP), no solo mide el volumen de agua consumida, sino que también evalúa la presión que este consumo ejerce sobre la disponibilidad hídrica en relación con otros usuarios. Para expresar esta presión, se utiliza el método AWARE (Available Water RE-maining), adoptado como un indicador de escasez en estudios de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) conforme al consenso del grupo WULCA (WULCA, 2024).

AWARE calcula un factor de caracterización (CF) basado en la diferencia entre la disponibilidad de agua y la demanda humana y ecológica (Availability Minus Demand, AMD), normalizado e invertido respecto al promedio mundial, limitándose a un rango entre 0,1 y 100 (Boulay et al., 2018).

Este CF se multiplica por el inventario de consumo de agua (WCP), generando un puntaje que refleja la escasez del recurso: valores mayores a 1 indican mayor escasez en comparación con el promedio global; por ejemplo, un CF de 10 significa que en esa región hay 10 veces menos agua disponible por área que en el promedio mundial (Boulay et al., 2018; WULCA, 2024).

Importancia del método AWARE:

1. Permite cuantificar no solo la cantidad de agua consumida, sino también la probabilidad de privar a otros usuarios (humanos o ecosistemas) debido a ese consumo (Boulay et al., 2018; WULCA, 2024).
2. Al normalizar el AMD por área y tiempo, la comparación entre distintas regiones es posible y significativa en términos de impacto (Boulay et al., 2018).
3. El uso del método AWARE está formalmente recomendado por la iniciativa Life Cycle Initiative (UNEP–SETAC) y es conforme al estándar ISO 14046 sobre huella hídrica (WULCA, 2024).

En resumen, al aplicar el WCP en combinación con el factor AWARE, este estudio no solo cuantifica el volumen de agua consumido, sino también la gravedad del impacto en función del contexto local de disponibilidad. Esto enriquece la capacidad de identificación de puntos críticos (“hotspots”) y facilita la toma de decisiones para adoptar medidas como la reutilización de agua, la optimización de procesos o el traslado de producción a zonas con menor estrés hídrico.

La categoría de impacto ambiental de eutrofización de agua dulce, descrito por el Potencial de eutrofización del agua dulce (FEP) se refiere a la capacidad de las emisiones de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, para inducir procesos de eutrofización en cuerpos de agua dulce. Este indicador se expresa generalmente en unidades equivalentes de fosfato (kg PO_4^{3-} eq) y se calcula sumando las aportaciones de dichos nutrientes a lo largo del ciclo de vida de un producto, proceso o servicio (Khan & Mohammad, 2014).

Su importancia radica en varios aspectos:

- Conocer el FEP de un proceso es fundamental porque la eutrofización provoca la proliferación excesiva de algas y plantas acuáticas, lo que genera la reducción del oxígeno disuelto, alteraciones en la biodiversidad y la degradación de la calidad del agua. Estos cambios pueden conducir a la formación de zonas de hipoxia o anoxia, afectando tanto a la fauna acuática como a los usos humanos del recurso hídrico (Breitburg et al., 2018).
- Gestión y optimización: La evaluación del potencial de eutrofización permite identificar “hotspots” o áreas críticas donde se libera una carga elevada de nutrientes. Esto facilita la implementación de medidas de gestión y optimización, tales como el uso racional de fertilizantes y la mejora en el tratamiento de aguas

residuales, con el fin de mitigar el proceso eutrofizante y preservar la calidad del agua (Schindler, 2012).

- En estudios de Análisis de Ciclo de Vida, el FEP se utiliza para comparar el potencial eutrofizante de distintos productos o procesos, orientando el diseño hacia alternativas con menor impacto en los ecosistemas acuáticos. Esta comparación es esencial para promover estrategias de desarrollo sostenible y reducir la huella de nutrientes en las cuencas hidrográficas (Morelli, et al., 2018)

6.3.9 Análisis de calidad de datos

La calidad de los datos medidos en general es buena, todos los datos son reproducibles, consistentes según el tipo de dato, son representativos al sistema utilizado y además son exhaustivos, queriendo decir que se tomaron en cuenta todos los datos necesarios para realizar la actividad descrita en este reporte.

La precisión de los datos de consumo de agua es alta debido al uso de medidores de flujo calibrados a la entrada del sistema. Lo mismo ocurre con los datos de calidad de agua, las muestras fueron tomadas y analizadas por el CICA, como se mencionó en la sección de metodología. Los datos de consumo eléctrico, leña, gas licuado de petróleo, cascarilla y consumo de café fruta, fueron medidos y proporcionados por el personal del ICAFE directamente por la unidad de industrialización, quienes llevan un control riguroso de la toma de datos.

Para datos como los caudales de agua residual y volúmenes de producción de café en grano oro, se consideran de precisión media. Esto se debe a que son calculados a partir de balances de masa y en el caso del grano oro a partir de parámetros tomados de la literatura observados en las Tablas 2 y 3. Lo mismo ocurre con la estimación del caudal de recirculación de agua dentro del sistema de macro beneficio, ya que los instrumentos utilizados, aunque considerados de buena calidad, no estaban calibrados.

La representatividad es baja en los consumos de agua asociados a los suministros como electricidad, leña y gas licuado de petróleo debido a la falta de datos regionales en las bases de datos utilizadas.

6.4. Análisis de inventario

6.4.1 Levantamiento de la información y determinación de agua consumida por usos directos

Como se menciona en secciones anteriores el personal de ICAFE mide y reporta el ingreso de café fruta al proceso. En la Tabla 3 se observan los datos de consumo de café fruta para el periodo estudiado en distintas unidades comunes en el sector. En la Tabla 4 se observa la composición del café en kg de cada una de las partidas, según los porcentajes expuestos en las Tablas 1 y 2.

Tabla 3. Consumo de café fruta

Proceso	Partida	Doble Hecto Litros (DHL)	Fanegas	Fruta (kg)	Ton	Porcentaje de producción (%)
Micro beneficio	A	126.5	63.3	16 002.3	16.0	8.9
Micro beneficio	B	85.2	42.6	10 775.3	10.8	6.0
Micro beneficio	C	1.1	0.6	141.7	0.1	0.1
Macrobeneficio	D	628.6	314.3	79 520.4	79.5	44.2
Macrobeneficio	E	423.0	211.5	53 509.5	53.5	29.7
Macrobeneficio	F	158.4	79.2	20 032.5	20.0	11.1
	Total	1 422.8	711.4	179 981.7	180.0	100.0

Tabla 4. Composición del café

Partida	Pulpa (kg)	Agua en la pulpa (kg)	Mucilago (kg)	Café en pergamino húmedo (kg)	Pergamino seco (cascarilla)(kg)	Agua evaporada (kg)	Grano oro (kg)	Humedad final de grano oro (%m/m)
A	6 657	5 326	2 496	6 849	688	3 184	2 976	12%
B	4 483	3 586	1 681	4 612	463	2 144	2 004	12%
C	59	47	22	61	6	28	26	12%
D	33 080	26 464	12405	34 035	3 419	15 825	14 791	12%
E	22 260	17 808	8 347	22 902	2301	9 653	10 948	20%
F	8 334	6 667	3 125	8 574	861	3 986	3 726	12%
Total	74 872	59 898	28 077	77 032	7 739	34 821	34 472	12%

De la misma manera, el personal de ICAFE reporta los consumos directos de materiales y servicios que se utilizaron durante el periodo de estudio. En la Tabla 5 se observan las sumas de consumos de electricidad, leña, cascarilla, y GLP para ambos procesos, micro beneficio y macro beneficio, por mes. En la Tabla 6 se observa el consumo de agua por medidor, por mes. En la Tabla 7 se observan el consumo por proceso, micro beneficio y macro beneficio de todo el periodo. Finalmente, en la Tabla 8 se observa el consumo de agua por partida.

Tabla 5. Consumos de electricidad, leña, cascarilla, y GLP para ambos procesos

Mes	Electricidad (kWh)	Leña (m ³) *	Cascarilla (kg)	Gas Licuado de Petróleo (L)
Diciembre 2022	4 200	40	1 188.5	1 055.2
Noviembre 2022	6 920	40	645	1 330.2
Total	11 120	80	1 833.5	2 385.4

* Densidad de la leña: 578 kg/ m³ (Farfán & Redon, 2014)

Tabla 6. Consumo mensual de agua por medidor

Agua de proceso	Medidor 1	Medidor 2
Diciembre	31 236	3 381
Noviembre	15 606	1 896
Total	46 842	5 277

Tabla 7. Consumo directo de agua por proceso, micro beneficio y macro beneficio

	Macro beneficio	Micro beneficio	Total
Total (L)	41 565	5 277	46 842

Tabla 8. Consumo directo de agua por tipo de partida

Partida	Consumo de agua (L)
A	3 137
B	2 112
C	28
D	21 594
E	14 531
F	5 440
Total	46 842

6.4.2 Entradas, salidas y balance de masa

En la Figura 5 se observan las entradas de consumos y salidas de subproductos y residuos de los procesos de beneficiado en estudio. En este caso tanto el macro beneficio como el micro beneficio tienen las mismas entradas y salidas, lo que cambia son las cantidades por tonelada de grano oro producido, como se refleja más adelante en las Tablas 9 y 10. Realizando un balance de masa (masa de entrada = masa de salida) se calculan los datos de salida en forma de subproducto y residuos por tonelada de grano oro a partir de las masas de entrada y la composición descrita en los Tabla 2 y 3.

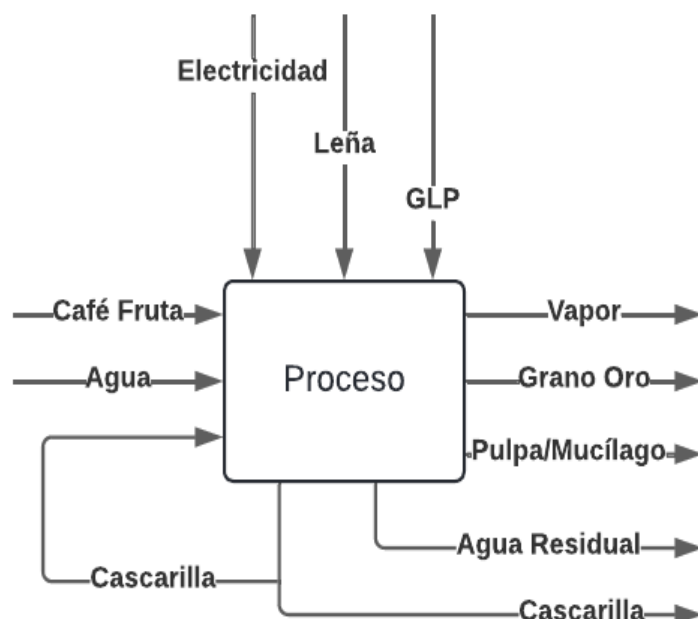


Figura 5. Entradas y salidas del proceso de beneficiado de café (Elaboración propia)

Tabla 9. Entradas de consumos por tonelada de Café Grano Oro

Partida	Leña m ³ /ton grano oro	Electricida d kWh/ton grano oro	Cascarilla kg/ton grano oro	GLP kg/ton grano oro	Agua de pozo L/ton grano oro	Café Fruta kg/ton grano oro
A	2.4	332.2	54.8	39.9	1 054.0	5 376.3
B	2.4	332.2	54.8	39.9	1 054.0	5 376.3
C	2.4	332.2	54.8	39.9	1 054.0	5 376.3
D	2.4	332.2	54.8	39.9	1 460.0	5 376.3
E	2.2	302.0	49.8	36.3	1 327.2	4 887.6
F	2.4	332.2	54.8	39.9	1 460.0	5 376.3
Totales	2.3	322.6	53.2	38.8	1 358.8	5 221.1

Tabla 10. Salidas de residuos y subproductos por tonelada de Café Grano Oro

Partida	Pulpa seca y mucilago kg/ton grano oro	Vapor kg/ton grano oro	Agua residual L/ton grano oro	Cascarilla kg/ton grano oro
A	1 286.0	1 069.9	2 843.2	231.2
B	1 286.0	1 069.9	2 843.2	231.2
C	1 286.0	1 069.9	2 843.2	231.2
D	1 286.0	1 069.9	3 249.2	231.2
E	1 169.1	881.7	2 953.8	210.2
F	1 286.0	1 069.9	3 249.2	231.2
Totales	1 248.9	1 010.1	3 096.4	224.5

Cabe destacar que la masa de agua residual se estima como la suma del agua consumida más el agua contenida en la pulpa y el mucilago, que durante el proceso de tratamiento de los residuos se exprime. Se está asumiendo para efectos de este estudio que el 100% del agua de la pulpa y el mucilago se logra extraer según la composición de la Tabla 3, aunque esto es prácticamente imposible. La masa de vapor se estima como el agua libre que se puede evaporar en el secado, según la composición de la Tabla 2 y la humedad final del grano oro.

Además, se observa en las Tablas anteriores que el único de consumo de agua directo es el de agua de pozo (Tabla 8 y columna destacada en azul de la Tabla 9). Las demás entradas tienen consumos de agua indirectos, también llamados agua virtual, este factor fue tomado en cuenta durante el análisis de ciclo de vida como se observa más adelante en este reporte.

6.4.3 Calidad del agua

En las Tablas 11 y 12 se observan los resultados de los análisis de calidad de agua tanto en la entrada (agua de pozo) como en la salida del proceso (agua residual) realizados por el CICA UCR y el Laboratorio de Análisis San Martín. Los reportes originales se encuentran en los anexos de este reporte.

Tabla 11. Resultados de los análisis de calidad de agua en la entrada (agua de pozo)

Análisis	Unidad	Resultado	Valor Alerta*	Valor Máximo Admisible*
Color	CU (U-Pt-Co)	5.0 ± 2.9	< 5	15
Conductividad	µS/cm	126.20 ± 0.77	400	---
Olor	----	Aceptable	Aceptable	Aceptable
pH	pH	7.20 ± 0.24	6	8
Temperatura	°C	21.8 ± 1.2	18	30
Turbiedad	UNT	< 0.30	1	5
Coliformes fecales	UFC/100ml	Negativo	No detectable	No detectable
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100ml	Negativo	No detectable	No detectable

* Decreto N° 41499-S REFORMA Y ADICIÓN AL DECRETO EJECUTIVO No.38924-S DEL 12 DE ENERO DEL 2015 “REGLAMENTO PARA LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE”, publicado en el Alcance No.15 a La Gaceta No.15 del 22 de enero del 2019. Para los parámetros de pH, temperatura, cloro residual libre y cloro residual combinado, los valores de VA y VMA establecen un ámbito permisible.

Tabla 12. Resultados de los análisis de calidad de en la salida del proceso (agua residual)

Análisis	Unidad	Resultado	Valor Máximo*
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5,20})	mg/L O ₂	(3.50 ± 0.25)x10 ³	50
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	(4.43 ± 0.15)x10 ³	150
Fósforo Total	mg/L P	4.85 ± 0.33	---
Grasas y Aceites	mg/L	< 10	30
Nitrógeno Total	mg/L N	39.2 ± 2.8	50
pH	pH	6.64 ± 0.24	5 a 9
Sólidos Sedimentables (S. Sed.)	mL/L	3.00 ± 0.31	1
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	390 ± 19	50
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/l	0.146 ± 0.018	5
Temperatura	°C	21.9 ± 1.2	15 a 40

*Decreto 33601- MINAE-S Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, publicado en el Alcance No. 8 a La Gaceta No. 55 del 19 de marzo del 2007. Valores máximos según código CIIUU 1079 aplicable a un beneficio de café.

6.4.4 Determinación del consumo de agua indirecto

Se determinó de forma individual el consumo de agua por uso indirecto, también conocido como “virtual”, de cada entrada y salida para reflejar con mayor precisión su contribución al impacto ambiental total del proceso de beneficiado, específicamente en las categorías de eutrofización y uso del agua (en inglés, “Water Scarcity”). Se obtuvieron los valores de la base de datos Ecoinvent versión 3.11 (Ecoinvent, 2024) utilizando el programa SimaPro como interfaz para realizar el cálculo, empleándose específicamente el método ReCiPe 2016 (Midpoint).

La elección de utilizar este método se fundamenta en su capacidad para ofrecer una evaluación transparente y detallada de los impactos ambientales a nivel intermedio, permitiendo identificar de forma precisa las áreas críticas de mejora y facilitar la comunicación de resultados conforme a las normativas internacionales de análisis de ciclo de vida (Huijbregts et al., 2017). Además, su implementación en SimaPro, que integra bases de datos actualizadas como Ecoinvent 3.11, refuerza la robustez y coherencia del análisis, haciendo de este método una opción apta para estudios orientados a la toma de decisiones sostenibles (PRé Sustainability, 2025).

En la Tabla 13 se presentan los detalles de la referencia específica utilizada en la base de datos, que incluyen el nombre del producto de referencia, la denominación exacta en la base de datos, la ubicación geográfica asociada a cada valor, la unidad de medida y su impacto ambiental expresado en términos de eutrofización (kg de P/unidad) y uso del agua (m³ de agua/unidad).

Para el caso del GLP, se eligió un dato con representación global, dado que en Costa Rica se importa desde distintos países; mientras que, en el caso de la electricidad, se encontró un valor que representa a Costa Rica.

El caso de la leña fue más complejo, ya que ningún producto de referencia en la base de datos correspondía específicamente a este combustible; por ello, se optó por utilizar la madera residual, denominada en la base de datos como “resto del mundo” (es decir, todos los países excepto aquellos que cuentan con datos exactos, generalmente algunas regiones altamente desarrolladas como Estados Unidos, Canadá, Japón y Europa). Aunque este dato no tenga alta confiabilidad, puesto que no representa exactamente la leña de Costa Rica, es valioso incluirlo en el análisis para evidenciar su contribución a los impactos ambientales estudiados.

Para el caso del agua de pozo, se utilizó el dato correspondiente al agua de grifo en Colombia extraída del subterráneo, ya que fue la opción más cercana tanto en descripción como en ubicación geográfica disponible en la base de datos. Se destaca que el valor obtenido hace referencia a la huella hídrica del proceso de la extracción del agua, se debe considerar aparte al valor del consumo directo que se observa en la Tabla 9.

Finalmente, las salidas de vapor y agua residual se agruparon en un solo valor debido a las limitaciones del programa, que permite crear una salida de agua totalmente personalizada para el caso en estudio. Esta salida consta de una parte de vapor, que no

requirió agregar información adicional, y una parte de agua líquida residual, cuya composición se personalizó para el proceso de beneficiado utilizando los valores de la Tabla 12, obtenidos a partir de una muestra de agua tomada en el sitio de estudio.

Cabe destacar que se excluye la cascarilla del análisis, ya que sus impactos serían idénticos a los del cultivo de café, y estos no están incluidos en el alcance de este estudio, que pretende únicamente analizar el proceso de beneficiado del café.

Tabla 13. Agua consumida y fósforo equivalente por uso indirecto de la leña, GLP, electricidad, agua de pozo, vapor y agua residual.

Entrada o salida del proceso	Producto de referencia en base de datos	Nombre de referencia en la base de datos	Ubicación geográfica del valor de referencia	Cantidad	Unidad	Kilogramos de fósforo equivalente (kg P-eq./unidad)*	Metros cúbicos de agua (m ³ /unidad)**
GLP	Gas licuado de petróleo	Grupo de mercado de gas licuado de petróleo	GLO (global)	1	kilogramo	4.75E-05	1.90E-03
Electricidad	Electricidad media tensión	Mercado de electricidad media tensión	CR (Costa Rica)	1	kilovatio hora	7.87E-06	0.000129
Leña	Madera residual. seca	Mercado de madera residual. seca	RoW (Resto del mundo)	1	metro cúbico	0.017397	1.547383
Agua de Pozo	Agua de grifo	Producción de agua de grifo. agua subterránea sin tratamiento	CO (Colombia)	1	kilogramo	2.60E-08	1.36E-06
Agua Residual y vapor	Agua residual y vapor	Agua residual y vapor	CR (Costa Rica)	1	kilogramo	3.59E-06	0.00026

*ReCiPe 2016 v1.03. midpoint (H) | eutrofización: agua dulce | potencial de eutrofización del agua dulce (FEP)

**ReCiPe 2016 v1.03. midpoint (H) | uso del agua | potencial de consumo de agua (WCP)

6.5. Evaluación de impactos relacionados con el uso del recurso hídrico

Para evaluar los impactos relacionados con el uso del recurso hídrico, se calcularon los indicadores de Potencial de consumo de agua (WCP), para posteriormente calcular el Impacto por escasez de agua, y el Potencial de eutrofización del agua dulce (FEP) que sería la representación del impacto por eutrofización de agua dulce, explicados a profundidad en la sección "*Impactos relacionados con el recurso hídrico*". El cálculo se realiza por partida y por categoría de entrada y salida, de esta manera se puede observar cuales factores afectan en mayor medida a cada parámetro de impacto ambiental.

El valor de WCP y FEP se determina multiplicando los valores de la Tabla 13 por los valores correspondientes de las Tablas 9 y 10, y se obtiene la contribución de cada entrada o salida, por partida en unidades de metros cúbicos de agua por tonelada de grano oro y kilogramos de fosforo por tonelada de grano oro. En las Tablas 14 y 15 se observan los valores obtenidos de FEP y WCP respectivamente.

6.5.1 Impacto por eutrofización de agua dulce

En la Tabla 14, se presentan los valores de FEP desagregados por partida y categoría de insumo. Se observa que el impacto de GLP, electricidad y el proceso de extracción de agua de pozo es relativamente menor, aunque constante entre las distintas partidas. Esto era esperable y se debe a que no son procesos donde se requiera el uso intensivo de agroquímicos, que es la principal fuente de fosforo, nitrógeno, y otros elementos que causan la eutrofización.

Tabla 14. Potencial de eutrofización del agua dulce

Partida	Kilogramos de fósforo equivalente (kg P-eq./ton de grano oro)					Potencial de eutrofización del agua dulce (FEP)
	Consumo indirecto				Proceso de extracción de agua de pozo	
	GLP	Electricidad	Agua residual*	Leña		
A	1.9E-03	2.6E-03	1.4E-02	4.2E-02	2.7E-05	6.0E-02
B	1.9E-03	2.6E-03	1.4E-02	4.2E-02	2.7E-05	6.0E-02
C	1.9E-03	2.6E-03	1.4E-02	4.2E-02	2.7E-05	6.0E-02
D	1.9E-03	2.6E-03	1.6E-02	4.2E-02	3.8E-05	6.2E-02
E	1.7E-03	2.4E-03	1.4E-02	3.8E-02	3.5E-05	5.6E-02
F	1.9E-03	2.6E-03	1.6E-02	4.2E-02	3.8E-05	6.2E-02
Totales	1.8E-03	2.5E-03	1.5E-02	4.0E-02	3.5E-05	5.9E-02

* Se asume una densidad del agua de 1 kg/L para el cálculo

El FEP promedio ($\approx 5.9 \times 10^{-2}$ kg P-eq/ton) evidencia una carga significativa de nutrientes en los efluentes, lo que aumenta el riesgo de eutrofización en cuerpos de agua cercanos. Esto obliga a priorizar sistemas de tratamiento que reduzcan fósforo y materia orgánica antes del vertido, y a establecer protocolos para el reúso agrícola controlado.

Se observa que en un caso similar al del WCP (Tabla 15), la leña es el insumo con mayor contribución al FEP en todas las partidas (aproximadamente 4.2E-02 kg P-eq./ton), representando cerca del 70% del total en cada caso. Esto se debe a que el proceso de producción de leña o cualquier otro cultivo requiere el uso intensivo de agroquímicos. De igual manera al caso del WCP, que se comenta más adelante, se considera importante mencionar que la leña es un producto utilizado como parte de un esfuerzo de economía circular. Es decir que el cultivo de la leña, un proceso que requiere del uso intensivo de agroquímicos, no se realizó con motivos energéticos, si no que tuvo su propio propósito comercial. Por lo tanto, este impacto podría no considerarse en el estudio.

El aporte de agua residual (entre 1.4E-02 kg P-eq./ton y 1.6E-02 kg P-eq./ton) también es considerable, debido a la presencia de nutrientes en los efluentes del proceso. Los nutrientes provienen del fruto de café y el uso de agroquímicos para su cultivo. En el ICAFE se realiza riego de plantaciones con zacate estrella con el agua residual por lo que se aprovecha parte de estos nutrientes y el agua. Sin embargo, dada la naturaleza del proceso

donde no se mide exactamente la cantidad de agua residual que se utiliza y la cantidad de agua residual que se está filtrando al suelo, no es posible incluir este factor en el estudio. Si se llegara a medir este reusó de agua se debería observar una disminución en ambos WCP y FEP.

El FEP de la partida E es menor a los de las otras partidas. Esto se debe a que el grano oro de la partida E tiene un mayor porcentaje de agua. Quiere decir que, se requiere menos energía para alcanzar este porcentaje de humedad y por lo tanto menos leña y otros insumos. No se observan diferencias significativas entre los procesos de micro y macro beneficio, lo cual tiene sentido dado que para secar el café se requiere la misma cantidad de leña por tonelada de grano oro.

6.5.2 Potencial de consumo de agua (WCP)

En la Tabla 15 se observa que en todas las partidas el consumo de GLP, electricidad y el proceso de extracción de agua de pozo tienen los menores impactos al WCP total. Mientras que el consumo de leña es el que tiene una mayor contribución, seguido del consumo directo de agua de pozo y la descarga de agua residual y vapor. En consecuencia, a estas observaciones, los esfuerzos futuros del ICAFE para reducir su huella hídrica deberían centrarse en los factores de mayor contribución.

Tabla 15. Potencial de consumo de agua

Partida	Metros cúbicos de agua (m ³ /ton de grano oro)						Potencial de consumo de agua (WCP)
	Consumo indirecto				Consumo directo		
	GLP	Electricidad	Agua residual * y vapor	Leña	Proceso de extracción de agua de pozo	Agua de pozo	
A	0.08	0.04	1.02	3.71	0.0014	1.05	5.91
B	0.08	0.04	1.02	3.71	0.0014	1.05	5.91
C	0.08	0.04	1.02	3.71	0.0014	1.05	5.91
D	0.08	0.04	1.12	3.71	0.0020	1.46	6.42
E	0.07	0.04	1.00	3.40	0.0018	1.33	5.84
F	0.08	0.04	1.12	3.71	0.0020	1.46	6.42
Totales	0.07	0.04	1.07	3.56	0.0018	1.36	6.10

* Se asume una densidad del agua de 1 kg/L para el cálculo

El WCP total de 6.10 m³/ton indica que la etapa de secado con leña es el principal contribuyente al consumo hídrico, incluso más que la extracción directa de agua. Esto sugiere implementar estrategias como secado solar parcial o sustitución por energía renovable, además de optimizar la recirculación en etapas críticas del proceso, cuando sea posible.

Como se menciona también en el caso del FEP, es de valor discutir que la leña es un producto utilizado como parte de un esfuerzo por evitar desperdicio, dándole un segundo uso y al mismo tiempo disposición final a un material de desecho de la industria agrícola. Por lo tanto, este impacto en el WCP podría considerarse ajeno al proceso de beneficiado. Es decir que el cultivo de la leña, un proceso que requiere de muchísima agua, no se realizó con motivos energéticos, si no que tuvo su propio propósito comercial, por ejemplo, cosechar café u otros frutos, o cosechar arboles maderables. Visto de esta manera, la huella hídrica debida a la leña podría excluirse del impacto ambiental, siempre y cuando el uso de leña sea parte de un esfuerzo por reutilizar el desecho y la leña no sea producida únicamente con el fin energético.

En lo que respecta al agua residual y el vapor, se puede iniciar el análisis comentando que el impacto del vapor es sumamente complejo de evitar ya que es básicamente la humedad del fruto de café que debe salir del café para la producción del grano oro. Es decir que reducir la cantidad de vapor emitido a la atmosfera es poco viable. Una posible opción sería condensar el vapor con un intercambiador de calor para disponer del material de forma líquida devolviéndolo a un cuerpo de agua. Sin embargo, operativamente esto es costoso y la reducción en el impacto es compleja de medir que ya que necesitaría de otros insumos como agua de enfriamiento o procesos de refrigerado que impactarían el WCP.

El impacto del agua residual y vapor es el tercer mayor contribuidor al WCP. Se observa que en las partidas que se procesan en el micro beneficio el impacto por este factor es menor a las que se procesan en el macro beneficio, esto se debe a que consumen una mayor cantidad de agua de pozo y por un simple balance de masa implica que habrá más agua residual. Cabe destacar la excepción de la partida E (macro beneficio) dado que, al tener una mayor humedad en este grano, la cantidad de vapor emitida es menor, lo que reduce su impacto al proceso. Más adelante en este documento se analiza el tema de la circularidad del agua residual, donde se discuten posibles maneras de reducir su impacto.

Por último, el impacto por consumo directo es el más alto, después de la leña. Se observa que en este caso el impacto por este factor es menor en las partidas de micro beneficio que en las partidas de macro beneficio, lo cual es interesante dado que el proceso macro utiliza técnicas de ahorro de agua que el proceso micro no.

Específicamente, el proceso macro usa la recirculación de agua para el transporte y lavado del café fruta, esta diferencia se observa claramente al comparar las Figuras 3 y 4. Recordando que el micro beneficio recibe cantidades de fruta muy bajas, este resultado implica que, aunque se está haciendo un esfuerzo de ahorro de agua, la cantidad de café a procesar puede tener un impacto significativo en los valores de consumo por tonelada de grano oro. Una posible explicación es que transportar lotes de café fruta en el micro beneficio, que son unos cuantos kilogramos, se puede realizar manualmente y por lo tanto evitar la necesidad de grandes cantidades de agua para transportar el café a las maquinas.

Más adelante en este documento se analiza el tema de la circularidad del consumo directo de agua de pozo, donde se discuten posibles maneras de reducir su impacto.

6.5.3 Impacto por escasez de agua

En la Tabla 16 se presentan los factores de caracterización utilizados para calcular el indicador de escasez de agua (impacto de escasez), aplicando el método AWARE, tal como se describe en la sección *“Impactos relacionados con el recurso hídrico”*.

La selección de los factores de caracterización (CF) se realizó considerando la ubicación geográfica asociada al origen de cada flujo (entrada o salida) y el periodo de referencia más adecuado según la información disponible. Los CF se obtuvieron de la base de datos de libre acceso del método AWARE (Seitfudem et al., 2025).

En el caso del GLP, este es importado a Costa Rica desde Estados Unidos (ARESEP, 2025); por ello, se empleó el CF correspondiente a dicho país, considerando un periodo anual, ya que no se dispone de datos exactos sobre el momento de extracción y procesamiento del material.

Para la electricidad, se utilizó el CF de Costa Rica, sin especificar una cuenca en particular, dado que la generación eléctrica puede provenir de diferentes fuentes. Se seleccionó el periodo de noviembre y diciembre, correspondiente a los meses en los que se registró el consumo.

En cuanto a la leña, también se seleccionó el CF de Costa Rica, empleando un periodo anual, ya que la planta de origen (especie no identificada) requiere varios años para alcanzar la madurez antes de su cosecha.

Finalmente, los CF aplicados para el agua de pozo, agua residual y vapor corresponden a la cuenca con ID 49686, identificada mediante la capa geoespacial de Google Earth incluida en las bases de datos del método AWARE (Seitfudem et al., 2025), tomando como referencia la ubicación del ICAFE (Figura 6). Para estos flujos, se seleccionó el periodo de noviembre y diciembre, en concordancia con la temporalidad de los datos de consumo y generación de efluentes.

Tabla 16. Factor de Caracterización (CF) del método AWARE para cada entrada o salida del proceso (Seitfudem, et al., 2025).

Entrada o salida del proceso	Ubicación geográfica del valor de referencia / número de ID de la cuenca	Periodo de referencia	Base de datos de origen*	Factor de Caracterización (CF), m ³ world equiv./m ³
GLP	Estados Unidos	Anual	AWARE20_Countries_and_Regions.xlsx	33.7
Electricidad	CR (Costa Rica)	Promedio noviembre y diciembre	AWARE20_Countries_and_Regions.xlsx	0.454
Leña	CR (Costa Rica)	Anual	AWARE20_Countries_and_Regions.xlsx	1.45
Agua de Pozo	ID 49686	Promedio noviembre y diciembre	AWARE20_Native_CFs.xlsx	0.2925
Agua Residual y vapor	ID 49686	Promedio noviembre y diciembre	AWARE20_Native_CFs.xlsx	0.2925

* Bases de datos descargables en <https://zenodo.org/records/16332127> (Seitfudem, et al., 2025).

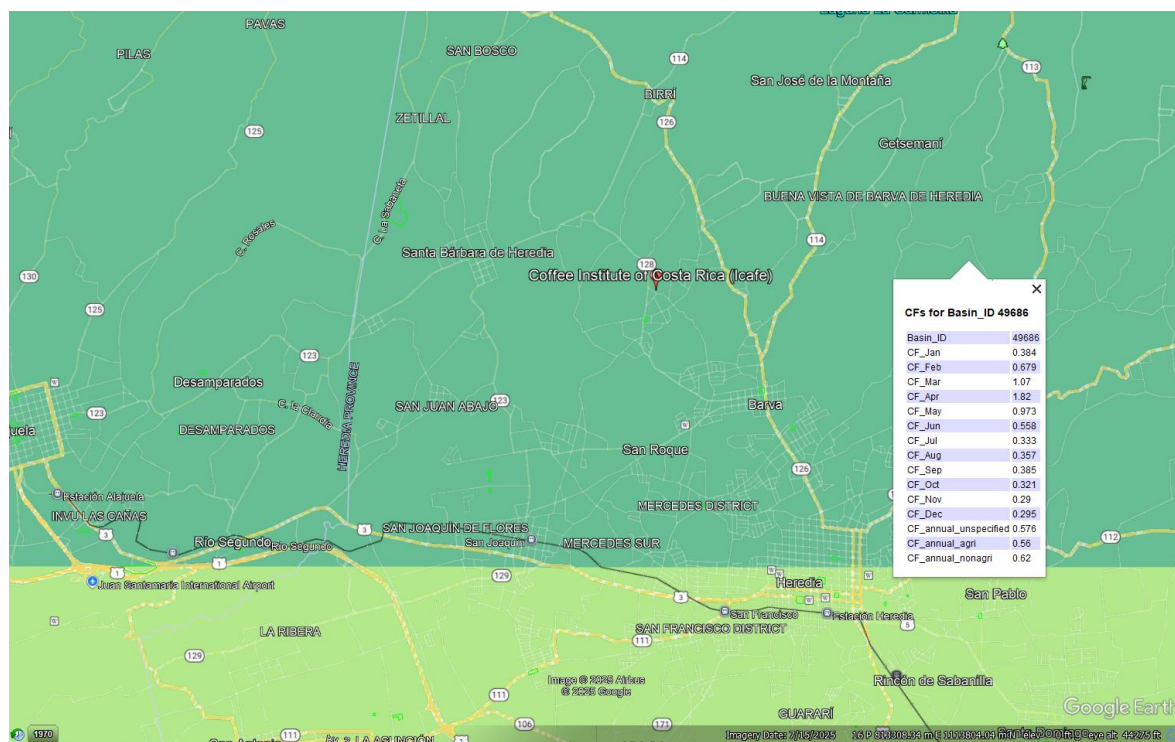


Figura 6. Captura de pantalla del programa Google Earth con la capa de CF (AWARE20_Native_CFs_geospatial.kmz) para identificar el ID de la cuenca donde se ubica el ICAFE, ID 49686 (Seitfudem, et al., 2025).

En la Tabla 17 se presentan los valores de impacto de escasez de agua por partida, desagregados según el tipo de consumo y la entrada o salida. Aunque la leña aparece como el insumo con mayor contribución al impacto, su efecto podría considerarse ajeno al proceso de beneficiado, siguiendo las mismas razones discutidas previamente para el WCP y el FEP.

Por otra parte, el Gas Licuado de Petróleo (GLP) muestra una contribución significativa al impacto de escasez de agua. Esto se debe a que el GLP empleado en el proceso proviene de un país cuyo factor de caracterización (CF) es 33,7 veces superior al promedio mundial, amplificando de manera considerable su huella hídrica en comparación con otros insumos. En comparación, al evaluar el consumo de agua mediante el indicador WCP, la participación del GLP resulta mucho menor, dado que este indicador solo considera el volumen consumido y no la severidad de la escasez en el lugar de extracción. Esta diferencia evidencia la importancia de utilizar metodologías como AWARE, que permiten capturar la presión real que los recursos energéticos ejercen sobre las cuencas hídricas de origen, especialmente en regiones con alto estrés hídrico.

Asimismo, aunque el consumo directo de agua de pozo y de vapor representa fracciones menores del impacto total, su contribución no es despreciable, particularmente en partidas como “D” y “F”, donde el uso de agua local incrementa ligeramente el impacto. Esto indica que, incluso en procesos donde la mayor presión hídrica proviene de insumos importados como el GLP, la gestión eficiente del agua local sigue siendo relevante para reducir la presión sobre la cuenca de origen. Por otro lado, la leña, pese a su elevado valor de impacto en AWARE, debe interpretarse con cautela, ya que su efecto se relaciona más con la asignación de impactos indirectos que con un consumo directo de agua en el proceso.

La partida E, al utilizar menos recursos energéticos como leña y GLP, por su humedad final mayor al resto de partidas, se ve favorecida en términos de impacto de escasez de agua. Esto muestra cómo variaciones en las propiedades del producto final pueden influir directamente en la eficiencia del uso de recursos y, por ende, en la huella hídrica del proceso.

Finalmente, al comparar las distintas partidas, se observa que la variación del impacto total es relativamente pequeña, oscilando entre 7,99 m³ world equiv./ton de grano oro y 8,85 m³ world equiv./ton de grano oro. Esto sugiere que las estrategias de mitigación podrían enfocarse principalmente en reducir la dependencia de insumos con alto CF, como el GLP, y en optimizar el uso del agua local en etapas como la finca y el procesamiento. En conjunto, los resultados destacan la utilidad del indicador AWARE, al mostrar cómo la presión sobre los recursos hídricos depende no solo del volumen de agua consumido, sino también del contexto geográfico y la vulnerabilidad de la cuenca de origen.

Tabla 17. Impacto de escasez de agua (AWARE) calculado con el método AWARE.

Partida	Metros cúbicos de agua (m ³ world equiv./ton de grano oro)						Impacto de escasez de agua
	Consumo indirecto				Consumo directo		
	GLP	Electricidad	Agua residual * y vapor	Leña	Proceso de extracción de agua de pozo	Agua de pozo	
A	2.70	0.02	0.30	5.38	4E-04	0.31	8.70
B	2.70	0.02	0.30	5.38	4E-04	0.31	8.70
C	2.70	0.02	0.30	5.38	4E-04	0.31	8.70
D	2.70	0.02	0.33	5.38	6E-04	0.43	8.85
E	2.36	0.02	0.29	4.93	5E-04	0.39	7.99
F	2.70	0.02	0.33	5.38	6E-04	0.43	8.85
Totales	2.36	0.02	0.31	5.16	5E-04	0.40	8.25

6.6. Análisis de circularidad del agua

Como parte del Objetivo 2 de este proyecto, se realizó el cálculo de las tres métricas de circularidad, descritas en la sección de Objetivos y Metodología: la circularidad en las fuentes, el indicador de circularidad en el proceso o sitio de estudio y la circularidad de los efluentes. El análisis se realiza por tipo de beneficiado, Micro beneficio y Macro Beneficio.

En la Tabla 18 se encuentran los parámetros necesarios para calcular la métrica de circularidad en las fuentes. Se observan dos categorías, la del agua de pozo que es extraída de un pozo en las instalaciones y la de agua contenida en el café fruta, que representa el agua virtual del café. Esta última toma relevancia porque en el proceso se extrae mucha de esa agua para obtener el grano oro, en este cálculo se excluye el agua que queda en el café oro en forma de humedad al 12% o 20%. Por efectos de balance de masas, se asume que el valor aquí indicado será un efluente del proceso en forma de vapor o agua residual.

En la Figura 1 se encuentra el árbol de decisión utilizado para estimar los valores de porcentaje de circularidad para cada categoría. Para el caso del agua de pozo el agua viene del acuífero de Barva en lugar de una fuente no virgen y se considera que se renueva de manera constante y completa por la precipitación y el ciclo natural del agua. En particular

gracias a las zonas de recarga protegidas por la legislación costarricense (Castro Peinador et al., 2011).

El agua de pozo una vez utilizada por la instalación no puede devolverse directamente a la fuente, pero si se devuelve indirectamente por medio de filtración en la caja de registro y por riego del zacate estrella. Por lo tanto, se considera que el agua de pozo es un 75% circular.

Por otra parte, en el caso del agua contenida en el café fruta, hay muchísima incertidumbre porque cada lote que se procesa puede venir de una finca de café diferente que tiene prácticas distintas y ubicación geográfica distinta. Entonces, no se conoce la fuente, no se sabe si hay renovación o si hay buena gobernanza del recurso por lo que se le otorga un valor de 0% de circularidad.

En la última columna de la Tabla 18 se estima la circularidad en las fuentes utilizando la ecuación 1. Se observa que el Macro beneficio tiene una circularidad en las fuentes menor que el Micro beneficio, esto se debe principalmente a que el Micro beneficio utiliza menos agua de pozo por ton de grano oro, pero un valor similar en términos de agua contenida en el café fruta. Nótese que en esta última categoría hay una ligera diferencia entre macro y micro beneficio debido a que en el macro beneficio la partida E tiene una humedad mayor en el producto final.

El personal del ICAFE no tiene control sobre el agua contenida en el café fruta, por lo que es importante destacar que, si este factor es ignorado, la circularidad de las fuentes, bajo control del ICAFE, es de un estimado 75%, lo cual es bastante positivo. Se podría mejorar y llegar a un 100% si la institución decidiera instalar un sistema de tratamiento de agua eficiente y devolver el agua tratada a la cuenca (o el pozo de ser posible), asegurándose previamente que cumple con todos los parámetros necesarios según la legislación vigente.

Tabla 18. Circularidad en las fuentes

Tipo de beneficio	Categoría	Agua extraída (L/ton grano oro)	Porcentaje de circularidad de cada categoría (%)*	Agua Circular (L/ton grano oro)**	Circularidad en las fuentes (%)
Micro beneficio	Agua de pozo	1 054.0	75%	790.5	20.0%
	Agua contenida en el café fruta	2 859.1	0%	0	
Macro beneficio	Agua de pozo	1 410.7	75%	1 057.5	25.5%
	Agua contenida en el café fruta	2 728.8	0%	0	
Total	Agua de pozo	1 359.8	75%	1 019.9	24.8%
	Agua contenida en el café fruta	2 747.7	0%	0	

*Porcentaje de circularidad estimado según árbol de decisión en la Figura 1.

**Se calcula multiplicando el agua extraída por el porcentaje de circularidad.

La circularidad en las fuentes (24.8 %) refleja una alta dependencia de agua fresca del acuífero. Para mejorar este indicador, se recomienda incorporar captación de agua de lluvia y aumentar el reúso externo, reduciendo la presión sobre el acuífero de Barva y fortaleciendo la resiliencia hídrica del beneficio.

Para poder calcular el indicador de circularidad en el proceso o sitio de estudio del macro beneficio, fue necesario hacer una medición puntal en sitio del caudal de la bomba de recirculación (Figura 3). Así como medir el tiempo en que la bomba de recirculación se mantiene encendida durante el procesamiento de una cantidad conocida de café fruta. El caudal se estimó haciendo un pequeño experimento donde se midió el tiempo que duraba la bomba en vaciar agua de un volumen conocido.

En la Tabla 19 se observan los resultados de las mediciones realizadas y la cantidad total de agua que se requiere en el proceso. Esto no significa que se extraiga esta agua. Por el contrario, es la cantidad necesaria de agua que, si no se recirculara absolutamente nada, se tendría que extraer. En el micro beneficio no hay recirculación de agua.

Tabla 19. Cálculo del agua recirculada por ton de grano oro en el macro beneficio.

Variable	Cantidad	Unidad
Volumen conocido	0.50	m ³
Tiempo de vaciado	50	s
Caudal de la bomba de recirculación	35.7	m ³ /h
Cantidad de café fruta procesado	1.962	Ton
Cantidad de oro grano producido	0.365	Ton
Tiempo en que la bomba estuvo encendida	0.55	h
Litros de agua recirculada en el tiempo en que la bomba estuvo encendida	19 638	L
Litros de agua recirculada/ton de grano oro	53 798	L/ton de grano oro

En la Tabla 20 se encuentran los parámetros necesarios para calcular el indicador de circularidad en el proceso o sitio de estudio. Para calcular el indicador, se utiliza la Formula 2. Se observa que solamente en el proceso de macro beneficio hay recirculación de agua, ocurre únicamente en el proceso de recibido, despedrado y desaguado, como se observa en la Figura 3. Gracias a este proceso de recirculación se está evitando el desperdicio de 13 veces la cantidad de agua extraída. Si se toma en cuenta únicamente el agua extraída que el ICAFE puede controlar, es decir el agua de pozo, el indicador es mucho más favorable con un valor de 39.

Se recomienda que en el macro beneficio se evalúe la posibilidad de guardar el agua de este ciclo y utilizarla en más de un lote. De esta manera aumentaría la circulación en el proceso y disminuiría la cantidad de agua extraída. Debe tomarse en cuenta que el agua se va ensuciando en estos procesos y se debe tener un indicador estricto que indique cuando se debe hacer el cambio/renovación del agua antes de que pueda afectar la calidad del producto.

El macro beneficio logra 14 ciclos de recirculación, mientras que el micro beneficio no presenta recirculación ($X = 1$). Esto muestra una oportunidad clara: replicar el sistema de recirculación en el micro beneficio y evaluar el uso del agua recirculada entre lotes para disminuir la extracción de agua fresca. Además de replicar el sistema, se recomienda definir indicadores de calidad para el agua recirculada y realizar un análisis costo-beneficio antes de implementar recirculación en lotes pequeños.

Tabla 20. Indicador de circularidad en el proceso.

Tipo de beneficio	Categoría	Agua extraída (L/ton grano oro)	Agua recirculada (L/ton grano oro)	Circulación en el proceso, X, (adimensional)
Micro beneficio	Agua de Pozo	1 054.0	0	1
	Agua contenida en el café fruta	2 859.1	0	
Macro beneficio	Agua de Pozo	1 410.7	53 798	14(39*)
	Agua contenida en el café fruta	2 728.8	0	

*Usando únicamente el agua extraída de pozo en el denominador de la Ecuación 2.

En la Tabla 21 se encuentran los parámetros necesarios para calcular la métrica de circularidad en los efluentes. Se observan dos categorías, la del agua residual y la de vapor. Cabe recalcar que ambos efluentes derivan de una estimación según los porcentajes presentados en las Tablas 2 y 3, la suposición de que toda el agua de la pulpa es parte del agua residual y un balance de masa según las entradas del proceso. Para determinar el porcentaje de circularidad de cada efluente se utiliza el razonamiento de decisión expuesto en la Figura 2.

Para el caso del vapor se considera que tiene un porcentaje de circularidad de 0%, debido a que se pierde en el proceso, no se puede decir con exactitud que regresa a la cuenca por precipitación ni como escorrentía ni por condensación recuperable. Por lo tanto, se considera totalmente lineal.

En el caso del agua residual generada en el proceso, se observa en la Tabla 12 que no cumple con los valores máximos permitidos por la normativa nacional de vertido (DBO, DQO y sólidos totales exceden los límites del Decreto 33601-MINAE-S). Sin embargo, sí se le da un uso posterior beneficioso a nivel local.

El agua residual se utiliza para el riego de zacate estrella en áreas cercanas a la planta y parte del flujo se infiltra en el suelo a través de la caja de registro. Esto representa una estrategia de aprovechamiento hídrico dentro de la misma cuenca hidrográfica y evita que el efluente se convierta en un flujo puramente lineal. No obstante, la falta de medición exacta del volumen reutilizado y la ausencia de un control más riguroso de la calidad posterior al riego limitan el reconocimiento total de esa circularidad.

Además, se debe considerar que la cuenca está bajo una presión de contaminación constante debido a las actividades de la zona (Madrigal-Solís et al., 2014). Por estas razones, se propone una circularidad parcial del 50% para el flujo de agua residual, reconociendo el valor del reúso agrícola pero también la incertidumbre del proceso.

En la última columna de la Tabla 21 se estima la circularidad en los efluentes utilizando la ecuación 3. Se observa que el Macro beneficio tiene una circularidad en los efluentes ligeramente menor que el Micro beneficio, esto se debe principalmente a que el Micro beneficio utiliza menos agua extraída por ton de grano oro, y genera un valor similar en términos de agua residual y vapor.

También, se recomienda al ICAFE evaluar mejoras en la medición y documentación del destino de los efluentes. Por ejemplo, medir el flujo/cantidad de agua residual producida y la cantidad que se utiliza para riego. Adicionalmente, se recomienda evaluar la instalación de un sistema de tratamiento de aguas residuales para tratar parcial (en caso de que se desee parte de la carga orgánica en el riego) o totalmente el agua residual antes de regresar el agua a la cuenca ya sea por medio de riego o de vertido a un cuerpo de agua.

La circularidad en los efluentes (aproximadamente 12 %) es baja por falta de tratamiento y pérdida de agua como vapor. Además de medir volúmenes y mejorar tratamiento, se

sugiere explorar tecnologías para recuperar vapor condensado, lo que permitiría aumentar la circularidad y reducir pérdidas hídricas.

Tabla 21. Circularidad en los efluentes

Tipo de beneficio	Agua extraída (kg/ton grano oro) ^{***}	Categoría	Efluente (kg/ton grano oro) ^{***}	Porcentaje de circularidad (%) [*]	Agua residual circular (kg/ton grano oro) ^{**}	Circularidad en los efluentes (%)
Micro beneficio	3 913.1	Agua residual	1 069.9	50%	535	13.7%
		Vapor	2 843.2	0%	0	
Macro beneficio	4 139.5	Agua residual	1 000.0	50%	500	12.1%
		Vapor	3 139.5	0%	0	
Total	4 107.5	Agua residual	1 010.1	50%	505	12.3%
		Vapor	3 096.4	0%	0	

*Porcentaje de circularidad estimado según Tabla de decisión en la Figura 2.

**Se calcula multiplicando el agua residual vertida o vapor por el porcentaje de circularidad.

*** Para efectos de mantener la coherencia de unidades en el cálculo, se convierte el valor tomado de la Tabla 10 a kg/ton grano oro utilizando una densidad promedio de 1 kg/L.

7.Limitaciones del estudio

Este estudio presenta varias limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados.

En primer lugar, no se realizó una medición directa del caudal de aguas residuales, lo que obligó a estimar estos valores mediante balances de masa, incrementando la incertidumbre en los cálculos.

En segundo lugar, se recurrió al uso de datos secundarios para insumos como leña y GLP, debido a la falta de información específica sobre su origen y características, lo que puede afectar la representatividad del análisis.

Asimismo, existe incertidumbre en la circularidad del agua contenida en el café fruta, ya que su procedencia y prácticas agrícolas varían entre fincas, dificultando la trazabilidad completa del recurso hídrico.

Finalmente, se excluyeron insumos menores como productos de limpieza y lubricantes, lo que podría subestimar ligeramente la huella hídrica total.

Estas limitaciones no invalidan los resultados, pero sí sugieren que deben interpretarse con cautela.

Para futuros estudios se recomienda:

- Instalar medidores de caudal en la salida del sistema,
- Mejorar la trazabilidad de insumos energéticos,
- Incluir mediciones directas del reúso de agua residual,
- Ampliar el alcance para incorporar insumos menores y evaluar su impacto.

8. Conclusiones y recomendaciones

- El Impacto de Escasez de Agua (AWARE) total es de 8.25 m³ world-eq/ton, lo que indica una presión hídrica moderada asociada al proceso. La leña y el GLP son los principales contribuyentes, reflejando que el consumo de estos insumos en cuencas con mayor vulnerabilidad hídrica aumenta la presión sobre el recurso disponible.
- Aunque ambos sistemas de beneficio dependen mayoritariamente de fuentes lineales, el macro beneficiado alcanza una circularidad de fuentes de 25.5 %, mientras que el micro beneficiado llega al 20.0 %.
- En el macro beneficio, el agua extraída de pozo se recircula internamente hasta 14 veces antes de requerir renovación, en contraste con el micro beneficio, donde no existe recirculación alguna.
- La circularidad de los efluentes resulta baja en ambos casos (13.7 % para micro y 12.1 % para macro), porque solo el 50 % del agua residual se considera circular y el resto se pierde como vapor de manera lineal.
- El Potencial de Eutrofización del Agua Dulce (FEP) total alcanza 5.9×10^{-2} kg P-eq/ton, evidenciando el aporte de nutrientes vertidos y un riesgo sobre la calidad de cuerpos de agua receptores.
- El Potencial de Consumo de Agua total es de 6.10 m³ por tonelada de grano oro, con la leña y el agua de pozo como los principales contribuyentes al consumo hídrico del proceso.
- El Potencial de Consumo de Agua (WCP) revela que la etapa de secado con leña es la que más presión ejerce sobre el recurso hídrico, superando incluso la extracción de agua de pozo, debido al consumo de leña.
- Los efluentes presentan una Demanda Bioquímica de Oxígeno de 3,500 mg/L, una Demanda Química de Oxígeno de 4,430 mg/L y Sólidos Suspendidos Totales de 390 mg/L, todos muy por encima del límite máximo según el Decreto 33601-MINAE-S, por lo que no deberían verterse sin tratamiento previo.
- Para reducir la incertidumbre en la estimación del volumen de agua residual, se recomienda instalar caudalímetros o sensores de flujo a la salida del sistema, de modo que cada litro reciclado o vertido quede debidamente cuantificado.

- A fin de garantizar la calidad del agua para reúso o descarga, se recomienda evaluar la instalación de un sistema de tratamiento biológico y/o físico-químico que cumpla con el Decreto 33601-MINAE-S antes de retornar el agua a la cuenca.
- Reutilizar el agua de recirculación en el macro beneficiado entre lotes diferentes podría optimizar aún más el uso del recurso, siempre que se definan indicadores de calidad que alerten el momento óptimo para renovar el agua.
- Aunque en el micro beneficiado no hay recirculación, explorar un circuito básico de reúso podría reducir el consumo de agua fresca, aunque debe evaluarse cuidadosamente el balance costo-beneficio operativo.
- La norma ISO 14046:2014 proporcionó un marco detallado para medir la huella hídrica, abarcando desde la definición de objetivos y alcance hasta la interpretación de resultados con coherencia metodológica.
- Integrar la base de datos ecoinvent 3.11 en SimaPro con el método ReCiPe 2016 permitió caracterizar el “agua virtual” de insumos como la leña y la electricidad, ofreciendo una visión completa de los impactos indirectos.
- Identificar a la leña y al proceso de extracción de agua de pozo como “puntos críticos” de la huella hídrica orienta las futuras acciones para reducir el consumo total de agua.
- El reúso de agua residual en riego de zacate estrella mejora la circularidad y aporta nutrientes al suelo, pero requiere protocolos de monitoreo posteriores que aseguren la protección de la cuenca.
- El presente estudio evidencia que una gestión hídrica más circular en el beneficiado de café puede trascender los límites del proceso productivo y generar beneficios para el sector agropecuario de la zona. Formalizar y ampliar el reúso del agua residual tratada para riego, aprovechando su contenido de nutrientes, representaría un insumo de valor para productores cercanos, reduciendo su dependencia de fertilizantes externos y disminuyendo simultáneamente la carga contaminante sobre las fuentes hídricas de la cuenca.
- Si se implementara un sistema de tratamiento de aguas residuales que cumpliera con los parámetros establecidos en el Decreto 33601-MINAE-S, el agua tratada podría devolverse de forma controlada a la cuenca, ya sea mediante infiltración al acuífero de Barva o mediante vertido a un cuerpo de agua receptor. Dado que el acuífero de Barva es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable para las comunidades del Gran Área Metropolitana y enfrenta crecientes

presiones por consumo y contaminación, esta medida generaría un beneficio directo para los usuarios domésticos cercanos, consolidando al ICAFE como un actor clave en la gestión integrada del recurso hídrico a escala de cuenca.

- La guía práctica propuesta en el Anexo A, que detalla el cálculo de métricas de circularidad y huella hídrica paso a paso, facilitará la estandarización de buenas prácticas en las plantas de beneficiado de café de Costa Rica.

9. Referencias

1. Anheuser-Busch InBev. (2022). Anheuser-Busch InBev - CDP Water Security 2022. [PDF]. Tomado de <https://www.ab-inbev.com/img/redesign/Sustainability/Anheuser%20Busch%20InBev%20-%20CDP%20Water%20Security%202022.pdf>
2. Alemayehu, Y. A., Asfaw, S. L., & Terfie, T. A. (2021). Reusing urine and coffee processing wastewater as a nutrient source: effect on soil characteristics at optimum cabbage yield. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101571.
3. Arias, I. G., & Calvo-Alvarado, J. C. (2012). Water resources of the upper Tempisque River watershed, Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 25, 63-70.
4. Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). (2025). Información general gas Licuado de Petróleo (GLP). Recuperado el 13 de agosto de 2025, de <https://aresep.go.cr/gas/informacion-general/>
5. Bhambhani, A., Kapelan, Z., & van der Hoek, J. P. (2023). A new approach to circularity assessment for a sustainable water sector: Accounting for environmental functional flows and losses. *Science of the Total Environment*, 903, 166520.
6. Beverage Industry Environmental Roundtable (BIER). (2023, March 8). [BIER website]. Retrieved March 8, 2023, from <https://www.bierroundtable.com/>
7. Birkenberg, A., & Birner, R. (2018). The world's first carbon neutral coffee: Lessons on certification and innovation from a pioneer case in Costa Rica. *Journal of Cleaner Production*, 189, 485-501.
8. Blackman, A., & Naranjo, M. A. (2012). Does eco-certification have environmental benefits? Organic coffee in Costa Rica. *Ecological Economics*, 83, 58-66.
9. Boulay, A. M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., ... & Pfister, S. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368-378.
10. Brändström, J., & Saidani, M. (2022). Comparison between circularity metrics and LCA: A case study on circular economy strategies. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133537.

11. Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., ... & Zhang, J. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371), eaam7240.
12. Bui, T. T., Nguyen, D. C., Han, M., Kim, M., & Park, H. (2021). Rainwater as a source of drinking water: A resource recovery case study from Vietnam. *Journal of Water Process Engineering*, 39, 101740.
13. Castro Peinador, G., Ñamendi, F. J. C., de la Cruz Godoy, J. C., Gelabert, C., Cascante, D. M., Palacios, W. C. P., ... & Tellez, A. G. T. (2011). Impacto antrópico en el Manto Acuífero Barva (Heredia, Costa Rica) con énfasis en el uso del suelo (1992-2006). *UNED Research Journal/Cuadernos de Investigación UNED*, 3(1), 71-80.
14. Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2007). The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological economics*, 64(1), 109-118.
15. Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H., & Gautam, R. (2006). The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological economics*, 60(1), 186-203.
16. Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD). (2023). Indicadores para empresas, elaborados por empresas: Indicadores de transición circular V1.0. Ginebra: WBCSD.
17. Decreto N° 41499-S REFORMA Y ADICIÓN AL DECRETO EJECUTIVO No.38924-S DEL 12 DE ENERO DEL 2015 “REGLAMENTO PARA LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE”, publicado en el Alcance No.15 a La Gaceta No.15 del 22 de enero del 2019
18. Decreto 33601- MINAE-S Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, publicado en el Alcance No. 8 a La Gaceta No. 55 del 19 de marzo del 2007
19. Del Borghi, A., Moreschi, L., & Gallo, M. (2020). Circular economy approach to reduce water–energy–food nexus. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 13, 23-28.
20. ecoinvent. (2024). *Ecoinvent database (versión 3.11)* [Base de datos en SimaPro]. Ecoinvent Association. <https://ecoinvent.org>
21. Elhalis, H., Cox, J., & Zhao, J. (2022). Coffee fermentation: Expedition from traditional to controlled process and perspectives for industrialization. *Applied Food Research*, 100253.

22. FAO (2017). AQUASTAT Database. AQUASTAT Website accessed on [29/06/2021 3:30].
23. Farfán, F. & Redón J.R. (2014) Producción de madera por las Variedades Castillo® y Tabi en sistemas agroforestales, CENICAFE. Tomado de: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/563/1/avt0448.pdf>
24. Febrianto, N. A., & Zhu, F. (2023). Coffee bean processing: Emerging methods and their effects on chemical, biological and sensory properties. *Food Chemistry*, 135489.
25. Ferreira, L. J. C., de Souza Gomes, M., de Oliveira, L. M., & Santos, L. D. (2023). Coffee fermentation process: A review. *Food Research International*, 112793.
26. Fonseca-Sánchez, A., Madrigal-Solís, H., Núñez-Solís, C., Calderón-Sánchez, H., Moraga-López, G., & Gómez-Cruz, A. (2019). Evaluación de la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección a manantiales en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. *Uniciencia*, 33(2), 76–94. <https://doi.org/10.15359/ru.33-2.6>
27. Fundación Chile & Agualimpia (2017). Manual de aplicación de evaluación de huella hídrica acorde a la norma ISO 14046. Lima, Perú
28. Garnier, C., Guiga, W., Marie-Laure, L., & Fargues, C. (2022). Water reuse in the food processing industries: A review on pressure-driven membrane processes as reconditioning treatments. *Journal of Food Engineering*, 111397.
29. Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F., & Van Beek, L. P. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197-200.
30. Gómez Mora, J. M. (2019). Modelación del procesamiento agroindustrial del café desde la fruta hasta el café oro.
31. Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Integrated assessment of water resources and global change: A north-south analysis*, 35-48.
32. Hoekstra, A. Y. (2009). Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological economics*, 68(7), 1963-1974.
33. Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Mekonnen, M. M., & Mathews, E. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the framework for a blue revolution. London: Earthscan.

34. Hoseini, M., Cocco, S., Casucci, C., Cardelli, V., & Corti, G. (2021). Coffee by-products derived resources. A review. *Biomass and Bioenergy*, *148*, 106009.
35. Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *22*(2), 138-147. doi:10.1007/s11367-016-1054-3
36. Ibáñez, G. R., Ruíz, J. M., Sánchez, M. R., & López, J. C. (2017). A corporate water footprint case study: The production of Gazpacho, a chilled vegetable soup. *Water resources and industry*, *17*, 34-42.
37. Instituto del Café de Costa Rica, ICAFE (2020). Informe Sobre la Actividad Cafetalera de Costa Rica. Heredia, Costa Rica
38. Instituto del Café de Costa Rica, ICAFE (2021). Informe Sobre la Actividad Cafetalera de Costa Rica. Heredia, Costa Rica
39. International Organization for Standardization. (2019). Water efficiency management systems — Requirements with guidance for use. ISO 46001:2019. Geneva: ISO.
40. INTE/ISO 14046:2015 (2015) Gestión ambiental. Huella de agua. Principios, requisitos y directrices
41. INTE/ISO 14044:2007/ENM 1:2018 (2018) Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.
42. Khan, M. N., & Mohammad, F. (2014). Eutrophication: challenges and solutions. *Eutrophication: Causes, Consequences and Control: Volume 2*, 1-15.
43. Karthik, M., Dhodapkar, R., Manekar, P., Aswale, P., & Nandy, T. (2011). Closing water loop in a paper mill section for water conservation and reuse. *Desalination*, *281*, 172-178.
44. Kim, F., Pablo, G. F., Lubertus, B., Lutz, A., Karin, W., Félix, H., ... & Johan, L. (2023). Effect-based evaluation of water quality in a system of indirect reuse of wastewater for drinking water production. *Water Research*, 120147.
45. Li, X., Zhu, L., Dong, Y., Chen, B., Li, Q., Wang, X., ... & Wang, L. (2022). Water footprint assessment of wool products with a low-water footprint baseline. *Sustainable Production and Consumption*, *34*, 310-317.
46. Lee, L. W., Cheong, M. W., Curran, P., Yu, B., & Liu, S. Q. (2015). Coffee fermentation and flavor—An intricate and delicate relationship. *Food chemistry*, *185*, 182-191.

47. Martínez-Arce, A., Chargoy, J. P., Puerto, M., Rojas, D., & Suppen, N. (2018). Water Footprint (ISO 14046) in Latin America, state of the art and recommendations for assessment and communication. *Environments*, 5(11), 114.
48. Madrigal-Solís, H., Fonseca-Sánchez, A., Núñez-Solís, C., & Gómez-Cruz, A. (2014). Amenaza de contaminación del agua subterránea en el sector norte del acuífero Barva, Heredia, Costa Rica. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(6), 103-118.
49. Mahlknecht, J., & González-Bravo, R. (2018). Measuring the water-energy-food nexus: The case of Latin America and the Caribbean region. *Energy Procedia*, 153, 169-173.
50. Majerník, M., Malindžáková, M., Naščáková, J., Bednárová, L., & Drábik, P. (2021). Future of sustainability and resources management. In *Sustainable Resource Management* (pp. 411-439). Elsevier.
51. Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and earth system sciences*, 15(5), 1577-1600.
52. Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2020). Sustainability of the blue water footprint of crops. *Advances in water resources*, 143, 103679.
53. Mohan, G., Chapagain, S. K., Fukushi, K., Papong, S., Sudarma, I. M., Rimba, A. B., & Osawa, T. (2021). An extended Input–Output framework for evaluating industrial sectors and provincial-level water consumption in Indonesia. *Water Resources and Industry*, 25, 100141.
54. Morelli, B., Hawkins, T. R., Niblick, B., Henderson, A. D., Golden, H. E., Compton, J. E., ... & Bare, J. C. (2018). Critical review of eutrophication models for life cycle assessment. *Environmental science & technology*, 52(17), 9562-9578.
55. Nautiyal, H., & Goel, V. (2021). Sustainability assessment: Metrics and methods. In *Methods in sustainability science* (pp. 27-46). Elsevier.
56. Newman, P. (2015). Planning issues and sustainable development. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (pp. 198-201). Elsevier Inc.
57. Nieuwlaat, R., Wiercioch, W., Brozek, J. L., Santesso, N., Kunkle, R., Alonso-Coello, P., ... & Schünemann, H. J. (2021). How to write a guideline: a proposal for a manuscript template that supports the creation of trustworthy guidelines. *Blood advances*, 5(22), 4721-4726.

58. Nika, C. E., Vasilaki, V., Renfrew, D., Danishvar, M., Echchelh, A., & Katsou, E. (2022). Assessing circularity of multi-sectoral systems under the Water-Energy-Food-Ecosystems (WEFE) nexus. *Water Research*, 221, 118842.
59. OECD. (2025). *The circular water economy in Latin America*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/a0508572-en>
60. Pérez-Osorio, G., Avelino-Flores, F., Hernández-Lorenzo, B., Gutiérrez-Arias, J. E. M., Mendoza-Hernández, J. C., & Chavarin-Pineda, Y. (2025). Evaluación del impacto de las aguas residuales del beneficio húmedo del café en Xicotepec, México. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 28(1).
61. Pfister, S., Koehler, A., Hellweg, S. 2009. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental science & technology*, 43(11), 4098-4104.
62. Pires, J. F., Viana, D. C., Braga Jr, R. A., Schwan, R. F., & Silva, C. F. (2021). Protocol to select efficient microorganisms to treat coffee wastewater. *Journal of Environmental Management*, 278, 111541.
63. PRé Sustainability. (2025). SimaPro. Recuperado de <https://simapro.com> el 11 de marzo de 2025.
64. Rebolledo-Leiva, R., Barros, M. V., Entrena-Barbero, E., Vásquez-Ibarra, L., Fernández, M., Feijoo, G., ... & González-García, S. (2024). Embedding Water-Energy-Food nexus and circularity assessment for organization benchmarking: A case study for dairy farms. *Waste Management*, 189, 410-420.
65. Richards, S., Rao, L., Connelly, S., Raj, A., Raveendran, L., Shirin, S., ... & Helliwell, R. (2021). Sustainable water resources through harvesting rainwater and the effectiveness of a low-cost water treatment. *Journal of Environmental Management*, 286, 112223.
66. Rivela, B., Kuczynski, B., & Sucozhañay, D. (2022). Life Cycle Sustainability Assessment-based tools. In *Assessing Progress Towards Sustainability* (pp. 93-118). Elsevier.
67. Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria, SEPSA (2021). Informe de Gestión del Sector Agropecuario, Pesquero y Rural Mayo 2020 – Abril 2021. Costa Rica
68. Seifudem, G., Berger, M., Schmied, H. M., & Boulay, A. M. (2025). The updated and improved method for water scarcity impact assessment in LCA, AWARE2. 0. *Journal of Industrial Ecology*.

69. Schindler, D. W. (2012). The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1746), 4322-4333.
70. Schreckinger, J., Mutz, M., & Mendoza-Lera, C. (2022). When water returns: Drying history shapes respiration and nutrients release of intermittent river sediment. *Science of The Total Environment*, 155950.
71. Stan, K. D., Sanchez-Azofeifa, A., & Ludwig, R. (2022). Sustainability of Costa Rica's water supply under climate change scenarios. *Environmental Science & Policy*, 136, 67-77.
72. Tan, S. S., & Kuebbing, S. E. (2023). A synthesis of the effect of regenerative agriculture on soil carbon sequestration in Southeast Asian croplands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 349, 108450.
73. Toniolo, S., Tosato, R. C., Gambaro, F., & Ren, J. (2020). Life cycle thinking tools: Life cycle assessment, life cycle costing and social life cycle assessment. In *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making* (pp. 39-56). Elsevier.
74. UNESCO World Water Assessment Programme. (2020). World Water Development Report 2020 – Water and Climate Change, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 7, Place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France.
75. Usva, K., Sinkko, T., Silvenius, F., Riipi, I., & Heusala, H. (2020). Carbon and water footprint of coffee consumed in Finland—life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(10), 1976-1990.
76. Vargas, G., & Mazón, B. (2004). Método para la determinación de humedad en cáscara de café. *Revista de Tecnología de Alimentos (REVITECA)*.
77. Vinante, C., Sacco, P., Orzes, G., & Borgianni, Y. (2020). Circular Economy Metrics: Literature Review and Company-Level Classification Framework. *Journal of Cleaner Production*, 125090.
78. Water Footprint Network. (09 de 01 de 2022). Frequently asked questions. Obtenido de Water Footprint Network: <https://waterfootprint.org/en/water-footprint/frequently-asked-questions/#CP8>
79. Walsh, B. P., Murray, S. N., & O'Sullivan, D. T. J. (2015). The water energy nexus, an ISO50001 water case study and the need for a water value system. *Water Resources and Industry*, 10, 15-28.
80. World Business Council for Sustainable Development, E. C. (2002). The Business case for sustainable development: Making a difference towards the Earth summit 2002 and beyond. *Corporate Environmental Strategy*, 9(3), 226-235.

81. World Business Council for Sustainable Development (2021). Water Circularity Metric: Tool application and guidance. Maison de la Paix Chemin Eugène-Rigot 2B CP 2075, 1211 Geneva 1, Switzerland
82. WULCA. (2024). *AWARE: Available WAter REmaining*. Water Use in Life Cycle Assessment. Recuperado el 12 de agosto de 2025, de <https://wulca-waterlca.org/aware/>
83. WWF. 2018. Informe Planeta Vivo - 2018: Apuntando más alto. Grooten, M. y Almond, R.E.A.(Eds). WWF, Gland, Suiza.

Anexo A. Guía práctica para el cálculo de huella hídrica e indicadores de circularidad en beneficios de café

1. Introducción

El proceso de beneficiado del café utiliza grandes volúmenes de agua y genera aguas residuales con alto potencial contaminante (Chapagain & Hoekstra, 2007), lo que representa un reto para la sostenibilidad hídrica del sector cafetalero costarricense en un contexto de creciente estrés por cambios climáticos y patrones de uso de suelo (UNESCO WWAP, 2020).

Esta guía tiene como objetivo brindar una herramienta práctica y sencilla para que los beneficios de café puedan evaluar su huella hídrica según la norma INTE/ISO 14046:2015 (INTE/ISO 14046, 2015) y aplicar métricas de circularidad del agua con la *Water Circularity Metric* (WCM) del Consejo Mundial de Empresas para el Desarrollo Sostenible (WBCSD) (World Business Council for Sustainable Development, 2021).

Ambas herramientas permiten conocer cuánto se consume, cómo se reutiliza y qué puntos críticos mejorar en el uso del agua, facilitando la identificación de oportunidades de optimización y reducción de impactos ambientales y operativos (Martínez-Arce et al., 2018; Vinante et al., 2020).

La guía está dirigida a profesionales técnicos, encargados de producción y gerencias de beneficios de café que buscan incorporar criterios de sostenibilidad sin requerir equipos de alta tecnología ni conocimientos técnicos avanzados. A través de ejemplos concretos y pasos claros, se adapta a la realidad operativa de plantas medianas y pequeñas en Costa Rica.

2. Requisitos previos

Para aplicar esta guía de manera efectiva, es necesario contar con los siguientes elementos mínimos de infraestructura y equipamiento:

2.1. Medición de caudales

Se requiere instalar caudalímetros volumétricos calibrados en la entrada de agua al beneficio y, de ser posible, en la salida de efluentes, se puede utilizar tecnologías como ultrasónicos, Coriolis u otras adecuadas para agua líquida. Esto garantiza datos primarios

de consumo con la precisión requerida por la norma INTE/ISO 14046:2015 (INTE/ISO 14046, 2015).

Además, se requiere medir los caudales de recirculación en caso de que se tenga algún circuito de recirculación de agua, esto se puede hacer con un caudalímetro (recomendado) o con un experimento donde se mida el tiempo que le toma a la bomba de recirculación llenar o vaciar un volumen conocido. Si se sigue este último procedimiento también se debe medir cuanto tiempo pasa la bomba encendida por lote y la cantidad de café en un lote, de modo que se pueda calcular el volumen total de agua recirculada por tonelada de café procesado. La Tabla A1, puede servir de plantilla para recolectar y calcular los datos requeridos.

Tabla A1. Cálculo del agua recirculada por ton de grano oro en un beneficio.

Variable	Cantidad	Unidad
Volumen conocido		m ³
Tiempo de vaciado o llenado		s
Caudal de la bomba de recirculación		m ³ /h
Cantidad de café fruta procesado		Ton
Cantidad de oro grano producido		Ton
Tiempo en que la bomba estuvo encendida		h
Volumen de agua recirculada en el tiempo en que la bomba estuvo encendida		m ³
Litros de agua recirculada/ton de grano oro		L/ton de grano oro

2.2. Puntos de muestreo de calidad de agua

Acceso a muestras representativas de agua de proceso y aguas residuales, con posibilidad de coordinación con un laboratorio acreditado (por ejemplo, CICA UCR) que realice los análisis exigidos por el Reglamento para la Calidad del Agua Potable y el Reglamento de Vertido (Decreto N° 41499-S REFORMA Y ADICIÓN AL DECRETO EJECUTIVO No.38924-S) y Reuso de Aguas Residuales (Decreto 33601- MINAE-S).

2.3. Registro y control de datos

Hojas de campo o planillas electrónicas para anotar volúmenes, fechas y parámetros analíticos, asegurando integridad y reproducibilidad.

2.4. Equipo técnico básico

Un responsable de operaciones con conocimientos del proceso de beneficiado y personal para la toma de muestras y registro de datos.

2.5. Herramientas de análisis

Si se desea realizar un análisis totalmente personalizado y se cuenta con los recursos necesarios en términos económicos y de personal capacitado o consultores, se recomienda el uso de un software de Análisis de Ciclo de Vida como SimaPro, Open LCA u otros junto con la base de datos Ecoinvent v3.11 (Ecoinvent, 2024) y el método ReCiPe 2016 (Huijbregts et al., 2017).

En caso que no se cuente con los recursos mencionados anteriormente se pueden realizar plantillas en hoja de cálculo (Excel, Google Sheets, LibreOffice Calc, etc.) para calcular el WCP, el FEP y los indicadores de circularidad, siguiendo los procedimientos indicados en esta guía.

3. Evaluación de la Huella Hídrica (INTE/ISO 14046)

La huella hídrica es una herramienta que permite cuantificar el consumo de agua y su impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de un producto, proceso o servicio (Hoekstra et al., 2011). En el contexto del beneficiado de café, su aplicación permite identificar los puntos críticos de consumo y contaminación de agua, generar datos para mejorar la eficiencia, cumplir con regulaciones y avanzar en sostenibilidad. La norma INTE/ISO

14046:2015 proporciona un marco estandarizado para este cálculo (INTE/ISO 14046, 2015).

En Costa Rica, el beneficiado representa una fracción pequeña de la huella hídrica total del café, pero utiliza agua azul, es decir, extraída directamente de fuentes como pozos o ríos, lo que le otorga gran relevancia en zonas con presión sobre el recurso.

Pasos para la evaluación de la huella hídrica

Paso 1: Definir el objetivo y el alcance del estudio

Antes de iniciar con la recopilación de datos o cálculos, la norma INTE/ISO 14046 establece que se debe definir con claridad el objetivo y el alcance del estudio, lo que garantiza la coherencia y utilidad de los resultados.

Estos son los elementos que deben establecerse:

a) Objetivo del estudio

Especifica el propósito del análisis, por ejemplo:

“Evaluar el impacto ambiental relacionado con el uso del agua en el proceso de beneficiado de café, con el fin de identificar oportunidades de mejora y avanzar hacia una gestión más eficiente y circular del recurso hídrico”.

También se puede vincular con planes institucionales, como fue el caso del ICAFE, donde se integró a su estrategia de sostenibilidad y a iniciativas como el programa NAMA Café.

b) Aplicaciones previstas

Debe indicarse cómo se espera utilizar los resultados. Ejemplos:

- Para mejorar la gestión interna del recurso hídrico.
- Como base para decisiones técnicas o estratégicas.
- Para compartir con actores del sector o cumplir requisitos institucionales

c) Público meta

Indica a quién está dirigido el estudio: técnicos, gerencias, entes reguladores, clientes u otras partes interesadas. En esta guía, se prioriza a responsables de producción y gestión ambiental de beneficios de café.

d) Tipo de evaluación

Se debe aclarar si es un estudio independiente o parte de un análisis más amplio (como un Análisis de Ciclo de Vida completo). Para beneficios de café, se recomienda hacerlo como un estudio específico de huella hídrica, sin comparaciones con otros productos o procesos, para garantizar validez y claridad en los resultados.

e) Unidad funcional

La unidad funcional es el parámetro de referencia al que se expresan todos los flujos de entrada, salida e impactos. Debe ser coherente con la finalidad del estudio.

En beneficios de café, una unidad funcional adecuada es:

- 1 tonelada de grano oro producida

Esto permite estandarizar los resultados, facilitar la comparación entre partidas y analizar consumos e impactos por cada unidad de producción.

f) Límites del sistema

Los límites del sistema definen hasta dónde se considera el proceso evaluado. Incluye qué etapas, equipos o flujos se integran al análisis.

En el caso del ICAFE, se definió que el sistema es el observado en las Figura A1 y A2 y tiene las siguientes características:

- Inicia en la recepción del café fruta.
- Finaliza en el pelado de la cascarilla del grano.
- Incluye dos líneas: el micro beneficio y el macro beneficio, con igual secuencia de operaciones, pero diferentes escalas y niveles de recirculación.
- No considera etapas posteriores como el secado solar ni el almacenamiento en bodega.

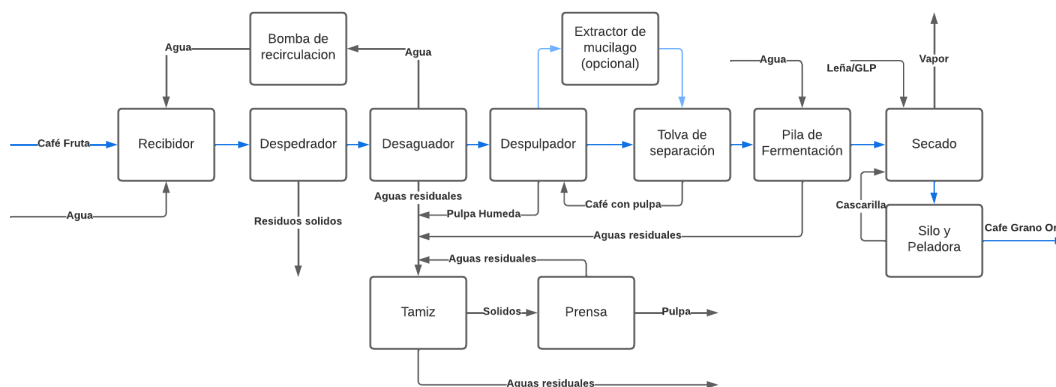


Figura A1. Diagrama de flujo del Macro beneficio en el ICAFE (Elaboración propia)

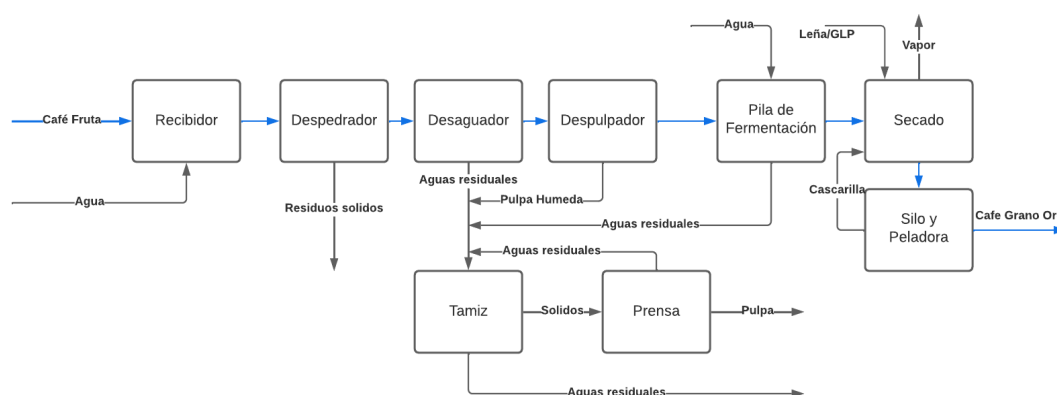


Figura A2. Diagrama de flujo del Micro beneficio en el ICAFE (Elaboración propia)

Además, se aclara que ciertos insumos como productos de limpieza o lubricantes se excluyen del análisis por su bajo volumen y porque no hay datos registrados de forma sistemática.

g) Dimensión temporal y geográfica

Debe indicarse claramente el periodo del año durante el cual se recopilan los datos, así como la ubicación geográfica del beneficio.

En el caso del ICAFE:

Periodo de estudio: noviembre y diciembre de 2022, durante la época de cosecha y procesamiento del café.

Ubicación: San Pedro de Barva, provincia de Heredia, dentro de la cuenca del río Tárcoles. Esta región se abastece del acuífero de Barva, una de las principales fuentes de agua para el Gran Área Metropolitana (Castro Peinador et al., 2011).

h) Categorías de impacto a evaluar

Una categoría de impacto es un tipo específico de efecto ambiental que se desea medir en un estudio de huella hídrica. Representa una consecuencia del uso del agua sobre el ambiente o los ecosistemas. Seleccionar categorías de impacto permite enfocarse en los efectos más relevantes del proceso evaluado sobre el recurso hídrico. En el contexto de la norma INTE/ISO 14046:2015, para un beneficio de café, en esta guía se recomiendan:

- **Potencial de consumo de agua y su relación con el impacto por escasez (WCP + AWARE):** El Potencial de Consumo de Agua (Water Consumption Potential, WCP), expresado en metros cúbicos (m^3), mide cuánta agua se extrae y no regresa al ecosistema (por ejemplo, por evaporación o incorporación al producto). Este valor se utiliza como base para calcular el impacto de escasez de agua mediante el método AWARE (Available WATER REmaining), que aplica factores de caracterización regionalizados según la disponibilidad y la demanda de agua en la cuenca de estudio. El resultado se expresa en metros cúbicos equivalentes de agua escasa (m^3 world-eq), lo que permite evaluar la presión hídrica generada por el consumo de agua (Hoekstra & Chapagain, 2007; Boulay et al., 2018).
- **Potencial de Eutrofización del Agua Dulce (FEP):** estima el efecto de nutrientes (como nitrógeno y fósforo) en la contaminación de cuerpos de agua dulce. Su unidad es kilogramos de fósforo equivalente (kg P-eq) y se relaciona con la aparición de algas, pérdida de oxígeno y daño a la biodiversidad (Breitburg et al., 2018).

i) Reglas de asignación

Cuando se procesan diferentes tipos de partidas de café, se deben asignar proporcionalmente los consumos e impactos según un criterio objetivo. En el caso ICAFE se utilizó la proporción másica del café fruta procesado por cada partida.

Por ejemplo, si una partida representa el 20 % del total procesado, se le asigna ese mismo porcentaje de los consumos de agua, energía e insumos. Además, en el caso de ICAFE

se distingue entre el macrobeneficio y el microbeneficio para asignar los datos según la línea de proceso utilizada.

j) Criterios de corte

Se deben indicar los elementos del sistema que se excluyen del estudio y la justificación para hacerlo. En ejemplo del ICAFE, se excluyeron insumos como:

Productos de limpieza (desinfectantes)

Materiales de mantenimiento (lubricantes)

La exclusión se justifica porque representan consumos muy pequeños y no se lleva un registro preciso de su uso. Esto cumple con los principios de relevancia y representatividad establecidos en la norma INTE/ISO 14046.

k) Datos de inventario

Esta sección tiene como objetivo identificar los tipos de datos que deben ser recolectados para realizar una evaluación de huella hídrica según la norma INTE/ISO 14046:2015. Aquí no se presentan resultados, sino que se describe qué información se debe recopilar, cómo se clasifica y qué medios se pueden usar para obtenerla.

El detalle y análisis de estos datos se debe realizar más adelante, en la sección correspondiente al análisis de inventario.

Es importante clasificar los datos según su origen:

- Datos primarios: Aquellos recolectados directamente en el beneficio por medio de mediciones, registros propios o pruebas de laboratorio. Deben ser la base del inventario siempre que sea posible.
- Datos secundarios: Son datos que no fueron medidos directamente, sino estimados a partir de promedios, factores publicados o literatura especializada. Se utilizan como complemento cuando no es posible obtener datos primarios confiables.

Esta clasificación y documentación de los datos es esencial para garantizar la transparencia, trazabilidad y credibilidad del estudio. En la sección de análisis de inventario, se detallará cómo se utilizaron estos datos y los resultados obtenidos.

Ejemplo de recopilación de datos del ICAFE:

La información sobre consumo de agua, energía, suministros y combustibles se recopiló con base en datos de noviembre y diciembre de 2022. Los datos fueron obtenidos mediante mediciones realizadas por el ICAFE y el CICA, así como por el responsable del estudio, a través de visitas, entrevistas y comunicación directa. Se consideran datos primarios aquellos recolectados directamente por estas fuentes, y datos secundarios los estimados a partir de los primarios o tomados de literatura técnica especializada.

I) Supuestos

En toda evaluación de huella hídrica, es común que haya aspectos del sistema que no puedan medirse directamente o para los cuales no se disponga de información completa. En estos casos, es válido utilizar supuestos técnicos razonables, siempre que estén claramente justificados, documentados y se basen en fuentes confiables o en el conocimiento del proceso.

Esta sección debe enumerar todos los supuestos aplicados en el estudio, especificando su origen, su relevancia dentro del inventario, y el grado de incertidumbre que podrían introducir en los resultados. Es importante evitar supuestos arbitrarios o sin fundamento.

Los supuestos son necesarios cuando:

- No es posible medir un dato directamente (por ejemplo, el volumen de agua infiltrada).
- Se deben completar flujos faltantes en el balance de masa.
- Se estiman condiciones de operación no registradas.
- Se extrapolan valores a partir de literatura o de experiencias anteriores.

Características de un buen supuesto:

- Ser coherente con las condiciones reales del beneficio.
- Estar fundamentado en literatura técnica, guías previas o experiencia del personal.
- Estar documentado en el informe, indicando cómo se calculó o de dónde se tomó.
- Ser transparente, de modo que pueda ser revisado o ajustado en futuros estudios.

Estos son ejemplos que pueden servir de guía para otros beneficios, basados en situaciones reales documentadas en el estudio del ICAFE:

- Contenido de agua en la pulpa y mucílago: Se puede asumir que el 100 % del agua contenida en estos subproductos es liberada al sistema como parte del agua residual.
- Volumen de agua residual generado: Si no se mide directamente, puede estimarse a partir de un balance de masa, restando el agua retenida en el producto final y en los subproductos.
- Tasa de evaporación en el proceso: Puede estimarse como una fracción del agua utilizada, si no se mide directamente.
- Distribución del consumo de agua entre líneas o etapas del proceso: Si no hay medición específica por línea (en caso de tener varias líneas de producción), puede asignarse proporcionalmente con base en la cantidad de café procesado.
- La composición del grano del café y la composición de la pulpa son las observadas en las Tablas A2 y A3.

Tabla A2. Composición del grano de café (Vargas & Mazón, 2004)

Componente	Porcentaje de un grano de fruta (%)
Pulpa	41.6
Mucilago	15.6
Pergamino	4.3
Grano Oro (12% de humedad)	18.6
Agua libre	19.9

Tabla A3. Composición de la pulpa del café (Gómez Mora, 2019)

Componente	Porcentaje de la pulpa (%)
Pulpa seca	20%
Agua	80%

m) Análisis de calidad de datos

Una vez recopilado el inventario, es necesario evaluar la calidad de los datos utilizados para garantizar la confiabilidad del estudio de huella hídrica. Esta evaluación ayuda a

identificar posibles fuentes de incertidumbre, priorizar mejoras en futuras mediciones y dar transparencia a los resultados reportados.

Este análisis no busca calificar la validez del estudio, sino más bien reforzar la interpretación de resultados, reconociendo las fortalezas y limitaciones de los datos disponibles.

Se recomienda analizar la calidad de los datos considerando los siguientes aspectos:

- Precisión o exactitud
- Representatividad temporal
- Representatividad geográfica
- Consistencia metodológica
- Fuente de los datos

En el estudio del ICAFE, se identificó que los datos de consumo de agua y energía tenían alta calidad, mientras que los volúmenes de efluente debieron ser estimados por balance, lo cual reduce su precisión relativa.

Paso 2: Recopilación de datos

Una vez definido el objetivo y alcance del estudio, el siguiente paso es la recopilación de datos, es decir, recolectar toda la información necesaria para caracterizar el sistema en función de sus entradas, salidas y procesos relevantes. Estos datos servirán para construir el inventario y luego calcular los impactos asociados al uso del recurso hídrico.

La norma INTE/ISO 14046 recomienda utilizar datos primarios siempre que sea posible. Para un beneficio de café, estos son los principales grupos de datos a recolectar:

- Datos de consumo de agua
 - Volumen total de agua utilizada durante el periodo definido.
 - Consumo de agua por línea de proceso (si aplica).
 - Registro de recirculación o reutilización, si se practica.
- Datos de materia prima
 - Cantidad de café fruta procesado por lote o partida.
 - Composición estimada de los subproductos (mucílago, pulpa, cascarilla, vapor de agua, etc.).
- Datos energéticos

- Consumo de electricidad, GLP, leña, cascarilla u otras fuentes energéticas.
- Registrar si son consumos medidos, facturados o estimados.
- Calidad del agua
 - Análisis del agua a la entrada (pozo o acueducto) y a la salida (efluentes).
 - Parámetros mínimos recomendados: Los establecidos en análisis exigidos por el Reglamento para la Calidad del Agua Potable y el Reglamento de Vertido (Decreto N° 41499-S REFORMA Y ADICIÓN AL DECRETO EJECUTIVO No.38924-S) y el Reglamento de Reúso de Aguas Residuales (Decreto 33601- MINAE-S)
- Condiciones operativas
 - Días de operación durante el periodo de estudio.
 - Turnos y horarios de trabajo (si aplica).
 - Cambios relevantes en el proceso que afecten el consumo de agua.

Se pueden utilizar los siguientes métodos de recolección, según las capacidades del beneficio:

- Mediciones directas con caudalímetros, medidores eléctricos o balanzas.
- Registros de planta (facturas, cuadernos de control, hojas de turno).
- Entrevistas al personal técnico para aclarar procedimientos o estimaciones.
- Muestreos y análisis de laboratorio para evaluar la calidad del agua (interno o externo).

Consejo práctico: Si no se dispone de medición directa del agua residual, se puede estimar mediante un balance de masa utilizando la cantidad de café fruta procesado y la composición aproximada de sus subproductos.

Recomendaciones para asegurar calidad

- Verificar que las unidades sean consistentes (por ejemplo, m³ para agua, kWh para electricidad, kg o toneladas para café).
- Registrar la fecha y fuente de cada dato (medición, factura, estimación).
- Usar formularios o hojas de campo para estandarizar la toma de datos.

Para el estudio de caso del ICAFE, los datos fueron recopilados por medio de registros operativos, mediciones internas y análisis del CICA-UCR. Se priorizó la medición directa,

pero también se estimaron ciertos valores como el volumen de efluente, aplicando balances de masa.

En las Tablas A4, A5, A6, A7, A8, A9 y A10 el usuario encontrara plantillas para recolección de datos. Agregue más líneas o columnas según su necesidad.

Tabla A4. Consumo de café fruta en el periodo de estudio en distintas unidades de masa y volumen

Proceso	Partida	Doble Hecto Litros (DHL)	Fane gas	Fruta (kg)	Ton	Porcentaje de producción (%)
<i>Proceso 1</i>	<i>Partida 1</i>					
<i>Proceso 2</i>	<i>Partida 2</i>					

Tabla A5. Consumos de electricidad, leña, cascarilla, y GLP, en el periodo de estudio

Mes	Electricidad (kWh)	Leña (m ³) *	Cascarilla (kg)	Gas Licuado de Petroleo (L)
<i>Mes de estudio 1</i>				
<i>Mes de estudio 2</i>				
<i>Total</i>				

* Densidad de la leña aproximada: 578 kg/ m³ (Farfán & Redon, 2014)

Tabla A6. Consumo de agua por medidor, en el periodo de estudio (ajuste según su número de medidores y periodo de estudio)

Agua de proceso	Medidor 1	Medidor 2
<i>Mes de estudio 1</i>		
<i>Mes de estudio 2</i>		
<i>Total</i>		

Tabla A7. Consumo directo de agua por proceso, en el periodo de estudio (ajuste al número de líneas de proceso de su beneficio)

	Macro beneficio	Micro beneficio	Total
Total (L)			

Tabla A8. Consumo directo de agua por tipo de partida (ajuste al número de partidas de su beneficio)

Partida	Consumo de agua (L)
<i>Partida 1</i>	
<i>Partida 2</i>	
<i>Total</i>	

Tabla A9. Resultados de los análisis de calidad de agua en la entrada (agua de pozo)

Análisis	Unidad	Resultado	Valor Alerta*	Valor Máximo Admisible*
Color	CU (U-Pt-Co)		< 5	15
Conductividad	μS/cm		400	---
Olor	----		Aceptable	Aceptable
pH	pH		6	8
Temperatura	°C		18	30
Turbiedad	UNT		1	5
Coliformes fecales	UFC/100ml		No detectable	No detectable
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100ml		No detectable	No detectable

* Decreto N° 41499-S REFORMA Y ADICIÓN AL DECRETO EJECUTIVO No.38924-S DEL 12 DE ENERO DEL 2015 “REGLAMENTO PARA LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE”, publicado en el Alcance No.15 a La Gaceta No.15 del 22 de enero del 2019. Para los parámetros de pH, temperatura, cloro residual libre y cloro residual combinado, los valores de VA y VMA establecen un ámbito permisible

Tabla A10. Resultados de los análisis de calidad de en la salida del proceso (agua residual)

Análisis	Unidad	Resultado	Valor Máximo*
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5,20})	mg/L O ₂		50
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂		150
Fósforo Total	mg/L P		---
Grasas y Aceites	mg/L		30
Nitrógeno Total	mg/L N		50
pH	pH		5 a 9
Sólidos Sedimentables (S. Sed.)	mL/L		1
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L		50
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/l		5
Temperatura	°C		15 a 40

*Decreto 33601- MINAE-S Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, publicado en el Alcance No. 8 a La Gaceta No. 55 del 19 de marzo del 2007. Valores máximos según código CIIUU 1079 aplicable a un beneficio de café.

Paso 3. Análisis del inventario

Una vez recopilados y clasificados los datos, se debe realizar el análisis del inventario de la huella hídrica, es decir, organizar toda la información en función de la unidad funcional y los límites del sistema definidos previamente.

El objetivo de este paso es construir un modelo coherente que describa el funcionamiento del sistema, identificando y cuantificando todas las entradas y salidas relevantes al uso del recurso hídrico.

El análisis debe incluir un diagrama o explicación con los siguientes datos:

- Listado completo de entradas y salidas
 - Todas las entradas al sistema: agua, energía, café fruta, insumos auxiliares.
 - Todas las salidas: grano oro, subproductos, agua residual, emisiones (por ejemplo, vapor de agua).
- La Figura A3 muestra un ejemplo de diagrama para un beneficio de café estándar, ajuste según sea necesario.

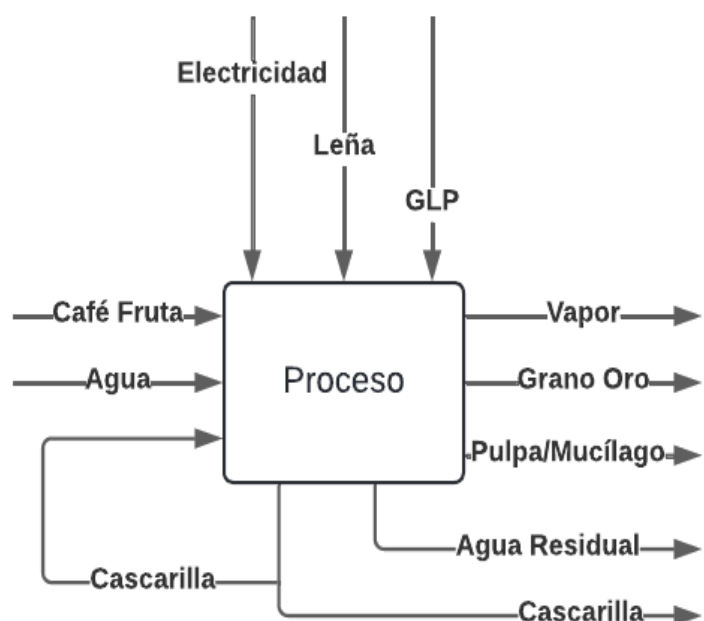


Figura A3. Entradas y salidas del proceso de beneficiado de café (Elaboración propia)

Métodos de cálculo y presentación de resultados

En cuanto a la presentación de resultados se debe realizar lo siguiente:

- Asignación de flujos a la unidad funcional
- Todos los datos deben ser expresados por unidad funcional (ej. por tonelada de grano oro).
- Si el beneficio procesa múltiples partidas, se recomienda asignar proporcionalmente los consumos según la masa de café fruta procesado por cada lote.
- Organización por líneas o etapas de proceso

- Si el beneficio cuenta con líneas diferenciadas (como macro y micro beneficio), se debe separar el inventario para cada una.
- Esto permite comparar eficiencia entre procesos y visualizar oportunidades de mejora.

Para facilitar los cálculos se recomienda iniciar esta etapa desglosando la composición del café usando los porcentajes expuestos en las Tablas A2 y A3 en la sección de supuestos y crear una Tabla de referencia por partida (si aplica) como la Tabla A11.

Tabla A11. Composición del café

Partida	Pulpa (kg)	Agua en la pulp a (kg)	Muci lago (kg)	Café en pergamín o húmedo (kg)	Pergami no seco (cascari lla)(kg)	Agua evapora da (kg)	Gran o oro (kg)	Humeda d final de grano oro (%m/m)
<i>Partida</i>								
<i>1</i>								
<i>Partida</i>								
<i>2</i>								
<i>Total</i>								

Aunque siempre será preferible medir los flujos de salidas como agua residual o vapor de agua, se pueden estimar aplicando un balance de masa, utilizando:

- La cantidad de agua ingresada.
- El contenido de humedad del café, la pulpa y otros subproductos.
- Estimación de pérdidas por evaporación u otros mecanismos.
- Si algunos consumos no están diferenciados por línea (por ejemplo, agua común para todo el proceso), se pueden asignar según el peso de la producción o mediante estimaciones basadas en experiencia del personal técnico.

Se recomienda organizar el inventario en forma de tabla, desglosando cada flujo de entrada y salida, la unidad utilizada, y su valor relativo por tonelada de grano oro. Esto facilita la trazabilidad y la interpretación. En las Tablas A12 y A13 el usuario encontrará plantillas para la presentación de resultados.

Tabla A12. Entradas de consumos por tonelada de Café grano oro

Partida	Leña m ³ /ton grano oro	Electricidad d kWh/ton grano oro	Cascarilla kg/ton grano oro	GLP kg/ton grano oro	Agua de pozo L/ton grano oro	Café Fruta kg/ton grano oro
<i>Partida 1</i>						
<i>Partida 2</i>						
<i>Total</i>						

Tabla A13. Salidas de residuos y subproductos por tonelada de Café Grano Oro

Partida	Pulpa seca y mucilago kg/ton grano oro	Vapor kg/ton grano oro	Agua residual L/ton grano oro	Cascarilla kg/ton grano oro
<i>Partida 1</i>				
<i>Partida 2</i>				
<i>Total</i>				

Recomendaciones

- Verificar la coherencia entre entradas y salidas (por ejemplo, si hay más agua entrando que saliendo, justificar la diferencia).
- Revisar que no haya flujos duplicados o faltantes.
- Asegurarse de usar las mismas unidades a lo largo de todo el inventario.
- Este análisis es la base para el cálculo de los impactos ambientales que se realiza en el siguiente paso.

En el caso del ICAFE, los flujos fueron organizados en Tablas separados para el macro y el micro beneficio, y los consumos comunes (como energía eléctrica) fueron distribuidos proporcionalmente según la producción de cada línea, usando las plantillas presentadas anteriormente.

Paso 4. Evaluación de impactos

Una vez organizado el inventario, se procede a calcular los impactos ambientales relacionados con el uso del recurso hídrico. Esto permite cuantificar los efectos del proceso de beneficiado en categorías como el consumo de agua y la contaminación de cuerpos de agua dulce, y así priorizar acciones para mejorar la sostenibilidad hídrica del beneficio.

Selección de categorías de impacto

La norma INTE/ISO 14046:2015 permite seleccionar diferentes categorías, pero para los beneficios de café se recomiendan las siguientes dos, por su relevancia directa:

- Impacto por escasez y su relación con el Potencial de consumo de agua (WCP + AWARE): Expresado inicialmente en metros cúbicos de agua consumida (m³), el Potencial de Consumo de Agua (Water Consumption Potential, WCP) representa el volumen de agua que se extrae y no regresa al mismo sistema (por evaporación, incorporación al producto o dispersión). Este valor se multiplica por un factor de caracterización regionalizado del método AWARE (Available WAtER REmaining) para estimar el impacto de escasez de agua, expresado en metros cúbicos equivalentes de agua escasa (m³ world-eq). Este enfoque permite considerar tanto la cantidad de agua consumida como la vulnerabilidad hídrica de la cuenca donde ocurre el proceso (Boulay et al., 2018).
- Potencial de eutrofización del agua dulce (Freshwater Eutrophication Potential, FEP) Expresado en kilogramos de fósforo equivalente (kg P-eq). Estima el riesgo de sobre-enriquecimiento de nutrientes en cuerpos de agua dulce causado por compuestos como nitrógeno y fósforo.

Ambas categorías se pueden calcular utilizando herramientas de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), como el método ReCiPe 2016 (midpoint) y el método AWARE.

Determinación de impactos directos e indirectos

La evaluación debe diferenciar entre:

- Impactos directos: Aquellos causados por el consumo de agua y generación de residuos dentro del proceso del beneficio (por ejemplo, agua extraída del pozo o parámetros del agua residual generada).

- Impactos indirectos o “virtuales”: Asociados a los insumos utilizados en el proceso, como electricidad, GLP o leña, cuyo impacto hídrico ocurre fuera del beneficio, durante su extracción, producción o transporte.

Cálculo de los impactos de los insumos indirectos

Existen dos opciones recomendadas para calcular los impactos de los insumos indirectos:

- Opción A: Análisis de Ciclo de Vida completo con software especializado
 - Si el beneficio cuenta con apoyo técnico o acceso a un especialista en ACV, se puede utilizar un software como SimaPro con la base de datos Ecoinvent v3.11, empleando el método ReCiPe 2016 o superior, o el método AWARE para obtener los valores de CF, WCP y FEP por insumo. Esta opción permite personalizar el análisis y obtener resultados más robustos y trazables (Huijbregts et al., 2017; Ecoinvent, 2024; WULCA. (2024).
- Opción B: Uso de parámetros de referencia ya calculados
 - Si no se cuenta con acceso a software, se pueden utilizar valores unitarios predeterminados de WCP y FEP obtenidos del mismo método y base de datos. Estos valores han sido seleccionados y adaptados específicamente para el proceso de beneficiado de café, y se presentan en la Tabla A14, de esta guía.
 - Para calcular el impacto de escasez de agua asociado a los insumos indirectos, se emplean factores de caracterización (CF) del método AWARE. La selección de los CF debe considerar:
 - Ubicación geográfica de origen de cada flujo (entrada o salida).
 - Periodo de referencia, según la temporalidad de los datos disponibles.
 - Disponibilidad de datos regionales para electricidad, combustibles, agua de pozo, agua residual y vapor.
 - Los CF se obtienen de la Bases de datos descargables en <https://zenodo.org/records/16332127> (Seitfudem, et al., 2025).
 - Ejemplos en el estudio del ICAFE:

- Para el GLP, se utilizó el CF de Estados Unidos, considerando un periodo anual, debido a la importación de este insumo (ARESEP, 2025).
- Para la electricidad, se seleccionó el CF de Costa Rica, sin especificar cuenca, debido a la variabilidad en la generación eléctrica. Se empleó el periodo de noviembre y diciembre, correspondiente al registro de consumo.
- Para la leña, se utilizó el CF de Costa Rica con un periodo anual, dado que la especie de origen no fue identificada y su maduración ocurre a largo plazo.
- Para agua de pozo, agua residual y vapor, se emplearon los CF correspondientes a la cuenca con ID 49686, identificada mediante la base geoespacial del método AWARE, utilizando los datos de noviembre y diciembre, en concordancia con la temporalidad del estudio (Seitfudem et al., 2025).

Ambas opciones son válidas y pueden usarse según las capacidades del beneficio. Lo más importante es ser consistente en la aplicación y documentar claramente las fuentes utilizadas para facilitar la interpretación y posible auditoría del estudio.

Tabla A14. Agua consumida y fósforo equivalente por uso indirecto de la leña, GLP, electricidad, agua de pozo, vapor y agua residual.

Entrada o salida del proceso	Producto de referencia en base de datos	Nombre de referencia en la base de datos	Ubicación geográfica del valor de referencia	Cantidad	Unidad	Kilogramos de fósforo equivalente (kg P-eq./unidad)*	Metros cúbicos de agua (m ³ /unidad)**
GLP	Gas licuado de petróleo	Grupo de mercado de gas licuado de petróleo	GLO (global)	1	kilogramo	4.75E-05	1.90E-03
Electricidad	Electricidad media tensión	Mercado de electricidad media tensión	CR (Costa Rica)	1	kilovatio hora	7.87E-06	0.000129
Leña residual. seca	Madera residual. seca	Mercado de madera residual. seca	RoW (Resto del mundo)	1	metro cúbico	0.017397	1.547383
Agua de Pozo	Agua de grifo	Producción de agua de grifo. agua subterránea sin tratamiento	CO (Colombia)	1	kilogramo	2.60E-08	1.36E-06
Agua Residual y vapor	Agua residual y vapor	Agua residual y vapor	CR (Costa Rica)	1	kilogramo	3.59E-06	0.00026

*ReCiPe 2016 v1.03. midpoint (H) | eutrofización: agua dulce | potencial de eutrofización del agua dulce (FEP)

**ReCiPe 2016 v1.03. midpoint (H) | uso del agua | potencial de consumo de agua (WCP)

Análisis de resultados por categoría de impacto

Si en su beneficio se realiza un Análisis de Ciclo de Vida completo con un experto y software especializado, esta subsección no aplica, ya que el cálculo y la agregación de impactos se obtienen directamente desde el modelo.

En caso de optar por la estimación manual con factores unitarios, los valores de WCP y FEP por consumo indirecto deben calcularse multiplicando los datos de consumo (por ejemplo, kg de GLP, kWh, m³ de agua) por los factores unitarios incluidos en la Tabla A14 de esta guía.

Los valores de WCP directo se obtienen del análisis de inventario, específicamente a partir de la cantidad de agua consumida, disponible en la Tabla A12.

Para el cálculo del impacto por escasez de agua (método AWARE), se debe multiplicar el WCP de cada flujo por el factor de caracterización (CF) correspondiente a la cuenca o país de origen, expresado en m³ world-eq/m³ consumido.

Todos los resultados deben expresarse con base en la unidad funcional (por tonelada de grano oro). Para cada partida (si aplica), los impactos parciales en WCP, FEP y escasez de agua deben sumarse por separado para obtener el total correspondiente de cada categoría.

Una vez calculados, se recomienda presentar los resultados desagregados por partida y por categoría de insumo o salida. Esta presentación permite identificar con claridad qué factores generan mayor presión hídrica, tanto en términos de consumo absoluto (WCP) como de impacto relativo a la escasez (AWARE), o contaminación, y facilita la priorización de acciones de mejora. En las Tablas A15 , A16 y A17 se presentan plantillas para la presentación de estos resultados.

Tabla A15. Potencial de consumo de agua (WCP)

Partida	Metros cúbicos de agua (m ³ /ton de grano oro)						Potencial de consumo de agua (WCP)
	Consumo indirecto					Consumo directo	
	GLP	Electricidad	Agua residual * y vapor	Leña	Proceso de extracción de agua de pozo	Agua de pozo	
<i>Partida 1</i>							
<i>Partida 2</i>							
<i>Total</i>							

* Se asume una densidad del agua de 1 kg/L para el cálculo

Tabla A16. Potencial de eutrofización del agua dulce (FEP)

Partida	Kilogramos de fósforo equivalente (kg P-eq./ton de grano oro)					Potencial de eutrofización del agua dulce (FEP)	
	Consumo indirecto						Total
	GLP	Electricidad	Agua residual *	Leña	Proceso de extracción de agua de pozo		
<i>Partida 1</i>							
<i>Partida 2</i>							
<i>Total</i>							

* Se asume una densidad del agua de 1 kg/L para el cálculo

Tabla A17. Indicador de escasez (impacto de escasez de agua) calculado con el método AWARE.

Partida	Metros cúbicos de agua (m ³ world equiv./ton de grano oro)						Indicador de escasez
	Consumo indirecto				Consumo directo	Total	
	GLP	Electricidad	Agua residual * y vapor	Leña			
A							
B							
C							
D							
E							
F							
Totales							

Interpretación de los resultados de los impactos

El análisis de los impactos debe incluir una discusión crítica sobre los resultados obtenidos. Por ejemplo:

- El uso de leña reciclada o residual puede ser considerado parte de una estrategia de economía circular, lo cual permite discutir si su impacto debe atribuirse o no al proceso energético del beneficio.
- Las emisiones de vapor son difíciles de evitar, ya que provienen de la humedad natural del grano. Aunque técnicamente se podrían recuperar con intercambiadores de calor, esta solución implica costos operativos y nuevos insumos que también impactarían el WCP y el impacto por escasez (AWARE).
- Las diferencias entre procesos pueden deberse más al tamaño del lote que a la tecnología empleada, por lo que las medidas de mejora deben adaptarse a la escala operativa del beneficio.

Este análisis es clave para priorizar acciones, seleccionar tecnologías de mejora y comunicar los resultados de forma clara a partes interesadas.

Paso 5. Análisis de circularidad del agua (WCM)

En esta etapa se evalúa qué tan circular es el uso del agua en el beneficio de café, aplicando la herramienta Water Circularity Metric (WCM) del Consejo Mundial de Empresas para el Desarrollo Sostenible. El propósito es cuantificar la proporción de agua “reutilizada” o “reciclada” frente al agua “nueva” o lineal, y así orientar acciones de mejora.

La circularidad del agua mide la capacidad de un sistema para cerrar el ciclo del recurso, minimizando la extracción de agua fresca y maximizando la reutilización interna y la entrega de efluentes aptos para otros usos. Evaluar la circularidad permite reducir la demanda de agua extraída, disminuir la generación de efluentes no aprovechables y promover modelos de gestión más resilientes y sostenibles (World Business Council for Sustainable Development, 2021).

La WCM describe tres métricas principales. Primero, la circularidad en las fuentes, que representa la circularidad combinada de todas las fuentes de agua y se describe según la ecuación A1. Se estima la circularidad de cada fuente siguiendo el árbol de decisión de la Figura A4 y tomando en consideración el uso anterior de la fuente de agua, la disponibilidad y demanda (incluida la variabilidad), la gobernanza y la conectividad con las redes de aguas residuales/alcantarillado.

$$\% \text{ Circularidad en las fuentes} = \frac{Q_{tc}}{Q_t} * 100 \quad (A1)$$

Donde:

Q_{tc} : Suma de todas las aguas circulares extraídas

Q_t : Suma de todas las fuentes de agua circulares y lineales extraídas

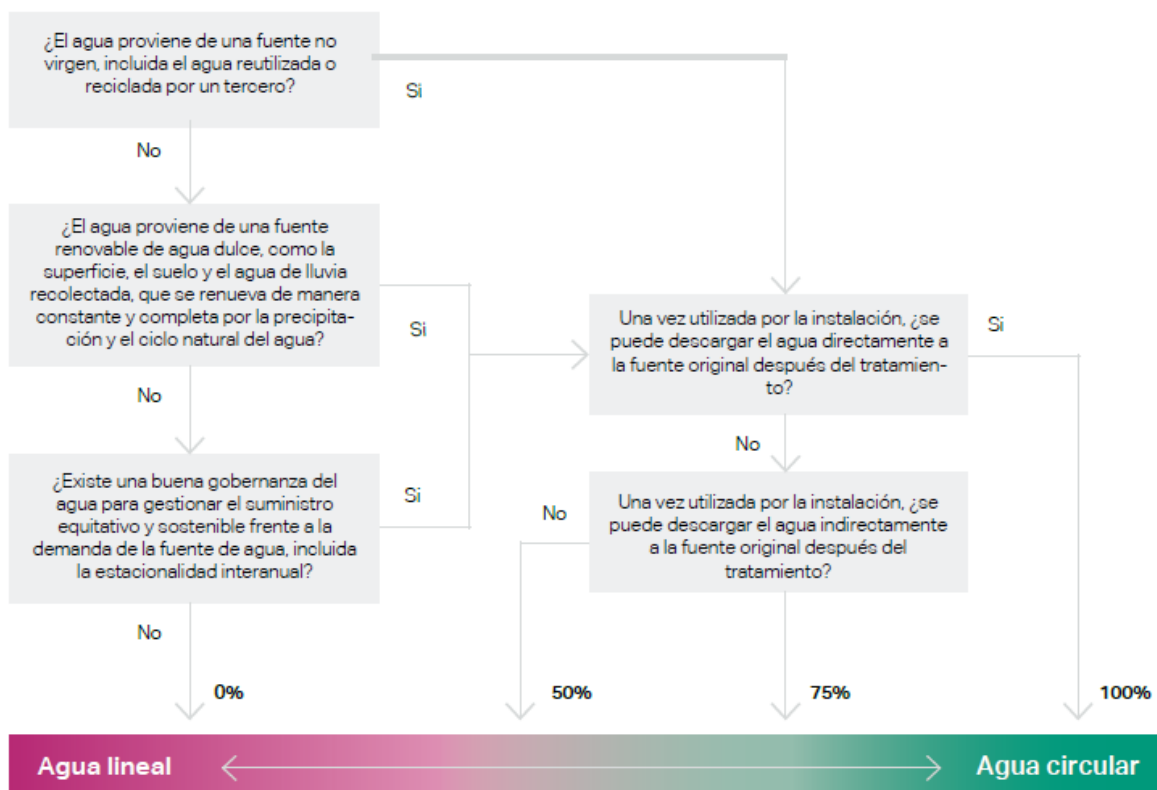


Figura A4. Árbol de decisión para evaluar circularidad de la fuente (World Business Council for Sustainable Development, 2021)

En segunda instancia, el indicador de circularidad en el proceso o sitio de estudio, permite conocer la cantidad de veces que se reutiliza la totalidad de agua en el proceso, se describe según la ecuación A2.

$$X = \frac{Qwu - Qt}{Qt} + 1 \quad (A2)$$

Donde:

Qwu : Suma de toda el agua de proceso necesaria (incluye el agua recirculada internamente)

Qt : Suma de todas las fuentes de aguas circulares y lineales extraídas

El tercer indicador es el de circularidad de los efluentes, para el cual se requiere conocer y estudiar los requisitos regulatorios que aplican a la calidad del agua residual generada en el sitio de estudio. Representa la circularidad combinada de todas las aguas vertidas y esta

descrito por la ecuación A3. Se estima la circularidad de cada vertido según los criterios de la Figura A5.

$$\% \text{ Circularidad de los efluentes} = \frac{Q_{wd}}{Q_t} * 100 \quad (A3)$$

Donde:

Q_{wd} : Suma de todas las aguas circulares vertidas

Q_t : Suma de todas las fuentes de agua circulares y lineales extraídas

CARACTERÍSTICAS DEL RETORNO CIRCULAR	SEGÚN LA INFORMACIÓN DISPONIBLE	CARACTERÍSTICAS DE RETORNO LINEAL
<ul style="list-style-type: none"> El agua está siendo reciclada (fuera del sitio) por otros sitios para un uso beneficioso tales como, para fines agrícolas, municipales o industriales 	<p style="text-align: center;">← →</p> <p style="text-align: center;">Reciclar (fuera del sitio) / aumentar la duración del ciclo del agua gestionada por humanos dentro de la cuenca</p>	<ul style="list-style-type: none"> El agua que sale del depósito como producto transportado o se pierde dentro del proceso (evaporación, contenida en productos de desecho (es decir, lodos, etc.)
<ul style="list-style-type: none"> El agua descargada se devuelve a la misma cuenca hidrográfica local con una calidad adecuada (incluyendo los requisitos jurídicos) que la hace fácilmente disponible para fines ambientales, sociales, agrícolas o industriales. 	<p style="text-align: center;">← →</p> <p style="text-align: center;">Retorno / reposición al sistema natural / cuenca local</p>	<ul style="list-style-type: none"> El agua se vierte con una calidad inadecuada a las masas de agua superficiales o subterráneas: el agua no está fácilmente disponible con una calidad de agua adecuada para otras demandas / usos del agua (por ejemplo, difícil de tratar) y / o, por lo tanto, tiene un impacto negativo en el medio ambiente y la sociedad. El agua se descarga en un acuífero
<ul style="list-style-type: none"> Agua producida que permanece dentro de la cuenca local al ser devuelta (suministro local de agua potable u otros productos que contienen agua que se devuelve conscientemente a la cuenca local (por ejemplo, a través del tratamiento de aguas residuales)) 	<p style="text-align: center;">← →</p> <p style="text-align: center;">Reciclar (no controlado por el sitio / retorno / reponer al sistema natural</p>	<ul style="list-style-type: none"> Agua que se descarga en el mar. El sitio se encuentra al final de una cuenca de agua (por ejemplo, cerca del mar, con solo receptores de agua salobre o de mar en las inmediaciones del sitio) y no se podría agregar ningún valor adicional, mediante el uso en otro proceso, sitio o dentro del medio ambiente (por ejemplo, recarga de acuíferos contra la intrusión de agua salada; uso de humedales, etc.). Puede ser sostenible hacerlo, pero es un flujo lineal.

Figura A5. Criterios de decisión para evaluar circularidad del efluente (World Business Council for Sustainable Development, 2021)

Para calcular cada indicador, se requiere:

- Volumen total de agua extraído (agua “nueva” más agua “reciclada”):
 - Suma de toda el agua que entra al beneficio, tanto la aportada por fuentes externas (pozo, acueducto) como la recuperada de procesos internos o externos.
- Volumen de agua procedente de fuentes circulares externas (por ejemplo, agua de lluvia recolectada o agua reutilizada proveniente de otro proceso):
 - Cantidad de agua “de segunda mano” que no requiere nueva extracción.

- Volumen de agua reutilizada internamente (recirculación dentro del beneficio):
 - Agua que, tras su uso en una etapa, se retiene y vuelve a emplearse en otra (se recircula, Tabla A1).
- Volumen de efluentes que cumplen criterios de calidad para usos posteriores (por ejemplo, vertido apto para riego agrícola o descarga segura al ambiente)
 - Agua descargada que alcanza estándares definidos y puede “cerrar el ciclo” o considerarse circular según Figura A5.

Opciones de cálculo:

- Utilizar mediciones directas de caudales de reúso externo e interno si están disponibles.
- En ausencia de mediciones específicas, estimar los volúmenes aplicando un balance de masa entre las entradas y salidas de agua (basado en los datos del Paso 4).

Presentación de resultados

Organizar los resultados por partida o línea de proceso, incluyendo los tres indicadores por separado, se pueden utilizar las plantillas presentados en las Tablas A18, A19 y A20:

Tabla A18. Circularidad en las fuentes

Partida o línea de proceso	Categoría (ejemplos)	Agua extraída (L/ton grano oro)	Porcentaje de circularidad de cada categoría (%)*	Agua Circular (L/ton grano oro)**	Circularidad en las fuentes (%)
Partida 1 o Línea de proceso 1	Agua de pozo				X%
	Agua contenida en el café fruta				
Partida 1 o Línea de proceso 1	Agua de pozo				Y%
	Agua contenida en el café fruta				
Total	Agua de pozo				Z%
	Agua contenida en el café fruta				

*Porcentaje de circularidad estimado según árbol de decisión en la Figura A4.

**Se calcula multiplicando el agua extraída por el porcentaje de circularidad asignado.

Tabla A19. Indicador de circularidad en el proceso.

Partida o línea de proceso	Categoría (ejemplos)	Agua extraída (L/ton grano oro)	Agua recirculada (L/ton grano oro)	Circulación en el proceso, X, (adimensional)
Partida 1 o Línea de proceso 1	Agua de Pozo			Y
	Agua contenida en el café fruta			
Partida 1 o Línea de proceso 1	Agua de Pozo			Z
	Agua contenida en el café fruta			

Tabla A20. Circularidad en los efluentes

Partida o línea de proceso	Agua extraída (L/ton grano oro) ^{***}	Categoría (ejemplos)	Efluente (L/ton grano oro) ^{***}	Porcentaje de circularidad (%)*	Agua residual circular (L/ton grano oro) ^{**}	Circularidad en los efluentes (%)
Partida 1 o Línea de proceso 1		Agua residual				X%
		Vapor				
Partida 1 o Línea de proceso 1		Agua residual				Y%
		Vapor				
Total		Agua residual				Z%
		Vapor				

*Porcentaje de circularidad estimado según Tabla de decisión en la Figura A5.

**Se calcula multiplicando el agua residual vertida o vapor por el porcentaje de circularidad.

***Para efectos de mantener la coherencia de unidades en el cálculo, se puede utilizar también la unidad de kg/ton de grano oro utilizando una densidad promedio de 1 kg/L.

Esta presentación permite comparar el grado de circularidad, identificar áreas críticas de reúso interno o calidad de efluentes, y priorizar acciones de mejora.

Interpretación y acciones recomendadas

- Un valor bajo de circularidad en las fuentes sugiere explorar fuentes circulares de agua (captación de lluvia, reúso externo).
- Un valor bajo de circularidad en el sitio indica la necesidad de aumentar la recirculación interna (instalación de bombas, tanques de almacenamiento).
- Un valor bajo de circularidad en los efluentes señala oportunidades para mejorar el tratamiento y permitir nuevos usos (agrícola, industrial).
- Antes de implementar cambios para mejorar la circularidad, evaluar el posible aumento de la huella hídrica asociado a nuevos insumos (bombas, reactivos), para asegurar una optimización real del sistema.

Paso 6. Conclusiones y recomendaciones

Esta guía práctica proporciona un método claro y paso a paso para que un beneficio de café en Costa Rica (y posiblemente otros países de Latinoamérica) pueda cuantificar su huella hídrica (ISO 14046) y evaluar la circularidad del agua (WCM), sin requerir conocimientos avanzados ni grandes inversiones tecnológicas.

Al definir claramente objetivos, datos de inventario, supuestos y calidad de la información, desglosar los resultados de impacto por escasez, WCP y FEP por partida e insumo y calcular métricas de circularidad, cada operación podrá identificar con precisión sus “puntos calientes” de consumo y contaminación, así como sus oportunidades de reúso externo e interno.

En este último paso se deben consolidar todos aprendizajes clave en una sección de conclusiones y recomendaciones. Especialmente recomendaciones de acciones a implementar en el beneficio de estudio. Algunos ejemplos son:

- Implementar mediciones regulares de consumos y calidades (agua, energía, efluentes) utilizando las plantillas sugeridas.
- Revisar y actualizar semestralmente los supuestos y la calidad de los datos, incorporando mejoras en instrumentos y registros.
- Establecer metas de reducción de WCP y aumento de las tres métricas de circularidad y asignar responsables para cada acción: optimizar recirculación, mejorar tratamiento de efluentes o captación de agua de lluvia.
- Comunicar internamente los resultados y compartirlos con las partes interesadas, para generar compromiso y justificar inversiones en sistemas de gestión hídrica.

Con este análisis, el beneficio de café obtiene una visión integral de su gestión del agua, combinando la reducción de la huella hídrica y el incremento de la circularidad para avanzar hacia operaciones más sostenibles.

4. Referencias:

1. Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). (2025). Información general gas Licuado de Petróleo (GLP). Recuperado el 13 de agosto de 2025, de <https://aresep.go.cr/gas/informacion-general/>
2. Boulay, A. M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., ... & Pfister, S. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368-378
3. Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., ... & Zhang, J. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371), eaam7240.
4. Castro Peinador, G., Ñamendi, F. J. C., de la Cruz Godoy, J. C., Gelabert, C., Cascante, D. M., Palacios, W. C. P., ... & Tellez, A. G. T. (2011). Impacto antrópico en el Manto Acuífero Barva (Heredia, Costa Rica) con énfasis en el uso del suelo (1992-2006). *UNED Research Journal/Cuadernos de Investigación UNED*, 3(1), 71-80.
5. Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2007). The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological economics*, 64(1), 109-118.
6. Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Integrated assessment of water resources and global change: A north-south analysis*, 35-48.
7. Decreto N° 41499-S REFORMA Y ADICIÓN AL DECRETO EJECUTIVO No.38924-S DEL 12 DE ENERO DEL 2015 “REGLAMENTO PARA LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE”, publicado en el Alcance No.15 a La Gaceta No.15 del 22 de enero del 2019
8. Decreto 33601- MINAE-S Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, publicado en el Alcance No. 8 a La Gaceta No. 55 del 19 de marzo del 2007
9. ecoinvent. (2024). *Ecoinvent database (versión 3.11)* [Base de datos en SimaPro]. Ecoinvent Association. <https://ecoinvent.org>
10. Farfán, F. & Redón J.R. (2014) Producción de madera por las Variedades Castillo® y Tabi en sistemas agroforestales, CENICAFE. Tomado de: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/563/1/avt0448.pdf>

11. Gómez Mora, J. M. (2019). Modelación del procesamiento agroindustrial del café desde la fruta hasta el café oro.
12. Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Mekonnen, M. M., & Mathews, E. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the framework for a blue revolution. London: Earthscan.
13. Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147. doi:10.1007/s11367-016-1054-3
14. INTE/ISO 14046:2015 (2015) Gestión ambiental. Huella de agua. Principios, requisitos y directrices
15. Martínez-Arce, A., Chargoy, J. P., Puerto, M., Rojas, D., & Suppen, N. (2018). Water Footprint (ISO 14046) in Latin America, state of the art and recommendations for assessment and communication. *Environments*, 5(11), 114.
16. Seitfudem, G., Berger, M., Schmied, H. M., & Boulay, A. M. (2025). The updated and improved method for water scarcity impact assessment in LCA, AWARE2. 0. *Journal of Industrial Ecology*.
17. UNESCO World Water Assessment Programme. (2020). World Water Development Report 2020 – Water and Climate Change, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 7, Place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France.
18. Vargas, G., & Mazón, B. (2004). Método para la determinación de humedad en cáscara de café. *Revista de Tecnología de Alimentos (REVITECA)*.
19. Vinante, C., Sacco, P., Orzes, G., & Borgianni, Y. (2020). Circular Economy Metrics: Literature Review and Company-Level Classification Framework. *Journal of Cleaner Production*, 125090.
20. World Business Council for Sustainable Development (2021). Water Circularity Metric: Tool application and guidance. Maison de la Paix Chemin Eugène-Rigot 2B CP 2075, 1211 Geneva 1, Switzerland
21. WULCA. (2024). *AWARE: Available WATER REMaining*. Water Use in Life Cycle Assessment. Recuperado el 12 de agosto de 2025, de <https://wulca-waterlca.org/aware/>

Anexo B. Datos sin procesar de la medición de caudal

Tabla B1. Datos sin procesar Medidor 1, caudal total.

Customer Name	Customer ID	Meter ID	Gateway	TotalFlow	SNR	Record Time	District	Address
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 07	724.96	-14.5	2022-12-31 05:46:25	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 79	724.96	-12.5	2022-12-31 05:46:24	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 07	724.92	7 -14.0	2022-12-30 23:46:30	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 78	724.92	7 -14.0	2022-12-30 23:46:29	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 78	724.67	1 -14.8	2022-12-29 02:46:38	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 78	701.08	2 -17.8	2022-12-27 20:46:51	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 07	691.78	6 -12.2	2022-12-26 02:47:02	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 79	691.22	6 -12.5	2022-12-25 05:47:09	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 07	691.22	6 -13.5	2022-12-24 11:47:16	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 79	691.22	6 -15.2	2022-12-24 05:47:17	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 04	630.19	8 -13.0	2022-12-15 08:48:22	Barva	Beneficio del Cafe

			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	619.12	-18.0	2022-12-14	05:48:33	Barva	Beneficio del Cafe
			0995	78					
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	611.37		2022-12-13			Beneficio del Cafe
			0995	79	5	-15.2	23:48:36	Barva	
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	593.16		2022-12-12			Beneficio del Cafe
			0995	79	7	-15.0	23:48:48	Barva	
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	579.67		2022-12-12			Beneficio del Cafe
			0995	78	3	-11.0	14:48:47	Barva	
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	575.48		2022-12-12			Beneficio del Cafe
			0995	78	1	-19.8	02:48:50	Barva	
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001			2022-12-11			Beneficio del Cafe
			0995	79	565.2	-16.0	02:48:58	Barva	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380			2022-12-10			Beneficio del Cafe
			0995	05	565.2	-15.2	08:49:04	Barva	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380			2022-12-10			Beneficio del Cafe
			0995	04	565.2	-18.0	02:49:08	Barva	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	562.63		2022-12-09			Beneficio del Cafe
			0995	04	5	-13.8	20:49:10	Barva	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	554.45		2022-12-09			Beneficio del Cafe
			0995	04	8	-15.2	08:49:15	Barva	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380			2022-12-08			Beneficio del Cafe
			0995	07	537.06	-13.8	20:49:17	Barva	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	529.54		2022-12-08			Beneficio del Cafe
			0995	0A	9	9.2	14:49:18	Barva	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	529.54		2022-12-08			Beneficio del Cafe
			0995	0A	9	9.8	11:49:21	Barva	

			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	529.54 9	11.0	2022-12-08 08:49:20	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	529.54 9	12.0	2022-12-08 05:49:21	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	529.06 5	8.8	2022-12-08 02:49:24	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	522.67 5	8.8	2022-12-07 23:49:23	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	518.32 9	10.5	2022-12-07 20:49:26	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	511.82 6	9.8	2022-12-07 14:49:28	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	511.82 6	10.8	2022-12-07 11:49:29	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	511.82 6	9.8	2022-12-07 08:49:47	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	511.82 6	10.0	2022-12-07 05:49:47	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	508.81 8	9.8	2022-12-07 02:49:31	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	504.74 3	9.2	2022-12-06 23:49:30	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	503.47 5	10.0	2022-12-06 20:49:33	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	501.28 9	10.5	2022-12-06 14:49:33	Barva	Beneficio del Cafe	

			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	500.90		2022-12-06		Beneficio del Cafe	
		0995	0A	9	10.0	11:49:38	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	500.52		2022-12-06		Beneficio del Cafe	
		0995	0A	8	9.8	08:49:35	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	500.14		2022-12-06		Beneficio del Cafe	
		0995	0A	8	12.2	05:49:40	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	498.37		2022-12-06		Beneficio del Cafe	
		0995	0A	9	-18.5	02:49:37	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	493.34		2022-12-05		Beneficio del Cafe	
		0995	0A	6	11.0	23:49:41	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	485.87		2022-12-05		Beneficio del Cafe	
		0995	0A	4	10.8	20:49:39	Barva		
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001			2022-12-04		Beneficio del Cafe	
		0995	78	478.89	-13.5	05:49:23	Barva		
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	478.34		2022-12-02		Beneficio del Cafe	
		0995	78	5	-14.2	20:49:35	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	472.48		2022-12-02		Beneficio del Cafe	
		0995	0A	1	9.8	14:49:40	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	472.48		2022-12-02		Beneficio del Cafe	
		0995	0A	1	9.5	11:49:41	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	472.48		2022-12-02		Beneficio del Cafe	
		0995	0A	1	10.0	08:49:36	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	472.39		2022-12-02		Beneficio del Cafe	
		0995	0A	6	10.0	05:49:40	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	466.22		2022-12-02		Beneficio del Cafe	
		0995	0A	7	10.8	02:49:36	Barva		

			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	462.15 4	13.0	2022-12-01 23:49:39	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	453.01 1	11.0	2022-12-01 20:49:39	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	449.21 6	8.5	2022-12-01 14:49:44	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	449.21 6	7.2	2022-12-01 11:49:43	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	449.21 6	10.8	2022-12-01 08:49:44	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	443.24 4	10.8	2022-12-01 05:49:54	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	434.08 9.0	9.0	2022-12-01 02:49:45	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	426.58 8	8.2	2022-11-30 23:49:48	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	420.82 9	11.2	2022-11-30 20:49:47	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	410.35 5	10.0	2022-11-30 14:49:02	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	410.08 2	10.5	2022-11-30 11:49:14	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	409.80 8	11.0	2022-11-30 08:49:05	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	408.63 10.2	10.2	2022-11-30 05:49:05	Barva	Beneficio del Cafe	

			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	401.01		2022-11-30		Beneficio del Cafe
		0995	0A	5	9.0	02:49:06	Barva	
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	397.55		2022-11-29		Beneficio del Cafe
		0995	0A	7	9.0	23:49:07	Barva	
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	396.95		2022-11-29		Beneficio del Cafe
		0995	0A	2	11.0	20:49:08	Barva	
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	395.72		2022-11-29		Beneficio del Cafe
		0995	05	9	-14.2	14:49:13	Barva	
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	395.72		2022-11-29		Beneficio del Cafe
		0995	0A	9	9.5	14:49:12	Barva	
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	395.72		2022-11-29		Beneficio del Cafe
		0995	0A	9	7.2	11:49:12	Barva	
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	395.72		2022-11-29		Beneficio del Cafe
		0995	0A	9	9.8	08:49:20	Barva	
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	395.72		2022-11-29		Beneficio del Cafe
		0995	0A	9	9.8	05:49:16	Barva	
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380			2022-11-29		Beneficio del Cafe
		0995	0A	392.6	10.5	02:49:25	Barva	
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	382.81		2022-11-28		Beneficio del Cafe
		0995	0A	4	9.5	23:49:15	Barva	
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	380.07		2022-11-28		Beneficio del Cafe
		0995	0A	5	11.2	20:49:18	Barva	
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	378.20		2022-11-28		Beneficio del Cafe
		0995	0A	4	8.5	14:49:17	Barva	
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	378.20		2022-11-28		Beneficio del Cafe
		0995	0A	4	11.0	11:49:20	Barva	

			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	378.20	4	10.2	2022-11-28 08:49:21	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 0A	378.20	4	10.2	2022-11-28 05:49:21	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 78	375.43	7	-18.2	2022-11-27 11:49:27	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 79	375.43	7	-16.8	2022-11-26 02:49:39	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 79	363.60	4	-12.8	2022-11-25 20:49:41	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 04	342.49	4	-12.5	2022-11-23 11:48:58	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 79	328.69	4	-19.8	2022-11-22 02:49:07	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 78	328.33	3	-10.0	2022-11-21 23:49:10	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 04	321.86	8	-16.5	2022-11-21 02:49:16	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 78	296.93	3	-13.0	2022-11-17 08:49:42	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 78	283.54	1	-12.0	2022-11-15 20:49:25	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 78	283.23	7	-20.5	2022-11-14 20:49:34	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 79	282.39	6	-14.5	2022-11-14 14:49:40	Barva	Beneficio del Cafe

			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	282.36		2022-11-14		Beneficio del Cafe	
		0995	78	6	-13.2	05:49:40	Barva		
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	275.51		2022-11-13		Beneficio del Cafe	
		0995	79	3	-14.8	05:49:45	Barva		
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	275.45		2022-11-12		Beneficio del Cafe	
		0995	79	9	-15.0	20:49:50	Barva		
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	275.45		2022-11-12		Beneficio del Cafe	
		0995	78	9	-10.2	20:49:49	Barva		
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	275.38		2022-11-12		Beneficio del Cafe	
		0995	79	8	-13.8	05:46:56	Barva		
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	252.48		2022-11-09		Beneficio del Cafe	
		0995	78	6	-14.5	05:47:16	Barva		
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	250.56		2022-11-08		Beneficio del Cafe	
		0995	78	2	-17.8	11:47:23	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	242.09		2022-11-04		Beneficio del Cafe	
		0995	05	3	-16.8	22:47:53	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	241.45		2022-11-04		Beneficio del Cafe	
		0995	04	4	-15.5	10:47:54	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	229.98		2022-11-03		Beneficio del Cafe	
		0995	04	6	-11.5	22:47:58	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380	221.22		2022-11-03		Beneficio del Cafe	
		0995	05	1	-14.0	13:48:03	Barva		
			3853014						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	8143380			2022-11-02		Beneficio del Cafe	
		0995	05	219.17	-13.5	16:48:08	Barva		
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0001	51022100	A000001	217.91		2022-11-01		Beneficio del Cafe	
		0995	78	7	-10.5	13:48:19	Barva		

			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 04	217.91	7 -10.8	2022-11-01 13:48:17	Barva	Beneficio del Cafe
			5A53012					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	A000001 78	217.91	7 -18.8	2022-11-01 07:48:20	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0001	51022100 0995	8143380 07	216.32	2 -13.0	2022-10-31 13:48:28	Barva	Beneficio del Cafe

Tabla B2. Datos sin procesar Medidor 2, caudal del micro beneficio.

Customer Name	Customer ID	Meter ID	Gateway	TotalFlow	SNR	Record Time	District	Address
			5A53012					
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	A000001 79	135.099	-20.2	2022-12-17 20:49:46	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	108.487	10.5	2022-12-08 14:43:17	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	108.487	11.0	2022-12-08 11:43:08	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	108.487	10.2	2022-12-08 08:43:19	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	108.487	8.5	2022-12-08 05:43:08	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	108.133	9.0	2022-12-08 02:43:10	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	107.519	9.2	2022-12-07 23:43:14	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	107.313	10.0	2022-12-07 20:43:13	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014					
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	104.345	9.8	2022-12-07 14:43:14	Barva	Beneficio del Cafe

			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	104.345	11.2	2022-12-07	11:43:17	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	104.345	9.5	2022-12-07	08:43:34	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	104.345	10.5	2022-12-07	05:43:35	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	104.173	7.8	2022-12-07	02:43:18	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	103.906	10.5	2022-12-06	23:43:22	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	103.649	9.5	2022-12-06	20:43:21	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	102.577	11.5	2022-12-06	14:43:29	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	102.196	10.0	2022-12-06	11:43:23	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	101.816	7.8	2022-12-06	08:43:36	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	101.436	10.5	2022-12-06	05:43:27	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	100.955	10.0	2022-12-06	02:43:29	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	100.32	10.0	2022-12-05	23:43:29	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	99.744	8.5	2022-12-05	20:43:28	Barva	Beneficio del Cafe

			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	97.091	9.5	2022-12-02 14:44:01	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	97.09	8.8	2022-12-02 11:44:02	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	97.09	9.0	2022-12-02 08:44:03	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	97.068	8.8	2022-12-02 05:44:01	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	96.32	9.5	2022-12-02 02:44:02	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	95.592	9.8	2022-12-01 23:44:01	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	95.089	10.0	2022-12-01 20:44:04	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	94.049	10.8	2022-12-01 14:44:06	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	94.049	10.5	2022-12-01 11:44:04	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	94.049	9.8	2022-12-01 08:44:05	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	93.083	8.8	2022-12-01 05:44:15	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	90.389	9.8	2022-11-30 23:44:10	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	90.228	8.5	2022-11-30 20:44:14	Barva	Beneficio del Cafe	

			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	86.825	9.8	2022-11-30	14:44:12	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	86.604	8.8	2022-11-30	11:44:24	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	86.383	9.5	2022-11-30	08:44:14	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	85.798	9.8	2022-11-30	05:44:22	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	84.758	10.2	2022-11-30	02:44:31	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	84.555	9.8	2022-11-29	23:44:17	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	84.402	10.8	2022-11-29	20:44:18	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	84.048	9.8	2022-11-29	14:44:22	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	84.048	10.2	2022-11-29	11:44:21	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	84.048	10.0	2022-11-29	08:44:30	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	84.048	9.0	2022-11-29	05:44:27	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	83.782	9.5	2022-11-29	02:44:34	Barva	Beneficio del Cafe
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210	8143380	83.705	10.8	2022-11-28	23:44:25	Barva	Beneficio del Cafe

			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	83.473	9.2	2022-11-28 20:44:28	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	83.044	10.8	2022-11-28 14:44:32	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	83.044	8.8	2022-11-28 11:44:31	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	83.044	9.2	2022-11-28 08:44:32	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 0A	83.044	8.0	2022-11-28 05:44:32	Barva	Beneficio del Cafe	
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	A000001 78	82.728	-17.5	2022-11-26 05:44:48	Barva	Beneficio del Cafe	
			5A53012						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	A000001 78	64.154	-17.2	2022-11-14 05:46:32	Barva	Beneficio del Cafe	
			3853014						
Beneficio del Cafe	0002	5102210 00997	8143380 04	50.334	-18.8	2022-11-05 12:47:44	Barva	Beneficio del Cafe	

Anexo C. Informes de calidad de agua

LCA-005-2023 (2)

Solicitante: Instituto Costarricense del Café
 Solicitado por: Ing. Daniel Ulloa
 Teléfono: 8909-0239
 Fecha de emisión del informe: 31 de enero de 2023

Cotización No.: 18-2023
 Número de muestras: Una

RESULTADOS

Análisis	Unidad	LCA-005-2023 # 2	Límite máximo***	Método aplicado (ver notas 5 y 6)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO _{5,20})*	mg/L O ₂	(3,50 ± 0,25)x10 ³	50	MAQA-10
Demanda Química de Oxígeno (DQO)*	mg/L O ₂	(4,43 ± 0,15)x10 ³	150	MAQA-12
Fósforo Total**	mg/L P	4,85 ± 0,33	---	MAQA-01
Grasas y Aceites*	mg/L	< 10	30	MAQA-02
Nitrógeno Total**	mg/L N	39,2 ± 2,8	50	MAQA-40
pH*	pH a ****	6,64 ± 0,24	5 a 9	UM-01
Sólidos Sedimentables (S. Sed.)*	mL/L	3,00 ± 0,31	1	MAQA-15
Sólidos Suspendedos Totales (SST)*	mg/L	390 ± 19	50	MAQA-17
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)*	mg/L	0,146 ± 0,018	5	MAQA-26
Temperatura*	°C	21,9 ± 1,2	15 a 40	UM-03

*Ensayo acreditado ante ECA. Ver alcance en <http://www.eca.or.cr>

**Ensayo no acreditado ante ECA.

***Decreto 33601- MINAE-S Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, publicado en el Alcance No. 8 a La Gaceta No. 55 del 19 de Marzo del 2007. Los valores de límite máximo reportados corresponden a los límites permisibles para los parámetros universales de aguas vertidas a cuerpo receptor ya que el reglamento no establece valores asociados al código CIU suministrado por el solicitante. (ver nota 8).

**** La temperatura de la lectura de pH corresponde al valor reportado en el análisis de temperatura.

NOTAS:

- El Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA), de la Universidad de Costa Rica opera bajo permiso sanitario de funcionamiento otorgado por el Ministerio de Salud, según resolución No. CS-ARSMO-D-593-19, vigente del 4 de julio de 2019 al 4 de julio del 2024.
- Los resultados de este informe son exclusivos para el análisis realizado a la(s) Muestra(s):
LCA-005-2023 # 2: Muestra compuesta de agua residual de tipo especial descrita como: "tanque de monitoreo del sistema de tratamiento de aguas residuales del beneficio del ICAFE". Ubicación: San Pedro, Barva, Heredia. Fecha de muestreo: 20 de enero de 2023. Hora de muestreo: 8:30 am a 10:30 am. Muestreado por: Ing. Melvin Alpizar M. (CICA). Fecha de ingreso al CICA: 20 de enero de 2023. El vertido del efluente es a: agua se infiltra en el subsuelo, código CIU suministrado por el interesado es 1079.
- Las muestras compuestas están constituidas por 5 submuestras de igual volumen, por lo tanto, el volumen de cada submuestra equivale a "Volumen de envase x 0,2". En el caso de muestras recolectadas en recipientes de un litro de capacidad, cada submuestra corresponde a un volumen de 200 mL.
- Las incertidumbres corresponden a incertidumbres expandidas con un factor de cobertura de 2 (k=2), lo cual da un nivel de confianza del 95 %.
- Métodos de Análisis Químico Ambientales (MAQA) realizados en las instalaciones del CICA de acuerdo con el A.P.H.A. (American Public Health Association) (2017). *Standard methods for examination of water and waste water (SMWW)*. 23th Ed. Washington DC, USA (para el método de referencia refiérase al alcance de acreditación del CICA en <https://www.eca.or.cr/>). El análisis de fósforo total MAQA-01 y nitrógeno total MAQA-40 no acreditados se basan en SM 4500-P D y SM-5310 B, respectivamente.
- Métodos de análisis de la Unidad de Muestreo (UM) realizados en el sitio de la toma de muestra (ver la descripción de cada muestra), de acuerdo con el A.P.H.A. (American Public Health Association) (2017). *Standard methods for examination of water and waste water (SMWW)*. 23th Ed. Washington DC, USA (para el método de referencia refiérase al alcance de acreditación del CICA en <https://www.eca.or.cr/>). Para el muestreo se aplicó el método acreditado PT-05.
- Documento confidencial para uso del solicitante. No puede reproducirse parcialmente sin autorización del Laboratorio.
- Los valores de reglamentación indicados en el presente informe de resultados se incluyen a petición del solicitante. El CICA no emite ninguna declaración de conformidad contra la reglamentación indicada.

**LCA-005-2023 (2)**

9. La fecha de análisis queda comprendida entre la fecha de ingreso de la muestra al CICA y la fecha de emisión del reporte. En caso de que el solicitante requiera la fecha de la ejecución de un análisis en particular, éste podrá solicitar por un medio escrito la información requerida.
10. Las muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 7 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este período se desecharán.
11. No se realizó la medición de caudal debido a que las condiciones en la infraestructura no eran apropiadas.

----- Última línea -----

Víctor G. Arias Mora
Encargado de Laboratorio



LCA-005-2023 (1)

Solicitante: Instituto Costarricense del Café
 Solicitado por: Ing. Daniel Ulloa
 Teléfono: 8909-0239
 Fecha de emisión del informe: 31 de enero de 2023

Cotización No.: 18-2023
 Número de muestras: Una

RESULTADOS

Análisis	Unidad	LCA-005-2023 # 1	Valor Alerta (VA)***	Valor máximo admisible (VMA)***	Método aplicado (ver notas 4 y 5)
Color*	CU****	5,0 ± 2,9	< 5	15	MAQA-34
Conductividad*	µS/cm	126,20 ± 0,77	400	---	MAQA-29
Olor*	---	Aceptable	Aceptable	Aceptable	MAQA-21
pH*	pH a *****	7,20 ± 0,24	6	8	UM-01
Temperatura*	°C	21,8 ± 1,2	18	30	UM-03
Turbiedad*	UNT	< 0,30	1	5	MAQA-28

*Ensayo acreditado ante ECA. Ver alcance en <http://www.eca.or.cr>

**Ensayo no acreditado ante ECA.

*** Decreto N° 41499-S REFORMA Y ADICIÓN AL DECRETO EJECUTIVO No.38924-S DEL 12 DE ENERO DEL 2015 "REGLAMENTO PARA LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE", publicado en el Alcance No.15 a La Gaceta No.15 del 22 de Enero del 2019.

Para los parámetros de pH, temperatura, cloro residual libre y cloro residual combinado, los valores de VA y VMA establecen un ámbito permisible.

****CU equivalente a (U-Pt-Co)

***** La temperatura de la lectura de pH corresponde al valor reportado en el análisis de temperatura.

NOTAS:

- El Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA), de la Universidad de Costa Rica opera bajo permiso sanitario de funcionamiento otorgado por el Ministerio de Salud, según resolución No. CS-ARSMO-D-593-19, vigente del 4 de julio de 2019 al 4 de julio del 2024.
- Los resultados de este informe son exclusivos para el análisis realizado a la(s) Muestra(s):
LCA-005-2023 # 1: Muestra simple de agua de pozo (sin clorar) descrita como: "tubo del área de chancado del beneficio ICAFE". Ubicación: San Pedro, Barva, Heredia. Fecha de muestreo: 20 de enero de 2023. Hora de muestreo: 10:52 am. Muestreado por: Ing. Melvin Alpízar M. (CICA). Fecha de ingreso al CICA: 20 de enero de 2023.
- Las incertidumbres corresponden a incertidumbres expandidas con un factor de cobertura de 2 (k=2), lo cual da un nivel de confianza del 95 %.
- Métodos de Análisis Químico Ambientales (MAQA) realizados en las instalaciones del CICA de acuerdo con el A.P.H.A. (American Public Health Association) (2017). *Standard methods for examination of water and waste water (SMWW)*. 23th Ed. Washington DC, USA (para el método de referencia refiérase al alcance de acreditación del CICA en <https://www.eca.or.cr/>).
- Métodos de análisis de la Unidad de Muestreo (UM) realizados en el sitio de la toma de muestra (ver la descripción de cada muestra), de acuerdo con el A.P.H.A. (American Public Health Association) (2017). *Standard methods for examination of water and waste water (SMWW)*. 23th Ed. Washington DC, USA (para el método de referencia refiérase al alcance de acreditación del CICA en <https://www.eca.or.cr/>). Para el muestreo se aplicó el método acreditado PT-05.
- Documento confidencial para uso del solicitante. No puede reproducirse parcialmente sin autorización del Laboratorio.
- Los valores de reglamentación indicados en el presente informe de resultados se incluyen a petición del solicitante. El CICA no emite ninguna declaración de conformidad contra la reglamentación indicada.
- La fecha de análisis queda comprendida entre la fecha de ingreso de la muestra al CICA y la fecha de emisión del reporte. En caso de que el solicitante requiera la fecha de la ejecución de un análisis en particular, éste podrá solicitar por un medio escrito la información requerida.
- Las muestras a que se refiere este reporte se mantendrán en custodia por 7 días naturales luego de la emisión de este informe. Concluido este período se desecharán.

----- Última línea -----

LCA-005-2023 (1)

Víctor G. Arias Mora
Encargado de Laboratorio



Experiencia y Tecnología a su Servicio

Cliente:	Centro de Investigación en Contaminación Ambiental	Código reporte:	AA23-0199-1
Dirección:	Universidad de Costa Rica, Ciudad de la Investigación, Finca #2	Fecha de muestreo:	20/01/2023
Provincia:	San José	Fecha de recepción:	20/01/2023
Cantón:	Cantón de Montes de Oca	Fecha de reporte:	01/02/2023
Distrito:	San Pedro		
Muestreador:	El Interesado .		

Permiso Sanitario de Funcionamiento del Laboratorio San Martín #1815-2021 dado el 08/12/2021, vence el 08/12/2023 y #1499-2022 dado el 15/11/2022, vence el 11/12/2024. Métodos de análisis acreditados por el ECA identificados en este informe por medio de un asterisco (*). Para consulta de variables acreditadas ingresar a la página del ECA (http://www.eca.or.cr/acr_lab.php) en el link del Laboratorio San Martín.

Código LSM	AA23-0199
Punto de muestreo	Muestra de agua. LCA-005-2023 #1 8:52 a.m Marchamo: 20050

Resultados

Ensayo	Resultado
* Coliformes fecales	Negativo UFC/100 mL
* <i>Escherichia coli</i>	Negativo UFC/100 mL

Metodología de análisis: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed. 2017.

Ejecución de actividades del Laboratorio: 20/01/2023 - 01/02/2023

Observaciones:

Declaración de Conformidad: Desde el punto de vista Microbiológico en las variables analizadas el agua cumple con los valores establecidos por el Decreto 41499 – S Reforma y adición al Decreto Ejecutivo 38924 – S Reglamento para la Calidad del Agua Potable.

Regla de Decisión: Para los análisis microbiológicos, al no expresar incertidumbre en sus resultados, se establecerá como regla de decisión lo indicado a continuación: “si el resultado es igual o menor al establecido como valor máximo en los reglamentos utilizados según la matriz de análisis, entonces el resultado expresado en el informe se considera conforme con las especificaciones requeridas”

NMP: Número más probable, UFC: Unidad formadora de colonias, Ausente o Negativo ≤ Límite de Detección (LD).

Los resultados de análisis solamente se refieren a la muestra aquí descrita.

Dr. Juan Carlos Rojas Carrión
Microbiólogo Cod. 488



Referencia

Ensayo	Matriz	Método	Límite de detección
<i>Bacillus cereus</i>	Alimentos	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed.,2015 .Cap. 31	< 10 UFC/g
Bacterias aerobias mesófilas	Agua	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 23 ^{ra} , 2017. Método 9215 B y C	< 1 UFC /mL
	Alimentos	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed.2015 .Cap 8	< 10 UFC/g
	Aire	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed.2015 Method 3.71.Cap 3	< 1 UFC/T/90 mm Min. 1 UFC/m ³
	Superficies	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed. 2015. Method 3.51.Cap 3	< 10 UFC/cm ²
	Materias primas y productos farmacéuticos	USP,36 ed,2018 .Test 61 y 62	< 10 UFC/g
Coliformes fecales	Agua clorada	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 23 ^{ra} , 2017. Método 9221 A,B,C,D, E, F, G	< 1,1 NMP/100 mL
	Agua no clorada	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 23 ^{ra} , 2017. Método 9221 A,B,C,D, E, F, G	< 1,8 NMP/100 mL
	Alimentos	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed.,2015.Cap 9	< 10 UFC/g
			< 3 NMP/g
Coliformes totales	Agua clorada	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 23 ^{ra} , 2017. Método 9221 A,B,C,D, E, F, G	< 1,1 NMP/100 mL
	Agua no clorada	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 23 ^{ra} , 2017. Método 9221 A,B,C,D, E, F, G	< 1,8 NMP/100 mL
	Alimentos	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed.2015.Cap 9	< 10 UFC/g
			< 3 NMP/g
	Aguas marinas	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 23 ^{ra} , 2017 Método 9221 A-B- C- E	< 1,8 NMP/100 mL
Enterobacterias	Alimentos	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed.2015.Cap 9	< 10 UFC/g
<i>Enterococcus</i>	Aguas	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 23 ^{ra} , 2017. Método 9230 B	< 1,8 NMP/100 mL
<i>Escherichia coli</i>	Agua clorada	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 23 ^{ra} , 2017 Método 9221 A,B,C,D, E, F, G	< 1,1 NMP/100 mL
	Agua no clorada		< 1,8 NMP/100 mL
	Alimentos	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed.,2015.Cap 9	< 10 UFC/g < 3 NMP/g
	Aguas marinas	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 23 ^{ra} , 2017 Método 9221 9221 A,B,C,D, E, F, G	< 1,8 NMP/100 mL
	Materias primas y productos farmacéuticos	USP,36 ed,2018 .Test 61 y 62	Ausencia o presencia < 10 UFC/g
Hongos y levaduras	Alimentos	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed.,2015.Cap 21	< 10 UFC/g
	Aire	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed. Method 3.71. Cap 3	< 1 UFC/T/90 mm < 1 UFC/m ³
	Superficies	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed. Method 3.51. Cap 3	< 10 UFC/cm ²
	Materias primas y productos farmacéuticos	USP,36 ed,2018 .Test 61 y 62	< 10 UFC/g
	<i>Legionella</i>	Agua	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 23 ^{ra} , 2017. Método 9260 J
<i>Listeria monocytogenes</i>	Alimentos	Vidas [®] Listeria DUO (LDuo Ref 30225. Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed.,2015.Cap 35	Ausencia o presencia/25 g
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Agua	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 23 ^{ra} , 2017. Método 9213 F	< 1,8 NMP/100 mL
	Materias primas y productos farmacéuticos	Farmacopea Americana, análisis microbiológicos exámenes 61 y 62	Ausencia o presencia/g
<i>Salmonella sp.</i>	Alimentos	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed.,2015.Cap 36 Vidas [®] Salmonella (SLM) Ref 30702.	Ausencia o presencia/25 g
	Materias primas y productos farmacéuticos	Farmacopea Americana, análisis microbiológicos exámenes 61 y 62 Vidas [®] Salmonella (SLM) Ref 30702.	Ausencia o presencia/10g
<i>Staphylococcus aureus</i>	Agua y aguas marinas	Standard Methods APHA-AWWA-WEF, 23 ^{ra} , 2017. Método 9213 B	< 1 UFC/mL
	Alimentos	Compendium of methods for the microbiological examination of foods. APHL 5th ed.,2015. Cap 39	< 10 UFC/g
	Materias primas y productos farmacéuticos	USP,36 ed,2018 .Test 61 y 62	Ausencia o presencia/g