



Evaluación del sistema de recirculación de agua en los procesos productivos para la planta de cementos argos Río Claro.

Manuela Rendón Sepúlveda

Informe de práctica para optar el título de Ingeniera Ambiental

Semestre de Industria

Asesor
Camilo César Castro Jiménez, Msc. en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Ingeniería Ambiental
Medellín
2025

Cita	(Rendón Sepúlveda, 2025)
Referencia	Rendón Sepúlveda, M (2025). Evaluación del sistema de recirculación de agua en los procesos productivos para la planta de cementos Argos Río Claro. [Semestre de industria]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/director: Julio César Saldarriaga Molina

Jefe departamento: Lina María Berrouet Cadavid

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

1. Resumen.....	7
2. Abstract.....	8
3. Introducción	9
4. Objetivos	11
4.1. Objetivo general	11
4.2. Objetivos específicos	11
5. Marco teórico	12
6. Metodología	15
7. Resultados y análisis	16
7.1. Descripción de la concesión	16
7.2. Uso del Agua	17
7.3. Agua en el sistema productivo.....	19
7.4. Calidad del agua	20
7.5. Estado de los medidores.....	21
7.6. Análisis de datos históricos para los medidores	25
7.7. Estadísticos de medidores macromedidores 1 y 2	31
7.8. Porcentaje de agua recirculada	33
8. Recomendaciones	36
9. Conclusiones	38
10. Referencias.....	39

Lista de gráficas

Gráfica 1. Temperatura del sistema para el mes de agosto 2024.....	20
Gráfica 2. Estado de los medidores.....	25
Gráfica 3. Promedio consumo anual para los medidores principales.	26
Gráfica 4. Promedio consumo anual para los medidores secundarios.....	28
Gráfica 5. Promedio consumo anual para medidor 16.....	30
Gráfica 6. Promedio consumo anual para medidor 22.....	31
Gráfica 7. Comparativo de consumo de agua en los medidores 1 (M1) y 2 (M2).	34
Gráfica 8. Porcentaje de agua recirculada por año	35

Lista de tablas

Tabla 1. Normas específicas aplicables al UEAA 13

Tabla 2. Descripción de la metodología a implementar..... 15

Tabla 3. Promedio a perdida cuando operan los equipos..... 18

Tabla 4. Estado de los medidores..... 22

Tabla 5. Promedio de consumo por año para los medidores primarios 26

Tabla 6. Promedio de consumo por año para los medidores secundarios 27

Tabla 7. Estadísticos para el medidor 1 31

Tabla 8. Estadísticos para el medidor 2 32

Siglas, acrónimos y abreviaturas

UEAA	Uso Eficiente y Ahorro del Agua
GIRH	Área Gestión Integral del Recurso Hídrico
CORNARE	Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
CO₂	Dióxido de carbono
CaCO₃	Caliza
SiO₂	Sílice
Fe₂O₃	Óxido de hierro
Al₂O₃	Alúmina
PTA	Planta de Tratamiento de Agua

1. Resumen

La Gestión Integral del Recurso Hídrico, según el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019) es un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales.

En el contexto de Colombia, un país con una abundante disponibilidad de recursos hídricos, la creciente demanda ha comenzado a ejercer una presión significativa sobre este recurso vital. En particular, la industria cementera destaca como un sector con un alto impacto en el consumo de agua. De acuerdo con el Reporte Integrado de Cementos Argos (2023), el consumo de agua en la producción de cemento es de 227 litros por tonelada para toda la regional Colombia (todas sus plantas de operación de cemento). Consciente de esta problemática Argos ha implementado una serie de acciones que promuevan una gestión más eficaz y sostenible del agua para equilibrar la demanda industrial con la conservación del recurso hídrico.

Esta propuesta busca realizar una evaluación del uso de agua en los procesos productivos de la planta de cemento Río Claro y proponer una alternativa para su optimización. Su desarrollo se basa en recopilación de datos históricos de consumo de agua, estudios o investigaciones realizados previamente sobre el tema, visitas de reconocimiento y revisión de bibliografía.

Palabras clave: Uso del agua, recirculación, optimización, uso eficiente del agua, reducción de pérdidas, recirculación de agua, impacto ambiental.

2. Abstract

Integrated Water Resource Management, according to the Ministry of Environment and Sustainable Development (2019) is a process that promotes the coordinated management and use of water resources, land and related natural resources, in order to maximize social and economic welfare in an equitable manner without compromising the sustainability of vital ecosystems.

In the context of Colombia, a country with an abundant availability of water resources, growing demand has begun to exert significant pressure on this vital resource. In particular, the cement industry stands out as a sector with a high impact on water consumption. According to the Cementos Argos Integrated Report (2023), water consumption in cement production is 227 liters per ton for the entire Colombia region (all its cement operating plants). Aware of this problem, Argos has implemented a series of actions to promote more efficient and sustainable water management to balance industrial demand with water conservation.

This proposal seeks to evaluate the use of water in the production processes of the Río Claro cement plant and propose an alternative for its optimization. The development is based on the collection of historical data on water consumption, studies or research previously conducted on the subject, reconnaissance visits and literature review.

Keywords: water use, recirculation, optimization, efficient water use, loss reduction, water recirculation, environmental impact.

3. Introducción

El agua es un recurso natural limitado y vital para la vida en nuestro planeta. Es esencial para la supervivencia de los seres vivos y es utilizada en una variedad de actividades humanas, desde el consumo doméstico hasta la agricultura y la industria. Sin embargo, el acceso al agua potable y su gestión adecuada son un desafío en muchas partes del mundo. (Arzapalo L & Sánchez A, 2023)

El aumento en la presión sobre el recurso hídrico es inminente, por lo cual promover e implementar el uso eficiente y ahorro del agua es imperativo. Elaborar e implementar los instrumentos para la gestión del recurso hídrico es fundamental para optimizar la demanda de agua que permitirá mantener la capacidad de regulación de las cuencas y la armonía con el ciclo hidrológico para garantizar la sostenibilidad de los recursos agua y suelo y así mejorar disponibilidad y el acceso al agua. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

Según el IDEAM (2018), Colombia es un país privilegiado en relación con la oferta hídrica superficial, puesto que el país cuenta con el 5 % de la riqueza hídrica mundial. Sin embargo, la riqueza del país no se reparte de manera equitativa en condiciones espaciales y temporales. En este contexto, la precipitación muestra que en un año húmedo el país puede recibir cerca de 3420 mm (alrededor de un 92 % más respecto al promedio), mientras que en un año seco puede estar recibiendo 841 mm (una reducción del 53 % respecto al promedio). Estos eventos hídricos extremos conllevan al desabastecimiento en algunos lugares del país.

La industria cementera es un sector clave que, a pesar de ser fundamental para la construcción y desarrollo de infraestructuras, enfrenta desafíos significativos en términos de gestión del agua. El proceso de producción de cemento requiere grandes cantidades de agua, tanto para la hidratación del clinker como para otros procesos operativos y de enfriamiento. Por lo tanto, la optimización en el uso del agua se convierte en una prioridad para reducir el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad operativa. (Barbosa, 2016)

Dado el estrés hídrico y la variabilidad en la disponibilidad del agua, es crucial que las plantas cementeras adopten prácticas y tecnologías que optimicen el uso del agua y minimicen el desperdicio. Esto no solo ayuda a enfrentar los problemas de disponibilidad y calidad del recurso, sino que también contribuye a la eficiencia económica y a la responsabilidad ambiental del sector.

Esta propuesta pretende buscar alternativas orientadas a mejorar el sistema de recirculación de agua de la planta de Cementos Argos Río Claro. Se abordarán estrategias para optimizar el uso del agua en distintos procesos de producción, evaluando cómo estas medidas no solo contribuyen a una gestión más sostenible del recurso hídrico, sino que también apoyan la transición hacia un modelo de economía circular, donde se minimizan los vertimientos y se maximiza la reutilización de los recursos. El objetivo es promover la optimización, el consumo racional y el control de pérdidas del recurso hídrico, integrando estas prácticas en un enfoque más amplio de sostenibilidad y eficiencia.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Evaluar el uso de agua del sistema de recirculación que se tiene en los procesos productivos para la planta de Cementos Argos Río Claro.

4.2. Objetivos específicos

- 1.** Analizar datos e información existente sobre el estado actual y el consumo de agua del sistema de recirculación.
- 2.** Evaluar la eficiencia del uso del agua en los procesos productivos del sistema de recirculación de la planta Río Claro.
- 3.** Proponer alternativas que conduzcan a la reducción de pérdidas y optimización del uso de agua en los procesos productivos.

5. Marco teórico

Cementos Argos es una organización líder del mercado de cemento y concreto en Colombia, con presencia también en Estados Unidos, Centroamérica y otros países del continente americano, donde cuenta con más de 22.000 clientes. (Cementos Argos Colombia, 2024). En este contexto, la Planta de Cementos Argos Río Claro, ubicada en el Corregimiento La Danta, Municipio de Sonsón, en el departamento de Antioquia, en el Km 165 de la Autopista Medellín – Bogotá, desempeña un papel crucial en el proceso de producción de cemento.

El cemento es un material en polvo que, al mezclarse con agua y agregados forma un compuesto de alta resistencia conocido como concreto. Es un material duradero y fuerte, compuesto principalmente de caliza (CaCO_3), sílice (SiO_2) y óxido de hierro (Fe_2O_3) y alúmina (Al_2O_3). La producción de cemento se divide en dos etapas principales: la producción de clinker a más de 1400°C y la molienda del clinker con otros minerales para producir el cemento en polvo. El proceso de producción incluye la explotación y transporte de materias primas, la trituración para reducir el tamaño del material, y la pre-homogenización y almacenamiento en silos. (Barbosa, 2016)

Para esta propuesta se busca analizar el sistema de recirculación de agua usada en el proceso de producción del cemento de la planta Argos Río Claro siguiendo los principios sobre el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (UEAA). Según el Decreto 1090 de 2018, el UEAA se refiere a toda acción que minimice el consumo de agua, reduzca el desperdicio u optimice la cantidad de agua a usar en un proyecto, obra o actividad, mediante la implementación de prácticas como el reúso, la recirculación, el uso de aguas lluvias, el control de pérdidas, la reconversión de tecnologías o cualquier otra práctica orientada al uso sostenible del agua (Presidencia de la República de Colombia, 2018). En este sentido, la Tabla 1 presenta las normas específicas aplicables en el marco del Uso Eficiente y Ahorro del Agua (UEAA).

Tabla 1.

Normas específicas aplicables al UEAA

Tipo De Legislación	Año	Entidad	Descripción
Decreto 2811	1974	Presidencia de la República	“Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”
Ley 99	1993	Congreso de la República	“Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones”
Ley 373	1997	Congreso de la República	“Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua”
Decreto 3102	1997	Presidencia de la República	“Por el cual se reglamenta el artículo 15 de la Ley 373 de 1997 en relación con la instalación de equipos, sistemas e implementos de bajo consumo de agua”
Resolución 1023	2005	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	“Por la cual se adoptan guías ambientales como instrumento de autogestión y autorregulación”
Decreto 1480	2007	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	“Por el cual se priorizan a nivel nacional el ordenamiento y la intervención de algunas cuencas hidrográficas y se dictan otras disposiciones”
Decreto 1076	2015	Presidencia de la República	“Por medio del cual se expide el decreto único reglamentario y desarrollo sostenible”
Decreto 1090	2018	Presidencia de la República	"Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua y se dictan otras disposiciones"
Resolución N° 112-2909	2019	CORNARE	“Por medio de la cual se aprueba un programa para el uso eficiente y ahorro del agua y se adoptan otras determinaciones.”
Resolución N° 631	2015	Presidencia de la República	“Por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.”

Cementos Argos S.A., consciente de la problemática presentada con el recurso hídrico, busca un uso eficiente y ahorro de agua para su planta Río Claro ubicada en el municipio de Sonsón (Antioquia), en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH), la cual establece que “El agua dulce se considera un recurso escaso y por lo tanto su uso será racional y se basará en el ahorro y uso eficiente”. Esta propuesta está alineada con las políticas nacionales sobre el uso eficiente del agua y las políticas ambientales y de calidad que rigen la organización. De esta manera, se promoverán acciones que busquen reducir el impacto de sus actividades en la disponibilidad de este recurso.

6. Metodología

La optimización del uso del agua en la planta de cemento Argos Río Claro requiere el desarrollo de estrategias para evaluar y mejorar la eficiencia en el consumo hídrico. Dado el alto nivel de consumo de agua en los procesos industriales de la planta, es esencial implementar prácticas que permitan una gestión efectiva del recurso. El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar una evaluación del sistema de recirculación de agua en los procesos productivos de la planta de cemento Argos Río Claro. La metodología presentada en la Tabla 2 permitirá entender el estado actual del consumo de agua en el proceso productivo de la planta, identificar áreas de mejora y proponer estrategias concretas para reducir el uso del recurso hídrico, mejorar la eficiencia y fomentar una gestión más sostenible. El proyecto se divide en tres fases principales detalladas a continuación:

Tabla 2.

Descripción de la metodología a implementar

1. Diagnóstico de la disponibilidad hídrica	Recopilación de datos	<ul style="list-style-type: none"> • Recolectar datos sobre el consumo actual de agua en la planta de cemento Argos Río Claro. • Revisar el marco normativo sobre gestión hídrica y eficiencia en el uso del agua. • Investigar estudios previos y mejores prácticas en la industria cementera. • Realizar visitas de reconocimiento a la planta para entender los procesos actuales.
	Análisis de información	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar la disponibilidad de agua y la demanda en el sistema de producción. • Identificar las principales áreas de consumo y pérdidas de agua en los procesos productivos.
2. Análisis del estado actual del sistema de recirculación	Identificación y medición de consumos	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar un análisis de los datos históricos de uso de agua en los procesos productivos. • Analizar las áreas donde se producen mayores consumos y pérdidas y evaluar las causas subyacentes.
	Especificación de criterios de evaluación	<ul style="list-style-type: none"> • Definir criterios claves para evaluar la eficiencia en la gestión del uso del agua. • Clasificar los criterios en dimensiones como eficiencia de procesos, recuperación de agua y reutilización.
3. Propuesta de las alternativas de mejora	Desarrollo de alternativas	<ul style="list-style-type: none"> • Elaborar recomendaciones para reducir las pérdidas de agua y optimizar su uso. • Incluir alternativas para la conservación del recurso.
	Elaboración de la propuesta	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar una propuesta que incluya recomendaciones para la planta.

7. Resultados y análisis

7.1. Descripción de la concesión

En el contexto de la gestión de recursos hídricos, se otorgó una concesión de aguas superficiales a Cementos Argos S.A. por un caudal total de 26.513 L/s, destinado a usos domésticos e industriales. Este caudal se captará de diversas fuentes: la fuente número 1 proporciona 11.3 L/s para uso industrial; la fuente número 2, 9.75 L/s también para uso industrial; la fuente número 3, Quebrada La Viuda, ofrece 0.520 L/s para uso doméstico y 4.083 L/s para uso industrial; y la fuente número 4, 0.06 L/s para uso doméstico y la fuente número 5, 0.80 L/s para uso industrial. Esta concesión beneficiará a la Planta Río Claro, ubicada en el predio FMI 028-11676, en el Corregimiento de Jerusalén, vereda La Hermosa, Municipio de Sonsón, Antioquia (CORNARE, 2021).

Las fuentes de abastecimiento cuentan con una buena cobertura vegetal protectora y un caudal suficiente para satisfacer las necesidades de la empresa, al tiempo que se mantiene un caudal remanente, según los aforos realizados por CORNARE (2021). Las actividades en las instalaciones se alimentan del caudal concesionado de la cuenca Río Claro-Cocorná Sur, que abarca un área total de 850.76 km². De esta área, el 82.9% se encuentra bajo la jurisdicción de CORNARE (705.28 km²), comprendiendo los municipios de San Luis, San Francisco, Sonsón y Puerto Triunfo, mientras que el 17.11% está bajo la jurisdicción de Corantioquia (145.56 km²), correspondiente al municipio de Puerto Nare.

La cuenca Río Claro-Cocorná Sur se sitúa en la parte alta y media del flanco oriental de la Cordillera Central, en la región del valle del Magdalena Medio. El Río Claro nace a 2,250 m.s.n.m. en Las Cuchillas de El Tigre y La Osa, en el municipio de San Francisco, y se une al Río Cocorná Sur, continuando como Río Claro-Cocorná Sur hasta desembocar en la margen izquierda del Río Magdalena a 135 m.s.n.m. Sus principales afluentes incluyen el Río Tigre y las quebradas La Cristalina, La Mesa y Las Mercedes.

Es importante destacar que esta cuenca representa uno de los últimos relictos de bosque primario, teniendo un insustituible y enorme potencial para la investigación del proceso de deforestación. Además, es fuente de explotación petrolera, extracción de mármoles y calizas, y producción ganadera (CORNARE, 2022).

7.2. Uso del agua

La planta de cemento se abastece de cinco fuentes para su proceso: cuatro de las fuentes van directo a la planta de tratamiento de agua potable donde respectivamente cuentan con su medidor, de allí se distribuye a dos tanques de almacenamiento principal: Tanque de uso doméstico y tanque de uso industrial. Para el tanque de uso doméstico se distribuye de la siguiente manera: Autogeneración, Planta, (casino, lavandería, base policía, Z3, ensacadoras entre otros), mina y taller diesel (campamento de la policía, trituradora, oficinas taller). Posterior a su uso pasa al sistema de tratamiento de aguas residuales, luego al humedal y finalmente es vertida a la quebrada la Sapa donde cumple con los parámetros establecidos por la resolución N° 631 de 2015. El tanque de agua industrial también es abastecido por la fuente de captación Río Claro, que es utilizada para el enfriamiento de equipos y después pasa a ser agua recirculada; el tanque cuenta con un rebose de caño seco. En la quebrada Campamento de ingenieros se encuentra un lago que es utilizado para el riego de vías y trituradora de calizas. Una parte de la fuente principal río Claro llega a las torres acondicionadoras 1 y 2 y el resto es agua cruda utilizada para generación de energía en todo su proceso y al finalizar es vertida al caño la Sapa. (Cementos Argos, 2018). Este trabajo se enfocó en el agua de uso industrial que es usada para enfriamiento de los equipos y posteriormente recirculada

La planta Río Claro cuenta con una lista de equipos que consumen agua, ya sea para su refrigeración, o para su operación, y dicha agua puede ser recuperada (como en el caso de la usada en refrigeración) o evaporada y liberada al ambiente (a pérdida). La tabla 3 muestra los consumos de agua a pérdida en los diferentes equipos en la planta

Tabla 3.

Consumos promedio de agua a pérdida cuando operan los equipos

Equipo	Promedio consumo a pérdida (m³/d)
Molino de crudo 2	4
Molino de carbón 2	1.2
Torre acondicionadora línea 1	8.5
Torre acondicionadora línea 2	1.5
Molino de cemento 3	1.5
Molino de cemento 4	3
Molino de cemento 5	2.5
HO ₃ enfriador interior	4.5
HO ₃ enfriador exterior	5

El agua de refrigeración de los equipos (chumaceras, sistemas hidráulicos, etc.) se lleva a un tanque de recirculación, donde un par de bombas la regresan a los tanques de agua para su enfriamiento y reutilización. Se puede considerar que por evaporación se pierde alrededor del 1% de dicha agua. (Cementos Argos, 2024)

En esta área de recirculación, donde se encuentra el tanque y las bombas, cierto porcentaje del agua se pierde del sistema. Aquí, se mide el caudal tres veces por semana utilizando el método volumétrico, el cual es adecuado para corrientes pequeñas debido a su simplicidad y bajo costo.

El procedimiento consiste en colocar el recipiente (por ejemplo, un balde) bajo el flujo de agua, registrar el tiempo que tarda en llenarse hasta un nivel predeterminado y calcular el caudal dividiendo el volumen recogido entre el tiempo medido

$$Q = \frac{V}{T}$$

Dónde: Q = Caudal expresado en m³ /s, V = Volumen dado en m³, T = Tiempo en s

(Suarez, 2018)

Luego de pasar por las bombas, el agua asciende a un tanque donde ocurre una pérdida adicional por rebose. Actualmente, no se dispone de un método para medir directamente el caudal perdido en este punto del sistema. Esta situación representa un desafío para evaluar con precisión las pérdidas totales y resalta la necesidad de implementar alternativas que permitan su medición.

7.3. Agua en el sistema productivo

La recirculación consiste en utilizar el agua en el proceso donde inicialmente se usó. En general, la primera vez que el agua ha sido utilizada, cambia sus características físicas y químicas y, por lo tanto, podría requerir de algún tipo de tratamiento. Es necesario entonces conocer la calidad del agua demandada por el proceso en cuestión, el nivel de degradación de su calidad en el mismo y, por ende, el tipo de tratamiento necesario. (Cortés, 1991)

En las plantas de cemento, este principio de recirculación es clave, ya que el agua desempeña un papel fundamental en la refrigeración de equipos y en la gestión de gases térmicos. Por ejemplo, durante el funcionamiento del horno de clinker, que alcanza temperaturas de hasta 1400 °C, se utilizan sistemas de refrigeración que emplean circuitos de agua para prevenir el sobrecalentamiento de las estructuras del horno. (Belmonte, 2017)

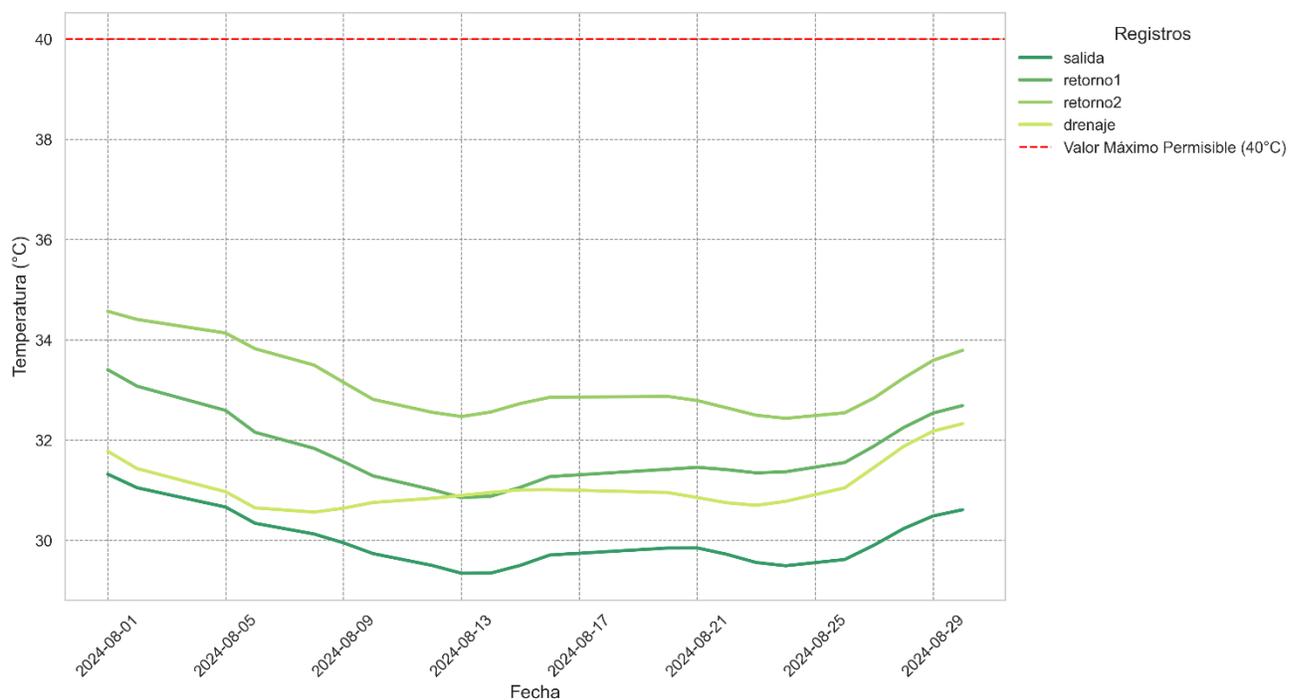
Los molinos de cemento también generan calor durante la molienda del clinker y otros materiales. Para evitar la acumulación de calor que podría afectar la calidad del producto, se utiliza agua para enfriar las cámaras de molienda. Este enfriamiento es crucial para mantener la eficiencia del proceso y garantizar que los materiales se procesen adecuadamente. Los sistemas de enfriamiento por agua incluyen torres de enfriamiento, donde el agua se enfría al entrar en contacto con el aire. El agua fría se recircula para mantener temperaturas óptimas en los equipos, lo que contribuye a protegerlos y a prolongar la vida útil de las instalaciones. (Belmonte, 2017)

La consecuencia común cuando el agua falta en el proceso ya sea agua de refrigeración o agua a pérdida, es el aumento sustancial de las temperaturas medidas en los equipos en operación, y este efecto se puede observar en las alarmas de sala de control. (Cementos Argos, 2024)

Para optimizar el uso del agua en la refrigeración de equipos, es fundamental implementar acciones de uso eficiente, como la recirculación, el reúso y la reducción del consumo. En los tres casos son necesarias dos actividades básicas: la medición y el monitoreo de la calidad del agua. La medición es la acción fundamental de cualquier programa de uso eficiente en el sector industrial. (Cortés, 1991)

7.4. Calidad del agua

En cuanto a la calidad del agua, el único parámetro que se tiene en cuenta en el sistema es la temperatura. Para asegurar su control, se monitorea en tres puntos: en el agua que sale al proceso (salida), en el tanque de retorno (retorno1), en el drenaje Z5 (drenaje) entre las 7:30 y 8:00 AM y, además, en el tanque de retorno se realiza nuevamente una medición a la 1:30 PM (retorno2). Este monitoreo permite verificar que el agua esté en una temperatura adecuada tanto para su recirculación como para su vertimiento en la quebrada. Los datos de temperatura se presentan en la siguiente gráfica, correspondiente únicamente al mes de agosto de 2024.



Gráfica 1. Temperatura del sistema para el mes de agosto 2024
Fuente: Elaboración propia

Según la Resolución 631 de 2015, en el artículo 5, "Del parámetro de temperatura en la zona de mezcla térmica. Para todas las actividades industriales, comerciales o de servicios que realicen vertimientos puntuales de aguas residuales a un cuerpo de agua superficial o a los sistemas de alcantarillado público, tendrán en el parámetro de temperatura como valor límite máximo permisible de 40.00 °C".

En la Gráfica 1, se observa que la temperatura registrada en los puntos de monitoreo "salida", "retorno1", "retorno2", "drenaje" oscila entre aproximadamente 30 °C y 35 °C. Esto indica que el sistema cumple con la normativa en cuanto a temperatura (< 40 °C), asegurando un margen de seguridad adecuado y reduciendo el riesgo de generar un impacto ambiental en el cuerpo de agua receptor. Es recomendable continuar con este control de temperatura para garantizar el cumplimiento sostenido de la regulación.

Dentro del análisis ambiental del sistema de recirculación de agua en la planta, también es fundamental garantizar la prevención y el control de posibles contaminantes que puedan comprometer la calidad del agua. Aunque no es común que ocurran derrames, se dispone de mecanismos de control para mitigar su impacto en caso de que sucedan, asegurando que el sistema opere de manera eficiente y sostenible. La gestión de grasas es importante y para su control se implementan dos estrategias claves:

Prevención: Se prioriza el manejo adecuado de grasas y aceites en los procesos, minimizando la probabilidad de derrames mediante buenas prácticas operativas y monitoreo continuo.

Control y remediación: En el caso de que las grasas lleguen al sistema, se ha construido un mecanismo de retención, una trampa de grasas diseñada para separar estos contaminantes del flujo hídrico. Estas trampas instaladas retienen por sedimentación los sólidos en suspensión y por flotación, el material graso. La trampa de grasas tiene dos compartimentos, ambos separados por una rejilla de acero inoxidable encargada de no dejar pasar sólidos. En el compartimento más grande, por donde llegan los líquidos con sólidos suspendidos, la grasa se separa al ser menos densa que el agua. Por el otro compartimento sale el agua con una menor concentración de grasas.

7.5. Estado de los medidores

En esta etapa se realizó una revisión general de todos los medidores para actualizar la información sobre su buen funcionamiento, esta se realizó con los operarios encargados del mantenimiento de los medidores, a continuación, se presenta la tabla con la información actualizada sobre el estado de los medidores:

Tabla 4.
Estado de los medidores

N° de medidor	Punto de medición	Característica
Medidor 1	Macromedidor industrial	Funciona bien
Medidor 2	Macromedidor retorno	Funciona bien
Medidor 3	Molino carbón 1- CONSUMO	No reporta datos
Medidor 4	Molino crudo 1- REFRIGERACIÓN	No reporta datos
Medidor 5		Ya no existe
Medidor 6	Molino crudo 1- REFRIGERACIÓN	No reporta datos
Medidor 7	Roldana 3 horno 1- REFRIGERACIÓN	Funciona bien
Medidor 8	Roldana 2.1 horno 1- REFRIGERACIÓN	No reporta datos
Medidor 8a	Roldana 2.2 horno 1- REFRIGERACIÓN	No reporta datos
Medidor 9	Roldana 1.1 horno 1- REFRIGERACIÓN	Funciona bien
Medidor 9a	Roldana 1.2 horno 1- REFRIGERACIÓN	No reporta datos
Medidor 13	Roldana 2 horno 2- REFRIGERACIÓN	No encontrado
Medidor 14	Roldana 3 horno 2- REFRIGERACIÓN	No reporta datos
Medidor 15	Compresores torres acondicionadoras	No reporta datos hace 5 años
Medidor 16	crudo 2-REFRIGERACIÓN	No reporta datos hace años
Medidor 17	acondicionadora 1- consumo	No reporta datos desde hace poco
Medidor 18	acondicionadora2- consumo	Funciona bien
Medidor 20	Z2- REFRIGERACIÓN	Ya no existe

N° de medidor	Punto de medición	Característica
Medidor 21	Z3- REFRIGERACIÓN	No reporta datos hace 3 0 4 años
Medidor 22	Z5-REFRIGERACIÓN	No reporta datos, nunca hay paso al medidor
Medidor 24	Lavadero de pipas	No reporta datos
Medidor 25	Riego materias primas-consumo	Funciona bien
Medidor 26	Envío TK industrial-consumo	No reporta datos
Medidor 27	Cuarto de compresores línea 2-REFRIGERACIÓN	No reporta datos
Medidor 28	Molino carbón 2- CONSUMO	Funciona bien
Medidor 29	crudo 2- CONSUMO	Funciona bien
Medidor 30	Premolienda-REFRIGERACIÓN	No reporta datos
Medidor 31	Z3- CONSUMO	Funciona bien
Medidor 32	Z4-CONSUMO	No reporta datos
Medidor 33	Z5-CONSUMO	Funciona bien

Al momento de la revisión existían 10 medidores en buen estado. Entre los medidores principales que están operando se encuentran el medidor 1 (macro medidor), medidor 2 (macro retorno), medidor 18 (acondicionadora 2), medidor 25 (riego de materias primas), y medidores secundarios: medidor 7 (Roldana 3 horno 1), medidor 9 (Roldana 1.1 horno 1), medidor 28 (molino carbón 2), medidor 29 (crudo 2), medidor 31 (Z3), medidor 33 (Z5).

Por el contrario, varios medidores no reportan datos. Entre las áreas que no tienen una medición adecuada se encuentran:

Medidores de refrigeración:

1. Molino carbón 1 - Refrigeración (Medidor 3)
2. Molino crudo 1 - Refrigeración (Medidores 4 y 6)
3. Roldanas de horno 1 - Refrigeración:
 - Roldana 2.1 (Medidor 8)
 - Roldana 2.2 (Medidor 8a)

- Roldana 1.2 (Medidor 9a)
- 4. Roldanas de horno 2 - Refrigeración:
 - Roldana 2 (Medidor 13)
 - Roldana 3 (Medidor 14)
- 5. Compresores Torres Acondicionadoras (Medidor 15)
- 6. Crudo 2 - Refrigeración (Medidor 16)
- 7. Z2 - Refrigeración (Medidor 20)
- 8. Z3 - Refrigeración (Medidor 21)
- 9. Z5 - Refrigeración (Medidor 22)
- 10. Premolienda - Refrigeración (Medidor 30)

Medidores de consumo:

- 11. Acondicionadora 1 - Consumo (Medidor 17)
- 12. Lavadero de pipas (Medidor 24)
- 13. Envío TK industrial - Consumo (Medidor 26)
- 14. Cuarto de compresores línea 2 - Refrigeración (Medidor 27)
- 15. Zona 4 - Consumo (Medidor 32)

Estos medidores que no reportan datos incluyen refrigeración y consumo de las diferentes áreas del sistema productivo de la planta, los medidores de refrigeración (por ejemplo, en el molino crudo y las roldanas) que no están funcionando bien o no están funcionando en su totalidad representan una limitación importante, ya que los sistemas de refrigeración suelen ser responsables de una parte considerable del consumo de agua. Si estos medidores no reportan datos, no es posible determinar cuánto agua se está recirculando adecuadamente en estas zonas.

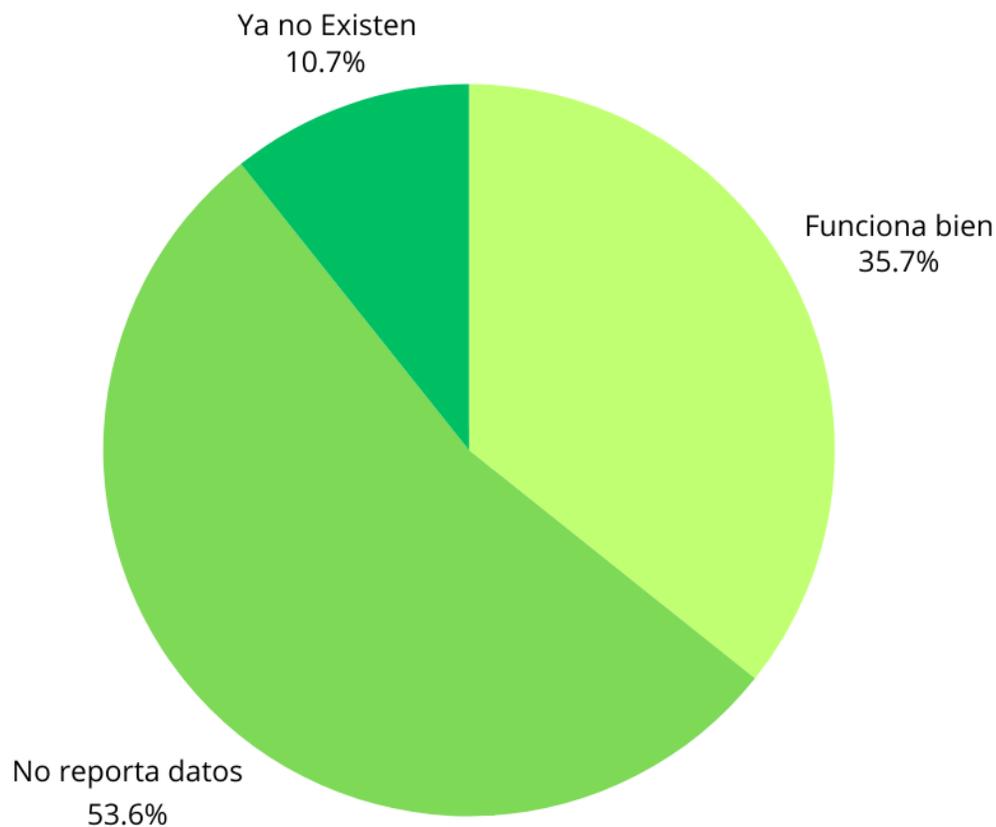
Con el estado actual, se puede inferir que los medidores que no reportan datos en áreas como acondicionadoras, lavadero de pipas, molinos y compresores están afectando directamente la capacidad de identificar pérdidas localizadas. Es decir, cualquier desviación en estas áreas se traducirá en una diferencia entre la entrada y el retorno, pero no es posible saber exactamente dónde se están produciendo las pérdidas.

Algunos medidores dejaron de funcionar y no están proporcionando datos confiables. Esto impide el control preciso sobre áreas específicas, por ejemplo, el medidor 17 de acondicionadora

1.

Debido al estado deficiente de muchos medidores locales, es importante priorizar la reparación de aquellos que están asociados a zonas de mayor consumo.

A continuación, se presenta una gráfica que recopila el estado actual de los medidores



Gráfica 2. Estado de los medidores.
Fuente: elaboración propia

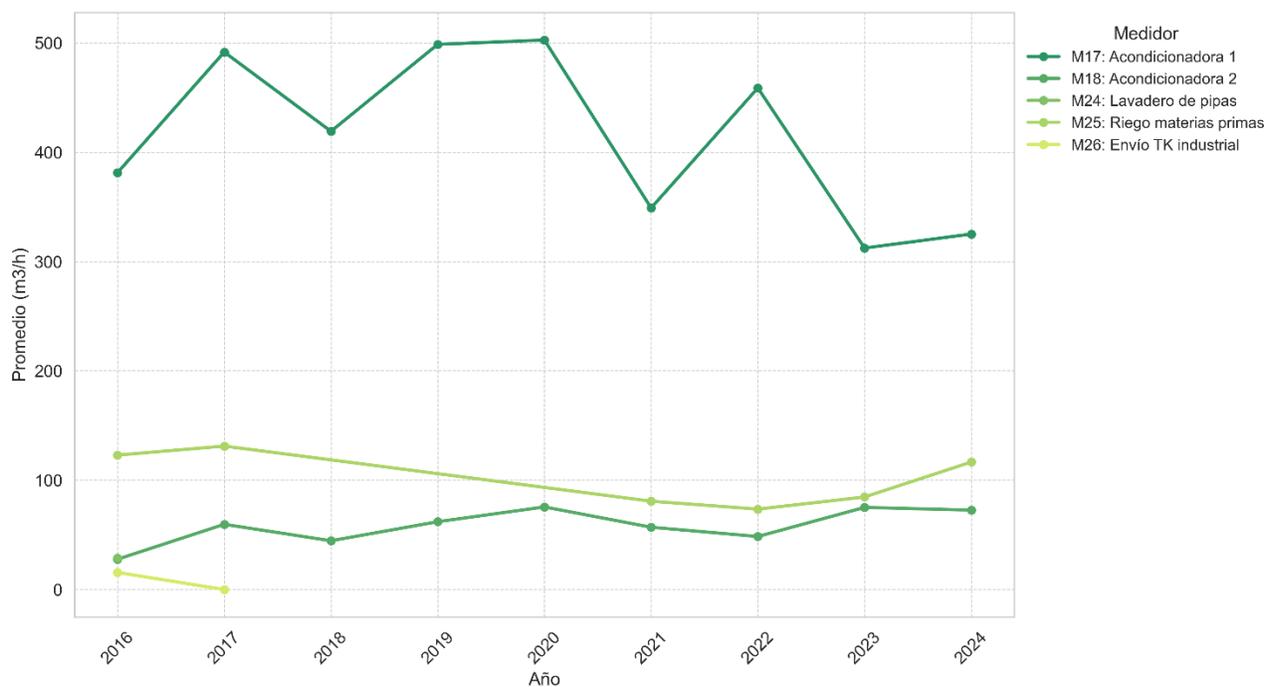
7.6. Análisis de datos históricos para los medidores

En el análisis de los medidores se ha observado un patrón importante: varios de los medidores que han registrado un alto consumo a lo largo del tiempo se encuentran actualmente fuera de servicio o se encuentran descalibrados. Estos medidores son tanto principales como secundarios y abarcan áreas importantes de la planta. A continuación, en las Tablas 5 y 6, y en las Gráficas 2, 4, 5 y 6 se presenta un análisis de los datos registrados para estos medidores.

Tabla 5.

Promedio de consumo por año para los medidores primarios (m³/h)

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
M17	381.35	491.63	419.15	498.67	502.64	349.07	458.79	312.38	325.18
M18	27.76	59.69	44.64	62.07	75.60	57.03	48.54	75.17	72.71
M24	28.79								
M25	123.00	131.24				80.83	73.59	84.70	116.65
M26	15.68	0.03							



Gráfica 3. Promedio consumo anual para los medidores principales.
Fuente: Elaboración propia

Medidor 17 (Acondicionadora 1 - Consumo)

Este medidor dejó de funcionar hace poco. Anteriormente, había registrado un consumo importante entre los medidores, indicando que el área de acondicionadora 1 es un punto crítico en términos de uso de agua. La falta de un medidor operativo en esta zona dificulta la identificación de potenciales fugas o ineficiencias, lo cual es crucial dado su alto impacto en el consumo total.

Medidor 24 (Lavadero de pipas)

Este medidor fue desmontado porque el proyecto de lavado de pipas dejó de funcionar, por lo tanto, ya no es necesario para el sistema.

Medidor 26 (Envío TK industrial-consumo)

Este sistema está fuera de uso, por lo tanto, el medidor no está en funcionamiento

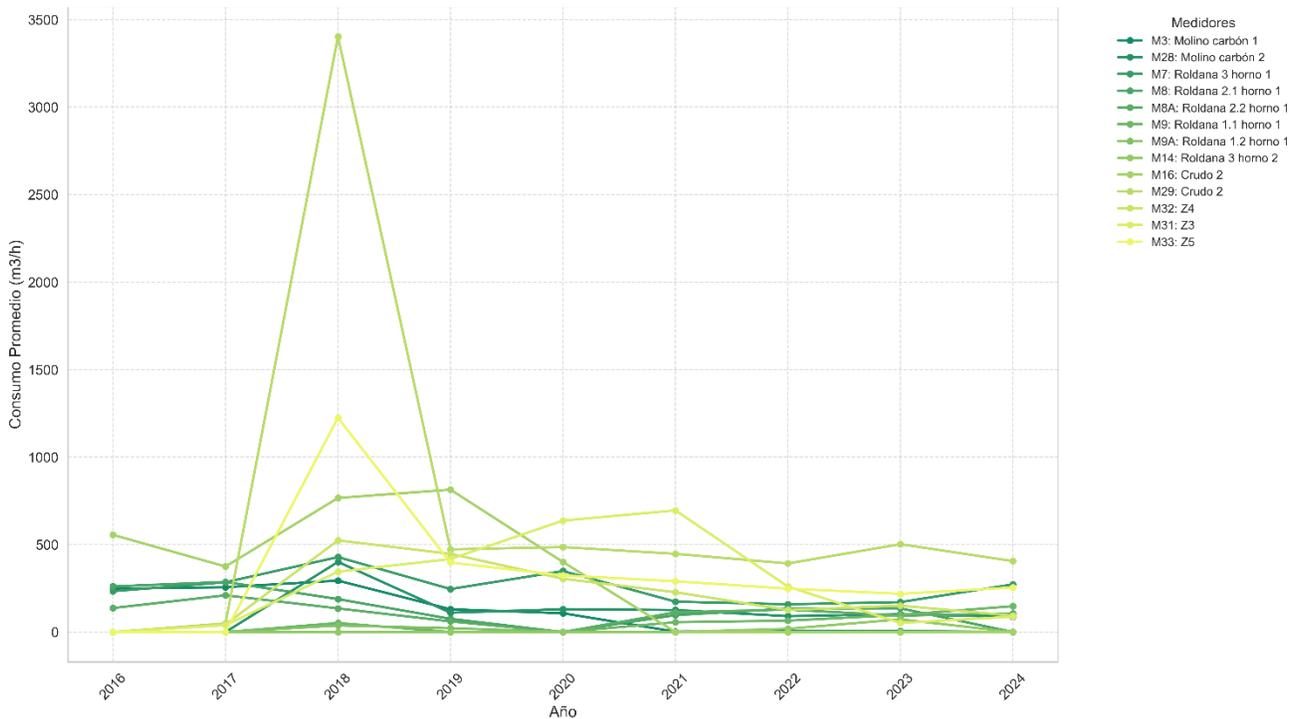
Tabla 6.

Promedio de consumo por año para los medidores secundarios (m³/h)

AÑO	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
M3	247.96	256.26	294.01	130.40	109.94	17.09	14.17	9.86	3.07
M4									
M6	150.16	172.81	190.94						
M30									
M28		0.63	555.10	117.79	145.11	131.00	96.58	162.17	143.74
M7	233.40	302.32	474.01	267.28	387.45	180.94	165.08	181.76	318.04
M8	270.60	303.90	227.83	157.86		133.36	137.06	207.60	
M8A	160.26	223.00	175.77	152.57		155.92	130.95	139.87	265.80
M9			176.20			94.19	66.40	113.32	215.82
M9A			131.21	43.79	8.41	1.57	0.57		
M14							122.34	189.36	
M13									
M15									
M16	598.26	423.28	797.64	847.79	667.09				
M27									
M29		510.80	3616.10	513.58	539.53	465.28	424.70	544.14	525.70
M20									
M21									
M32		563.64	1161.74	476.07	354.33	227.72	182.08	153.72	275.52
M31		411.00	382.88	719.77	843.54	824.77	264.94	53.16	88.30
M22	8495.89	8874.28	9454.21	7147.32	8217.62	8276.97			
M33			2449.98	397.31	352.18	314.80	248.19	227.38	278.90

Al observar el historial de los medidores secundarios, se evidencia una falta de monitoreo continuo y preciso, ya que muchos presentan datos faltantes o años sin mediciones, lo que impide obtener un panorama completo del uso del agua en el sistema. Esta falta de continuidad en las mediciones dificulta la evaluación adecuada de la eficiencia del sistema. Además, los problemas

de medición o mantenimiento son evidentes en varios medidores que muestran datos inconsistentes, lo que sugiere posibles fallas en los equipos o la necesidad de un mantenimiento adecuado. Es crucial revisar estos medidores y garantizar que estén funcionando correctamente para obtener una visión más precisa del consumo de agua, facilitando una gestión eficiente del recurso.



Gráfica 4. Promedio consumo anual para los medidores secundarios.
Fuente: Elaboración propia

En general, la Gráfica 4 evidencia una falta de consistencia en los datos de consumo de agua, con algunos medidores presentando picos inusuales que se deben a posibles fallos de medición o eventos operacionales anómalos. Al mismo tiempo, varios medidores muestran un comportamiento estable y consistente en su consumo, lo que indica una operación más controlada en esas áreas del sistema. Sin embargo, algunos medidores tienen consumos insignificantes o inexistentes, lo que sugiere que podrían estar presentar problemas. En conjunto, esta variabilidad evidencia la necesidad de mejorar el sistema de monitoreo para obtener datos más confiables que permitan una evaluación precisa del consumo y una optimización eficaz del uso del agua.

Medidor 30 (Premolienda - Refrigeración)

Este medidor no funciona bien, y está asociado con el sistema de refrigeración de la premolienda, una etapa clave del proceso que implica un volumen de agua para evitar sobrecalentamientos. El hecho de que no reporte datos implica una falta de control en el uso del agua para refrigeración.

Medidor 13 (Roldana 2 Horno 2 - Refrigeración)

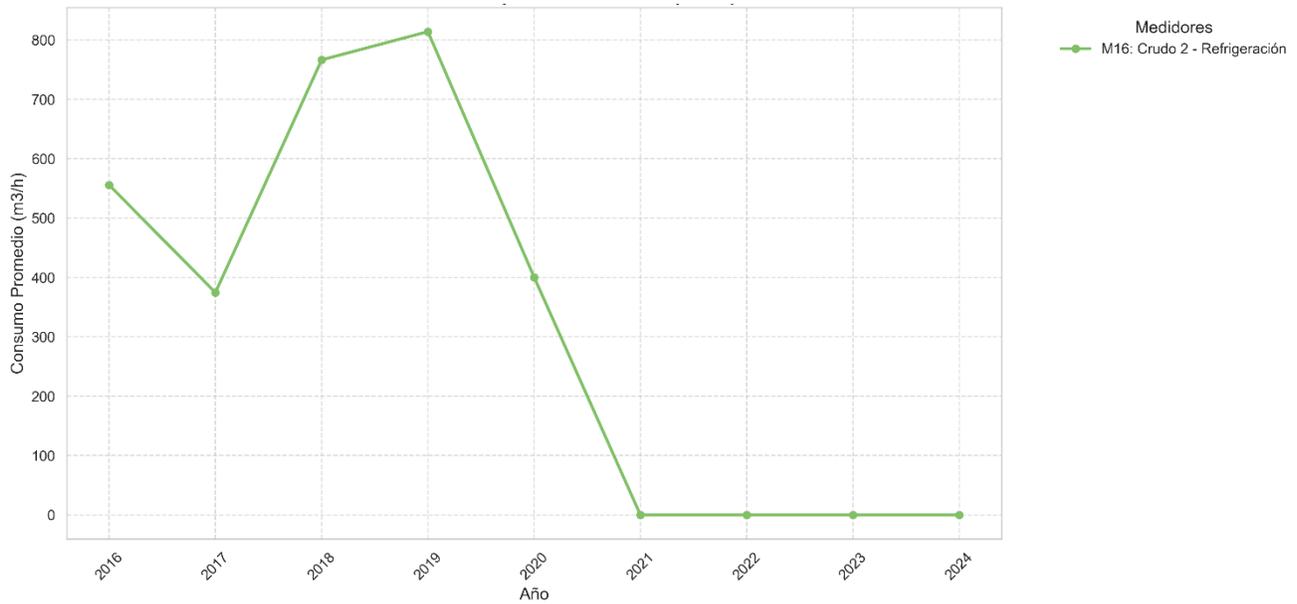
Este medidor ya no existe, pero solía registrar consumos elevados. La eliminación de este medidor impide cuantificar con precisión el agua necesaria para mantener la operación óptima y detectar problemas de ineficiencia en la refrigeración de esta sección.

Medidor 14 (Roldana 3 horno 2-Refrigeración)

Los valores de consumo solo están presentes en los años 2022 y 2024. La falta de datos en los años anteriores sugiere que este medidor no ha estado funcionando correctamente o no se ha utilizado durante un período significativo. Esta discontinuidad puede haber generado problemas en la monitorización del agua en las áreas que cubre.

Medidor 16 (Crudo 2 - Refrigeración)

Este medidor no está funcionando, a pesar de que anteriormente reflejaba un alto consumo. La refrigeración en el molino crudo 2 es esencial para mantener la calidad del producto y la eficiencia del proceso. La ausencia de este control limita la posibilidad de optimizar el sistema de refrigeración y podría derivar en pérdidas no controladas. En la siguiente grafica se presenta el promedio por año para el medidor 16.



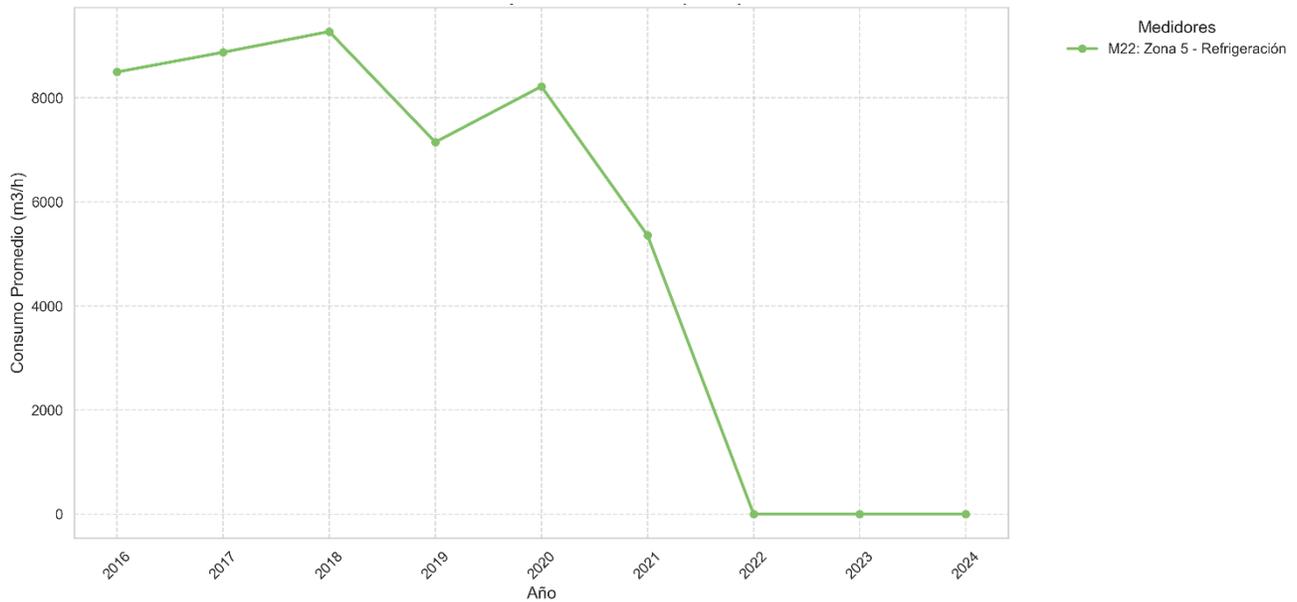
Gráfica 5. Promedio consumo anual para medidor 16
Fuente: Elaboración propia

Medidor 27 (Cuarto de Compresores Línea 2 - Refrigeración)

El medidor 27 no reporta datos, y se sabe que el cuarto de compresores es un área de alto consumo de agua para refrigeración. Sin un registro fiable, no se puede evaluar la eficiencia en la utilización del agua.

Medidor 22 (Z5 - Refrigeración)

Este medidor tampoco reporta datos, y no hay paso al medidor. Z5 ha sido un punto crítico de consumo, y la falta de medición imposibilita la identificación de posibles ineficiencias. Dada la importancia de la refrigeración en estas zonas, la falta de un registro adecuado impide una correcta evaluación del desempeño del sistema.



Gráfica 6. Promedio consumo anual para medidor 22
Fuente: Elaboración propia

7.7. Estadísticos de medidores macromedidores 1 y 2

Se analizaron estadísticos para los macro medidores 1 y 2, estos estadísticos permiten analizar el rendimiento y tomar decisiones basadas en datos sobre el sistema de recirculación de agua. Los datos para el medidor 1 se presentan en la Tabla 7

Tabla 7.

Estadístico medidor 1

Año	Promedio (m³/h)	Máximo (m³/h)	Mínimo (m³/h)	Desviación estándar (m³/h)
2016	10592	19715	3842	3864
2017	10647	29601	2372	4284
2018	10904	24023	4100	3554
2019	10154	51789	3277	4619
2020	9775	21119	3038	3613
2021	9388	28990	858	3747
2022	10037	18398	3863	3349
2023	9937	19081	3172	3451
2024	9400	17703	3104	3057

El promedio del caudal refleja un nivel "típico" de operación del sistema. La tendencia general a la baja en este promedio desde 2016 hasta 2024 sugiere que el sistema ha reducido su uso de agua para el mismo proceso.

Por otro lado, el caudal máximo representa el pico de demanda de agua en el sistema de recirculación cada año. Picos altos, como el de 2019 (51789 m³/h), junto con un promedio elevado, pueden señalar un mayor consumo de agua durante ese año. En contraste, la reducción de los valores máximos en años recientes 2023 y 2024 que fueron de 19081 m³/h y 17703 m³/h respectivamente, sugiere que el sistema está utilizando un menor volumen de agua.

Los caudales mínimos, que indican el uso mínimo de agua en cada año, han mostrado una notable consistencia, lo que indica que el sistema no suele experimentar condiciones extremas de baja operación, aunque pueden existir algunas anomalías.

La desviación estándar, que mide la variabilidad de los caudales, es un indicador clave de las fluctuaciones en el consumo de agua. Un valor alto, como el registrado en 2019 (4619 m³/h), indica una considerable variabilidad en los caudales durante ese año. Sin embargo, a lo largo de los años, los valores de desviación estándar han mostrado una tendencia a la estabilidad, con disminuciones notables en años recientes, especialmente en 2024. Esto sugiere que el sistema ha tendido a estabilizarse, presentando menos fluctuaciones extremas, lo cual es favorable para la eficiencia operativa.

De la misma manera se analizaron los estadísticos para el medidor 2, los cuales se presentan en la Tabla 8:

Tabla 8.
Estadístico medidor 2

Año	Promedio (m ³ /h)	Máximo (m ³ /h)	Mínimo (m ³ /h)	Desviación estándar (m ³ /h)
2016	6862	12567	2208	2483
2017	9316	21758	1956	3925
2018	10135	22165	4036	3262
2019	8997	44655	2471	4113
2020	9107	19698	3371	3287
2021	9160	27195	3488	3741
2022	8953	17480	3299	295
2023	8971	16311	3187	3076
2024	8788	15653	2927	275

El promedio del caudal recirculado ha fluctuado a lo largo de los años, comenzando en 6862 m³/h en 2016 y alcanzando un pico de 10135 m³/h en 2018. Sin embargo, desde 2019, se observa

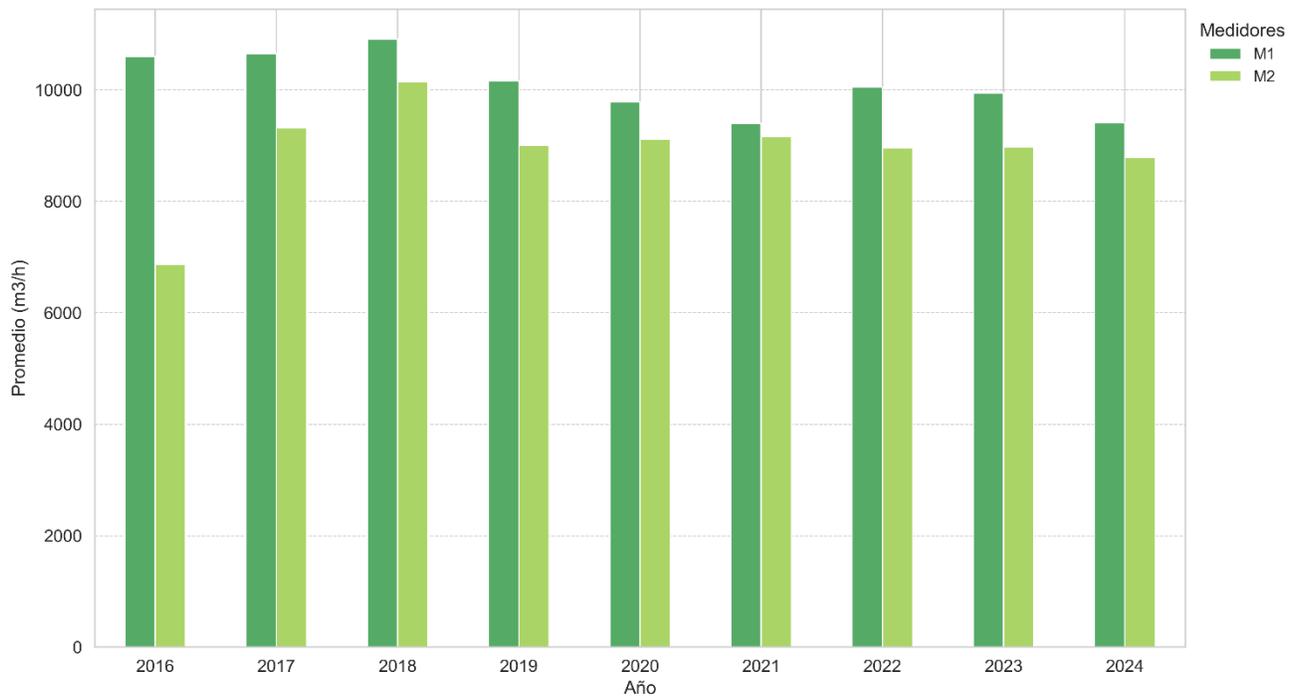
una tendencia general decreciente, con el promedio llegando a 8788 m³/h en 2024. El caudal máximo alcanzado también muestra una variabilidad significativa. En 2019, se registró un pico de 44655 m³/h, lo que indica un año de alta demanda de agua en el sistema. A partir de 2020, los caudales máximos comenzaron a disminuir, alcanzando 15653 m³/h en 2024, esto coincide con los datos del medidor 1 y muestra concordancia entre el uso del agua y la recirculación.

Los caudales mínimos han sido relativamente estables, esto indica que el sistema no experimenta frecuentemente condiciones de baja operación extrema. La estabilidad en los caudales mínimos sugiere un uso más constante de agua.

La desviación estándar, que mide la variabilidad de los caudales, muestra una notable fluctuación a lo largo de los años. En 2017, la desviación estándar alcanzó un valor alto de 3925 m³/h, indicando una gran variabilidad en el uso de agua durante ese año. Sin embargo, se observa una tendencia decreciente en la desviación estándar en años recientes, alcanzando un valor de 2758 m³/h en 2024. Esta reducción en la variabilidad sugiere que el sistema ha comenzado a estabilizarse.

7.8. Porcentaje de agua recirculada

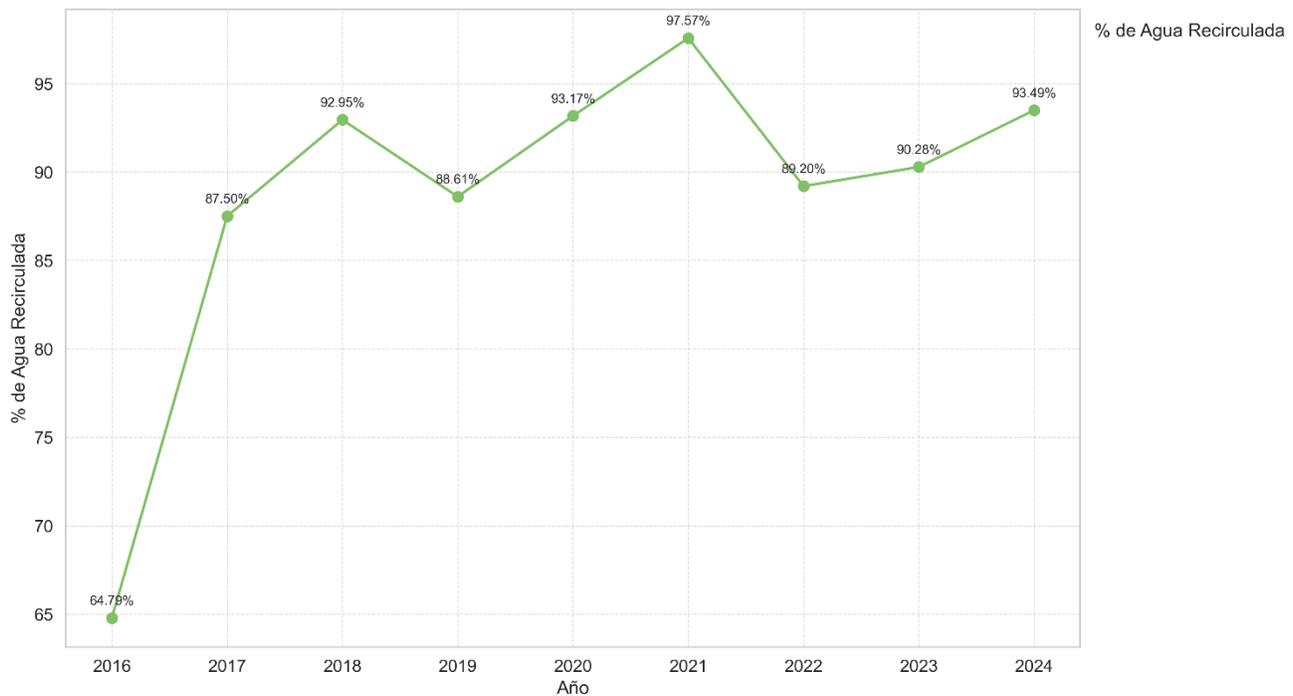
En la siguiente gráfica se muestran los promedios anuales de caudal en m³/h para los años 2016 a 2024, diferenciados entre el caudal que entra al sistema (M1) y el caudal que se recircula (M2).



Gráfica 7. Comparativo de consumo de agua en los medidores 1 (M1) y 2 (M2).
Fuente: Elaboración propia

Entre los años 2016 y 2024, el sistema parece mantener una relación estable entre el caudal que entra y el que se recicla. Esto indica que el sistema de recirculación es eficaz en reusar un alto porcentaje del agua. Sin embargo, el caudal de entrada (M1) siempre es ligeramente superior al de recirculación (M2), lo cual es esperado debido a posibles pérdidas del sistema.

Entre 2016 y 2017, parece haber una diferencia más notable entre el caudal de entrada y el de recirculación, lo que podría reflejar un menor rendimiento en la recirculación de agua durante ese período. En 2023 y 2024, se evidencia un aumento en ambos caudales, lo que sugiere un aumento en la demanda de agua para el proceso. Esta estabilidad final puede reflejar optimizaciones recientes en el sistema de recirculación. Para analizar mejor la diferencia de estos valores se calculó el porcentaje de agua recirculada, el cual se presenta en la siguiente gráfica:



Gráfica 8. Porcentaje de agua recirculada por año
Fuente: Elaboración propia

En 2016, el porcentaje de agua recirculada era relativamente bajo (64.76%), pero para 2017 aumentó significativamente a 87.50%, lo que sugiere mejoras importantes. A partir de 2018, el sistema se estabilizó en niveles altos de agua recirculada, alcanzando su punto máximo en 2019 con un 97.57%. Aunque en 2020 hubo una leve disminución a 88.61%, la recuperación en los años siguientes demuestra la resiliencia del sistema, posiblemente gracias a un mantenimiento adecuado y una rápida identificación de problemas operativos. Desde 2021, ha mostrado una tendencia positiva, alcanzando el 93.49% en 2024, lo que indica una mejora continua y un enfoque proactivo en la optimización del sistema.

En general, el sistema ha demostrado ser altamente sostenible. La estabilización en niveles superiores al 90% desde 2018 sugiere que hay un uso eficiente del agua, recirculando gran cantidad de ella. En resumen, el sistema de recirculación de agua ha logrado optimizar la reutilización del recurso, lo que contribuye a la reducción de costos y al impacto ambiental positivo de la planta.

8. Recomendaciones

Para mejorar el control y seguimiento del consumo de agua en el sistema de recirculación de la planta, es esencial enfocarse en reparar o sustituir los medidores críticos que han presentado problemas históricos. Ya que los medidores en condiciones deficientes dificultan la detección de fugas y el cálculo preciso del agua utilizada, afectando la capacidad para gestionar el recurso hídrico de una mejor manera. Un análisis de todos los medidores permitirá identificar aquellos que requieren mantenimiento, sustitución o calibración, facilitando un monitoreo más preciso y eficiente.

Además, es necesario implementar un programa de mantenimiento preventivo para asegurar que los medidores y el equipo de recirculación de agua operen sin interrupciones. Una rutina estructurada de mantenimiento contribuirá a reducir la incidencia de fugas y averías imprevistas, manteniendo el sistema de recirculación en condiciones óptimas. Complementariamente, realizar un análisis integral del consumo de agua en cada área de la planta permitirá optimizar el flujo según los datos específicos de caudal y consumo, identificando áreas con potencial de ahorro y ajustando el suministro según las necesidades reales de cada proceso.

Otro aspecto clave para la sostenibilidad de la planta y el medio ambiente es fomentar una cultura de responsabilidad en el uso del agua. A través de capacitaciones y campañas educativas, se puede sensibilizar al personal sobre el impacto del consumo de agua, promoviendo prácticas de ahorro y uso eficiente en todos los niveles. Esta conciencia permitirá al equipo colaborar activamente en la gestión eficiente del agua, contribuyendo al logro de los objetivos de sostenibilidad de la planta.

En cuanto al control y la medición, es fundamental tener un control más preciso de los flujos de agua que salen del sistema para tener precisión, medir las pérdidas y optimizar el uso del recurso. En el ámbito ambiental, es crucial realizar un seguimiento detallado del uso del agua y aplicar estrategias para su conservación. Por ello, es necesario aforar los caudales que se descargan del sistema de manera continua.

Al contar con un vertedero triangular en el tanque de rebose que se encuentra en la PTA, se puede lograr un mejor control sobre el agua que sale del sistema, ya que este tipo de vertedero permite calcular el caudal que pasa a través de él. Un vertedero triangular tiene una forma geométrica en la que el agua fluye a través de un triángulo, lo que facilita su diseño y cálculo.

El caudal se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$Q = Cd * \frac{8}{15} * \tan \frac{\theta}{2} * \sqrt{2g} * H^{5/2}$$

Donde:

- Q es el caudal (en m³/s),
- Cd es el coeficiente de descarga, que depende de las características del vertedero (generalmente entre 0.6 y 0.8),
- g representa a la gravedad con un valor de 9.81 m/s²
- H es la altura del agua sobre el vértice del vertedero (en metros).

(Jiménez Jiménez & Morocho Jiménez, 2018).

Implementar la medición del caudal de esta manera podría ayudar a tener un mayor control sobre el uso del agua en el sistema de recirculación.

9. Conclusiones

El sistema de recirculación de agua de la planta de cementos Argos Río Claro ha demostrado ser una herramienta eficiente para garantizar un manejo sostenible del recurso hídrico en sus procesos productivos. Al reutilizar la mayor parte del agua empleada en sistemas de refrigeración, el sistema logra reducir significativamente la demanda de agua, lo que representa no solo un beneficio económico, sino también un compromiso ambiental alineado con las metas de sostenibilidad de la empresa. Este enfoque contribuye a la conservación de las fuentes hídricas locales.

En términos de calidad, el sistema cumple con los estándares normativos, particularmente en lo que respecta a la temperatura del agua. Este cumplimiento asegura que el impacto sobre los cuerpos de agua receptores sea mínimo, protegiendo los ecosistemas locales y contribuyendo al cumplimiento de los objetivos regulatorios. La capacidad de mantener la calidad del agua dentro de los límites establecidos resalta la eficacia del diseño y la operación del sistema de recirculación.

Sin embargo, la evaluación ha identificado áreas críticas que representan desafíos importantes. Una de las principales limitaciones es el mal funcionamiento de los medidores en áreas de alto consumo hídrico, como los sistemas de refrigeración y acondicionamiento de materiales. Estos medidores que presentan mal funcionamiento dificultan el monitoreo preciso de los volúmenes de agua utilizados y recirculados, lo que impide identificar posibles ineficiencias, pérdidas o puntos de mejora en el sistema. Sin datos confiables, resulta complejo analizar el comportamiento real del sistema y tomar decisiones informadas para optimizar su operación.

Otro desafío identificado es la falta de control adecuado sobre los caudales de agua que salen del sistema. Esta carencia limita la capacidad de medir las pérdidas reales y de calcular con exactitud la eficiencia global del sistema. Sin una medición confiable de los caudales de salida, es difícil evaluar completamente el desempeño del sistema y garantizar que las pérdidas hídricas sean mínimas.

A pesar de estas limitaciones, el sistema de recirculación representa un avance significativo hacia un uso más eficiente del agua en procesos industriales. La capacidad de integrar un enfoque de recirculación dentro de operaciones de alta demanda hídrica, como la producción de cemento, demuestra que es posible equilibrar la eficiencia operativa con la sostenibilidad ambiental. Este equilibrio es un ejemplo de cómo las empresas pueden adoptar prácticas responsables que reduzcan su impacto ambiental sin comprometer la productividad ni la calidad de sus operaciones.

10. Referencias

Arzapalo, L. E. S., & Sanchez, A. D. P. M. A. (2023). Optimización del consumo de agua agrícola en Lima: Buenas prácticas y métodos de riego eficientes.

Barbosa Fuentes, N. A. (2016). Evaluación del sistema de recirculación de agua de una planta de cemento de Cemex Colombia ubicado en el municipio de La Calera.

Belmonte Rivas, D. (2017). Cogeneración con ciclo de cola en industria cementera.

Cementos Argos. (2018). *Programa de uso eficiente y ahorro del agua – PUEAA*. Sonson.

Cementos Argos. (2023). Reporte integrado. <https://argos.co/wp-content/uploads/2024/02/Reporte-Integrado-2023.pdf>

Cementos Argos Colombia. (2024). Acerca de cementos argos. <https://colombia.argos.co/acerca-de-argos/>

Cementos Argos. (2024). Manejo de contingencias de agua industrial. Sonsón.

Congreso de la República de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-99-1993.pdf>

Congreso de la República de Colombia. (1997). Ley 373 de 1997. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=342>

CORNARE (2019). Resolución N° 112-2909 de 2019. https://www.cornare.gov.co/boletin_oficial/2020/diciembre/res/r112-4470-2020.pdf

CORNARE (2022). Cuencas. <https://www.cornare.gov.co/cuencas/>

CORNARE (2021). https://www.cornare.gov.co/boletin_oficial/2021/marzo/res/RE-01422-2021.pdf

Cortés, F. I. A. (1991). Uso eficiente del agua. *Tecnología y ciencias del agua*, 9-22.

IDEAM (2018). Reporte de avance del estudio nacional del agua 2018. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Jiménez Jiménez, J. C., & Morocho Jiménez, J. C. (2018). Elaboración del modelo físico y la guía

metodológica para la práctica: vertederos de pared delgada, de la asignatura Mecánica de Fluidos de la Universidad del Azuay (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, Colombia: <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Uso eficiente y ahorro del agua. <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/uso-eficiente-y-ahorro-del-agua/>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2005). Resolución 1023 de 2005. https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Res1023-28-07-05_guias_ambientales.pdf

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Decreto 1480 de 2007. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=25347>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico-web.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 del 2015. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>

Presidencia de la República de Colombia. (1974). Decreto 2811 de 1974. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551>

Presidencia de la República de Colombia. (1997). Decreto 3102 de 1997. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=3333>

Presidencia de la República de Colombia. (2015). Decreto 1076 de 2015. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

Presidencia de la República de Colombia. (2018). Decreto 1090 de 2018. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=87181>

Suárez Agudelo, E. (2018). AFORO DE CAUDALES.

Anexo N. póster

<https://www.canva.com/design/DAGcmllPZHs/-N1il3gxwa6I3mtkjCkq3A/edit>