

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

Análisis de Ciclo de Vida de la potabilizadora de La Atarjea, ubicada en la ciudad de Lima

Tesis para optar por el título de ingeniera civil, que presenta la bachillera:

Mayra Lucía Montoya Flores

Asesora: Dra. Karin Bartl

Lima, enero del 2021

Resumen

El Perú se ubica entre los países con mayor disponibilidad hídrica en el mundo, sin embargo la ciudad de Lima presenta diversos desafíos para poder abastecer a la población de agua apta para el consumo humano. Debido a esto, Lima Metropolitana cuenta con un complejo sistema de suministro de agua potable el cual contempla etapas de almacenamiento, transporte, potabilización y distribución. Con respecto al sistema de potabilización, se desconoce y se subestiman los potenciales impactos ambientales asociados a los continuos procesos para potabilizar el agua, los cuales requieren numerosos insumos químicos y de energía eléctrica. La presente investigación expone el desempeño ambiental, mensual y anual, de la planta potabilizadora de La Atarjea mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para un periodo de 12 meses, desde Enero hasta Diciembre de 2016. La planta capta el agua directamente del Río Rímac y mediante procesos convencionales brinda agua potable a alrededor de 9 millones de personas dentro de un rango de 3'504 km², alcanzando una producción diaria aproximada de 1'400'000 m³/s. El alcance del estudio comprende desde la captación del agua cruda hasta su distribución a la ciudad de Lima Metropolitana, evaluando sólo la etapa de operación. La información necesaria para la elaboración del ACV fue obtenida de diversas fuentes de información que incluye el Anuario Estadístico de SEDAPAL para el año 2016, visitas y entrevistas realizadas en la planta potabilizadora y revisión de la literatura. La unidad funcional utilizada fue de 1m³ de agua potabilizada, tanto para la evaluación en cada mes de operación, así como para la evaluación anual. Para el modelamiento del ACV se utilizó el software SimaPro y la base de datos Ecoinvent v3. Asimismo, los impactos asociados a 1m³ de agua potabilizada fueron calculados para 7 categorías de impacto, empleando tres métodos: IPCC 2013, USEtox 2 y ReCiPe 2016.

Los resultados de la evaluación en la planta de La Atarjea indican que, para el año 2016, las mayores cargas ambientales estuvieron asociadas al uso de insumos químicos y por los residuos generados en los procesos de potabilización. En la categoría de cambio climático, el impacto asciende a 0.067 kg CO₂-eq / m³, siendo el uso de carbón activado el mayor contribuyente. Por otro lado, el uso de sulfato de cobre representa el 50% y 40% de los impactos totales para las categorías de eutrofización de agua dulce y marina, respectivamente. Asimismo, el 22% de los impactos para la categoría de acidificación terrestre están asociados al uso de sulfato de aluminio. En el caso de los impactos asociados a la salud humana y ecosistemas, estos son dominados por el uso de sulfato de cobre, sulfato de aluminio y los residuos generados en la potabilización del agua cruda. Finalmente, los impactos ambientales relacionados al consumo

eléctrico y el transporte de insumos hacia la planta fueron menores que el 4% del total para todas las categorías evaluadas.

En conclusión, los impactos para todas las categorías evaluadas están directamente o indirectamente vinculados al uso de químicos en los procesos de potabilización de la planta de La Atarjea. Como manera de sopesar estos impactos se recomienda en incorporar nuevas tecnologías que reduzcan el empleo del carbón activado y en optar por insumos alternos al sulfato de aluminio y sulfato de cobre tal que produzcan una menor carga ambiental en su producción, así como en realizar una debida eliminación del material excedente en los procesos de potabilización. De igual manera, que la presente investigación sea precedente para la evaluación ambiental de sistemas de agua potable en el país, de manera que eventualmente se llegue a la sostenibilidad dentro de estos sistemas incluyendo aspectos tanto económicos como sociales.



Abstract

Peru is among the countries with the highest water availability in the world, however the city of Lima presents various challenges to supply the population with water suitable for human consumption. Due to this, Lima Metropolitan has a complex drinking water supply system which includes stages of storage, transportation, purification and distribution. Regarding the purification system, the potential environmental impacts associated with the continuous processes to purify water, which require numerous chemical inputs and electrical energy, are unknown and underestimated. This investigation presents the monthly and annual environmental performance of La Atarjea water treatment plant using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology for a period of 12 months, from January to December 2016. The plant captures water directly from the Rímac River and through conventional processes it provides drinking water to around 9 million people within a range of 3'504 km², reaching an approximate daily production of 1'400'000 m³ / s. The scope of the study takes place from the collection of raw water to its distribution to Lima Metropolitan, evaluating only the operation stage. The necessary information was obtained from various sources, including the SEDAPAL Statistical Yearbook for 2016, visits and interviews carried out at the water treatment plant, and literature review. The functional unit was 1m³ of purified water, both for the evaluation for each month of operation as well as for the annual evaluation. The SimaPro software and the Ecoinvent v3.4 database were used for the LCA modeling. The impacts associated with 1m³ of purified water were calculated for 7 impact categories, using three methods: IPCC 2013, USEtox 2 and ReCiPe 2016.

The results indicate that, for 2016, the highest environmental burdens were associated with the use of chemical inputs and the waste generated in the purification processes. The results for the Climate Change category are 0.067 kg CO₂-eq. / m³, being the largest contributor the use of activated carbon. On the other hand, the use of copper sulfate represents 50% and 40% of the total impacts for the eutrophication categories of fresh and marine water, respectively. Furthermore, 22% of the impacts for the terrestrial acidification category are associated with the use of aluminum sulfate. Regarding the impacts associated with human health and ecosystems, these are dominated by the use of copper sulfate, aluminum sulfate and the waste generated in the purification of the raw water. Finally, the environmental impacts related to electricity consumption and the transport of inputs to the plant were less than 4% of the total for all categories evaluated.

In conclusion, the impacts for all the categories evaluated are directly or indirectly associated to the use of chemicals in the purification processes of La Atarjea plant. As a way of weighing these

impacts, it is recommended to incorporate new technologies that reduce the use of activated carbon and to opt for alternative chemicals to aluminum sulfate and copper sulfate that have a lower environmental load in their production, as well as to carry out a proper elimination of excess material in the purification processes. Moreover, that this investigation becomes a precedent for the environmental assessment of drinking water systems in the country, and that sustainability is reached within these systems integrating economic and social aspects.



Agradecimientos

Agradezco a mis padres, Lina y Luis Enrique, por su constante apoyo durante toda mi vida, por ser modelos para mí de perseverancia y en ayudarme a lograr mis metas. A mis tíos, Elizabeth y Eduardo, por su soporte en los inicios de mi carrera universitaria. A Kathia y Carlos, por sus buenos consejos como amigos y profesionales.

A mi asesora, Karin Bartl, por su buena disposición y paciencia, y por haberme apoyado en la elaboración de esta tesis. A Raul Zamudio, por enseñarme generosamente lo que conlleva los procesos de potabilización en la planta de La Atarjea, su aporte fue esencial en la elaboración de este trabajo de investigación. Finalmente, a SEDAPAL por posibilitarme el acceso a sus instalaciones e información necesaria.

Muchas gracias



ÍNDICE

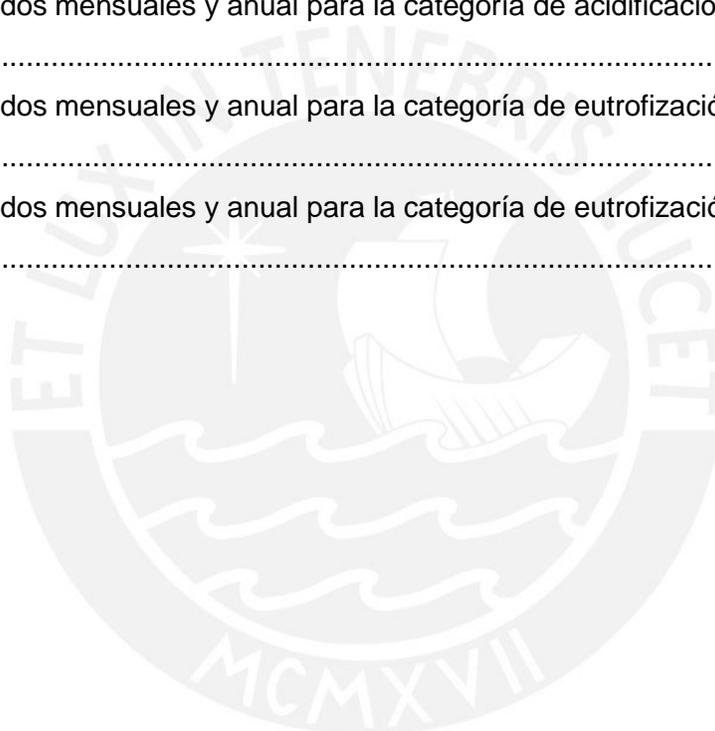
Resumen	ii
Abstract	iv
Agradecimientos	vi
ÍNDICE	vii
FIGURAS	ix
TABLAS	xi
LISTA DE ACRÓNIMOS	xiii
CAPÍTULO 1: Introducción	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Hipótesis	3
1.4 Objetivo	3
CAPÍTULO 2: Marco teórico	4
2.1 Antecedentes	4
2.2 Estado del arte	7
2.2.1 Análisis de ciclo de vida	7
2.2.1.1 Historia del ACV.....	8
2.2.1.2 Metodología del ACV	9
2.2.1.2.1 Objetivo y Alcance.....	10
2.2.1.2.2 Inventario de Ciclo de Vida.....	11
2.2.1.2.3 Análisis del Impacto de Ciclo de Vida.....	11
2.2.1.2.4 Análisis de sensibilidad	14
2.2.1.2.5 Interpretación de Resultados.....	15
2.2.2 Análisis de ciclo de vida en el Perú	15
2.2.3 Análisis de ciclo de vida en sistemas de suministro de agua potable	16
CAPÍTULO 3: Caso de Estudio	22
3.1 Procesos de potabilización en La Atarjea.....	22
3.1.1 Almacenamiento en Los Andes	23
3.1.2. Trayecto del agua cruda hacia la bocatoma	26
3.1.3. Plantas de tratamiento de agua potable La Atarjea	28

3.1.3.1 Químicos empleados en La Atarjea.....	42
CAPÍTULO 4: Metodología.....	48
4.1. Definición del objetivo y alcance.....	48
4.1.1 Limitaciones y suposiciones	49
4.2. Inventario de ciclo de vida	51
4.2.1 Agua potabilizada.....	51
4.2.1.1 Pérdidas de agua cruda	52
4.2.2 Insumos químicos	52
4.2.2.1 Carbón Activado.....	53
4.2.3 Consumo eléctrico	54
4.4.4 Transporte de insumos	54
4.2.5 Residuos generados en los decantadores.....	55
4.3. Evaluación de impactos de ciclo de vida	56
4.4. Análisis de sensibilidad	56
CAPÍTULO 5: Resultados e interpretación de resultados.....	58
5.1. Evaluación de ciclo de vida	58
5.1.1. Cambio Climático	58
5.1.2. Toxicidad humana cancerígena	60
5.1.3. Toxicidad humana no cancerígena.....	61
5.1.4 Ecotoxicidad del agua dulce.....	62
5.1.5. Acidificación terrestre	62
5.1.6. Eutrofización del agua dulce.....	63
5.1.7. Eutrofización marina.....	64
5.1.8. Análisis de sensibilidad	65
5.2. Comparativo entre categorías de impacto	66
5.3. Evaluación de toxicidad.....	68
5.4. Comparación con la literatura.....	70
CAPÍTULO 6: Conclusiones	73
Referencias	76
ANEXO 1	87

FIGURAS

Figura 2.1: Relación entre escasas de agua y estrés hídrico. Fuente: Adaptación de The CEO Water Mandate (2014)	5
Figura 2.2: Agua potabilizada en el Perú según tamaño de EPS para el 2016. Fuente: Adaptación del INEI (2018)	6
Figura 2.3: Producción neta de la planta de La Atarjea entre los años 2009 a 2016 (miles m ³). Fuente: Adaptación de Sedapal (2014; 2016)	7
Figura 2.4: Metodología para realizar un ACV. Fuente: Modificado de Friedrich (2002).....	8
Figura 2.5: Representación de las 4 fases metodológicas del ACV establecidas por la ISO 14044 Fuente: Adaptación ISO 14044 (2006b)	9
Figura 2.6: Relación entre resultados del ICV, indicadores midpoint y endpoint en la elaboración del AICV mediante la metodología ReCiPe. Fuente: Adaptado de Huijbrets et. al., 2017.....	14
Figura 3.1: Capacidad de almacenamiento en Los Andes (%). Fuente: Sedapal (2018)	24
Figura 3.2: Registro histórico de volúmenes almacenados de agua entre los años 2013 a 2018 (hm ³). Fuente: Adaptación de Sedapal (2018)	25
Figura 3.3: Planta de Tratamiento de Agua Potable La Atarjea, ubicada en el distrito de El Agustino. Fuente: Google Earth, 2017.	29
Figura 3.4: Secuencia de procesos realizados en la planta de La Atarjea. Fuente: Adaptación de Sedapal (2017)	31
Figura 3.5: Barrajes móviles ubicados a lo ancho del río Rímac. Fuente: Fotografía propia.....	32
Figura 3.6: Bocatoma N°2 ubicada en el margen izquierdo del río Rímac. Fuente: Fotografía propia.....	33
Figura 3.7: Unidades de desarenación designadas para el agua proveniente de la bocatoma N°1 Fuente: Fotografía propia.....	34
Figura 3.8: Reservorio ubicado en la zona de Santa Rosa 1 Fuente: Fotografía propia.....	35
Figura 3.9: Reservorio ubicado en la zona de Santa Rosa 2 Fuente: Fotografía propia.....	36
Figura 3.10: Obra de reparto ubicada adyacente a la Planta N°1 Fuente: Fotografía propia	37
Figura 3.11: Decantador pulsator circular de la Planta N°1 Fuente: Fotografía propia	38
Figura 3.12: Unidades de filtros de la Planta N°1 Fuente: Fotografía propia	39
Figura 3.13: Procesos realizados en la limpia de filtros dentro de La Atarjea Fuente: Fotografía propia.....	40
Figura 3.14: Decantadores pulsatores rectangulares de la Planta N°2 Fuente: Fotografía propia	41

Figura 4.1: Límites del sistema del presente estudio. Fuente: Elaboración propia	49
Figura 5.1: Resultados mensuales y anual para la categoría de cambio climático (Kg CO ₂ Eq)	59
Figura 5.2: Resultados mensuales y anual para la categoría de toxicidad humana cancerígena (Casos)	60
Figura 5.3: Resultados mensuales y anual para la categoría de toxicidad humana no cancerígena (Casos).....	61
Figura 5.4: Resultados mensuales y anual para la categoría de ecotoxicidad del agua dulce (FPA.m ³ .día)	62
Figura 5.5: Resultados mensuales y anual para la categoría de acidificación terrestre (Kg SO ₂ eq)	63
Figura 5.6: Resultados mensuales y anual para la categoría de eutrofización del agua dulce (Kg P eq).....	64
Figura 5.7: Resultados mensuales y anual para la categoría de eutrofización del agua marina (kg N eq).....	65



TABLAS

Tabla 2.1: Resumen de estudios que aplicaron la metodología ACV en sistemas de agua potable.....	21
Tabla 3.1: Origen de la oferta del recurso hídrico para la ciudad de Lima en el año 2016 (hm ³). Fuente: Observatorio del agua (2019).....	24
Tabla 3.2: Calidad de agua del río Rímac (2016) y valores permisibles propuestos por la ECA para consumo humano. Fuente: Fuente: Adaptación de INEI 2018 y MINSa 2011.....	27
Tabla 3.3: Características del cloruro férrico empleado en La Atarjea. Fuente: Fichas técnicas Sedapal (2019)	42
Tabla 3.4: Características del sulfato de aluminio empleado en La Atarjea. Fuente: Fichas técnicas Sedapal (2019)	43
Tabla 3.5: Características del sulfato férrico empleado en La Atarjea. Fuente: Fichas técnicas Sedapal (2019)	43
Tabla 3.6: Características del carbón activado empleado en La Atarjea. Fuente: Fichas técnicas Sedapal (2019)	46
Tabla 3.7: Características del cloro empleado en La Atarjea. Fuente: Fichas técnicas Sedapal (2019)	47
Tabla 4.1: Matriz energética peruana para el año 2016. Fuente: Modificado de Vázquez et al. (2015)	50
Tabla 4.2: Producción bruta y neta de la planta de La Atarjea para el año 2016. Fuente: Sedapal, 2017.....	51
Tabla 4.3: Pérdidas de agua cruda mensuales dentro de los procesos de potabilización de La Atarjea para el año 2016 (m ³). Fuente: Sedapal, 2017.....	52
Tabla 4.4: Químicos empleados en los procesos de potabilización de La Atarjea para el año 2016. (Toneladas). Fuente: Sedapal ,2017	53
Tabla 4.5: Consumo de energía eléctrica mensual de La Atarjea para el año 2016. Fuente: Sedapal, 2017.....	54
Tabla 4.6: Distancias consideradas para el transporte de insumos químicos hacia La Atarjea (km).	55
Tabla 4.7: Metodologías y categorías de impacto analizadas en el presente estudio	56
Tabla 4.8: Insumos necesarios para modelar la producción de carbón activado. Fuente: Adaptado de Kim et al. (2018).....	57

Tabla 5.1: Resultados mensuales y anuales obtenidos para las distintas metodologías y categorías de impactos evaluadas en el presente estudio	58
Tabla 5.2: Comparativo entre los resultados obtenidos en cada categoría de impacto evaluada para los escenarios 1 y 2.	66
Tabla 5.3: Resumen de resultados para cada categoría de impacto evaluada indicando la contribución de los impactos	68
Tabla 5.4: Resultados empleando los dos distintos factores de caracterización empleados por UseTox para todo el año 2016	68
Tabla 5.5: Comparativo entre los distintos factores de caracterización para las tres categorías evaluadas por UseTox	69
Tabla 5.6: Comparativo de consumo eléctrico, uso de bombeo y capacidad de potabilización entre distintas plantas convencionales	70
Tabla 5.7: Comparativo de categorías de impacto entre distintas plantas convencionales	71



LISTA DE ACRÓNIMOS

ACV - Análisis de Ciclo de Vida

AICV - Análisis de Impacto de Ciclo de Vida

AT – Acidificación Terrestre

CC – Cambio climático

CML - Centre for Environmental Studies

DBO - Demanda Biológica de Oxígeno

DQO - Demanda Química de Oxígeno

EAD – Ecotoxicidad del agua dulce

ECA - Estándares de calidad ambiental para el agua

EPS - Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento

ETAD – Eutrofización del agua dulce

ETAM - Eutrofización del agua marina

ICV - Inventario de ciclo de vida

ISO - Organización Internacional de Estandarización

MINAM – Ministerio Peruano del Medio Ambiente

MINSA - Ministerio de Salud

MM3 - Millones de metros cúbicos

PELCAN - Red Peruana Ciclo de Vida y Ecología Industrial

PUCP – Pontificia Universidad Católica del Perú

Ppm – Partes por millón

PTAP - Planta de tratamiento de agua potable

PTAR - Planta de tratamiento de aguas residuales

SEDAPAL - Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima

SETAC- Society of Environment Toxicology and Chemistry

THC – Toxicidad humana cancerígena

THNC - Toxicidad humana no cancerígena

TRACI - Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Generalidades

En el año 2012, el Perú logró una oferta hídrica de 2'482'351 millones de metros cúbicos (INEI, 2018), ubicándolo entre los países con mayor disponibilidad de agua en el mundo (WWF, 2014). La ciudad de Lima, ubicada en el desierto costero de la vertiente del pacífico, alberga cerca de la tercera parte de la población total del Perú (INEI, 2018). Esta ciudad tiene uno de los ecosistemas más áridos del mundo, siendo esta parte de la cuenca del pacífico peruano, la cual cuenta con sólo el 1.5% de los recursos hídricos totales del país (INEI, 2018).

La demanda hídrica en el Perú se divide en dos tipos de uso: consuntivo y no consuntivo. Se define uso consuntivo a la extracción de la fuente hídrica de su lugar de origen, sin ser devuelta, y al uso no consuntivo la utilización del agua desde su fuente de origen, sin removerla (Bernex et al., 2017). En el 2016, el 89% del uso consuntivo del agua se debió a la agricultura, 9% al uso poblacional y 2% para la minería e industrias (INEI, 2018). En el caso de uso no consuntivo, el 99% fue destinado a la generación de energía y el 1% al uso acuícola, recreativo, turístico entre otros (INEI, 2018).

La producción de agua potable en la ciudad de Lima es realizada mediante la captación de agua por medio de fuentes superficiales y subterráneas. En el año 2016 se registró que el 21% de agua potabilizada provenía de fuentes subterráneas mientras que el 79% por medio de fuentes superficiales (SEDAPAL, 2017). En el caso de potabilización del agua de fuentes superficiales, Lima cuenta con tres plantas de tratamiento de agua cruda, todas administradas por la empresa prestadora de servicios de saneamiento SEDAPAL. La planta más grande, La Atarjea, ubicada en el distrito de El Agustino, proveen el 71% de agua potable producida en esta ciudad (SEDAPAL, 2017).

El agua potabilizada en la planta de La Atarjea proviene del río Rímac, fuente hídrica que es regulada todos los meses del año. Su trayectoria empieza desde los 5500 msnm en los Andes hasta desembocar en el Océano Pacífico. Durante su recorrido, el agua se ve alterada por contaminantes emitidos por mineras, sectores agrícolas y pobladores que se ubican a lo largo de las riberas del río y sus afluentes, los cuales perjudican severamente la calidad del agua (Sedapal, 2018). Además, eventos climatológicos tales como sequías y precipitaciones intensas que ocurren en la cuenca media – alta del río Rímac ponen en riesgo la infraestructura de la planta tal como el continuo abastecimiento.

Debido a los cambios que sufre la calidad del agua al momento de llegar a las bocatomas de La Atarjea, esta necesita de diversos procesos que requieren del uso de energía eléctrica y cuantiosos insumos químicos para obtener y distribuir agua apta para el consumo humano (Sedapal, 2018). En el 2015, Vargas Medina, ex Gerente General de Sedapal, manifestó que debido al incremento de la contaminación del río Rímac, SEDAPAL reportó un incremento en los costos de operación vinculados a procesos de potabilización en La Atarjea en 30 millones de soles, todo esto como manera de garantizar la calidad del agua potabilizada (El Comercio, 2015).

Este continuo y complejo sistema de potabilización realizado en La Atarjea contribuye, directa e indirectamente, a potenciales impactos ambientales los cuales hasta el momento son desconocidos. Una herramienta útil para la evaluación ambiental de la planta consiste en llevar a cabo un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), siguiendo las pautas establecidas por las normas internacionales ISO 14040 y 14044 (ISO, 2006a; 2006b). De esta manera, se podrá identificar debilidades ambientales en el sistema y así poder proponer alternativas en la mitigación de impactos.

1.2 Justificación

Al momento de diseñar o realizar mejoras en los procesos de potabilización, se suelen considerar aspectos tecnológicos y económicos, mientras que se desconocen y se subestiman los potenciales impactos ambientales asociados a los continuos procesos de potabilización. Actualmente, en el Perú solo hay un estudio relacionado al empleo de la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida orientados al rubro de saneamiento, en procesos de purificación de aguas crudas (Cáceres, 2016). Analizar y encontrar deficiencias ambientales en el sistema de potabilización del agua ayudaría a dar paso a futuros cambios en donde se evaluaría proponer nuevos procesos y optar por insumos que contribuyan al mejoramiento en la reducción de impactos ambientales, especialmente en Lima donde se vive un constante estrés hídrico.

Con los resultados de esta investigación se desea incentivar en futuros estudios similares en otros puntos del país, así como en tomar en cuenta óptimos diseños de infraestructura y procesos de potabilización que sean sostenibles en el tiempo. De igual manera, optar por mejoras en el uso de energía eléctrica, materiales y la debida gestión de eliminación de efluentes lo cual podría generar reducciones en los costos de operación del sistema. Esto, además, generaría prestigio en la empresa que lo elabore, mostrando así responsabilidad social y medioambiental.

1.3 Hipótesis

Los continuos procesos de potabilización requieren de constante consumo de químicos y energía eléctrica los cuales generan directa e indirectamente impactos al ambiente. Un inapropiado manejo de los residuos obtenidos durante la potabilización del agua cruda podría generar impactos directos a ecosistemas y a la salud de los seres humanos.

1.4 Objetivo

El objetivo principal de esta investigación es llevar a cabo el ACV del agua potabilizada en La Atarjea, desde que el agua es captada en las bocatomas hasta que esté disponible para su distribución, considerando sólo la etapa de operación. De esta forma, se podrá evaluar cuantitativamente las potenciales cargas ambientales asociadas al sistema de potabilización siguiendo las normativas ISO 14040 y 14044.

Los objetivos específicos son:

- Elaboración de inventario de entradas y salidas del sistema en estudio a partir de datos de campo y de la literatura.
- Efectuar el ACV del proceso operativo de la planta de La Atarjea, mensual y anual, y analizar siete distintas categorías de impacto.
- Identificar las deficiencias medioambientales dentro de los procesos de potabilización.
- Realizar un análisis de sensibilidad como manera de conocer la fiabilidad de los resultados del ACV.
- Brindar recomendaciones tal que se pueda mitigar los potenciales impactos ambientales encontrados.

CAPÍTULO 2: Marco teórico

2.1 Antecedentes

El agua dulce es un elemento esencial para la vida, con disponibilidad limitada en el mundo y se ve comprometida por diversos agentes que alteran su calidad y cantidad (OMS, 2019). Diversos factores intensifican el uso del agua dulce: crecimiento poblacional, desarrollo económico, cambio climático, etc. Esto provoca que la actual demanda mundial del agua se encuentre en 4´600 km³/año, con un incremento proyectado del 20% al 30% para el 2050 (Burek et al., 2016). El mayor uso de agua mundialmente se da en la agricultura (69%), seguidos por el uso industrial (19%) y doméstico (12%) (FAO, 2016).

Alrededor del 55% de la población mundial se encuentra viviendo en las ciudades del mundo (UN, 2018) y, según la UNDESA (2017), se prevé que para el año 2050 la población mundial llegue a 9,800 millones de habitantes, viviendo las dos terceras partes en las ciudades. Con respecto a grandes ciudades (mayores a 750´000 habitantes), el 78% de estas ciudades dependen primordialmente de fuentes hídricas superficiales, 20% de fuentes subterráneas, y 2% de sistemas de desalinización (McDonald et al., 2014). Ciudades como Ámsterdam disponen del 67% de agua potabilizada por medio de fuentes superficiales y el resto de fuentes subterráneas (Waternet, 2019), mientras que, en la Ciudad de México, el 68% de agua potable proviene de fuentes subterráneas (Monroy, 2013). El 25% de las fuentes de agua en grandes ciudades se encuentran bajo estrés hídrico, del cual el 22% y 39% de las fuentes superficiales y subterráneas se encuentran afectadas, respectivamente (McDonald et al., 2014). Se estima que 4 mil millones de personas se encuentran bajo estrés hídrico como mínimo un mes al año, mayormente en ciudades donde el crecimiento urbano va en aumento (Mekonnen et al., 2016), lo cual podría incrementarse de 4,8 a 5,7 billones para el 2050 (Burek et al., 2016).

Se define como estrés hídrico la capacidad o carencia de satisfacer la demanda humana y ecológica de agua dulce debido a diversos aspectos físicos tales como disponibilidad, calidad y accesibilidad (The CEO Water Mandate, 2014). La escasez de agua se refiere a la abundancia o falta volumétrica de recursos hídricos en cierto lugar. Esta se determina analizando el volumen de agua consumida por el ser humano en contraste con el volumen de recursos hídricos disponible en un área determinada (The CEO Water Mandate, 2014). Mientras que la escasez de agua es un parámetro objetivo que sólo analiza el volumen de agua dulce disponible en cierto lugar, independientemente de si esta sea apta o no para el uso humano o ecológico, el estrés

hídrico es un concepto más amplio el cual contempla escasez de agua (disponibilidad), calidad y acceso a los recursos hídricos (ver Figura 2.1).

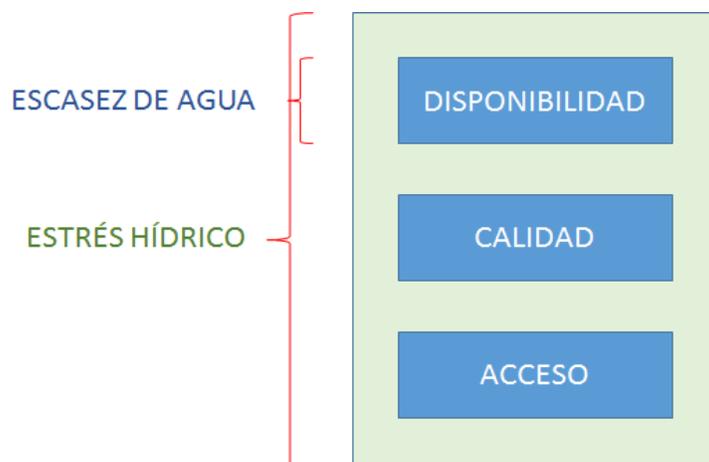


Figura 2.1: Relación entre escases de agua y estrés hídrico.

Fuente: Adaptación de The CEO Water Mandate (2014)

Diversos estudios catalogan a la ciudad de Lima bajo un constante estrés hídrico (Aquafondo, 2016; Burek et al., 2016; McDonald et al., 2014; Mekonnen et al., 2016). Al realizar el análisis de esta situación mediante la definición de estrés hídrico explicada previamente, se realizaron diversos hallazgos.

En primer lugar, refiriéndonos a disponibilidad hídrica, Lima tiene un promedio de precipitación anual de 8 mm y su mayor fuente de obtención de agua, el río Rímac, tiene un caudal natural anual de 7.87 m³/s. La disponibilidad hídrica natural no alcanzan la demanda anual aproximada de agua de 26.86 m³/s registrada para la ciudad de Lima (Sedapal, 2014).

En segundo lugar, respecto a la calidad de agua, esta se encuentra altamente contaminada convirtiendo el agua no apta para el consumo humano y producto de ello la mayor parte de la flora y fauna del río Rímac ha desaparecido (ANA, 2016c).

Finalmente, la distribución y asequibilidad de agua potable es muy desigual con respecto a los diferentes niveles socioeconómicos encontrados en la ciudad. La población crece a 1.5% al año tomando como territorio de expansión las periferias de la ciudad, del cual las situaciones son adversas (Sedapal, 2014). En ellas se encuentra mayormente personas de bajos recursos las cuales carecen de red pública de agua potable y alcantarillado (loris, 2017)

Sin embargo, a pesar de que la ciudad de Lima se encuentra bajo estrés hídrico, esta es la ciudad con mayor producción de agua potable en el país (INEI, 2018). En el año 2016, la producción total de agua potable en el Perú fue de 1'411'027 miles de metros cúbicos (INEI, 2017). En la ciudad de Lima, la empresa Sedapal dotó de agua potable ese mismo año con 714'745 miles de metros cúbicos, de los cuales 511'360 miles de metros cúbicos provinieron de las potabilizadoras ubicadas en La Atarjea, y el agua potable restante por medio de otras fuentes, en su mayoría subterráneas (INEI, 2018). En la Figura 2.2 se aprecia que el 51% de agua potabilizada en el Perú proviene de la empresa prestadora de servicios de saneamiento SEDAPAL S.A. y que el 36% del total de agua potabilizada en el Perú se da en las plantas potabilizadoras de La Atarjea.

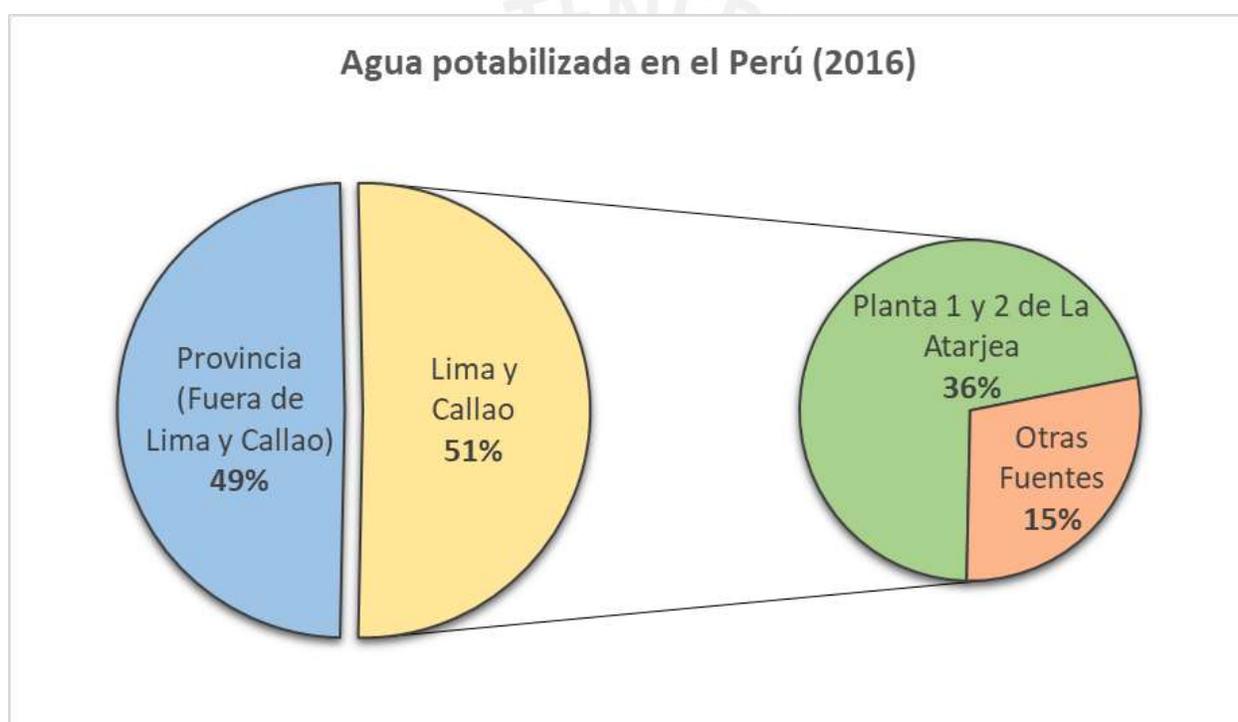


Figura 2.2: Agua potabilizada en el Perú según tamaño de EPS para el 2016. Fuente: Adaptación del INEI (2018)

La producción de agua potable anual por medio de la potabilizadora de La Atarjea ha sido relativamente constante en los últimos 8 años (ver Figura 2.3). Esto se debe a que la planta trabaja a su máxima capacidad producto de la alta demanda de la población por agua potable (Sedapal, 2017). Asimismo, la planta no ha tenido mejoras o ampliaciones significativas las cuales puedan aumentar la capacidad de producción. Para sopesar la demanda de la población por agua potable, en los últimos años se ha incrementado la explotación de agua por medio de

fuentes subterráneas, y a su vez desde el año 2002 entra en funcionamiento la planta potabilizadora de Chillón, la cual sólo opera en épocas de avenida, y en el 2014 se crea la planta potabilizadora de Huachipa, la cual provee de agua potable la parte norte de la ciudad (Sedapal, 2017).

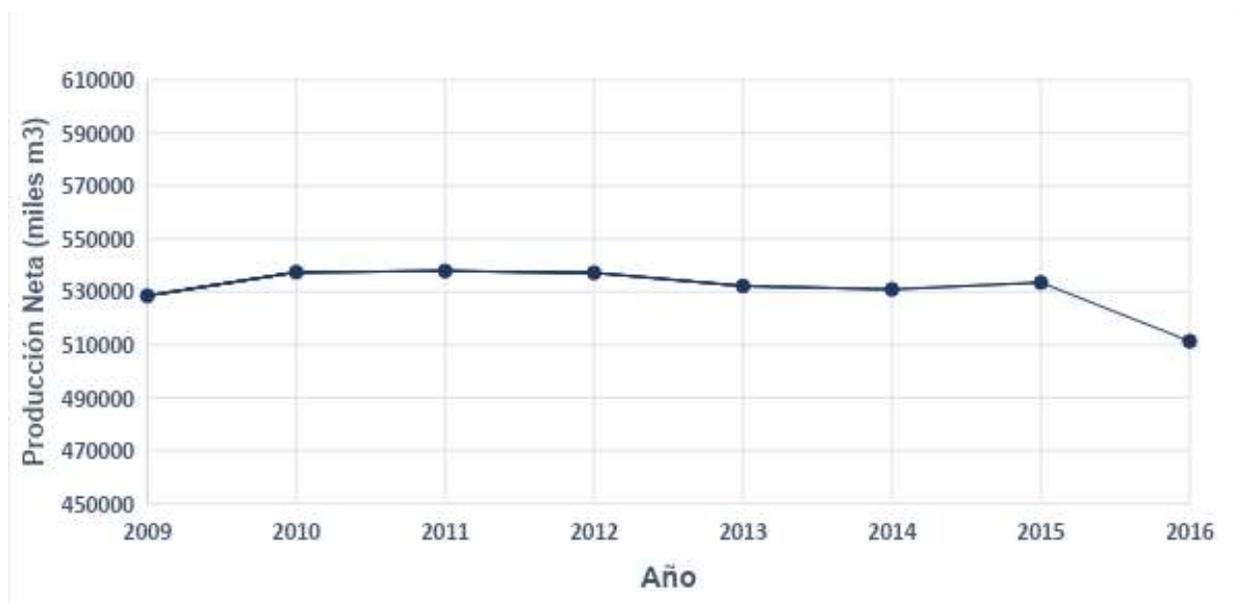


Figura 2.3: Producción neta de la planta de La Atarjea entre los años 2009 a 2016 (miles m³). Fuente: Adaptación de Sedapal (2014; 2016)

2.2 Estado del arte

2.2.1 Análisis de ciclo de vida

El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología que permite cuantificar e identificar los impactos ambientales generados por un producto, proceso o actividad analizando todas las etapas de su ciclo de vida, desde la cuna hasta su fin de vida (Ver figura 2.4), de manera holística (ISO, 2006a). En los siguientes subcapítulos se explicará la historia y la metodología empleada al realizar un ACV.

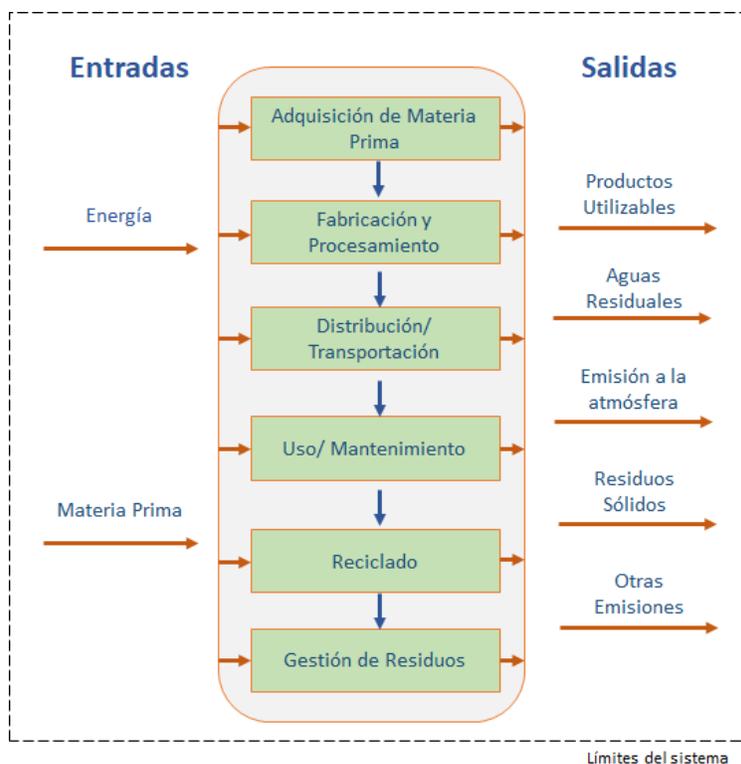


Figura 2.4: Metodología para realizar un ACV. Fuente: Modificado de Friedrich (2002)

2.2.1.1 Historia del ACV

La evolución de la implementación del método ACV empieza desde los fines de los 1960 e inicios de los 1970 cuando se genera interés en Estados Unidos y Europa sobre la limitada disponibilidad de recursos naturales y energéticos, al igual que el progresivo incremento de la generación de residuos sólidos (McManus et al., 2015). Inicialmente, los métodos orientados al análisis de ciclo de vida fueron implementados por compañías interesadas en determinar los impactos ambientales (principalmente ocasionados por la fuente de energía utilizada) asociados a los diferentes tipos de empaquetado utilizados en sus productos, teniendo fines comparativos (Curran et al., 2015; Bjørn et al., 2018). Los ACVs realizados en 1970 y 1980 poseían diferentes metodologías y carecían de un marco teórico común, lo cual impedía que fuera utilizada como una herramienta confiable e universal (Guinee et al., 2010). Es a partir de los inicios de los años 1990 surge la denominación "Análisis y Evaluación de Ciclo de Vida", y en 1993 se funda un marco teórico común, nombrado "Código de Práctica para ACV", resultado de dos conferencias internacionales organizada por SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) en Estados Unidos y Europa (Klöpffer et al., 2014). Para fines de los 1990 los estándares SETAC

fueron reformados y adoptados por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) como parte de la familia ISO 14000, implementada por el comité técnico 207, grupo encargado en desarrollar normas de gestión ambiental (Finkbeiner, 2014 siendo el ISO 14040 (2006a) y el ISO 14044 (2006b) los dos principales estándares utilizados para la realización de un ACV. Esto dio a pie que el uso de ACV tomará aceptación mundial por empresas públicas y privadas, siendo actualmente una de las herramientas de evaluación ambiental más aceptada para productos, procesos o servicios (Finkbeiner, 2014).

2.2.1.2 Metodología del ACV

Un ACV cuenta con cuatro fases: la fase de definición de objetivo y alcance, la fase de evaluación de inventario, la fase de evaluación de impacto y la fase de interpretación de resultados (ISO, 2006a; ISO, 2006b). Debido a que cada fase del ACV requiere del resultado de las otras fases para obtener resultados consistentes y concluyentes, se formula que este procedimiento es iterativo (ver Figura 2.5). Un ejemplo para explicar la naturaleza iterativa del ACV es que a medida que se vaya recolectando datos e información sobre el estudio a realizar, puede que el alcance inicial sufra correcciones, todo esto para cumplir con los objetivos originalmente establecidos al momento de realizar dicho estudio (ISO, 2006a).



Figura 2.5: Representación de las 4 fases metodológicas del ACV establecidas por la ISO 14044 Fuente: Adaptación ISO 14044 (2006b)

2.2.1.2.1 Objetivo y Alcance

La primera fase consiste en definir el objetivo y el alcance, así como en definir unidad funcional y los límites del sistema. La definición del objetivo del estudio debe contener las razones por las cuales se desea realizar el estudio, tal como el ámbito de aplicación y la audiencia en alcance (Curran, 2015; ISO, 2006a; 2006b).

El alcance debe ser lo más específico posible de manera que aborde las necesidades del objetivo establecido. La ISO 14044 establece pautas sobre lo que el alcance debe incorporar, dentro de los cuales se puede encontrar la definición de la unidad funcional y en determinar los límites del sistema del estudio, además de incluir datos necesarios, limitaciones, la calidad de los datos, entre otros.

Se define la unidad funcional como "una descripción cuantificada del rendimiento de la producción de un bien o servicio, siendo empleada como una unidad de referencia" (Weidema et al., 2004). Es decir, la unidad funcional proporciona una referencia cuantitativa a la cual se relacionan los datos de entrada y de salida que se delimitan en el alcance (Curran, 2015) y esta a su vez debe ser consistente con el objetivo y el alcance del estudio (ISO, 2006a, 2006b). La unidad funcional también permite analizar y comparar distintos ACVs de bienes o servicios (Rebitzer et al., 2004), sólo si estos comparten una metodología semejante (ISO, 2006b).

Debido a que el sistema en estudio puede ser complejo, es fundamental establecer límites para que el modelamiento del ACV comprenda las etapas más importantes. Estos límites, conocidos como límites del sistema, definen qué elementos deben ser parte del modelamiento del ACV (ISO, 2006a). Dichos elementos, conocidos como procesos unitarios, son los componentes base que conforman el estudio y en cada uno se cuantifica y asigna datos de entradas y salidas propias de cada proceso (Rebitzer et al., 2004; Curran, 2015). Tillman et al. (1994) sugiere que los límites del sistema deben estar relacionados con el área geográfica, un horizonte de tiempo, y delimitación del inicio y fin de la aplicación del ACV.

Según la ISO (2006a), en los últimos años se han desarrollado dos diferentes enfoques al momento de realizar ACV: uno que cuantifica y atribuye potenciales impactos ambientales a un producto o servicio en particular, y otro que evalúa las consecuencias medioambientales producto de cambios entre los diferentes sistemas vinculados a un producto o servicio, como resultado de la variación en la producción del mismo. Estos enfoques se denominan como atribucional y consecuencial, respectivamente. Mientras que el enfoque atribucional es un estudio a micro escala y abarca un proyecto o producto en específico, el enfoque

consecuencial es más complejo debido a que el límite del sistema en estudio es más amplio, tomando en cuenta aspectos económicos como coste marginal, elasticidad de oferta y demanda, entre otros (Brander et al., 2009; Curran ,2015).

2.2.1.2.2 Inventario de Ciclo de Vida

En la etapa de Inventario de Ciclo de Vida se colecciona y cuantifica flujos de entrada y de salida que son parte de los procesos unitarios establecidos dentro de los límites del sistema (ISO, 2006a). Estos flujos son componentes de la biósfera (p. ej. Recursos naturales, energía, etc.) tanto como de la tecnósfera (p. ej. Emisiones a la atmosfera, desechos, etc.)

Para poder elaborar el ICV, es preciso contar con datos cualitativos y cuantitativos tal que provengan de fuentes confiables. Además, se requiere establecer el tipo de información a recopilar para los distintos procesos unitarios del sistema. Este tipo de información se clasifica en datos primarios y secundarios. Con respecto a los datos primarios, estos pueden ser obtenidos por medio de mediciones directas, cálculos o estimaciones provenientes de la fuente de la cual se realiza el estudio, y los datos secundarios de la literatura, bases de datos (P.ej. Ecoinvent, agri-footprint, etc.), softwares (p.ej. SimaPro, GaBi, etc.) entre otros (Weidema et al., 2003). Todo el flujo de entradas y salidas para cada proceso unitario se relacionan a la unidad funcional asignada en la primera etapa del ACV del estudio.

Para el modelamiento del presente estudio se empleó el uso de SimaPro 8.5.2.0, software desarrollado por Pré Consultants. Este programa es actualmente líder en el rubro de la industria y la academia para la elaboración de ACVs por casi 30 años, realizando un modelamiento de manera sistemático y transparente (Goedkoop et. al., 2016). SimaPro contiene diversas bases de datos, entre ellas Ecoinvent v3 la cual fue empleada en este estudio. Esta base de datos contiene más de 17'000 procesos unitarios enfocados en áreas de energía, agricultura, transporte, productos químicos, entre otros (Ecoinvent, 2019).

2.2.1.2.3 Análisis del Impacto de Ciclo de Vida

La fase de Análisis de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) tiene como objetivo evaluar cuantitativamente la importancia de los potenciales impactos ambientales asociados al ciclo de vida del estudio, empleando los resultados obtenidos en el ICV (ISO, 2006a). De acuerdo a la ISO (2006b), para poder elaborar de manera efectiva esta etapa se cuenta con fases obligatorias (selección, clasificación y caracterización) y opcionales (normalización, agrupación, ponderación).

Dentro de las fases obligatorias de un AICV, primero se debe seleccionar las categorías de impacto a emplear, indicadores de categoría, así como modelos de caracterización. Se define como categoría de impacto una categoría que representa problemas de preocupación medioambiental a las que se les relaciona con los resultados provenientes del ICV (ISO, 2006b). Entender estos impactos es el primer paso para poder tomar acciones de prevención, reducción y remediación con respecto a problemas medioambientales (Sonnemann et al., 2004). Segundo, se categoriza los flujos provenientes del ICV, los cuales se ordenan y se asignan a cada categoría de impacto inicialmente seleccionada. Por último, se caracteriza cuantitativamente estos flujos categorizados previamente en unidades de equivalencia comunes empleando factores de caracterización, que al sumarse proveen un resultado global para cada categoría de impacto elegida (ISO, 2006b). Para la transformación de la información proveniente del ICV se emplean diferentes modelos de caracterización, alguno de ellos como IPCC 2013 (Stocker et. al., 2013), USEtox 2 (Frantke et. al., 2015), ReCiPe 2016 (Huijbrets et. al., 2017), entre otros. En cada una de estas metodologías, las categorías de impacto se pueden clasificar y caracterizar utilizando diferentes indicadores de categoría conocidos como midpoint y endpoint. Los indicadores de categoría endpoint está enfocado a daños finales en el cual se relacionan los resultados del ICV a determinadas áreas de protección (Salud humana, recursos y ecosistemas), mientras que los indicadores de categoría midpoint se relacionan a preocupaciones ambientales y se ubican entre los resultados del ICV y los indicadores de categoría endpoint, dentro de los cuales se encuentran las categorías de cambio climático, acidificación terrestre, eutrofización del agua dulce, entre otros (Finnvenden et. al., 2009). A continuación se explicarán las tres distintas metodologías empleadas y las categorías de impactos que serán analizadas en el siguiente estudio.

El método IPCC 2013, desarrollado por el Panel Internacional de Cambio Climático, se empleó para evaluar la categoría de Cambio Climático. Esta metodología contiene información actualizada sobre factores de conversión de gases del efecto invernadero (Potencial de Calentamiento Global) (IPCC, 2013). El cálculo del potencial de calentamiento global (Cambio Climático) se realizó para un horizonte temporal de 100 años, tiempo recomendado por IPCC para tener un mejor entendimiento sobre los efectos acumulados de los gases del efecto invernadero en producto o sistema en estudio (IPCC, 2013).

USEtox 2 es una metodología que evalúa los efectos asociado a emisiones químicas en la evaluación de un ACV, calculando factores de caracterización para categorías de impactos relacionadas a la salud humana y la ecotoxicología (Rosenbaum et. al, 2008). Esta

caracterización se hace en base a el destino, exposición y efectos de las emisiones químicas efectuadas lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, proceso o servicio (Frantke et. al., 2015). El cálculo de los factores de caracterización se puede hacer optando por uno de los dos conjuntos de modelamiento disponibles: "interim + recommended" y "recommended". La diferencia entre estos dos conjuntos es que los factores de caracterización "interim" incluye en su modelamiento impactos asociados a químicos orgánicos, organometálicos y anfifílicos (detergentes), los cuales poseen una alta incertidumbre al momento de abordar temas como su destino y exposición, mientras que los factores de caracterización "recommended" abarca las demás sustancias en el cual el modelamiento se considera completamente apropiado y de suficiente calidad para propiciar una debida recomendación final (Frantke et. al., 2015). USEtox siempre recomienda en optar por los factores de caracterización "interim + recommended" como manera de no excluir cualquier sustancia al momento de realizar el modelamiento, aún así esta contenga una alta incertidumbre. Si los resultados son dominados por algún factor de caracterización "interim", USEtox sugiere realizar un análisis de sensibilidad como manera de ver cómo los resultados y posiblemente las conclusiones varían, aplicando en este análisis sólo los factores de caracterización "recommended" (Frantke et. al., 2015). Las categorías de impacto que caracteriza esta metodología, y que serán evaluadas en este estudio, son toxicidad humana cancerígeno, toxicidad humana no cancerígeno y ecotoxicidad del agua dulce.

ReCiPe 2016 (Huijbrets et. al., 2017) proporciona factores de caracterización para dos distintos niveles: 18 indicadores midpoint y 3 indicadores endpoint. Para este estudio, se evaluará 3 distintas categorías de impacto midpoint por medio de la metodología ReCiPe: acidificación terrestre, eutrofización del agua dulce y eutrofización del agua marina las cuales serán evaluadas mediante un modelo jerarquizado, ReCiPe (H). La Figura 2.6 muestra la relación entre los resultados del ICV, los indicadores midpoint y endpoint que evalúa la metodología ReCiPe 2016.



Figura 2.6: Relación entre resultados del ICV, indicadores midpoint y endpoint en la elaboración del AICV mediante la metodología ReCiPe. Fuente: Adaptado de Huijbrets et. al., 2017

2.2.1.2.4 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una herramienta utilizada para analizar la solidez de los resultados obtenidos en el ICV o AICV y entender su sensibilidad a ciertos factores de incertidumbre (Wei et al., 2015). Como manera de evaluar la confiabilidad de los resultados finales del ACV, la ISO (2006b) recomienda siempre en realizar un análisis de sensibilidad.

Este análisis se puede realizar mediante la variación numérica de un parámetro de entrada (ya sea por una cantidad fija, un porcentaje, una desviación estándar o entre un máximo o mínimo) y observando el cambio entre los resultados del análisis de sensibilidad propuesto con el análisis realizado sin variar ningún dato de entrada inicialmente propuesto (Heijungs, 1994).

Cuando la variación no se da en un parámetro de entrada sino en una elección cualitativa (tales como cambio en los límites del sistema, reglas de asignación, unidad funcional, metodología AICV, entre otros), y se evalúa el cambio que se obtiene entre los resultados de cada alternativa propuesta, dicho análisis se denomina como un análisis de escenario (Rosenbaum et al., 2017). Este análisis también se usa a menudo como herramienta para

evaluar el desempeño ambiental de diferentes posibles escenarios que podrían ocurrir o implementarse en un proyecto evaluado tales como la alternativa de emplear nuevas tecnologías, poniéndose en el supuesto de "en el mejor o peor de los casos", entre otros (Rosenbaum et al., 2017).

2.2.1.2.5 Interpretación de Resultados

En la interpretación de resultados, etapa final de un ACV, se analizan los resultados del ICV y AICV de acuerdo al objetivo y alcance inicialmente establecidos, teniendo en cuenta las incertidumbres de los datos utilizados, así como los supuestos efectuados al momento de realizar el proyecto (Hauschild et al., 2017), lo cual conlleva a realizar las conclusiones, limitaciones y recomendaciones del estudio (ISO, 2006b). Estos resultados brindan información a las etapas anteriores del ACV sobre las necesidades de fortalecer o descartar ciertos datos del ICV, modificar la elección de metodología elegida en el AICV e incluso en reconsiderar el objetivo y el alcance ya establecido, todo esto como parte de la naturaleza iterativa que brinda la herramienta del ACV (Hauschild et al., 2017).

2.2.2 Análisis de ciclo de vida en el Perú

En el Perú, sólo existen dos estudios que evalúan los impactos ambientales empleando la metodología de ACV en el rubro de saneamiento: Cáceres (2016) expone una evaluación ambiental mediante con el uso de la metodología ACV para una PTAP ubicada en la ciudad de Moquegua y cómo este análisis ayuda en demostrar que se genera una disminución en las cargas ambientales del sistema si se reducen las pérdidas durante los procesos de potabilización. Por otro lado, Torre (2018) evalúa el desempeño ambiental del diseño de una PTAR ubicada en la ciudad de Huaraz utilizando la herramienta de ACV. A parte de estos estudios que evalúan el desempeño ambiental de infraestructura de saneamiento empleando ACV, también se encontró estudios de ACV en infraestructura vial (Larrea-Gallegos et. al., 2017; Verán, 2017), infraestructura de viviendas y oficinas (García-Torres; 2014; Cáceres-Cebrecos, 2016; Calle, 2019), así como en infraestructura de residuos sólidos (Ziegler-Rodriguez et. al., 2019).

Con respecto a otros estudios relacionados al uso del ACV en el Perú, estos en su mayoría han sido realizados por el grupo de investigación de la Red Peruana de Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN), el cual se origina en el 2005 siendo parte de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) (PELCAN, 2019). En los últimos 9 años, estos estudios han sido enfocados en el rubro de la agro-industria, pesquero y energético (Bartl et. Al., 2011,

2012; Quispe et. al., 2018; Vázquez et. al., 2015, 2016a, 2016b, 2018). Además, en el 2019, gracias a la integración de la ONU Medio Ambiente, el Ministerio Peruano del Medio Ambiente (MINAM) y PELCAN, se lanzó la página web de Perú LCA, la base de datos de inventario de ciclo de vida del Perú (Vázquez et. al., 2019). Esta nueva base de datos contiene más de 50 inventarios con datos regionales y nacionales, dentro de los cuales se encuentran los sectores de energía, rellenos sanitarios, productos de refinerías y de agricultura o pesca (Vázquez et. al. 2019).

2.2.3 Análisis de ciclo de vida en sistemas de suministro de agua potable

Los sistemas de suministro de agua potable son únicos alrededor del mundo dado que varían respecto a la localidad en donde son establecidos, ya sea por la orografía de la zona, fuente de obtención hídrica, tecnologías implementadas, demanda poblacional, entre otros aspectos. El empleo de la metodología de ACV en sistemas de suministro de agua ha tomado importancia dado que su uso durante años ha demostrado ser una herramienta apropiada y eficaz al momento de evaluar impactos ambientales (Godskesen et al., 2013). A su vez, llevar a cabo un ACV en sistemas de suministro de agua potable conlleva desafíos, debido a que cada estudio es complejo y diverso, requiriendo la recopilación de datos de diversas fuentes las cuales pueden no ser públicas, necesitando la cooperación de distintas entidades (Godskesen et al., 2018). Estos estudios, acatando los estándares ISO 14040 Y 14044, han sido realizados en continentes como Europa (Amores et al., 2013; Barrios et al., 2006; Godskesen et al., 2011; Igos et al., 2013), Norteamérica (Bonton et al., 2012; Racoviceanu et al., 2007; Jones et al., 2018), África (Friedrich et al., 2002; Mohamed-Zine et al., 2013), Sudamérica (Ortiz et al., 2016; Cáceres, 2016), Asia (Hamzah et al., 2010), y en países transcontinentales como Turquía (Saad et al., 2018), de los cuales algunos comprenden completamente el sistema de abastecimiento de agua potable (captación, conducción, tratamiento, almacenamiento y distribución) y en algunos casos son cubiertos parcialmente.

En la mayoría de los estudios realizados se compara el desempeño ambiental de distintas tecnologías implementadas en los sistemas de abastecimiento de agua potable, en específico del sistema de potabilización (Bonton et al., 2012; Ortiz et al., 2016; Friedrich et al., 2002; Godskesen et al., 2011). A su vez, cierto estudios sólo realizan la evaluación ambiental de un sistema completo de suministro de agua urbano, el cual abarcaba la obtención del agua cruda, potabilización, bombeo, distribución, alcantarillado y tratamiento de aguas servidas (Amores et al., 2013). Otros estudios sólo evalúan los impactos asociados a los procesos de potabilización de agua cruda (Igos et al., 2013; Mohamed-Zine et al., 2013; Cáceres, 2016; Hamzah et al.,

2010; Saad et al., 2018), y en algunos casos se evalúa los procesos de potabilización incluyendo en la investigación impactos financieros (Barrios et al., 2006).

Con respecto a la unidad funcional, la unidad más empleada en los estudios examinados es de 1 m³ de agua potable, ya sea producida en planta o hasta ser abastecida a los consumidores y son pocos los estudios que detallan la calidad del agua antes y/o después de ser potabilizada (Bonton et al. 2012; Messaound-Bouregghda et al. 2013; Saad et al., 2018).

Respecto a los estudios que evalúan los impactos ambientales generados en los procesos de potabilización, las tecnologías implementadas varían desde sistemas convencionales que constan de procesos de floculación/coagulación-decantación-filtración (Amores et al., 2013; Ortiz et al., 2016; Friedrich et al., 2002; Saad et al., 2018; Hamzah et al., 2010; Mohamed-Zine et al., 2013; Bonton et al., 2012; Igos et al., 2013; Cáceres, 2016), nanofiltración (Godskesen et al., 2011; Bonton et al., 2012), ultrafiltración (Vince et al., 2008) y osmosis inversa (Vince et al., 2008). Los límites del sistema en cada estudio varían según las necesidades del objetivo y alcance, dentro de las cuales puede que se encuentren incluidas dentro del ciclo de vida las etapas de construcción, mantenimiento, demolición, transporte de insumos y emisión de lodos.

Para la elaboración del AICV, diversas metodologías fueron empleadas. Entre ellas se pudo encontrar el uso de CML 2001 (Amores et al., 2013; Ortiz et al., 2016; Saad et al., 2018) ReCiPe (Igos et al., 2013; Cáceres, 2016), Impact 2002+ (Bonton et al., 2012; Vince et al., 2007; Igos et al., 2013), IPCC 2013 (Cáceres, 2016), USEtox (Igos et al., 2013), Eco-indicator 99 (Mohamed-Zine et al., 2013, Barrios et al., 2006) y TRACI (Jones et al., 2018). Debido al distinto uso de estas metodologías, se observó el empleo de diversas unidades para representar el puntaje global de las categorías de impacto seleccionadas por estudio, sean estas *midpoint* o *endpoint*. Entre las categorías más usadas, para indicadores *midpoint*, podemos encontrar cambio climático, acidificación terrestre, ecotoxicidad, eutrofización, entre otros. En el caso de indicadores *endpoint*, se encontró que algunos estudios transforman los resultados a unidades simples como "eco point".

Sobre los resultados obtenidos en los distintos estudios realizados en sistemas de suministro de agua, se encontró lo siguiente: Un estudio reportó que el uso energético en la red de distribución de agua potable producía considerables impactos (Amores et al., 2013). De igual manera, otros estudios concluyen que el consumo eléctrico dentro de los procesos de potabilización generaba los mayores impactos (Friedrich et al., 2002; Vince et al., 2007; Racoviceanu et al., 2007; Ortiz et al., 2016; Igos et al., 2013; Saad et al., 2018) y otros

manifestaban que el consumo de diversos químicos perjudicaba el desempeño medioambiental (Barrios et al., 2006; Hamzah et al., 2010; Bonton et al., 2012; Ortiz et. al., 2016; Cáceres, 2016), esto debido a las fuentes de energía necesitadas para la producción de los productos empleados. Cabe resaltar que en cada estudio las fuentes de obtención de energía eléctrica varían por país, lo cual ocasiona que los impactos asociados a las mezclas energéticas varíen respecto a la localidad de cada proyecto evaluado. Los estudios que incluían la etapa de construcción dentro de los límites del sistema reportaban que esta solo aporta del 4% al 15% de los impactos totales (Vince et al., 2007; Hamzah et al., 2010; Boston et. al., 2012; Messaound-Bouregghda et al., 2013; Igos et al., 2013; Cáceres, 2016), donde la mayoría de impactos está vinculado directamente al volumen de acero considerado, el cual depende de la vida útil de la infraestructura analizada. Es importante mencionar que los procesos de potabilización son actividades continuas en el tiempo, y por lo tanto requieren de un abastecimiento constante de insumos químicos y energía eléctrica; en contraste, la construcción de infraestructura es un proceso no continuo, que ocurre en un determinado plazo de tiempo. Por esta razón, los impactos ambientales asociados a los insumos empleados en la etapa de construcción son normalizados considerando la vida útil de la infraestructura, y como se puede apreciar en resultados en donde se consideró la infraestructura como parte del estudio, los impactos asociados a estos suelen ser poco significativos con respecto a los impactos totales.

Igos (2013) dentro de los límites de sistemas del ACV de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) incluyó el estudio del impacto asociado al esparcimiento de lodos del cual no pudo dar una interpretación clara, esto debido a que sus hallazgos en el aporte de los impactos dependían mucho del método utilizado para la elaboración del AICV. Con el uso de ReCiPe encontró que los impactos asociados a los lodos eran despreciables para las categorías de toxicidad humana y del agua dulce. Sin embargo, para la categoría de ecotoxicidad del suelo el aporte de los impactos a causa de los lodos era de 29% para la planta A y 39% para la planta B. Cuando analizó las cargas ambientales con la metodología Impact 2002+, los impactos fueron significativos para las categorías de toxicidad del agua dulce y del suelo en ambas plantas, y siendo no significativas para la categoría de toxicidad humana. Con respecto al uso de la metodología USEtox, el aporte de lodos fue de un 77% para la planta A y un 72% para la planta B en la categoría de toxicidad humana y en la categoría de toxicidad del agua dulce el aporte fue de 31% para la planta A y de un 41% para la planta B. El autor asocia estos resultados a la distinta y limitada cantidad de metales y sustancias tóxicas incluidas en cada metodología, teniendo ciertos componentes factores de caracterización más elevados o no existentes en otros métodos, lo cual no permite determinar un resultado consistente.

Son pocos los estudios que reportan haber elaborado un análisis de sensibilidad. Saad (2018) al evaluar los impactos ambientales que se generaban en una PTAP en Turquía encontró que estos estaban dominados por el consumo eléctrico en los procesos de potabilización. Como manera de realizar un análisis de sensibilidad, evaluó los posibles cambios que podría tener las categorías de impacto al optar por diversas fuentes para la generación de energía eléctrica utilizando tres distintos escenarios: uso exclusivo de energía solar, uso de energía proveniente de la combustión de carbón y uso de energía eólica. Al analizar los tres posibles escenarios, se reportó que el escenario con el mejor desempeño medioambiental era el que empleaba energía eólica, esto debido a que demostró que se podía realizar una disminución de hasta un 84% en todas las categorías de impacto.

Otro estudio, ubicado en Francia, realizó el ACV de dos plantas potabilizadoras y mediante un análisis de sensibilidad variando en $\pm 50\%$ los parámetros de entradas inicialmente considerados (entre ellos ocho parámetros de la etapa de potabilización y cuatro de la etapa de construcción), arrojó que, para la etapa de potabilización, el parámetro más sensible en sólo para una de las plantas estudiadas era el uso de carbón activado, y en el caso de la etapa constructiva el parámetro más sensible era la vida útil que se le daba a la infraestructura. En el caso que se utilizara una vida útil de 15 años, los impactos ambientales, independientemente de la metodología empleada en el AICV, aumentaban de un 5% hasta un 30% en todas las categorías. En cambio, si la vida útil de la infraestructura era de 45 años, los impactos ambientales se reducían hasta en un 10% con respecto a todas las categorías analizadas (Igos et al., 2013).

Según Godskensen (2018) hace falta una normativa la cual detalle qué indicadores incluir en un estudio de sistemas de suministro de agua. De manera que el estudio no carezca de información relevante, el autor recomienda incluir los siguientes descriptores:

- Área y población de la zona en donde se realizará el estudio
- Longitud total de las tuberías de distribución del agua potable
- Distancia entre la captación del agua cruda hasta esta ser potabilizada, y distancia media entre la potabilizadora y consumidor
- Cota media desde la producción hasta el consumidor.
- Pérdidas de agua en todos los procesos de suministro de agua potable
- Mezcla de energía eléctrica utilizada en el país de estudio
- Detalles de la fuente de obtención del agua cruda
- Tecnología implementada, capacidad nominal, tal como el suministro real del agua en los procesos de potabilización

- Calidad del agua después de que esta haya sido potabilizada

En la Tabla 2.1 se puede apreciar un resumen de investigaciones asociados al uso de ACV en PTAP en los últimos 6 años detallando información sobre año de publicación, el lugar de estudio, objetivo, fuente de obtención del agua, software y metodología empleada, tal como la inclusión o exclusión de la etapa constructiva y su aporte respecto a los impactos totales y finalmente los resultados obtenidos en cada estudio.



Tabla 2.1: Resumen de estudios que aplicaron la metodología ACV en sistemas de agua potable.

Referencia	Año	País	Objetivo	Procedencia del Agua	Unidad funcional	Vida Útil de infraestructura	Aporte de la Etapa Constructiva	Software/Metodología AICV	Conclusiones
Bonton et al.	2012	Canadá	Realizar un ACV comparativo entre una planta convencional y una de nanofiltración en la ciudad de Québec.	Agua Superficial	1 m ³	60 años	La fase operacional es la más dominante respecto a la fase de construcción y desmantelamiento. Si bien estos son menores no son despreciables.	Simapro 7.3 / Impact 2002+	Mayor impacto ambiental en la planta de nanofiltración por uso eléctrico y para la planta convencional por el empleo de carbón activado.
Igos et al.	2013	Francia	Evaluación ambiental de dos plantas potabilizadoras enfocadas en el aporte de la infraestructura y esparcimiento de lodos. utilizando la metodología ACV	Agua Superficial	1 m ³	30 años	7%-12% planta A y 4%-7% planta B. El uso de acero es el mayor contribuidor de impactos ambientales.	No Especifica / ReCiPe, Impact 2002+ y UseTox	Mayor carga ambiental por el consumo eléctrico en ambas plantas.
Amores et al.	2013	España	Evaluación ambiental del sistema ciclo de agua urbano utilizando la metodología de ACV.	Agua Superficial/ Residual	1 m ³	-	No incluye infraestructura	No Especifica / CML2001	Mayor carga ambiental por el uso eléctrico en los procesos de captación y bombeo de agua potabilizada.
Mohamed-Zine et al.	2013	Algeria	Evaluación ambiental de la producción de agua potable en Boumerdes.	Represa de Keddara	1 L	No Especifica	5% de todos los impactos en todo los procesos de potabilización	Simapro 6 / Eco-indicator 99	Etapa de pre-tratamiento y bombeo generan las mayores cargas ambientales de todo el sistema.
Cáceres	2016	Perú	Identificar y cuantificar los impactos ambientales de una planta convencional en Moquegua utilizando la metodología de ACV.	Agua Superficial	1 m ³	50 años	menos del 10% de los impactos totales	Simapro 8 / ReCiPe 2016 e IPCC 2013	Etapa de tratamiento presenta mayores cargas ambientales. Uso y transporte de policloruro de aluminio y cloruro férrico presentan el 60% de los impactos totales.
Ortiz et al.	2016	Colombia	Evaluación ambiental de cuatro potabilizadoras en el norte de Colombia utilizando la metodología de ACV	Agua Superficial	1 m ³	-	No incluye infraestructura	LCA-Data Manager / CML2001	Dos de las plantas mostraron mayor carga ambiental por uso de coagulantes. Las otras dos plantas restantes mostraron que la mayor carga se daba por el uso eléctrico en los procesos de potabilización.
Saad et al.	2018	Turquía	ACV de una planta potabilizadora en Turquía	Agua Superficial	1 m ³	-	No incluye infraestructura	Gabi / CML2001	Las cargas ambientales en el proceso de potabilización estuvieron dominado por el consumo eléctrico de la planta.

CAPÍTULO 3: Caso de Estudio

3.1 Procesos de potabilización en La Atarjea

La ciudad de Lima se ubica en el desierto costero de la vertiente del pacífico, concentrando su población en la parte baja de tres cuencas hidrográficas conocidas como cuenca Rímac, Chillón y Lurín. Esta parte de la ciudad, agrupada con la provincia del Callao, conforman Lima Metropolitana, la cual alberga alrededor de 9,5 millones de personas, aproximadamente la tercera parte de la población del país (INEI, 2018). La obtención de agua para esta zona se da por medio de fuentes hídricas superficiales y subterráneas provistas por las cuencas Chillón, Rímac y Lurín y también del trasvase procedente de la cuenca Mantaro (FFLA, 2015).

Sedapal, empresa estatal fundada en 1981, se encarga de prestar servicios de agua potable y alcantarillado para toda la zona metropolitana de Lima y Callao (Sedapal, 2017). Las actividades que realiza Sedapal, con respecto al sistema de agua potable, va desde el almacenamiento y captación del agua cruda, seguido por la potabilización, almacenamiento, bombeo y distribución para finalizar con los procesos de alcantarillado, los cuales comprenden en la recolección de aguas residuales, tratamiento y disposición final (Sedapal, 2017). Sobre el sistema de agua potable, el abastecimiento de agua a la ciudad de Lima es posible gracias a una compleja infraestructura que inicia con el almacenamiento de agua cruda desde Los Andes, seguido por la captación por medio de bocatomas ubicadas en la cuenca baja del río Rímac y Chillón para luego ser potabilizada por 3 distintas plantas de tratamiento: Planta de La Atarjea, Huachipa y Chillón. A su vez, Sedapal cuenta con 467 pozos que captan agua subterránea, de los cuales 342 se encuentran en funcionamiento (Sedapal, 2017). Con respecto al suministro de potabilización por medio de fuentes superficiales, las plantas de La Atarjea son gran fuente de generación de agua potable para la metrópolis debido a que producen el 71% de agua para los habitantes, teniendo como origen de captación el río Rímac (Sedapal, 2017).

El río Rímac, ubicado en la cuenca que lleva su mismo nombre, es el recurso hídrico más importante para la ciudad. Además, este posee un caudal estacional el cual es mayor en épocas de avenida (lluvias) y menor en épocas de estiaje (sequías). Como medida de asegurar la continuidad del suministro de agua potable y eléctrico, el río es regulado todo el año por medio de descargas provenientes de reservorios ubicados en su cuenca alta y del trasvase procedente de la cuenca Mantaro. A su vez, la calidad del río se ve seriamente afectada por medio de actividades antropogénicas que lo contaminan en diversos puntos de su trayectoria y

a la par, efectos meteorológicos ponen en riesgo la continuidad del suministro de agua para la ciudad.

Debido a los diversos factores extrínsecos, el sistema de potabilización por medio de las plantas de La Atarjea es complejo. Por ello, cuenta con etapas de pre-tratamiento, etapas de tratamiento físico-químico, todas estas etapas emplean numerosos y variados químicos para así asegurar la continuidad y la calidad del agua a ser potabilizada.

3.1.1 Almacenamiento en Los Andes

El escurrimiento natural del río Rímac se origina sobre los 5'500 msnm a causa de las precipitaciones estacionales y deshielos de los nevado que ocurren en su cuenca alta (Sedapal, 2017). El río Rímac en épocas de avenidas (de diciembre a abril) posee una escorrentía natural promedio de 30 m³/s y en épocas de estiaje (de mayo a noviembre) de 7,8 m³/s (Sedapal, 2014).

La construcción de diversa infraestructura se da con el fin de poder suministrar y cumplir con la creciente demanda de agua potable, y simultáneamente abastecer a la ciudad de suministro energético. En 1960 se empieza a construir represas e incorporar lagunas en el sistema de almacenamiento en la cuenca alta del río Rímac, tal como trasvases procedentes de la cuenca alta del río Mantaro ubicada en la Vertiente del Atlántico por medio del túnel trasandino Graton (Sedapal, 2014). En la actualidad, se cuenta con 3 represas y 19 lagunas ubicadas en las subcuencas Santa Eulalia (capacidad de 77 MM³) y San Mateo (capacidad de 48,3 MM³), tal como en la cuenca alta del Mantaro (capacidad de 206 MM³) que en conjunto poseen una capacidad de almacenaje de 331 MM³ (Sedapal, 2017). Esta agua almacenada es regulada y descargada en el río Blanco y Santa Eulalia, afluentes del río Rímac.

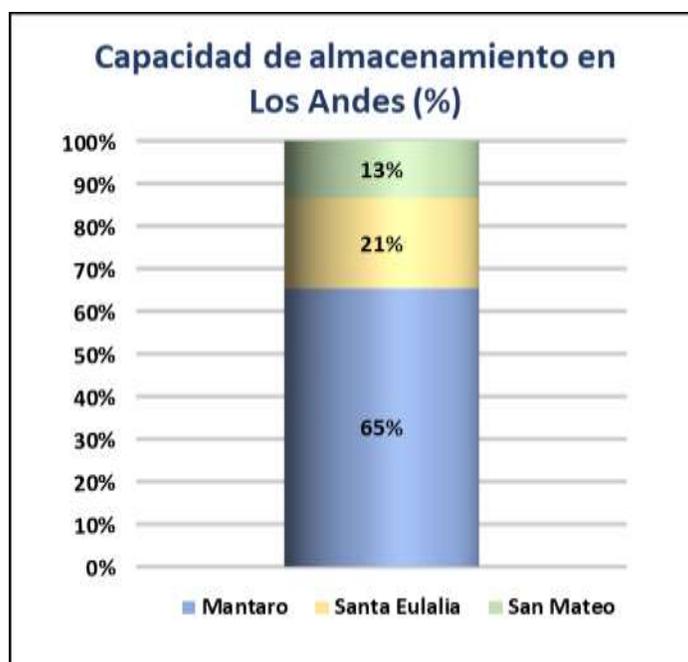


Figura 3.1: Capacidad de almacenamiento en Los Andes (%). Fuente: Sedapal (2018)

Como se puede apreciar en la Figura 3.1 el 65% de la capacidad de almacenamiento que se encuentra en Los Andes es dominada por la infraestructura hidráulica ubicada en la cuenca Mantaro (Sedapal, 2018). En la Tabla 3.1 podemos observar que para el año 2016, aproximadamente el 32% de la oferta superficial del río Rímac (considerando en la oferta superficial el caudal provisto por los sistemas de regulación) resultó del trasvase Mantaro-Rímac, el cual tuvo un aporte máximo del 51% para el mes de octubre y mínimo de 10% para el mes de marzo (Observatorio del Agua, 2019). Esto refleja que el aporte de la cuenca Mantaro es una fuente dominante y esencial para poder abastecer a la ciudad de agua potable, especialmente en épocas de estiaje.

Tabla 3.1: Origen de la oferta del recurso hídrico para la ciudad de Lima en el año 2016 (hm³). Fuente: Observatorio del agua (2019)

Oferta del Recurso Hídrico (hm ³)	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
ESCORRENTÍA NATURAL RÍO RÍMAC	35.3	83	111	72.7	35.1	20.5	22.4	9.2	15.9	16.5	15.5	13.4	450.5
ESCORRENTÍA REGULADA RÍO RÍMAC	0.8	0	0.2	0.3	1.5	8.4	13.1	21	13.1	10.6	13	15.7	97.7
TRASVASE MANTARO-RIMAC	23.3	12.5	12.4	10.3	19.9	24	24.4	22.7	27.3	28.3	27.3	20.5	252.9
ESCORRENTÍA NATURAL RÍO LURÍN	5.5	40.8	26.1	13.6	1	0.9	0.5	0.2	0.1	0.2	0	0.5	89.4
ESCORRENTÍA NATURAL RÍO CHILLÓN	9.1	36.6	44	28.2	10.6	3.3	2.5	4.4	5.8	9.1	4.4	7.3	165.3
FLUJO ENTRANTE AGUA SUBTERRÁNEA	24	17.9	18.6	17.5	24.5	28	29	28.8	29.1	31.7	31.2	28.4	308.7
TOTAL	98	191	212	143	92.6	85.1	91.9	86.3	91.3	96.4	91.4	85.8	1364.5

En el año 2016, los volúmenes de almacenamiento mostraron valores por debajo de los promedios históricos (ver Figura 3.2) debido a una moderada sequía en las cuencas altas de Rímac, Chillón y Lurín (Senamhi, 2019). Ese año, la producción de agua potable por medio de fuentes subterráneas se incrementó en un 23% y disminuyó un 5% por medio de fuentes superficiales con respecto al año anterior (SEDAPAL, 2017). Sedapal, como plan de contingencia a causa de las sequías, en enero del 2016 ejecutó un plan de recorte de agua en las noches por medio de las plantas de La Atarjea como manera de preservar el recurso hídrico (La República, 2016). De igual manera, en diciembre de 2016, se registró un volumen de almacenamiento de sólo 100 MM³, muy por debajo de su promedio histórico, lo cual condujo a Sedapal a aplicar un plan que constituía en la reducción de la presión de abastecimiento de agua potable en horas de la noche y de la explotación de pozos como manera de asegurar la continuidad de agua potable (Sedapal, 2016). Caso similar se registró en 2004, cuando una sequía que golpeó la sierra central obligó a Sedapal a disminuir el suministro de agua potable desde abril hasta diciembre de ese año, registrándose sólo 17,9 horas de servicio en promedio (Sedapal, 2004).



Figura 3.2: Registro histórico de volúmenes almacenados de agua entre los años 2013 a 2018 (hm³).

Fuente: Adaptación de Sedapal (2018)

3.1.2. Trayecto del agua cruda hacia la bocatoma

El agua almacenada en la cuenca alta del río Rímac y Mantaro es dirigida por medio de canales hacia dos afluentes del río Rímac: río Blanco y río Santa Eulalia. El río Rímac posee una longitud entre la naciente y la desembocadura de 127 kilómetros y su cuenca cuenta con un área total de 3'504 km² (ANA, 2015a). La calidad del agua del río se clasifica como no apta para el consumo humano debido a que se encuentra altamente contaminada en diferentes puntos de su cuenca por residuos resultado de actividades antropogénicas al igual que restos producidos por la acción de eventos naturales (ANA, 2015a). Este tipo de contaminación se clasifica en dos categorías: contaminación de fuentes puntuales y contaminación de fuentes no puntuales. Se define como contaminantes por fuentes puntuales contaminantes proveniente de lugares conocidos tales como aguas residuales domésticas e industriales, desmonte de mina, botadero de residuos sólidos, entre otros (ANA, 2015b). En el caso de contaminantes no puntuales, estos son contaminantes liberados por la escorrentía superficial en temporada de lluvias, las cuales arrastran consigo polvo, residuos urbanos, fertilizantes, pesticidas, suelo, estiércol, residuos animales y vegetales del mismo modo que contaminantes atmosféricos (ANA, 2015a).

En el año 2016, ANA (2016) reportó que hasta el año 2015 existían 722 distintas fuentes de contaminación puntuales en diferentes partes de la cuenca del río Rímac. En la cuenca alta (los primeros 70 km desde el origen del río Rímac), el deterioro de la calidad del agua se da por la influencia de relaves mineros, vertimiento de aguas residuales, pasivos mineros y componentes propios de la naturaleza geoquímica de la cuenca (ANA, 2016).

Estas actividades generan concentraciones en exceso sobre los parámetros propuestos por los Estándares de calidad ambiental para el agua (ECA) para metales pesados tales como el antimonio, manganeso, cadmio, boro, cobre, plomo, zinc, aluminio, así como por la presencia de arsénico. En la cuenca media (desde los primeros 70 km hasta los 107 km), el nivel de los metales pesados presentes disminuye debido a que se van sedimentando a lo largo del trayecto de río en la medida de que el cauce del río avanza (Sedapal, 2014). Sin embargo, esta disminución de concentración de metales pesados aún sobrepasa los parámetros del ECA, sobresaliendo las concentraciones de aluminio y arsénico atribuyéndose probablemente a las descargas directas al río proveniente de aguas residuales industriales. Asimismo, los parámetros de coliforme termotolerantes y *escherichia coli* aumentan debido a que en esta zona se ubican tuberías de aguas residuales domésticas que están directamente conectadas al cauce del río (ANA, 2015b).

En la cuenca baja (desde las bocatomas de La Atarjea hasta su desembocadura al Océano Pacífico), la contaminación bioquímica y de metales pesados como fósforo, aluminio y arsénico excede notablemente los parámetros considerados por la ECA. Cabe resaltar que parte de esta excedencia está directamente vinculada con los vertimientos de aguas residuales industriales y domésticas al igual que residuos sólidos domésticos que se dan en la quebrada Huaycoloro (ubicado en la cuenca media), tributario importante del río Rímac, el cual desemboca 1,6 km aguas arriba de las bocatomas de La Atarjea (ANA, 2015b). De igual manera, el vertimiento de aguas residuales y residuos sólidos domésticos en los puntos más bajos de la cuenca baja alteran notablemente las concentraciones de DBO, DQO, Arsénico, Cobre, Hierro y Manganeso (ANA, 2016). En la Tabla 3.2 se visualiza el reporte promedio, para el año 2016, de la calidad del agua del río Rímac, y a su vez los parámetros permisibles por el ECA (MINSa, 2011) para que el agua sea apta para el consumo humano.

Tabla 3.2: Calidad de agua del río Rímac (2016) y valores permisibles propuestos por la ECA para consumo humano. Fuente: Fuente: Adaptación de INEI 2018 y MINSa 2011

Parámetros de Calidad de Agua	Unidad	Valor	Valor Permissible
Turbiedad	UNT	43	5
Concentración de Iones de Hidrógeno	pH	8.16	6.5 a 8.5
Temperatura	°C	N/A	Δ 3
Color verdadero	UC	<5.000	15
Conductividad Específica	μmho/cm	546	1500
Alcalinidad total	mg/L	108.57	N/A
Dureza Total	mg/L	217.46	500
Materia Organica	mg/L	2.79	N/A
Coliformes termotolerantes	N°/100ML	50406	2000
Coliformes totales	N°/100ML	111509	5000
Hierro	mg/L	5.048	0.3
Plomo	mg/L	0.075	0.01
Cadmio	mg/L	0.0024	0.003
Aluminio	mg/L	3.609	0.2

En épocas de avenidas, las intensas precipitaciones que ocurren de manera rápida y localizada en la cuenca media alta del río Rímac activan quebradas generando flujos de detritos y lodo, coloquialmente conocidos como "huaicos", los cuales afectan sitios poblados poniendo en riesgo la integridad de las personas y ocasionando daños materiales (Chira la Rosa et al., 2016). Asimismo, este tipo contaminación de fuente no puntual, al desembocar en el río Rímac, aumenta drásticamente la turbiedad del agua y al momento de arribar a las bocatomas de La Atarjea, la alta concentración de sólidos en suspensión dificulta la producción de agua potable y

en algunos casos se sobrepasa la tolerancia permitida de turbiedad por las plantas, imposibilitando la operación de tratamiento.

En el 2017, el evento meteorológico "El Niño Costero", catalogado por sus impactos como el tercer "Fenómeno del Niño" más intenso de los últimos 100 años, tuvo un tiempo de duración de 6 meses (Diciembre 2016 - Mayo 2017) ocasionando fuertes lluvias en lugares del norte del Perú como Tumbes, Piura, Lambayeque, La Libertad, y en la zona medio costera-andina como Ancash, Lima e Ica (ENFEN, 2017). Sus efectos se sintieron en Lima Metropolitana, cuando las intensas lluvias ocurridas en la cuenca media alta del Rímac desencadenaron numerosos y continuos "huaicos", los cuales al llegar al río Rímac y seguir su cauce hasta las bocatomas de La Atarjea arrastraron consigo rocas, troncos y lodo, aumentando considerablemente la concentración de turbiedad. Este suceso impidió la captación y producción de agua potable, por lo cual la empresa Sedapal reportó la suspensión el servicio de agua potable desde el 16 hasta el 19 de marzo, como manera de evitar posibles daños a la infraestructura de las plantas (El Comercio, 2017). Como plan de contingencia, Sedapal dispuso gratuitamente de agua potable a la población por medio de pozos ubicados estratégicamente en la ciudad metropolitana, lo cual generó largas colas hasta enfrentamientos para la obtención del recurso hídrico (El Comercio, 2017b; Vazquez Rowe et.al., 2017).

3.1.3. Plantas de tratamiento de agua potable La Atarjea

La ciudad de Lima, desde sus inicios, se ha abastecido de agua proveniente de la zona conocida como "La Atarjea" por medio de un acuífero que se encuentra represado por una cadena de cerros ubicados en este lugar (Maish, 1996). El afloramiento natural que se daba en este territorio fue suficiente para abastecer de agua a la ciudad. Sin embargo, en 1850 fue necesaria la construcción del primer sistema de galerías de infiltración para obtener agua del subsuelo y suministrarla a la población, y en 1920 se construye un nuevo sistema de galerías de infiltración, pero de mayor extensión y profundidad (Maish, 1996). Debido al insuficiente rendimiento de este nuevo sistema implementado, se decidió utilizar las aguas superficiales del río Rímac para poder proporcionar a la ciudad de agua potable. El suministro de agua fue posible gracias a sistemas convencionales de desarenación, coagulación y sedimentación ubicados en La Atarjea, introduciéndose en 1935 el uso de cloro para poder eliminar la carga bacteriológica procedente del río (Maish, 1996).

En 1955, el gobierno de Manuel A. Odría suscribe un contrato con la empresa sociedad francesa "Degremont" para el diseño, construcción e implementación de una planta filtrante para

la ciudad de Lima (Sedapal, 2019). El 23 de julio de 1956 se inaugura la primera planta de filtración de agua ubicada en La Atarjea, bajo el cargo del Consejo Superior de Agua Potable de Lima, y el 28 de ese mismo año entra en operación teniendo un volumen de producción de 5 m³/s y convirtiéndose en la primera planta potabilizadora con mayor capacidad de producción en el mundo (Sedapal, 2019). Es recién en 1981 cuando se funda la empresa Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL) y en 1992 pasa a ser una empresa de propiedad del estado, de "Derecho Privado con autonomía técnica, administrativa, económica y financiera" (Sedapal, 2019).

Los procesos de potabilización en La Atarjea ubicados en el distrito de El Agustino, provincia y departamento de Lima (ver Figura 3.3), se realizan en dos etapas: pretratamiento y tratamiento físico-químico. La etapa de pretratamiento consiste en retirar sólidos flotantes, de arrastre y partículas de arena. De igual manera, se lleva a cabo una precloración para eliminar la mayor carga microbiológica posible. Esta etapa optimiza la eficiencia de tratamiento para la etapa físico-químico que se realiza por medio de dos plantas conocidas como Planta N°1 y Planta N°2, las cuales trabajan continuamente y en paralelo teniendo como objetivo eliminar toda partícula en suspensión, al igual que retirar toda materia orgánica y microorganismos encontrados en el agua (Sedapal, 2014).



Figura 3.3: Planta de Tratamiento de Agua Potable La Atarjea, ubicada en el distrito de El Agustino.

Fuente: Google Earth, 2017.

La Planta N°1 cuenta con dos sistemas de potabilización, uno convencional y otro también convencional, pero de sistema patentado. El sistema convencional, el cual tiene más de 70 años, cuenta con procesos de floculación-sedimentación mientras que el sistema patentado por la firma Dégremont consta de unidades de decantación y filtración, contando con una capacidad nominal de producción de 10 m³/s (Sedapal, 2014). Sin embargo, esta planta sólo llega a trabajar eficientemente para un caudal total de 7.5 m³/s (Sedapal, 2014). Actualmente, la planta convencional es utilizada como unidades de paso hacia la planta patentada (Planta 1) debido a que el incremento de producción, producto de la demanda por agua potable, provocara variaciones en el flujo de agua inicialmente establecido ocasionando que las unidades convencionales no lograrán cumplir su objetivo de potabilización (Sedapal, 2014).

La Planta N°2, diseñada y construida en dos etapas, cuenta con unidades de decantación y filtración y, al igual que la Planta N°1, es de patente Dégremont. La primera etapa se incorporó en los procesos de potabilización en 1983 contando con una capacidad nominal de 5 m³/s. En 1994, la segunda etapa entró en funcionamiento, brindando así una capacidad nominal total para la Planta N°2 de 10 m³/s (Sedapal, 2014).

En la Figura 3.4 se detalla los procesos de potabilización que se realizan en las plantas de La Atarjea. Estos procesos están habilitados de tal manera que el flujo de agua sea posible por medio de la gravedad, desde el punto que el agua es captada hasta su almacenamiento. En conjunto, las plantas tienen una capacidad de producción de 17,5 m³/s, y los procesos realizados en las plantas de La Atarjea se desarrollarán en los siguientes párrafos (Sedapal, 2014).

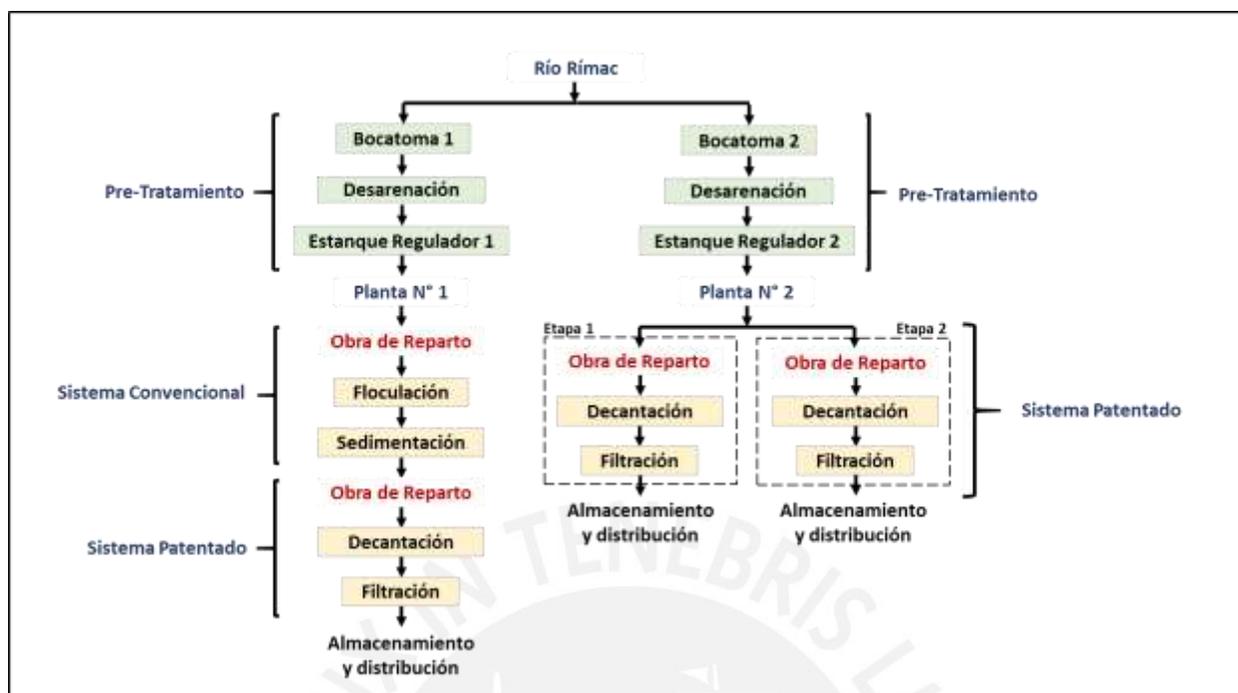


Figura 3.4: Secuencia de procesos realizados en la planta de La Atarjea. Fuente: Adaptación de Sedapal (2017)

I) Pre-tratamiento

Bocatoma

El proceso de potabilización para la planta de La Atarjea empieza por la captación del agua desde dos bocatomas ubicadas en los márgenes del río Rímac. En el margen derecho se encuentra la bocatoma N°1 y en el margen izquierdo, la bocatoma N°2. A lo ancho del río Rímac existen 7 barrajes móviles, 2 de ellos designados al canal de limpia, los cuales posibilitan la toma de agua cruda hacia las bocatomas (ver Figura 3.5). Esta infraestructura que data desde el año 1965, fue construida para poder retener un caudal máximo de 700 m³/s (SEDAPAL, 2014).



Figura 3.5: Barrajes móviles ubicados a lo ancho del río Rímac. Fuente: Fotografía propia

La primera bocatoma de tipo captación lateral tiene una capacidad de captación de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, cuenta con tres ventanas de captación de $1.1 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, un canal desrripador el cual tiene como función retener y elimina la grava procedente del río, asimismo cuenta con un sistema de desbaste conformado por cuatro rejillas inclinadas que impiden el ingreso de material flotante. Luego, el agua cruda es conducida a cuatro compuertas de captación para ser dirigida a una tubería de conducción de 96 pulgadas de diámetro con una longitud de 750 m la cual transporta el agua cruda hacia los desarenadores (Sedapal, 2014). La segunda bocatoma, también de tipo captación lateral, posee una capacidad de captación de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (ver Figura 3.6). Al igual que la Bocatoma N° 1, esta cuenta con tres ventanas de captación de $1.1 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, un canal desrripador, un sistema de desbaste que consiste de tres rejillas inclinadas, cinco compuertas de captación y una tubería de conducción de 3 m de diámetro y 460 m de longitud la cual funciona como sifón invertido que traspasa desde el margen derecho hacia el izquierdo (Sedapal, 2014).



Figura 3.6: Bocatoma N°2 ubicada en el margen izquierdo del río Rímac. Fuente: Fotografía propia

Desarenadores

El agua captada por las bocatomas es derivada hacia los desarenadores (ver Figura 3.7), donde primero pasa por un canal de transición ocasionando que la velocidad del agua disminuya y luego esta es derivada a un canal de distribución el cual reparte caudales de manera equitativa a los desarenadores. Por cada bocatoma existe una batería de desarenadores, y en cada una se encuentran doce unidades de desarenación, sumando un volumen total de 11'000 m³ (Sedapal, 2014). En los desarenadores las partículas de arena (hasta 0.20mm de diámetro) son sedimentadas por medio de la gravedad en su parte inferior la cual tiene forma trapezoidal, permitiendo el deslizamiento del material sedimentado hacia el canal de purga (Sedapal, 2014). En épocas de avenida, donde el agua presenta mayores niveles de turbiedad, antes de que el agua llegue hacia las unidades de desarenación esta es dosificada con polímeros con el fin de ayudar a precipitar las partículas finas. El agua saliente de estas unidades entra a una etapa de precloración teniendo como objetivo eliminar la mayor carga microbiológica posible. Las purgas son eliminadas mediante el canal de desagüe general de la planta, siendo su destino final el río Rímac (Sedapal, 2014).



Figura 3.7: Unidades de desarenación designadas para el agua proveniente de la bocatoma N°1 Fuente:
Fotografía propia

Embalses Reguladores

Existen dos unidades de embalses reguladores: uno con capacidad útil de 400'000 m³ ubicada en la zona de Santa Rosa 1 (ver Figura 3.8) y el segundo embalse con una capacidad útil de 800'000 m³ ubicada en la zona de Santa Rosa 2 (ver Figura 3.9). Los embalses reguladores tienen tres diferentes funciones dentro de los procesos de potabilización. En primer lugar, sirven como reservorios en caso se necesite detener la captación del agua cruda proveniente del río Rímac, debido a ciertas características del agua que puedan poner en riesgo la infraestructura de potabilización, de esta forma se asegura la continuidad de producción en las plantas. También, tienen como función permitir la producción de agua potable a un ritmo constante, independientemente de la variabilidad del caudal del río debido a su naturaleza

estacional. Finalmente, sirven como reservas, permitiendo paralizar los procesos anteriores para recibir mantenimiento o reparaciones (SEDAPAL, 2014).



Figura 3.8: Reservorio ubicado en la zona de Santa Rosa 1 Fuente: Fotografía propia

El tratamiento que recibe el agua cruda en esta etapa tiene el objetivo en disminuir el contenido y evitar el crecimiento de algas en los embalses. Para ello, se utiliza sulfato de cobre, el cual es ubicado debajo de cilindros huecos de plástico los cuales se encuentran estratégicamente distribuidos en toda el área superficial de los embalses.

Debido a que el agua entrante a los embalses aún carga consigo arenas y materiales finos, la inevitable sedimentación de estas partículas genera lodos en su fondo. El volumen de lodos generado, que es significantes durante las épocas de crecidas del río Rímac, es eliminado al término de la temporada de avenidas. Para esto, existe en cada embalse un canal central de vaciamiento con alta velocidad para retirar el fango asentado. De igual forma, puesto que el área de fondo de los estanques es amplia, se utiliza de maquinaria automotriz para poder derivar los lodos hacia el canal central. Este volumen de lodos generado es finalmente derivado hacia el sistema general de desagüe de la planta, en donde son descargados paulatinamente a las aguas del río Rímac (Sedapal, 2014).



Figura 3.9: Reservorio ubicado en la zona de Santa Rosa 2 Fuente: Fotografía propia

II) Tratamiento Físico-Químico

Obra de Reparto

El agua proveniente de los estanques reguladores, o excepcionalmente desde los desarenadores, antes de ingresar a la planta primero es dirigida hacia las obras de reparto (ver Figura 3.10). En este lugar, el agua pretratada recibe en forma continua la dosificación de coagulantes con el fin de favorecer la aglomeración de las partículas en suspensión causantes de la turbiedad, al igual que agrupar partículas de materia orgánica y de microorganismos. Para que los coagulantes se mezclen de manera uniforme dentro del volumen del agua a tratar se efectúa una turbulencia en el flujo mediante el aumento repentino del nivel de agua, conocido como salto hidráulico (SEDAPAL, 2014a). Luego, esta mezcla pasa por una segunda etapa donde el flujo de agua es lento para posibilitar la formación de flóculos, y en ocasiones requiriendo la asistencia de ayudantes de coagulación. Seguidamente de la dotación de los reactivos, el agua es dirigida hacia las plantas N°1 y N°2 para poder separar los flóculos del agua por medio de la decantación (SEDAPAL, 2014). Entre los coagulantes más utilizados para la aglutinación de estas partículas en suspensión se encuentran el Sulfato de Aluminio, Cloruro

Férrico y Sulfato Férrico y en el caso de ayudantes para la floculación se emplea polímeros aniónicos y catiónicos al igual que arcillas activadas (Andía, 2000).



Figura 3.10: Obra de reparto ubicada adyacente a la Planta N°1 Fuente: Fotografía propia

Planta N°1

Sistema Convencional

El sistema convencional, que tiene más de 70 años de ser construido, cuenta con 4 unidades de floculación y 10 unidades sedimentadores (Sedapal, 2014). Como mencionado previamente, el sistema convencional dentro de la planta N°1 no se encuentra activo por lo cual se implementa como unidad de paso hacia la planta patentada.

Sistema Patentado

Decantador Pulsator

La planta N°1 cuenta con 6 unidades de decantación, todas de diseño circular con diámetro de 40 m y 5 m de alto, teniendo en conjunto una capacidad de producción de 10 m³/s. No obstante, los decantadores sólo llegan a tratar agua de manera eficiente para un caudal total de 7.5 m³/s (Sedapal, 2014). El agua bruta ingresa uniformemente por el fondo del decantador

por medio de tuberías radiales con perforaciones (2'644 orificios de diámetro reducido) manteniendo un flujo vertical ascendente. A causa de pulsaciones intermitentes, y por la ayuda de los reactivos previamente suministrados, las partículas finas forman flóculos los cuales se van aglomerando de tal modo que se forma una capa de lodo manteniéndose en constante suspensión en la parte medio inferior de los decantadores (Sedapal,2014). El agua que aflora encima de estos lodos está clarificada y esta es recolectada por tubos o canales radiales mediante 2'200 orificios distribuidos uniformemente en la superficie para luego ser dirigida a la etapa de filtración (ver Figura 3.11). Los lodos generados en esta etapa son retirados periódicamente por las válvulas de purga y posteriormente son vertidos en el río Rímac.



Figura 3.11: Decantador pulsator circular de la Planta N°1 Fuente: Fotografía propia

Filtros

El agua proveniente de los decantadores ingresa por parte superior de los filtros de Planta N°1 por medio de 4 compuertas batientes, tiene un flujo descendente que atraviesa un lecho filtrante de arena con el fin de retener las partículas que no hayan sido retirada en la etapa de decantación (Sedapal, 2014). La Planta N°1 cuenta con 2 baterías de filtración, cada una cuenta con 18 unidades de filtración con dimensiones de 12,5 x 8 m y 2,88 m de altura y dispone de 100 m² de área filtrante cada una (ver Figura 3.12).



Figura 3.12: Unidades de filtros de la Planta N°1 Fuente: Fotografía propia

Estos filtros, de tipo Aquazur V patentado por Degrémont, contienen una capa de arena cuarzosa de 1 m de espesor con granos de alrededor de 1 mm de diámetro teniendo como función retener las partículas que son menores que los poros entre los granos de arena. Este lecho filtrante está ubicado encima de un material de soporte compuesto por grava de 5 cm de altura y que se sitúa en un falso fondo de losas prefabricadas equipadas con 6'580 toberas de polipropileno por filtro las cuales permiten el paso del agua filtrada (Sedapal, 2014). Esta agua filtrada sale por la parte inferior de los filtros hacia los reservorios, y en su transcurso recibe una última dotación de cloro para eliminar cualquier carga microbiológica existente y a su vez dejar cloro residual en el agua como medida de defensa ante posibles contaminantes durante su distribución a los reservorios y/o a la ciudad, de manera que se satisface lo requerido por norma (Sedapal, 2014).

Los filtros a partir de las 24 a 36 horas de funcionamiento se ensucian y requieren de limpieza. La limpieza de los filtros se realiza empleando aire comprimido y agua, ingresando por la parte inferior de manera que va en contracorriente del flujo original (ver Figura 3.13). El agua sucia que aflora es dirigida hacia unas instalaciones que se encargan de recuperar el agua utilizada en esta etapa, de manera de que no se pierda siendo descargada al río en conjunto

con las purgas y desagües de los otros procesos (Sedapal, 2014). El agua recuperada es dirigida hacia las entradas de los decantadores para su posterior tratamiento.

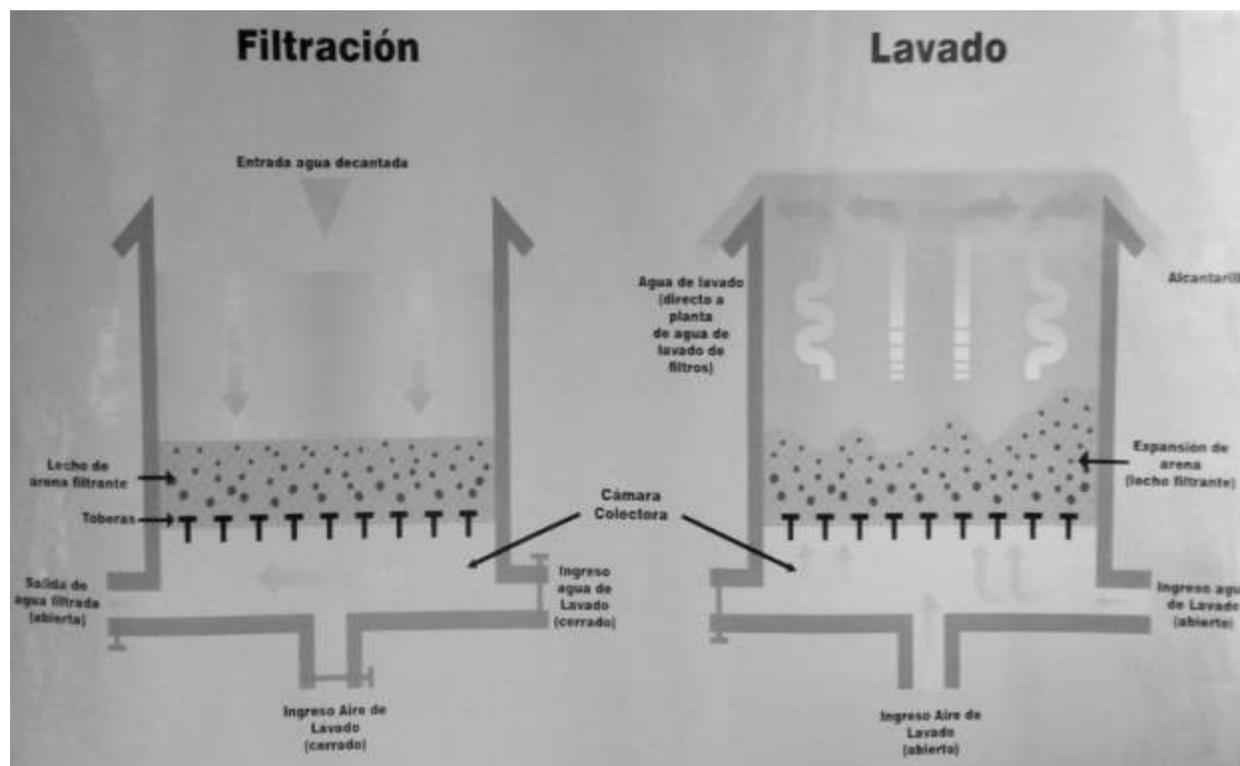


Figura 3.13: Procesos realizados en la limpia de filtros dentro de La Atarjea Fuente: Fotografía propia

Planta N°2

Decantadores

Los decantadores ubicados en la Planta N°2 son semejantes que al de la Planta N°1 ya que son de flujo ascendente y pulsante a través de manto de lodos, sin embargo estos son de sección rectangular (ver Figura 3.14). La Planta N°2 cuenta con 6 decantadores pulsator de patente Degremont, cada uno con dimensiones de 35,5 x 39,5 m. El ingreso del agua se hace por medio de tuberías ubicadas en la parte inferior de los decantadores, teniendo un total de 4 600 orificios (Sedapal, 2014). La recolección del agua se da por más de 3 100 orificios ubicados uniformemente en la superficie de los decantadores, para conducirla a la etapa de filtración (Sedapal, 2014). Al igual que los decantadores de la Planta N°1, los fangos recolectados son eliminados por medio de válvulas de purga teniendo como destino final su vertimiento gradual al río Rímac.



Figura 3.14: Decantadores pulsatores rectangulares de la Planta N°2 Fuente: Fotografía propia

Filtros

Los filtros de La Planta N°2 son similares al de la Planta N°1. Esta planta cuenta con dos módulos de filtración, cada uno ubicado en las dos distintas etapas de la planta. En cada módulo se encuentran 2 baterías de filtración dispuestas una enfrente de otra, teniendo una 6 filtros y la otra 5. Los filtros tienen una dimensión de 17,5 x 1,8 m, cada uno con una área de filtración de 140 m² (Sedapal, 2014). El ingreso de agua se da por la parte superior por medio de 3 compuertas manuales y 4 vejigas, por este medio pasa un flujo descendente y luego pasa por un un lecho filtrante. El mecanismo de filtración es igual que de la Planta N°1, sin embargo, cada filtro en esta planta cuenta con 7'560 toberas de polipropileno (Sedapal, 2014). El mantenimiento con respecto a la limpia de filtros también se da del mismo modo que la Planta N°1.

Reservorios

El agua ya purificada y apta para el consumo humano se almacena en los reservorios de La Atarjea lista para ser distribuida a las diferentes redes de conducción con el fin de abastecer a la ciudad de agua potable. Los reservorios tienen como función almacenar el agua en momentos de poco consumo, así como utilizarla en momentos de máximo consumo,

evitando la discontinuación de distribución de agua potable a los distintos distritos de Lima Metropolitana (Sedapal, 2014). Dentro de La Atarjea existen 5 reservorios, cuatro de 32'000 m³ y uno de 53'000 m³ de capacidad. Asimismo, fuera del área de La Atarjea se encuentran 4 reservorios con una capacidad total de 40'000 m³.

3.1.3.1 Químicos empleados en La Atarjea

En las plantas potabilizadoras de La Atarjea se utilizan diversos insumos para asegurar la calidad del agua de acuerdo a estándares establecidos por el MINSA (2019) dentro de los cuales se puede encontrar coagulantes, floculantes, desinfectantes y adsorbentes. A continuación se explicará cada uno de los insumos empleados y en las etapas dentro de los procesos de potabilización de los cuales su uso es requerido.

Coagulantes:

Las partículas finas encontradas en el agua cruda conocidas como partículas coloidales son las causantes de la turbiedad, color, olor y sabor del agua. Estas partículas, de carga negativa, se mantienen en suspensión por tiempo prolongado, teniendo una concentración estable sin aproximarse unas a otras (Andía, 2000). Para aglomerar y facilitar la eliminación de las partículas en suspensión dentro de los procesos de potabilización del agua, el empleo de coagulantes es necesario. Los coagulantes son productos químicos inocuos para la salud, conformados de sales con carga positiva (De Moel et. Al. 2006). Al estar en contacto con agua producen una reacción química, formando un precipitado absorbente, insoluble, conformado normalmente por el hidróxido metálico del coagulante en uso (Andía, 2000).

En el año 2016, la planta de La Atarjea empleó como coagulantes cloruro férrico, sulfato férrico y sulfato de aluminio. Las características de cada coagulante empleado se pueden visualizar en las Tablas 3.3, 3.4 y 3.5.

Tabla 3.3: Características del cloruro férrico empleado en La Atarjea.

Fuente: Fichas técnicas Sedapal (2019)

Cloruro Férrico en Solución al 40%	
Fórmula Química	: FeCl ₃
Color	: Marrón rojizo oscuro
Concentración de Cloruro Férrico (% FeCl ₃)	: 38% al 45%
Concentración de Cloruro Ferroso (% FeCl ₂)	: No mayor de 0,5%
Acidez Libre (HCl) % por Masa	: No mayor de 0,5%
Residuo Insoluble (%)	: No mayor de 0,5%
Densidad	: 1,40 g/cm ³ - 1,45 g/cm ³

Tabla 3.4: Características del sulfato de aluminio empleado en La Atarjea.

Fuente: Fichas técnicas Sedapal (2019)

Sulfato de Aluminio en Solución al 8%	
Fórmula Química	: $Al_2(SO_4)_3$
Color	: Pardo Amarillento
Concentración de Óxido de Aluminio (% Al_2O_3)	: 7,9% a 8,3%
Basicidad (% Al_2O_3 Libre)	: No Mayor de 0,20%
Acidez Libre (Como H_2SO_4)	: No Mayor de 0,20%
Fierro Total (%Fe_2O_3)	: No Mayor a 0,35%
Residuo Insoluble (%)	: No Mayor de 1,0%
Densidad	: 1,30 gr/cm ³ - 1,35 gr/cm ³

Tabla 3.5: Características del sulfato férrico empleado en La Atarjea. Fuente:

Fichas técnicas Sedapal (2019)

Sulfato Férrico en Solución	
Fórmula Química	: $Fe_2(SO_4)_3$
Color	: Café Oscuro
Concentración de Hierro Férrico (% Fe+3)	: Mayor a 11%
Concentración de Hierro Ferroso (% Fe+2)	: Menor a 0,5%
Acidez Libre (Como H_2SO_4)	: Menor a 3,5%
Cloruros	: Menor a 70 ppm, por cada 1% de Fe+3
pH	: Menor a 2
Residuo Insoluble (%)	: Menor a 0,1%
Densidad	: 1,49 gr/cm ³ -1,63 gr/cm ³

Estos coagulantes se utilizan en los puntos de tratamientos químicos, conocidos como obras de reparto o puntos de aplicación de reactivos, los cuales se encuentran al inicio de los procesos de potabilización de la Planta 1 y Planta 2 de La Atarjea. Para que la coagulación tome lugar de manera óptima en el agua a tratar, el pH es una variable importante a tener en cuenta. Ciertos rangos de pH definen el coagulante a ser usado (Andía, 2000). Para sales de aluminio, el rango de pH debe fluctuar entre 6,5 a 8 para que ocurra la coagulación y en el caso de sales de hierro, el pH debe estar entre 5,5 a 8,5 unidades (Andía, 2000).

En el año 2016, el pH promedio del Río Rímac estuvo en 8,16 unidades (INEI, 2018). En conversaciones con el ingeniero de planta que laboró en el 2017, el agua entrante a las Plantas 1 y 2 tienen un pH entre 7, 8 a 8, 4 unidades y con respecto a la dosis requerida de coagulantes, esta es variable ya que depende de la calidad del agua de ingreso a las plantas teniendo dosis de aplicación entre 18 a 40 ppm, según se requiera.

Floculantes:

Los floculantes son polímeros orgánicos formados por cadenas largas de monómeros, tienen pesos moleculares elevados y son solubles en agua (Andía, 2000). Son empleados principalmente como ayudantes en la aglomeración de flóculos procedentes de la coagulación, cuando se ha utilizado sales de aluminio o hierro como coagulante principal (Bolto et. Al, 2007). Los floculantes pueden ser de naturaleza mineral, orgánico natural y orgánico de síntesis. En los procesos de potabilización en La Atarjea se utilizan como floculantes arcillas activadas, polímeros aniónicos y catiónicos.

a) Arcillas Activadas

Es un floculante mineral producida por la neutralización parcial de silicato sódico con ácidos tales como ácido sulfúrico, sulfato de amonio, cloro, dióxido de carbono y sulfato de aluminio (Aguilar et al., 2002), forma coloides con carga negativa los cuales ayudan a incrementar el tamaño del flóculo y a reforzar la estructura de los hidróxidos metálicos durante la coagulación (Fan et al., 2003). Debido a que es una solución poco estable su preparación se realiza in situ, requiere de un delicado manejo ya que presenta riesgo de gelatinización (Andía, 2000). Las arcillas activadas son empleadas como ayudantes a la coagulación en la etapa de desarenación.

b) Polímeros aniónicos y catiónicos

Son floculantes orgánicos de síntesis conformados por macromoléculas de cadenas extensas con densidad de carga negativa (aniónicos) o positiva (catiónicos) característicos por poseer un gran peso molecular (Rabiee, 2010). Los polímeros aniónicos se identifican por estar compuestos de copolímeros de acrilamida y de ácido acrílico, y los catiónicos por copolímeros de acrilamidas y un polímero catiónico (Andía, 2000).

Los procesos que requieren la aplicación de polímeros aniónicos y catiónicos en La Atarjea son en la desarenación y en la decantación. En épocas de avenida, cuando la turbiedad del agua es elevada a comparación del resto del año, se emplea, en la etapa de pretratamiento, el polímero aniónico antes de ingresar a los desarenadores. Este polímero actúa como un coagulante, absorbiendo las partículas coloidales por medio de grupos químicos de amidas ubicado en sus extremidades, creando enlaces de hidrógeno (Andía, 2000). A su vez, los polímeros catiónicos son empleados todos los meses del año y tienen como función facilitar el crecimiento y aglomeración de los flóculos formados en la coagulación, y posibilitan la sedimentación de estos a causa del aumento de su tamaño y peso (Andía, 2000).

Adsorbentes:

El carbón activado es un material rico en carbón el cual posee una estructura interna porosa y una amplia área superficial, siendo el insumo adsorbente más antiguo utilizado en la purificación del agua cruda (Bhatnagar et al., 2013). Entre los más utilizados, se encuentra el carbón mineral (roca sedimentaria), biomasa natural como madera, biomasa residual tales como cáscara de coco, residuo leñoso, residuo de aceitunas, entre otros elementos (Campbell et al., 2012; Arena et al., 2016; Danish et al., 2018; Gu et al., 2018; Kim et al., 2018). La producción de carbón activado se realiza por medio de dos procesos: La carbonización y la activación. La carbonización consiste en eliminar los compuestos orgánicos volátiles del material empleado a través de un proceso térmico conocido como pirólisis. La pirólisis consiste en exponer la materia prima empleada en un ambiente inerte (en ausencia de oxígeno) a una temperatura entre 400°C a 850°C con el propósito de incrementar el contenido de carbono en el material (Campbell et al., 2012; Arena et al., 2016; Danish et al., 2018; Gu et al., 2018; Kim et al., 2018). A partir de este punto el producto obtenido mediante el uso de biomasa vegetal se conoce como carbón vegetal, biochar o charcoal (Campbell et al., 2012; Arena et al., 2016; Danish et al., 2018; Gu et al., 2018; Kim et al., 2018). El siguiente proceso para la producción de carbón activado, la activación, se da por medio físicos o químicos. Cuando se emplea una activación física, el carbón vegetal o mineral se expone a una temperatura mayor que la aplicada en la etapa de carbonización, la cual se sitúa entre 600°C a 1100°C, en donde se aplica continuamente un gas oxidante como vapor de agua, dióxido de carbono, nitrógeno u otro gas inerte o la mezcla de estos con la finalidad de reaccionar con el carbono presente en las muestras y de esta manera obtener una estructura microporosa, dando como resultado el carbón activado (Campbell et al., 2012; Danish et al., 2018; Gu et al., 2018; Kim et al., 2018). Si la activación se da por medios químicos, el carbón mineral o vegetal se impregna con un agente deshidratador, ya sea ésta alguna sustancia alcalina o ácida, para luego ser sometido a temperaturas menores a las aplicadas en la activación física de manera que se remueve el alquitrán de la materia empleada, obteniendo un producto final altamente poroso (Campbell et al., 2012; Danish et al., 2018; Gu et al., 2018; Kim et al., 2018). Luego, el producto final es lavado para remover cualquier residuo químico o impureza sobrante del proceso de activación para obtener como resultado el carbón activado.

El adsorbente utilizado en La Atarjea es el carbón activado. Su empleo tiene como fin eliminar las partículas causantes del mal olor y sabor del agua. En La Atarjea se suministra carbón activado en polvo al agua saliente de los desarenadores, por medio de un dosificador

volumétrico. Las características del carbón activado aplicado al agua se observan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Características del carbón activado empleado en La Atarjea. Fuente: Fichas técnicas Sedapal (2019)

Carbón Activado en Polvo	
Materia Prima	: Madera
Granulometría	
Pasa Malla 100	: 95% Mínimo
Pasa Malla 200	: 85% Mínimo
Pasa Malla 325	: 60% Mínimo
Humedad	: 8% Máximo en Masa
Densidad Aparente	: 0,2 gr/cm ³ a 0,75 gr/cm ³
Número de Yodo	: Mínimo 500 Mg/gr

Desinfectantes:

La desinfección tiene como propósito eliminar los microorganismos patógenos encontrados en el agua cruda, todo con el fin de evitar la propagación de enfermedades (De Moel et al., 2006). La inclusión del uso de desinfectantes dentro de los procesos de purificación del agua data de los años 1900, cuando en Bélgica se empieza a emplear el uso de cloro y se evidencia una disminución de enfermedades transmitidas por esta fuente (De Moel et al., 2006). En la actualidad, entre los diversos procesos de potabilización existentes, se puede encontrar la aplicación de cloro, ozono, radiación UV y dióxido de cloro como método de desinfección (De Moel et al., 2006).

a) Cloro

El cloro sirve, principalmente, como desinfectante, pero también se emplea como un agente oxidante para el control de olores y sabores en el agua, prevenir el crecimiento de algas, entre otras utilidades (De Moel et al., 2006). El gas licuado empleado en la planta de La Atarjea es inyectado en la salida de los desarenadores y en las salidas de las plantas N°1 y N°2 (inmediatamente después de salir de la etapa de filtración) con el fin de eliminar toda carga microbiológica contenida en el agua. En la Tabla 3.7 se encuentra las características del cloro utilizado para la etapa de pretratamiento y al salir de los filtros.

Tabla 3.7: Características del cloro empleado en La Atarjea. Fuente: Fichas técnicas Sedapal (2019)

Cloro Gas Licuado	
Fórmula Química	: Cl ₂
Color	: Amarillo Verdoso
Concentración	: 99,5% (Mínimo)
Gravedad Específica (Como gas seco a 0°C y 1atm)	: 2,482
Gravedad Específica (Líquido de 0°C a 4°C)	: 2,482
Impurezas y Otros Gases Residuales	: 0,1% (Máximo)
Humedad	: Menor a 150 ppm (0,015% de peso)

b) Sulfato de Cobre

El sulfato de cobre es un químico utilizado como alguicida para evitar el crecimiento de cianobacterias, especialmente en reservorios de agua designados para el consumo humano (Garcia-Villada et al., 2004). En la planta de La Atarjea se emplea en los dos reservorios la presentación granular del sulfato de cobre como manera de evitar la proliferación de algas. Los cristales azules se colocan debajo de cilindros huecos que flotan equitativamente en toda el área superficial de los reservorios para luego disolverse en toda su superficie, eliminando las cianobacterias presentes en el agua.

CAPÍTULO 4: Metodología

4.1. Definición del objetivo y alcance

El siguiente estudio tiene como objetivo realizar el ACV mensual y anual de las plantas potabilizadoras de La Atarjea para un periodo operativo de 12 meses, desde enero hasta diciembre del 2016. La potabilizadora ofrece sus servicios a aproximadamente 9,5 millones de personas dentro de un rango de 3'504 km² (INEI, 2017) y cuenta con una capacidad de producción diaria de 1'400'000 m³ (Sedapal, 2018). El estudio tiene un alcance desde la captación del agua cruda proveniente de río Rímac hasta que esta es almacenada y lista para su distribución. Sólo se efectúa el ACV de la fase operacional de planta potabilizadora, dentro los cuales se encuentran los siguientes procesos: Bocatoma, desarenación, embalses, decantación y filtración. La unidad funcional es de 1 m³ de agua potabilizada en planta, la cual cumple con los estándares de calidad de agua establecidos por el MINSA (2011). Debido a que los datos propiciados son de las dos plantas trabajando en conjunto, para fines prácticos se reduce el proceso de las dos plantas a sólo una.

La principal fuente de obtención de datos fue por medio del anuario estadístico de la empresa Sedapal para el año 2016. Se recopilaron datos primarios tales como la cantidad y tipo de químicos empleados, consumo eléctrico y volumen tratado mensual y anual (enero a diciembre) del año 2016 (Sedapal 2017, 2018). Estos datos tienen un alto nivel de confiabilidad debido a que fueron recolectados de la base de datos de las oficinas de Sedapal. Igualmente, se logró adquirir las fichas técnicas para la mayor parte de los químicos utilizados en la planta (Véase Anexo 1). Las dudas y aclaraciones sobre los datos y procesos fueron resueltas por el Ingeniero de planta que laboró en el año 2017 en la planta potabilizadora. El modelado se realizó mediante el software SimaPro empleándose como fuente de datos secundarios la base de datos Ecoinvent v3. Se optó en utilizar tres distintas metodologías de categorías de impacto: IPCC 2013, USEtox 2 y ReCiPe 2016 evaluándose las categorías de cambio climático, toxicidad humana cancerígeno, toxicidad humana no cancerígeno, ecotoxicidad del agua dulce, acidificación terrestre, eutrofización del agua dulce y eutrofización marina. En la Figura 4.1 se detalla los procesos unitarios a ser evaluados para este estudio, también se incluyen las entradas y salidas del sistema indicando los límites del estudio.

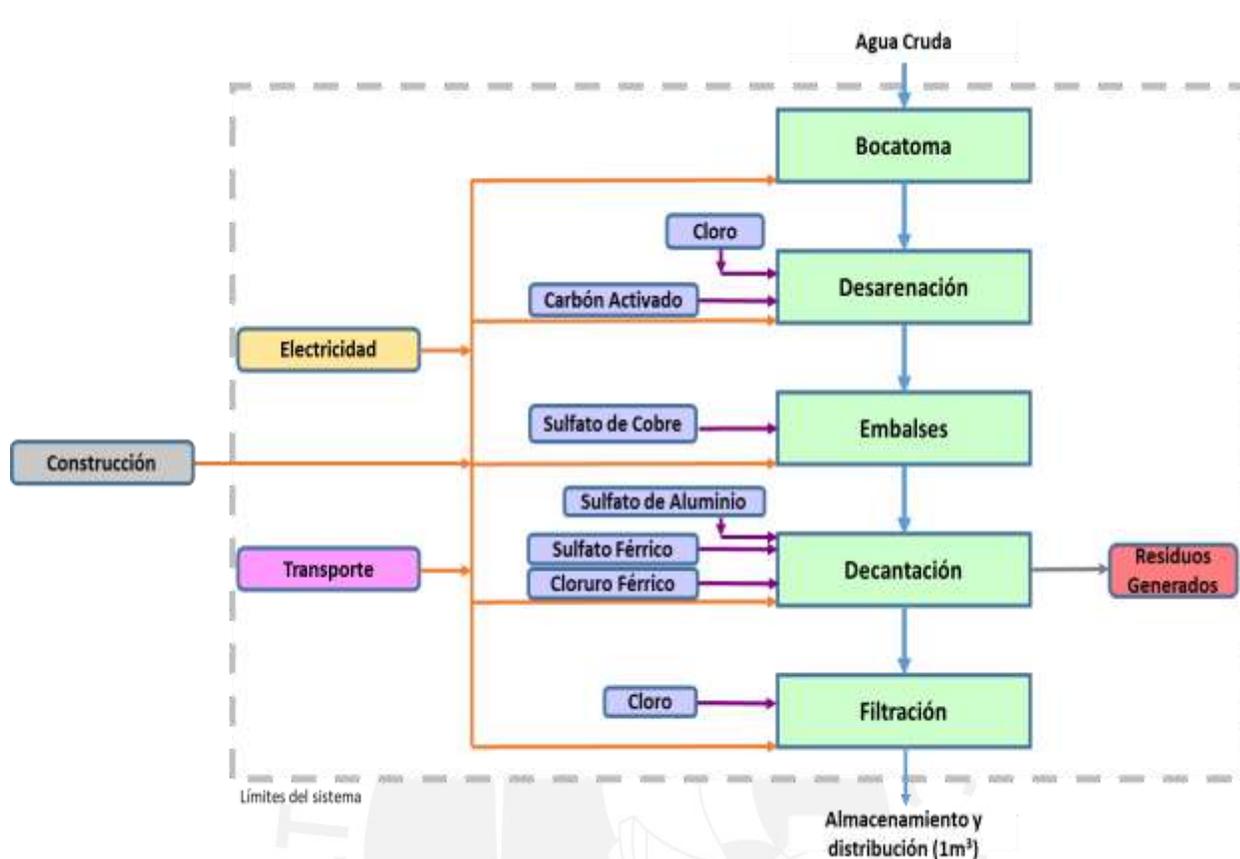


Figura 4.1: Límites del sistema del presente estudio. Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Limitaciones y suposiciones

Las siguientes limitaciones y suposiciones fueron realizadas para efectuar de manera representativa el ACV del presente estudio:

Durante la realización del estudio se presentaron diversos inconvenientes, ocasionando que el alcance inicialmente propuesto fuera modificado. Debido a que la obtención de datos relacionada a la etapa de construcción de la planta no pudo ser obtenida y en base a lo encontrado en la revisión bibliográfica, la etapa constructiva no fue considerada dentro del alcance en el presente estudio, limitando sólo a incluir la etapa de operación de la planta de La Atarjea.

En el caso del carbón activado, no se encontró un registro de producción dentro de la base de datos Ecoinvent tal que se aproximara a las especificaciones encontradas en la ficha técnica del insumo empleado en La Atarjea. Con el objetivo de no excluir este insumo dentro de ACV se procedió en modelar la producción de carbón activado con el respaldo de la bibliografía

encontrada, la base de datos de Ecoinvent y, de igual manera, con las especificaciones del carbón activado utilizando en la planta el cual se explicará en el capítulo 4.2.2.1.

La información sobre la calidad y la cantidad de los lodos emitidos en todos los procesos de la planta potabilizadora de La Atarjea no pudo ser obtenida por medio de la empresa Sedapal. Sin embargo, no se quiso descartar los potenciales impactos asociados a la emisión de los lodos que son vertidos al río Rímac. Los lodos generados dentro de los procesos de potabilización presentan, aparte de partículas coloidales e impurezas en suspensión del agua cruda captada, los precipitados de hidróxido provenientes de las sales utilizadas como coagulantes en la purificación del agua (Ahmad et al., 2016). Debido a que sólo se tiene información sobre los químicos empleados en la planta, se decidió realizar un balance de masas, en el cual se asume que todos los químicos utilizados hasta la etapa de decantación son eliminados dentro de las purgas producidas en las etapas de potabilización. La elaboración de esta salida se detalla en el subcapítulo 4.2.5.

Con respecto a la matriz energética peruana encontrada en la base de datos de Ecoinvent, esta data del año 2014. Como manera de representar los impactos asociadas al consumo eléctrico dentro de La Atarjea se procedió a modelar la matriz energética propuesta por PELCAN para el año 2016, cuyos datos fueron obtenidos directamente por dicho grupo de investigación, donde la metodología para este modelamiento es formulada por Vázquez-Rowe et al. (2015). Esta matriz considera que la generación de energía eléctrica proviene de energía hidráulica, gas natural, carbón, diésel, eólica, biogás, bagazo y solar y sus aportes se pueden apreciar en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Matriz energética peruana para el año 2016.

Fuente: Modificado de Vázquez et al. (2015)

Mezcla energética Perú (2016)	
Hidráulica	48.1%
Gas Natural	47.7%
Carbón	0.4%
Diesel	0.6%
Eólico	2.2%
Biogas	0.1%
Bagazo	0.3%
Solar	1%

En el caso de los datos obtenidos sobre el consumo energético de la planta, se obtuvo valores mensuales y anuales del cuál no se pudo desconocer si está también incluido el consumo

energético de las oficinas administrativas que se encuentran adyacentes a la planta. Debido a esto, se asume que la información obtenida no incluye el consumo eléctrico de dichas oficinas.

En la elaboración del ACV se toma en consideración el transporte de los diversos químicos utilizados en los procesos de potabilización hacia la planta de La Atarjea. Examinando las licitaciones públicas que efectuó Sedapal en el año 2016 (Sedapal, 2016) se encontró que Quimpac S.A., Aris Industrial S.A. y Mercantil S.A. son las tres principales empresas que proveen a la planta de insumos químicos. Quimpac S.A., Aris Industrial S.A. elaboran sus productos en la ciudad de Lima, sin embargo, Mercantil S.A. es una empresa que efectúa el comercio exterior. Las consideraciones efectuadas con respecto al transporte de los químicos hacia la planta se explicarán en el subcapítulo 4.4.4.

4.2. Inventario de ciclo de vida

Esta etapa es esencial y base para iniciar el análisis de ciclo de vida y a su vez fue la que más tiempo tomó en realizar. En ella se detalla las entradas y salidas dentro de los límites del sistema en estudio. A continuación se presentará los datos primarios obtenidos para realizar el ICV.

4.2.1 Agua potabilizada

En el año 2016, el volumen de agua tratado fue de 511'360 miles de metros cúbicos (Sedapal, 2017), registrándose la mayor producción el mes de mayo. Sin embargo, se perdió aproximadamente del 1% al 4% del agua inicialmente captada para ser tratada debido a pérdidas

Tabla 4.2: Producción bruta y neta de la planta de La Atarjea para el año 2016. Fuente: Sedapal, 2017

Mes	Volumen entrante (m ³)	Pérdidas (m ³)	Volumen tratado (m ³)
ENE.	44133390	832763	43300627
FEB.	45384720	996893	44387827
MAR.	47663141	515525	47147616
ABR.	46856469	1453942	45402527
MAY.	44697611	1237759	43459852
JUN.	42321981	1387454	40934527
JUL.	42885518	1266915	41618603
AGO.	43294145	1593073	41701072
SEP.	42693652	1142394	41551258
OCT.	43539685	1458425	42081260
NOV.	41186044	1448787	39737257
DIC.	40848531	811300	40037231
TOTAL	525504887	14145230	511359657

localizadas en los distintos procesos de potabilización. Para la elaboración de este estudio se tomará la data detallada en la Tabla 4.2 la cual muestra los volúmenes tratados para el año 2016, incluidas las pérdidas y la producción neta de las plantas en conjunto.

4.2.1.1 Pérdidas de agua cruda

En el año 2016, se necesitó de 1.03 m³ de agua cruda para obtener 1 m³ de agua potable. Para distribuir las pérdidas en cada proceso de potabilización primero se procedió a determinar la evaporación de las superficies de agua que estuvieran expuestas al ambiente (desarenadores y embalses). Para hallar dicha evaporación se utilizó la fórmula de Penman mediante la metodología propuesta por PHI UNESCO-LAC (2006). Los datos para realizar este cálculo fueron realizados mediante el uso de Google Earth y e información hidrometeorológica de SENAMHI (2019). Luego, se estableció que la diferencia entre las pérdidas totales y las pérdidas por la evaporación eran eliminadas en conjunto con los lodos generados hasta la etapa de decantación. En la Tabla 4.3 se resumen el cálculo de las pérdidas de agua cruda para todo el año 2016

Tabla 4.3: Pérdidas de agua cruda mensuales dentro de los procesos de potabilización de La Atarjea para el año 2016 (m³). Fuente: Sedapal, 2017

Mes	Pérdidas por evaporación (m ³)	Pérdidas en la decantación (m ³)	Pérdidas toales (m ³)
ENE.	61454	771309	832763
FEB.	60174	936719	996893
MAR.	59700	455825	515525
ABR.	43349	1410593	1453942
MAY.	29611	1208148	1237759
JUN.	19294	1368160	1387454
JUL.	21371	1245544	1266915
AGO.	23335	1569738	1593073
SEP.	29124	1113270	1142394
OCT.	41481	1416944	1458425
NOV.	50789	1397998	1448787
DIC.	58169	753131	811300
TOTAL	497852	13647378	14145230

4.2.2 Insumos químicos

La Tabla 4.4 detalla el tipo y cantidad de químicos utilizados a lo largo del 2016 en la planta de La Atarjea Estos datos se utilizarán para realizar el ICV del estudio. Se pudieron obtener las fichas técnicas de la mayoría de los químicos utilizados en la planta. No obstante, en el caso de las arcillas activadas, polímeros aniónicos y catiónicos al igual que el sulfato de cobre no se

logró obtener las características técnicas y la descripción de estos se basa en lo encontrado en la literatura.

Tabla 4.4: Químicos empleados en los procesos de potabilización de La Atarjea para el año 2016. (Toneladas). Fuente: Sedapal ,2017

Químico	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
Sulfato de Aluminio Solucion	25	0	0	1128	1496	819	850	767	702	575	639	752
Cloro 907	155	125	136	114	90	80	119	96	78	78	80	82
Cloro Granel	345	334	272	296	308	312	306	318	312	321	264	269
Polimero Aniónico	0.1	4	5	0.2								
Polímero Catiónico	0.3	3.8	6	10	14	12	12	11	11	11	10	10
Cloruro Férrico al 40%	900	1294	1149	563	97	431	365	413	414	496	567	462
Sulfato de Cobre	21	22	16	22	25	24	28	27	25	50	58	49
Carbón Activado	300	211	269	164	16	143	408	424	312	432	441	451
Sulfato Férrico	244	216	675	47						47		
Arcillas Activadas												3.3

4.2.2.1 Carbón Activado

Para el modelamiento de producción del carbón activado utilizado en la planta de La Atarjea, se tomaron datos de Kim et al. (2018) y de la base de datos Ecoinvent 3.0. Primero, en la base de datos de Ecoinvent se encontró un proceso para la obtención de 1kg de carbón vegetal (Charcoal {GLO}| production | APOS, U), el cual se considerará como el primer proceso para la obtención de carbón activado: la carbonización. Los datos complementarios para la realización del carbón activado son obtenidos de Kim et al. (2018). Realizando las conversiones necesarias, se encontró que se necesita 2.01 kg de carbón vegetal, 0.06kg de agua destilada, 0.04 kg de kerosene y 0.009 kWh de energía eléctrica para la producción de 1kg de carbón activado. Debido a que el carbón activado empleado en La Atarjea proviene de China, se decidió utilizar la mezcla energética de este país, de manera que el modelado sea representativo. No hay salidas en el sistema modelado ya que la información del ciclo de vida de los subproductos obtenidos en la producción de carbón activado es escaso (Kim et. al., 2018).

4.2.3 Consumo eléctrico

Los procesos de potabilización dentro de La Atarjea son continuos las 24 horas del día. La planta no demanda de mucha energía eléctrica debido a que el agua sigue un flujo por medio de la gravedad desde que es captada hasta que es almacenada. Sedapal contrata el servicio de electricidad por medio de la empresa Luz del Sur. El consumo total por medio de las dos plantas de Atarjea para el año 2016 fue de 5'249 mWh (ver Tabla 4.5) donde el mes con mayor consumo fue febrero y julio donde se requirió de menos energía.

Tabla 4.5: Consumo de energía eléctrica mensual de La Atarjea para el año 2016. Fuente: Sedapal, 2017.

Mes	Consumo eléctrico (MWh)
ENE.	457
FEB.	471
MAR.	433
ABR.	449
MAY.	440
JUN.	454
JUL.	416
AGO.	424
SEP.	417
OCT.	443
NOV.	462
DIC.	384
TOTAL	5249

4.4.4 Transporte de insumos

Para la inclusión del transporte de los insumos químicos utilizados en la planta, se conoce que el cloro 907, cloro granel, cloruro férrico y sulfato de aluminio son obtenidos de las empresas locales QUIMPAC S.A. y ARIS S.A., mientras que el carbón activado de Mercantil S.A., sin embargo, se desconoce la obtención de los químicos restantes. Como manera de incluir el transporte para todos los químicos, se asumió que los químicos restantes son elaborados en Lima, y que la distancia considerada sería un promedio entre las sedes de las dos empresas nacionales hacia la planta de La Atarjea. En el caso del carbón activado, se encontró que es un insumo importado desde China, elaborado por la empresa Hangzhou Hengxing Activated Carbon Co., Ltd. (MINSAb, 2019). En el cálculo de la distancia del carbón activado hasta la planta de La Atarjea se consideró lo siguiente: 1. La distancia desde la planta de producción del producto hasta el puerto más cercano a esta 2. Distancia desde el puerto considerado hasta el puerto de

Callao por vía marítima y 3. Distancia del puerto de Callao hasta la planta potabilizadora. Las distancias consideradas para el transporte de los insumos nacionales e internacionales se encuentran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Distancias consideradas para el transporte de insumos químicos hacia La Atarjea (km).

Transporte	Distancia (km)
Transporte nacional:	
Fábrica insumos - Sedapal	29
Transporte internacional:	
Fábrica insumo China- Puerto China	323
Puerto China- Puerto Callao	17257
Puerto Callao- Sedapal	21

4.2.5 Residuos generados en los decantadores

Debido a que no se tiene información de los lodos emitido durante los procesos de potabilización, se decidió realizar un balance de masas asumiendo que los químicos utilizados en la planta son eliminados en conjunto con las purgas, hasta la etapa de decantación. Primero, se hallaron las concentraciones 5 compuesto químico empleados en la planta y se encontró las siguientes concentraciones para cada insumo: sulfato férrico al 45%, cloruro férrico al 40%, sulfato de aluminio al 27%, sulfato de cobre al 100% y cloro al 100%. Luego, se procedió a realizar la descomposición química de cada compuesto llegando a sus componentes elementales. De esta desintegración se obtuvo elementos químicos como aluminio (Al), Azufre (S), Hierro (Fe), Cobre (Cu), y Cloro (Cl), los cuales son incluidos en las purgas de los decantadores y sus impactos están asociados como emisiones al agua debido a que son vertidos en el río Rímac.

4.3. Evaluación de impactos de ciclo de vida

El AICV se realizó mediante el uso del software SimaPro 8.5.2.0, la base de datos de Ecoinvent 3.0 y optando por tres distintas metodologías de categorías de impacto: IPCC 2013, USEtox 2 y ReCiPe 2016. La elección de las categorías a ser evaluadas se basó en lo encontrado en la revisión de la literatura y en las necesidades de este estudio, entre las cuales se seleccionaron las categorías de Cambio Climático, Toxicidad humana cancerígeno, Toxicidad humana no cancerígeno, Ecotoxicidad del agua dulce, Acidificación terrestre, Eutrofización del agua dulce y Eutrofización marina. La Tabla 4.7 resume las metodologías empleadas en este estudio, tal como la respectiva categoría que analiza y la unidad de caracterización.

Tabla 4.7: Metodologías y categorías de impacto analizadas en el presente estudio

Metodología	Categoría de impacto	Abreviación	Unidad
IPCC 2013	Cambio climático	CC	Kg CO ₂ eq.
USEtox 2	Toxicidad humana cancerígena	THC	Casos
	Toxicidad humana no cancerígena	THNC	Casos
	Ecotoxicidad del agua dulce	EAD	PAF.m ³ .día
ReCiPe (H) 2016	Acidificación terrestre	AT	kg SO ₂ eq.
	Eutrofización del agua dulce	ETAD	kg P eq.
	Eutrofización del agua marina	ETAM	kg N eq.

4.4. Análisis de sensibilidad

La única producción de carbón activado encontrada en la base de datos de Ecoinvent tenía como materia prima carbón mineral, la cual no era compatible con el insumo utilizado en la planta. Como manera de incluir la producción del carbón activado utilizado como adsorbente se procedió a crear un nuevo proceso donde se tomó la producción de carbón vegetal directamente de la base de datos de Ecoinvent y para complementar los procesos restantes se tomó datos de la literatura (Kim et al., 2018) los cuales fueron adaptados a para un escenario de producción en China. Tal modelado genera cierta incertidumbre, ya que se está tomando un proceso global de producción de carbón vegetal y tomando procesos complementarios para obtener carbón activado en base a un proceso realizado en Corea.

En la elaboración del análisis de sensibilidad se proponen dos escenarios: El escenario 1 (E1) en el que se realiza el ACV de la planta para todo el año 2016, incluyendo el proceso de carbón activado descrito en el capítulo 4.2.2 y el escenario 2 (E2) en el cual se plantea que la materia prima para la elaboración de carbón activado proveniente de desechos de madera, tal como lo efectuado por Kim et al. (2018). Los procesos considerados para este escenario son el pretratamiento de la madera, el cual consta del astillado y secado, luego sigue la carbonización para después obtener el carbón activado por medio de la activación cuyos datos considerados se pueden encontrar en la Tabla 4.8. Como se realizó previamente para el E1, en este escenario también se adapta el lugar de producción de los insumos para China.

Tabla 4.8: Insumos necesarios para modelar la producción de carbón activado. Fuente:
Adaptado de Kim et al. (2018)

Componente	Cantidad
Entradas:	
Materia Prima	
Madera Reciclada (kg)	8.475
Materiales/Combustibles	
Agua (kg)	0.060
Kerosene (kg)	0.047
Diesel (kg)	0.064
Electricidad	
Mezcla eléctrica- China (kWh)	0.021
Salidas:	
Producto de la madera reciclada (kg)	1

CAPÍTULO 5: Resultados e interpretación de resultados

5.1. Evaluación de ciclo de vida

La evaluación de ciclo de vida empleando las metodologías IPCC 2013, USEtox 2 y ReCiPe 2016 mostraron los siguientes resultados expuestos en la Tabla 5.1. En los siguientes subcapítulos se detallará la etapa en la cual se encuentran estos impactos tal como la fuente de estos.

Tabla 5.1: Resultados mensuales y anuales obtenidos para las distintas metodologías y categorías de impactos evaluadas en el presente estudio

Mes	Categorías de Impacto						
	CC(Kg CO ₂ eq.)/m ³	THC (casos)/m ³	THNC (casos)/m ³	EAD (PAF.m ³ .día)/m ³	AT (kg SO ₂ eq)/m ³	ETAD (kg P eq)/m ³	ETAM (kg N eq)/m ³
ENE	6.77E-02	5.08E-09	4.19E-08	4.03E+03	3.17E-04	4.45E-05	3.25E-06
FEB	6.83E-02	5.50E-09	4.58E-08	4.41E+03	3.31E-04	4.93E-05	3.99E-06
MAR	6.56E-02	4.87E-09	3.84E-08	3.84E+03	3.36E-04	4.18E-05	3.54E-06
ABR	5.75E-02	1.57E-08	5.09E-08	8.30E+03	4.03E-04	4.55E-05	3.44E-06
MAY	4.19E-02	1.94E-08	5.51E-08	1.00E+04	4.15E-04	4.49E-05	3.41E-06
JUN	5.38E-02	1.34E-08	5.12E-08	7.61E+03	3.71E-04	4.60E-05	3.67E-06
JUL	7.35E-02	1.39E-08	5.51E-08	8.02E+03	4.22E-04	4.97E-05	3.91E-06
AGO	7.46E-02	1.29E-08	5.34E-08	7.55E+03	4.11E-04	4.88E-05	3.83E-06
SEP	6.37E-02	1.19E-08	4.95E-08	7.01E+03	3.71E-04	4.52E-05	3.60E-06
OCT	7.64E-02	1.21E-08	7.58E-08	9.22E+03	4.70E-04	6.80E-05	5.04E-06
NOV	8.33E-02	1.41E-08	9.05E-08	1.11E+04	5.37E-04	8.02E-05	5.75E-06
DIC	8.03E-02	1.46E-08	7.93E-08	1.04E+04	5.07E-04	7.00E-05	5.07E-06
TOTAL	6.68E-02	1.19E-08	5.66E-08	7.54E+03	4.03E-04	5.24E-05	3.97E-06

Nota: CC= Cambio climático; THC= Toxicidad humana cancerígena; THNC= Toxicidad humana no cancerígena; EAD= Ecotoxicidad del agua dulce; AT= Acidificación terrestre; ETAD= Eutrofización del agua dulce; ETAM= Eutrofización del agua marina

5.1.1. Cambio Climático

Los impactos totales para la categoría de Cambio Climático fluctúan entre 0.0418 kg CO₂-eq/m³ y 0.0830 kg CO₂-eq/m³, teniendo un promedio para todo el año de 0.0668 kg CO₂-eq/m³. Se observa en la Figura 5.1 que el mayor impacto se da en el mes de noviembre, del cual el 59% de estos impactos están relacionados a la etapa de pretratamiento, 34% la etapa de tratamiento físico- químico y el 7% asociado al transporte de insumos y al consumo eléctrico de la planta. Dentro de la etapa de pretratamiento, el 51% de los impactos se lleva a cabo en la etapa de desarenación.

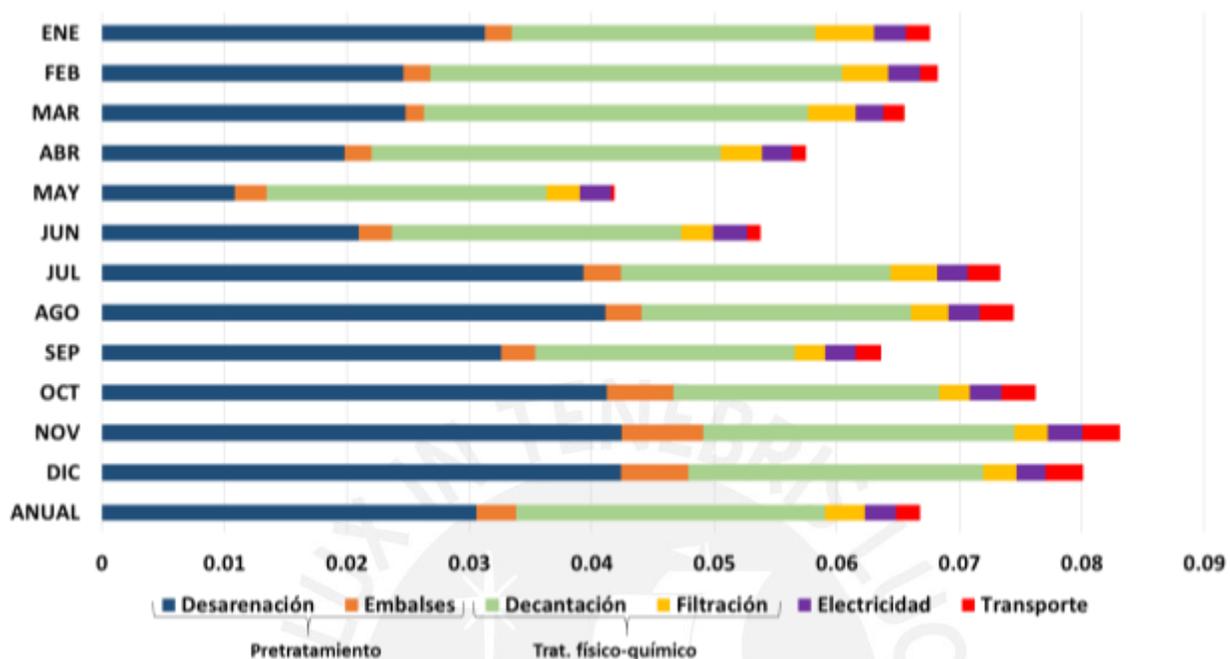


Figura 5.1: Resultados mensuales y anual para la categoría de cambio climático (Kg CO₂-eq)

Al analizar los impactos para 7 de los meses estudiados (enero, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre), tal como en el promedio anual, se encontró que los impactos en la etapa de desarenación están asociados al uso de carbón activado. Esto se debe a la producción de carbón vegetal, del cual las emisiones están relacionadas con emisiones al aire de metano biogénico durante la producción de carbón vegetal (charcoal) para obtener carbón activado. Con respecto a la etapa físico-química en estos 7 meses, en el proceso de decantación, la producción de cloruro férrico es la que mayores impactos aporta a esta etapa debido al uso de energía eléctrica requerida para la fabricación de dicho insumo. En conjunto, los impactos asociados a la producción de carbón activado y cloruro férrico suman un 54% de los impactos totales para esta categoría en todo el 2016.

En el caso del mes de mayo, donde los impactos son menores, el 61% de estos se da en la etapa de tratamiento físico-químico, del cual el 54% del impacto total se debe a la decantación. El proceso que genera mayores impactos es la producción de sulfato de aluminio debido al uso de energía requerida para su producción. La etapa de pretratamiento (32% de los impactos) los desarenadores son el mayor aporte de emisiones. Esto se debe a consumo eléctrico requerido

para la generación de cloro gas licuado. En contraste, el transporte de insumos y el consumo eléctrico de la planta se llevan el 7% de los impactos totales.

5.1.2. Toxicidad humana cancerígena

Los resultados para la categoría de toxicidad humana cancerígena se aprecian en la Figura 5.2 que en todos los meses la mayor carga de impactos se da dentro de los tratamientos físico-químicos realizados en La Atarjea, específicamente en el proceso de decantación. El impacto promedio para el año 2016 fue de $1.19\text{E}-08$ casos/ m^3 . El mes de mayo es donde se generó los mayores impactos en todo el año, en el cual aproximadamente 11% de los impactos se asocian a la etapa de pretratamiento, 89% en la etapa físico química y el resto (menos del 1%) están relacionados al consumo eléctrico y de transporte. Dentro de la etapa fisicoquímica, el 88% de los impactos están asociados a la decantación, vinculado directamente a la producción de sulfato de aluminio. Durante la producción de este insumo se generan emisiones al agua de óxido de cromo (IV) debido a la producción de hidróxido de aluminio, causante de los impactos asociados a esta categoría de impacto.

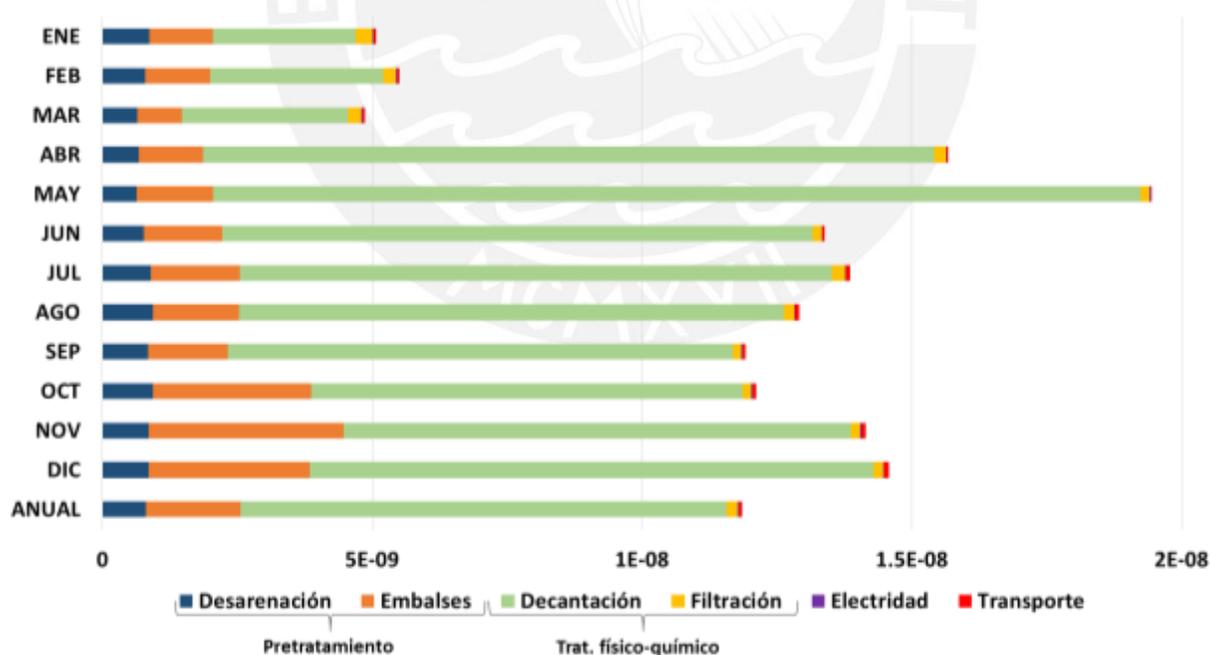


Figura 5.2: Resultados mensuales y anual para la categoría de toxicidad humana cancerígena (Casos)

5.1.3 Toxicidad humana no cancerígena

En la categoría de toxicidad humana no cancerígena se aprecia en la Figura 5.3 que a lo largo del año 2016 la etapa de pretratamiento es la que mayor carga ambiental posee, teniendo un valor promedio anual de $5.66E-08$ casos/ m^3 . Analizando el mes con el mayor impacto total (noviembre), se encontró que la etapa de pretratamiento tuvo un 77% respecto a los impactos totales, destacando la etapa de embalses que obtuvo un 73% de los impactos totales producto de emisiones de diversos metales al agua y al aire tales como arsénico, zinc, plomo y cadmio durante la obtención de óxido de cobre, insumo necesario para la producción de sulfato de cobre. En el mes de marzo, donde se produce la menor cantidad de impactos, los impactos asociados a la etapa de pretratamiento así como la físico-química presentan valores cercanos (47% y 52%, respectivamente). Los impactos asociados a la etapa de decantación se deben al uso de sulfato de aluminio a causa de emisiones de arsénico y mercurio al agua y al aire para la obtención de cobre, insumo necesario para su producción. En todos los meses las cargas ambientales asociadas a la etapa de consumo eléctrico así como de transporte son menos del 1% de los impactos totales.

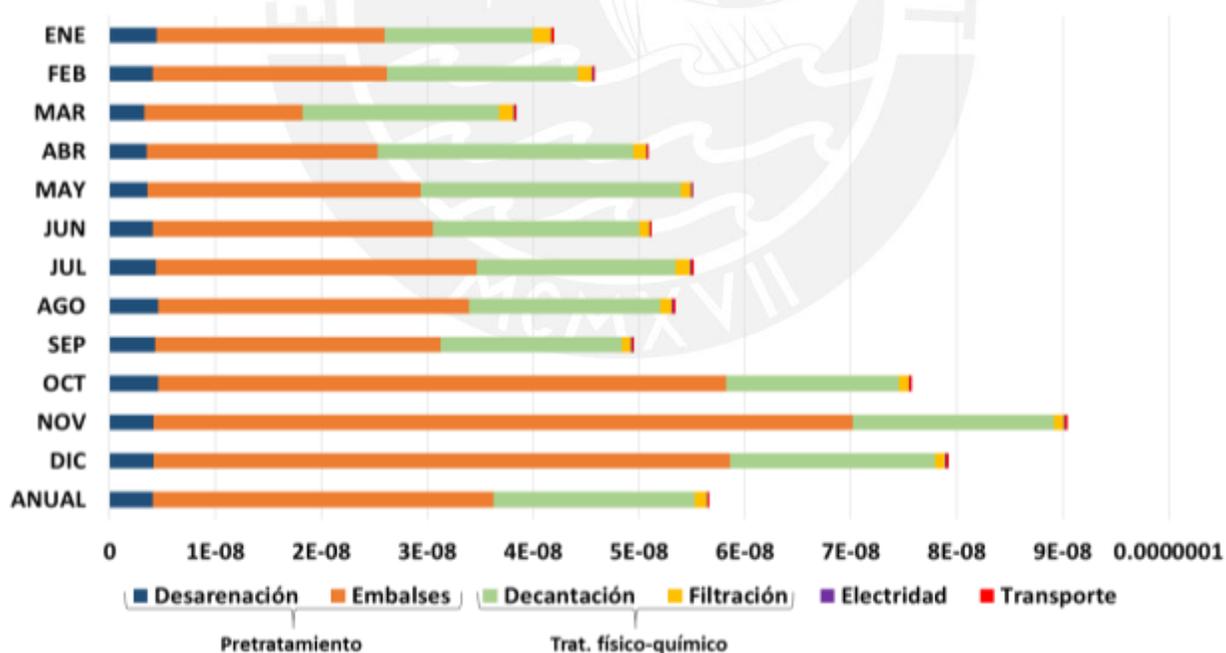


Figura 5.3: Resultados mensuales y anual para la categoría de toxicidad humana no cancerígena (Casos)

5.1.4 Ecotoxicidad del agua dulce

La carga ambiental registrada para la categoría de ecotoxicidad del agua dulce en el año 2016 fue de $7.54E+03$ PAF.m³.día/m³ y, como se ve en la Figura 5.4, los impactos en todos los meses son dominantes en la etapa fisicoquímica. En la etapa de pretratamiento los impactos totales para todos los meses varía entre el 5% al 11%. Respecto a la etapa fisicoquímica, estos impactos fluctúan entre el 89% hasta el 95% de los impactos totales donde la mayoría de impactos se asocian a los procesos de decantación. Se encontró que las emisiones al agua y al aire de elementos químicos tales como aluminio, cobre y hierro proveniente del control de masas realizado son los causantes de estos impactos. El impacto relacionado al uso eléctrico de la planta y al transporte de los insumos necesarios para la potabilización del agua registra menos del 1% de los impactos totales para todos los meses evaluados.

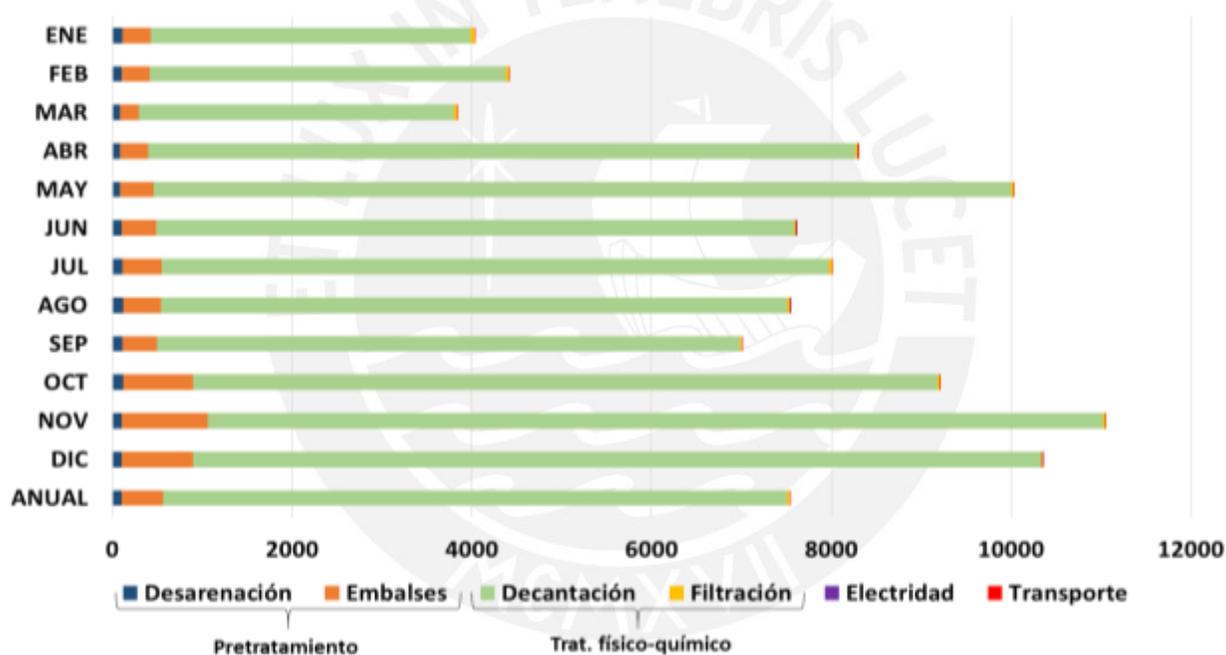


Figura 5.4: Resultados mensuales y anual para la categoría de ecotoxicidad del agua dulce (FPA.m³.día)

5.1.5. Acidificación terrestre

En la categoría de acidificación terrestre, para el año 2016, se obtuvo un impacto promedio anual de $4.03E-04$ kg SO₂ eq/m³. En la Figura 5.5 se observa que los impactos son dominantes en la etapa de pretratamiento para los meses de octubre, noviembre y diciembre, mientras en el resto de meses la mayor carga ambiental se da en la etapa físico-química. El mayor y menor impacto total se dan en los meses de noviembre y enero, respectivamente. En noviembre, la etapa de pretratamiento tiene un aporte del 54% respecto al total de todos los

impactos. Esto se debe a la emisión de dióxido de sulfuro y amonio al aire debido a la producción de cobre necesario para la producción de sulfato de cobre. En la etapa fisicoquímica, el mayor impacto se da en los decantadores (36% de los impactos totales) debido a la producción de sulfato de aluminio. El impacto asociado al uso de energía eléctrica y al transporte de insumos es del 8% respecto a los impactos totales para este mes, en el cual el aporte del transporte terrestre debido a emisiones de nitrato domina estos impactos

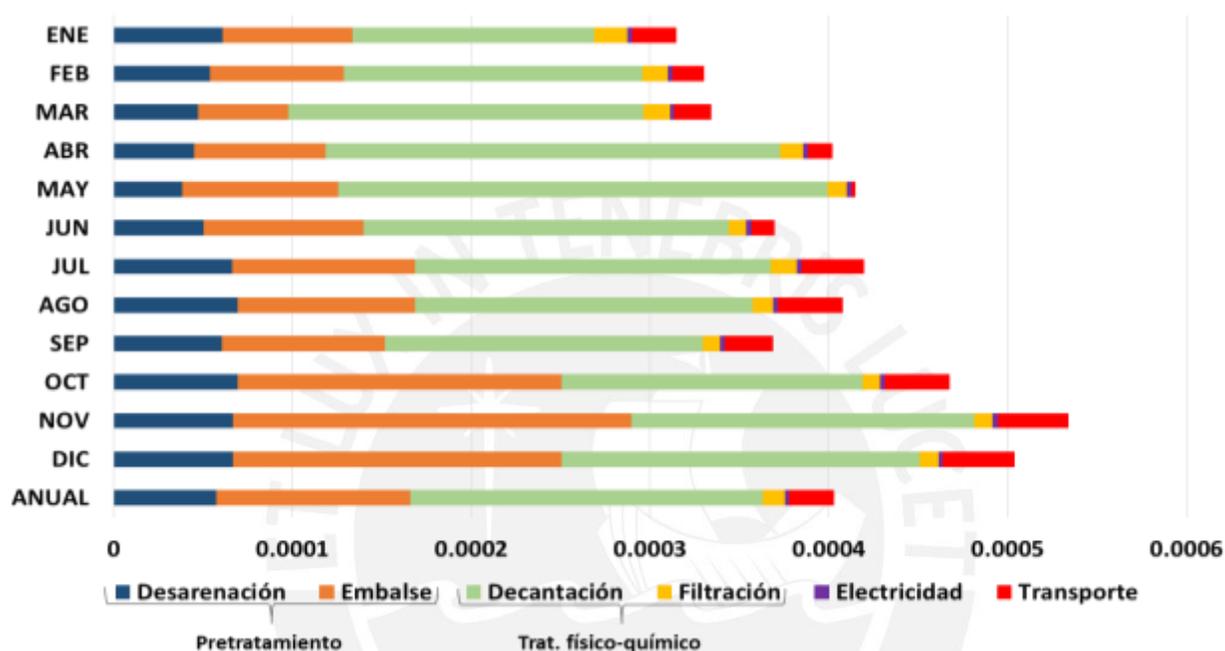


Figura 5.5: Resultados mensuales y anual para la categoría de acidificación terrestre (Kg SO₂ eq)

En el mes de enero los impactos por la etapa de pre-tratamiento y físico-químico es de 42% y 49% respectivamente. Los impactos asociados a estas etapas son las mismas mencionadas para el mes de noviembre. El uso de energía eléctrica de igual manera que en noviembre es despreciable y el impacto asociado por el transporte de químicos es de 9%.

5.1.6 Eutrofización del agua dulce

Los impactos asociados para la categoría de eutrofización del agua dulce para el año 2016 obtuvo un valor de 5.24E-05 kg P eq/m³. Como se observa en la Figura 5.6 los mayores impactos están ubicados en la etapa de pretratamiento, en excepción en el mes de marzo. La mayor y menor carga de impactos a lo largo del 2016 se da en el mes de noviembre y marzo, respectivamente. En noviembre, el 76% de los impactos totales se da en la etapa de pretratamiento. De este, el 67% se debe a la etapa de embalses, esto a causa de las emisiones de fosfato al agua durante la obtención de cobre para la producción del sulfato de cobre. En la

etapa fisicoquímica, los impactos asociados a la etapa de decantación (24%) están vinculados a emisiones de fósforo al suelo como consecuencia de la producción del coagulante cloruro férrico.

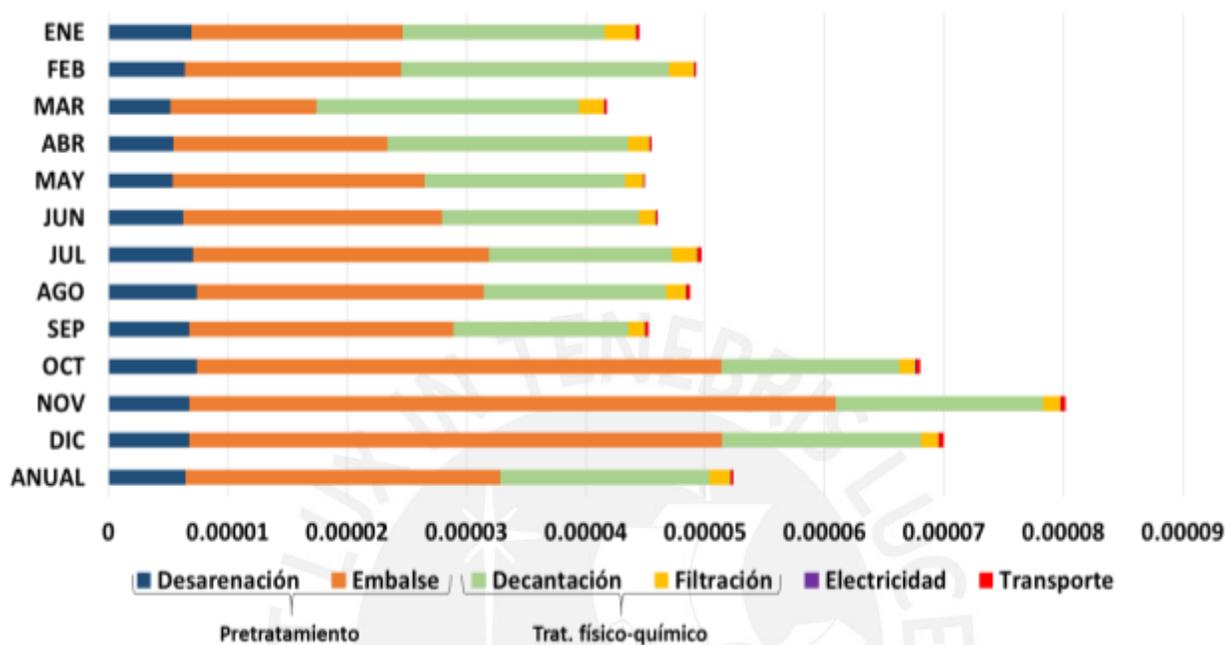


Figura 5.6: Resultados mensuales y anual para la categoría de eutrofización del agua dulce (Kg P eq)

5.1.7 Eutrofización marina

Con respecto a la eutrofización marina, al igual que la categoría de eutrofización de agua dulce, se observa en la Figura 5.7 que el mayor y menor impacto se dan en los meses de noviembre y enero, respectivamente. El valor promedio de impactos para el año 2016 se sitúa en $3.97E-06$ kg N eq /m³. En el mes de noviembre el 68% de los impactos se da en la etapa de pretratamiento dentro de la etapa de embalse, debido a emisiones al agua de nitrato por la producción de sulfato de cobre. Los impactos asociados a la etapa fisicoquímica, la cual genera el 31% de los impactos totales, se debe a la producción de cloruro férrico. Las cargas ambientales respecto al consumo eléctrico tal como el transporte de los químicos representan el 1% de los impactos totales.

En el mes de enero el 53% de los impactos se da en la etapa de pretratamiento, el 46% en la etapa fisicoquímica y el 1% debido al consumo eléctrico y transporte de insumos. Los procesos asociados a estos impactos son similares a los planteados para el mes de noviembre.

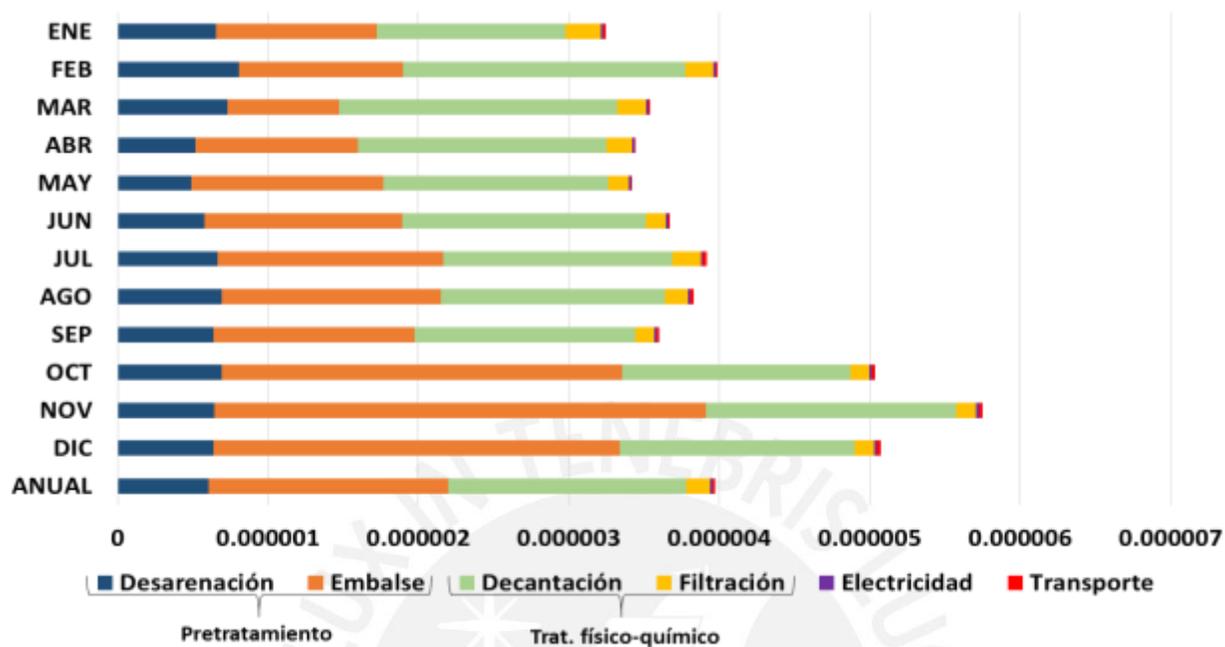


Figura 5.7: Resultados mensuales y anual para la categoría de eutrofización del agua marina (kg N eq).

5.1.8. Análisis de sensibilidad

Los impactos relacionados al análisis de sensibilidad efectuado para este estudio, proponiendo un escenario alternativo en el cual se emplea como materia prima madera reciclada para la obtención de carbón activado (escenario 2), arrojó ciertos cambios con respecto a los impactos totales analizados en el modelamiento inicial para todo el año del 2016 (escenario 1). La Tabla 5.2 muestra la variación porcentual de cada categoría evaluada del escenario 2 con respecto al escenario 1, del cual se aprecia que mayor variación ocurrió en la categoría de cambio climático, donde se redujo el 28% de los impactos totales (de 66.7 gr CO₂ eq a 48.1 gr CO₂ eq). En la categoría en mención, el proceso de desarenación en el cual se emplea el carbón activado, mostró una reducción del 55% con respecto a los impactos totales para el año 2016. Sin embargo, los impactos aumentaron para las demás etapas, esto debido a que los demás procesos no fueron sujetos a cambios y al momento de relacionar estos valores absolutos con la reducción que sufrió esta categoría, los impactos relativos aumentaron. Las demás categorías no sufrieron mayor cambio con respecto a lo propuesto en el primer escenario (disminución hasta un 2% de los impactos totales). Esto se debe a que los impactos en las categorías restantes son dominados por el uso de otros químicos utilizados en planta.

Tabla 5.2: Comparativo entre los resultados obtenidos en cada categoría de impacto evaluada para los escenarios 1 y 2.

Categorías de Impacto	Variación (%)
Cambio climático	-28%
Toxicidad humana cancerígena	-1%
Toxicidad humana no cancerígena	-1%
Ecotoxicidad del agua dulce	0%
Acidificación terrestre	-2%
Eutrofización del agua dulce	-2%
Eutrofización del agua marina	-2%

5.2. Comparativo entre categorías de impacto

Es importante mencionar que cada categoría muestra distintas tendencias con respecto a otras. Como se observa en la Tabla 5.3, en las categorías de impacto analizadas, la mayoría refleja mayores impactos para el mes de noviembre, salvo la categoría de toxicidad humana carcinógena. Examinando para el mes en mención, se encontró que los impactos están asociados a la etapa de pretratamiento, en el cual 3 de estas categorías (THC, AT, ETAM) los impactos están relacionados dentro del proceso de embalsamiento del agua cruda debido al uso de sulfato de cobre, mientras que para la categoría de EAD los impactos se deben a los residuos generados dentro del proceso de decantación. Para la categoría de CC los impactos están vinculados al proceso de desarenación por el empleo de carbón activado y en contraste, para la categoría ETAD los impactos están asociados a la etapa fisicoquímica, en el proceso de decantación por el uso de sulfato de aluminio. Cabe aclarar que en el mes de noviembre el uso de sulfato de cobre es máximo, reflejándose sus impactos en las 3 categorías de impacto previamente mencionadas.

Los meses con menores impactos para las distintas categorías evaluadas en el año 2016 varían. Según los resultados reflejados en la Tabla 5.3, se encontró que para las categorías de AT y EM los menores impactos se dan en enero. En la categoría de AT, los impactos están dominados en la etapa fisicoquímica por el uso de cloruro férrico en la decantación, mientras que en la categoría de EM los mayores impactos se dan en el pretratamiento debido al uso de sulfato de cobre dentro de los embalses. Para las categorías THC, THNC, EAD y ETAD los menores

impactos se hallan en marzo. Para dos de estas categorías (THC, THNC) los mayores impactos se dan por el uso de sulfato de aluminio, en el caso de la categoría EAD por los metales presente en las salidas y para la categoría de ETAD por el uso de cloruro férrico. La categoría de CC presenta los menores impactos para el mes de mayo del cual los mayores impactos están asociados al uso de sulfato de aluminio.

Otra observación encontrada es que en la categoría de CC para el mes de mayo, cuando presenta los menores impactos, la categoría THNC presenta, para este mismo mes, los mayores impactos. En este mes, peculiarmente, el uso de carbón activado es mínimo mientras que el uso de sulfato de aluminio es máximo, evidenciando los impactos asociados a estos productos en estas dos distintas categorías de impacto. De igual manera, en todas las categorías evaluadas, los impactos asociados a cada una de ellas están vinculado directamente con el consumo de químicos durante los procesos de potabilización. En todas las categorías los impactos por el uso eléctrico y del transporte de insumos, en conjunto, constituyen menos del 6% de los impactos totales. Adicionalmente, en todas las categorías evaluadas, la mayor cantidad de impactos están asociados para los meses de estiaje, siendo considerables en noviembre salvo para la categoría de THC. En la etapa de estiaje, se puede visualizar en la tabla 4.4 que el uso de sulfato de aluminio, polímero catiónico, carbón activado y sulfato de cobre fueron significativas a comparación que en los meses de avenida.

Con respecto a la relación entre las categorías de impacto evaluadas y la calidad del agua entrante, mayor información con respecto a parámetros de sabores, olores, materia orgánica, entre otros es necesaria para poder dar una apreciación sólida. Sin embargo, en el caso del parámetro de turbiedad se encontró una relación calidad-impacto. Para el mes de mayo, la turbiedad entrante a las plantas de tratamiento fue la tercera menor registrada durante el año y, también, para este mes el impacto para la categoría de THC fue el mayor registrado para el 2016. A su vez, en este mes se registró como único coagulante el uso de sulfato de aluminio el cual representa la mayor cantidad empleada durante el año, y este producto es el mayor contribuyente a los impactos para la categoría de THC. Esto está relacionado porque, en épocas de estiaje, cuando el agua presenta menos turbiedad, la coagulación se realiza por el método de barrido y se emplea altas dosis de sulfato de aluminio produciendo una supersaturación para inestabilizar las partículas coloidales presentes en el agua cruda (Sedapal, 2014).

Tabla 5.3: Resumen de resultados para cada categoría de impacto evaluada indicando la contribución de los impactos

Categoría de impacto	Valor anual	Insumo con mayor contribución	Proceso con mayor contribución	Mes con mayor impacto	Mes con menor impacto
CC(Kg CO2 eq)/m3	6.68E-02	Carbón activado	Desarenación	Noviembre	Mayo
THC (casos)/m3	1.19E-08	Sulfato de aluminio	Decantación	Mayo	Marzo
THNC (casos)/m3	5.66E-08	Sulfato de cobre	Embalses	Noviembre	Marzo
EAD (PAF.m3.día)/m3	7.54E+03	Emisiones en la decantación	Decantación	Noviembre	Marzo
AT (kg SO2 eq)/m3	4.03E-04	Sulfato de aluminio	Decantación	Noviembre	Enero
ETAD (kg P eq)/m3	5.24E-05	Sulfato de cobre	Embalses	Noviembre	Marzo
ETAM (kg N eq)/m3	3.97E-06	Sulfato de cobre	Embalses	Noviembre	Enero

Nota: CC= Cambio climático; THC= Toxicidad humana cancerígena; THNC= Toxicidad humana no cancerígena; EAD= Ecotoxicidad del agua dulce; AT= Acidificación terrestre; ETAD= Eutrofización del agua dulce; ETAM= Eutrofización del agua marina

5.3. Evaluación de toxicidad

La evaluación de toxicidad dentro de los procesos de potabilización de La Atarjea se realizó mediante la metodología USETox 2. Se encontró que para la categoría de THC y THNC los impactos son dominados por la producción de sulfato de aluminio y sulfato de cobre, respectivamente para cada categoría, como resultados de las emisiones de los residuos generados para la producción de ambos químicos y, para la categoría de EAD debido a la presencia de cobre, aluminio y hierro, mayormente debido a las salidas asumidas dentro de los residuos generados en los procesos de potabilización. Debido que los resultados para todas las categorías están dominados por sustancias inorgánicas, se procedió a realizar la recomendación expuesta USEtox 2 para todo el año del 2016, la cual arrojó los siguientes resultados: En la Tabla 5.4 se observa que los impactos totales se redujeron significativamente, sin embargo al analizar para cada proceso unitario (ver Tabla 5.5) se encontró que los impactos relativos para cada categoría cambiaron.

Tabla 5.4: Resultados empleando los dos distintos factores de caracterización empleados por UseTox para todo el año 2016

Categoría de impacto	Recommended + interim	Recommended
THC (Casos)	1.185E-08	4.070E-12
THNC (Casos)	5.664E-08	5.967E-12
EAD (PAF.m ³ .día)	7.544E+03	3.010E-04

En el caso de THC, para factores de caracterización "recommended" los mayores impactos se trasladaron hacia la etapa de desarenación. Se encontró que la causa de este aumento se da en los procesos de producción del carbón activado, debido a emisiones de formaldehído al aire. Asimismo, para la etapa de decantación los impactos se deben a las mismas emisiones que la etapa de desarenación, por el uso de cloruro férrico.

Para la categoría de THNC, los mayores impactos se desplazaron hacia la etapa de transporte. El transporte terrestre de los insumos nacionales hasta la planta y, a su vez, de la planta de producción del insumo internacional hacia el puerto marítimo son causantes de los impactos debido a emisiones de acroleína al aire. Analizando la etapa de decantación, los impactos también están relacionados al transporte terrestre de insumos necesarios para la producción de cloruro férrico y sulfato de aluminio. Por último, los mayores impactos para la categoría de EAD se desplazaron en la etapa de embalsamiento del agua cruda. Se encontró que las emisiones de pireno al agua durante la producción de sulfato de cobre son las causantes de los impactos. A su vez, la segunda mayor causa de impactos para esta categoría se da en la etapa de decantación, producto de emisiones de benceno al agua durante la producción de cloruro férrico.

Tabla 5.5: Comparativo entre los distintos factores de caracterización para las tres categorías evaluadas por UseTox

Procesos	Categorías de impacto					
	THC (%)		THNC (%)		EAD (%)	
	R+I	R	R+I	R	R+I	R
Desarenación	7%	38%	7%	23%	1%	13%
Embalse	15%	14%	57%	6%	6%	46%
Decantación	76%	36%	33%	29%	92%	33%
Filtración	2%	3%	2%	2%	0%	2%
Electricidad	0%	5%	0%	8%	0%	4%
Transporte	0%	5%	0%	31%	0%	1%

Adicionalmente a este análisis, la debida caracterización del carbón activado presente en el agua cuando es descargado hacia el río Rímac en conjunto con las purgas no ha podido ser efectuada por falta de información. Sin embargo, hay estudios que enfatizan que la presencia de carbón activado en el agua evidencias daños en los ecosistemas y posiblemente a la salud humana. Bernardo et al. (2016) realizó pruebas de lixiviación de carbones activados provenientes de residuos orgánicos, encontrando que, para ciertos pH del líquido empleado, se liberan iones metálicos y no metálicos provenientes del mismo producto precursor y/o debido a los residuos encontrados en el insumo a causa de la activación química realizada. Para líquidos con pH ácidos, se reportó que las emisiones fueron mayores. Los autores recomiendan en que se debe

intensificar la evaluación ecotoxicológica de este insumo, especialmente debido a que es aplicado en el tratamiento de agua potable, ya que la liberación de ciertos contaminantes al momento de emplearlo podrían ser determinantes para restringir su uso. Asimismo, Jonker et al. (2009) manifiesta que la exposición de carbón activado en polvo ante fuentes de agua puede ser tóxico para invertebrados acuáticos, causándoles daños químicos y físicos. Ambos estudios demuestran que, a pesar de que el carbón activado es un material rico en carbón, no se debe considerar como un material inerte cuando es expuesto ante el medioambiente y es necesario intensificar los estudios vinculados a la ecotoxicidad debido a su uso y disposición final para comprender en la totalidad los impactos que tiene a los ecosistemas y a la salud humana.

5.4. Comparación con la literatura

Al momento de realizar un comparativo con otros estudios que realizaron la metodología de ACV en plantas potabilizadoras se encontró similitudes y diferencias con respecto a los resultados obtenidos. Primero, no se encontró estudio que evaluara una potabilizadora con una capacidad de producción similar o superior a la de este estudio (1'400'000 m³/día). Con respecto al uso eléctrico en los procesos de plantas de sistemas convencionales, como se observa en la tabla 5.6, la planta de La Atarjea es una de las plantas que menor consumo por año presenta. Algunas de estas plantas convencionales requieren de más consumo eléctrico ya que dependen del bombeo del agua cruda hacia las plantas, además de contar con una cadena compleja de unidades convencionales.

Tabla 5.6: Comparativo de consumo eléctrico, uso de bombeo y capacidad de potabilización entre distintas plantas convencionales

Referencia	Consumo eléctrico (kWh/m ³)	Uso de bombeo	Capacidad de potabilización (m ³ /día)
Friedrich et al., 2002	0.575	Sí	N/A
Bonton et al., 2012	0.162	Sí	2 000
Amores et al., 2013	0.071	No	197 000
Cáceres, 2016	0.066	No	20 000
Ortiz et al., 2016	0.014	N/A	N/A
Ortiz et al., 2016	0.62	N/A	N/A
Ortiz et al., 2016	1.31	N/A	N/A
Saad et al., 2018	0.57	Sí	400 000
Este estudio	0.01	No	1 400 000

En la tabla 5.7 se aprecia que el resultado obtenido para la categoría de cambio climático fluctúa entre los valores obtenidos en potabilizadoras de sistema convencional. Sin embargo, la mayor carga ambiental o *hot spot* encontrado en nuestro estudio para esta categoría se da en la etapa pretratamiento, en el proceso de desarenación debido al uso de carbón activado. La mayoría de estudios reportó que el mayor contribuyente a la categoría de cambio climático se da por el uso de energía eléctrica requerida en procesos de potabilización (Friedrich et al., 2002; Ortiz et al., 2016; Igos et al., 2013; Saad et al., 2018) mientras que en otros estudios manifestó que el mayor aporte al CC se daba por el uso de los químicos empleados debido a la energía necesitada para su producción (Barrios et al., 2006; Hamzah et al., 2010; Bonton et al., 2012; Ortiz et al., 2016; Cáceres, 2016), en el cual un estudio reportó que la producción de carbón activado fue el segundo mayor contribuidor para esta categoría (Igor et al., 2013).

Tabla 5.7: Comparativo de categorías de impacto entre distintas plantas convencionales

Referencia	CC (kg CO ₂ eq)/m ³	AT (kg SO ₂ eq)/m ³	ETAD (kg P eq)/m ³	ETAM (kg N eq)/m ³
Friedrich et al., 2002	1.85E-01	1.10E-03	2.47E-05	-
Bonton et al., 2012	6.80E-01	4.50E-03	3.80E-06	-
Amores et al., 2013	1.01E-01	6.72E-04	2.29E-05	-
Cáceres, 2016	3.27E-02	1.58E-04	6.23E-06	1.32E-05
Ortiz et al., 2016	1.39E-2	1.12E-04	1.05E-05	-
Ortiz et al., 2016	1.73E-01	5.90E-04	6.47E-05	-
Ortiz et al., 2016	3.83E-1	1.48E-03	1.68E-04	-
Saad et al., 2018	3.42E-1	1.13E-03	3.53E-05	-
Este estudio	6.68E-02	4.03E-04	5.24E-05	3.97E-06

Nota: CC= Cambio climático; AT= Acidificación terrestre; ETAD= Eutrofización del agua dulce; ETAM= Eutrofización del agua marina

Respecto a la categoría de toxicidad, los estudios que incluyeron esta categoría como Bonton et al. (2011) señalan que, para la planta de tipo convencional estudiada, los impactos se daban debido al uso de alumbre en los procesos de potabilización. Ortiz (2016) reportó que en dos de las plantas estudiadas en Colombia, la toxicidad se debía al uso de cloro gas, seguido por el empleo de coagulantes (clarifloc y AK23). Igos (2013) encontró la toxicidad por medio de Récipe, USEtox e Impact 2002 determinando lo siguiente: con la metodología Récipe, la toxicidad humana se debe al consumo eléctrico y del uso cloruro de hierro y cuando analizó con la metodología Impact 2002 arrojó resultados similares; sin embargo, cuando se utilizó la metodología USEtox, el 77% de los impactos estaban asociados al tratamiento de los lodos.

Saad et al. (2018) reportó que la toxicidad humana se daba por el consumo eléctrico tal como por el uso de cloro.

Nuestro estudio arroja resultados distintos cuando se emplea los dos métodos establecidos por USEtox 2, no se obtuvo un resultado congruente. A pesar de esto, todos los impactos asociados a las 3 distintas categorías de toxicidad están asociadas directa e indirectamente con el uso de químicos durante los procesos de potabilización, compartiendo similitud con algunos estudios mencionados previamente.

Con respecto a las demás categorías, para la categoría de acidificación terrestre en nuestro estudio el 49% de impactos se da por el uso del coagulante sulfato de aluminio utilizado en la etapa fisicoquímica, en la decantación. Estudios como Saad et al. (2018), Amores et al. (2013), Mohamed et al. (2013) y Friedrich et al. (2002), reportan que el 23% al 84% de los impactos ambientales asociados a la acidificación terrestre se debe al uso eléctrico utilizado en los procesos de potabilización, lo cual no guarda relación con lo encontrado en este estudio para esta categoría. Con respecto a la eutrofización del agua dulce, Friedrich et al. (2002) encontró que el 81% de los impactos se debían al consumo eléctrico mientras que el uso de sulfato de cobre es mayor causante de los impactos para la categoría de eutrofización del agua dulce para este estudio.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

El presente trabajo de investigación expone el desarrollo del ACV de la potabilizadora de La Atarjea para un periodo de 12 meses desde enero hasta diciembre del año 2016, siguiendo las pautas establecidas por la ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006). El estudio abarcó los procesos unitarios desde la captación del agua por medio de las bocatomas laterales hasta que esté lista para su distribución a Lima Metropolitana. Se empleó el software SimaPro 8.5.2.0 para el desarrollo del ACV mediante datos obtenidos de la planta tal como de la literatura, utilizando la base de datos Ecoinvent 3.0 y desarrollando del modelamiento mediante 3 diferentes métodos: IPCC 2013, USEtox 2 y ReCiPe 2016.

Los hallazgos de este estudio arrojaron que, en promedio para el año 2016, los impactos para la categoría de Cambio Climático asciende a 0.67 kg CO₂-equivalentes/m³, siendo la desarenación el proceso con mayor contribución (45.8% de los impactos totales), en el cual la producción de carbón activado aporta un 31% de los impactos totales de la categoría en mención. El segundo proceso contribuyente al cambio climático fue la etapa de decantación, donde la producción de cloruro férrico alcanzó un 22.9% de aportes totales.

Al momento de realizar un análisis de sensibilidad optando por el cambio de materia prima para la obtención de carbón activado, este mostró una disminución del 28% de los impactos totales en la categoría de cambio climático. Es importante mencionar que el insumo de carbón activado ha ido en aumento desde el año 2012 (Sedapal, 2017), y en conversaciones con el ex jefe de planta del 2017 el uso dicho insumo se proyecta a incrementar, lo cual generaría mayores impactos en la categoría de CC. Los impactos asociados a este insumo podrían reducirse si este se genera localmente a partir de biorresiduos, incorporándose dentro de los procesos de potabilización como parte de un lecho filtrante, regenerando el carbón activado cuando se sature prolongando así su tiempo de vida útil y ser finalmente desechado adecuadamente (Bonton et al, 2012).

La evaluación de la toxicidad se llevó a cabo utilizando la metodología USEtox 2. Se analizaron 3 diferentes categorías de impacto: Toxicidad humana, carcinógeno, toxicidad humana no carcinogénico y toxicidad del agua dulce. La categoría de toxicidad humana, carcinógeno utilizada para analizar los impactos en el año 2016, indicó que el 76% de los impactos están vinculados con la etapa de decantación. El uso de sulfato de aluminio en este proceso es causante del 63% de los impactos totales.

En el caso de la toxicidad humana no carcinógeno el 57% de los impactos totales se da en los embalses debido a las emisiones al agua de arsénico y zinc a causa de la producción de sulfato de cobre de cobre (35% de los impactos totales).

Para la categoría de toxicidad del agua dulce, el proceso de decantación aporta un 92% de los impactos, donde el 83% se atribuye a las emisiones al agua de aluminio, cobre y hierro a causa del control de masas realizado para los residuos generados hasta este proceso. Sin embargo, debido a que estos impactos están dominados por emisiones de sustancias inorgánicas, no se puede llegar a una conclusión consistente.

No obstante, para las tres categorías evaluadas, se puede extraer que, para ambos factores de caracterización empleados, los impactos ambientales están influenciados por el uso de sulfato de cobre, sulfato de aluminio, carbón activado, cloruro férrico, el transporte terrestre de insumos químicos y los residuos generados en los procesos de potabilización. Asimismo, al no incluir dentro de las salidas la debida caracterización del carbón activado, arcillas activadas y los polímeros eliminados en la etapa de decantación, se subestiman sus potenciales impactos toxicológicos a fuentes dulces y hacia la salud humana. Para comprender completamente los impactos que tienen estas sustancias al medioambiente, son necesarias más investigaciones para poder ser incluidos en los modelos de caracterización al momento de realizar un ACV.

En el caso de los lodos generados en los procesos de potabilización, estos pueden ser tratados y aprovechados en la fabricación de ladrillos, cerámica, cemento y como sustituto de ciertos materiales de construcción (Ahmad et al., 2016). Otra posible alternativa propuesta para reducir los impactos medioambientales es en recuperar la fuente hídrica del río Rímac. Tal alternativa podría percibirse como una utopía puesto que existe una limitada valoración del agua, desconociéndose el complejo sistema de agua potable y alcantarillado existente (su producción, purificación, distribución y posterior tratamiento), los costos detrás de ellos, y la alta vulnerabilidad de la infraestructura, llegándose a percibir como un recurso ilimitado. La difusión sobre la actual realidad del recurso hídrico y sensibilizar a la población es necesaria para poder consolidar una cultura de agua en la sociedad. Actualmente, se encuentra en implementación un plan de restauración del Río Rímac, el cual fue preparado en cooperación entre Corea del Sur y Perú (ANA, 2015), que tiene como finalidad restituir la calidad del agua del río mediante tres etapas de implementación: recuperar la fuente hídrica, garantizar su calidad y preservarlo de manera sostenible.

Las categorías de Acidificación terrestre así como eutrofización del agua dulce y marina fueron analizadas por el método ReCiPe 2016. Para la acidificación terrestre se obtuvo que el 49% de los impactos totales se dan en la etapa de decantación, esto a causa de emisiones al aire de dióxido de sulfuro en la producción de sulfato de aluminio (22% de los impactos totales). En el caso de la eutrofización del agua dulce y marina los impactos se dan en los embalses. Las emisiones al agua de fosfato y nitrato en la producción del sulfato de aportan el 50% y el 40%, respectivamente, de los impactos totales.

Además, al hacer el análisis mensual, se infiere que, para el año 2016, los impactos son mayores en épocas de estiaje. No se puede dar una conclusión consistente con respecto a la calidad del agua entrante con los resultados obtenidos por falta de información. Sólo se puede rescatar que, con la información recolectada con respecto a la turbiedad del agua entrante, los impactos para la mayoría de las categorías evaluadas están asociados cuando el agua presenta una menor turbiedad. Esto se debe al alto uso de sulfato de aluminio para inestabilizar las partículas coloidales encontradas en el agua cruda para dicha estacionalidad del río.

Debido a que los impactos son dominados por los químicos empleados en todo el proceso de potabilización de la planta de La Atarjea es importante realizar una mejor gestión en el tratamiento, optando por la implementación de nuevas tecnologías que reduzcan el uso de químicos que son los causantes de las cargas ambientales para la obtención de agua potable y al ser algunos insumos necesarios, como en el caso del carbón activado, elegir químicos que su producción genere los menores impactos medioambientales posibles y en eliminar debidamente las purgas de los procesos de potabilización.

Finalmente, se desea incentivar en la realización de estudios similares en el Perú, de manera que se pueda entender mejor las causas de la generación de cargas ambientales dentro de los procesos de potabilización y posiblemente generar una base de datos local de la producción de los insumos necesarios en la obtención de agua potable. Además, se recomienda ampliar de los límites de sistema del estudio realizado, incluyendo elementos como la infraestructura, el almacenamiento en Los Andes al igual que la distribución del agua potable a la población de manera que se puedan identificar los puntos débiles en todo el sistema de agua y brindar soluciones de mitigación. De igual modo, se contribuiría a generar interés en empresas encargadas en los sistemas de agua potable ante la identificación de procesos que tienen un pobre desempeño ambiental, exponiendo lo investigado en este estudio realizado. Por último, en incorporar dentro de la realización de ACV de sistemas de agua potable en el Perú aspectos económicos y sociales, de manera que se pueda lograr una evaluación completa de sostenibilidad del sistema.

Referencias

M. I. Aguilar, J. Sáez, M. Lloréns, A. Soler, J.F. Ortuño (2002) Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación

Ahmad, Tarique & Ahmad, Kafeel & Alam, Mehtab. (2016). Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options. *Procedia Environmental Sciences*. 35. 950-955. 10.1016/j.proenv.2016.07.088.

Amores, Maria & Meneses, Montse & Pasqualino, Jorgelina & Antón, Assumpció & Castells, Francesc. (2013). Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. *Journal of Cleaner Production*. 43. 84-92. 10.1016/j.jclepro.2012.12.033.

Arena, N., Lee, J., & Clift, R. (2016). Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells. *Journal of Cleaner Production*, 125, 68–77. doi:10.1016/j.jclepro.2016.03.073

Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2015a) PLAN MAESTRO DEL PROYECTO RESTAURACIÓN DEL RÍO RÍMAC. 158 pg. <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/637>

ANA (2015b) Resultado del monitoreo participativo de la calidad de agua superficial de la cuenca del río Rímac: Informe técnico <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/2456>

Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2016c) Rímac: Historia del Río Hablador. 156 pg. 1ra edición. <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/185>

Bartl, K., Gómez, C. A., & Nemecek, T. (2011). Life cycle assessment of milk produced in two smallholder dairy systems in the highlands and the coast of Peru. *Journal of Cleaner Production*, 19(13), 1494-1505.

Bartl, K., Verones, F., & Hellweg, S. (2012). Life cycle assessment based evaluation of regional impacts from agricultural production at the Peruvian coast. *Environmental science & technology*, 46(18), 9872-9880.

Barrios, Ramiro & Siebel, Maarten & Van der Helm, Alex & Bosklopper, Th & Gijzen, Huub. (2008). Environmental and financial life cycle impact assessment of drinking water production at Waternet. *Journal of Cleaner Production*. 16. 471-476. 10.1016/j.jclepro.2006.07.052.

Bernardo, Maria & Lapa, Nuno & Matos, Inês & Fonseca, Isabel. (2016). Critical discussion on activated carbons from bio - wastes - environmental risk assessment. *BOLETIN del Grupo Español del Carbón*. 18-21.

Bhatnagar, Amit & Hogland, William & Marques, Marcia & Sillanpää, Mika. (2013). An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chemical Engineering Journal*. 219. 499–511. 10.1016/j.cej.2012.12.038.

Brander, Matthew & Tipper, R & Hutchison, C & Davis, G. (2009). Consequential and Attributional Approaches to LCA: A Guide to Policy Makers with Specific Reference to Greenhouse Gas LCA of Biofuels. *Ecometrica*. Technical Paper TP090403A. 44.

Bjørn A., Owsianiak M., Molin C., Hauschild M.Z. (2018) LCA History. In: Hauschild M., Rosenbaum R., Olsen S. (eds) *Life Cycle Assessment*. Springer, Cham

Bolto, Brian & Gregory, John. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water research*. 41. 2301-24. 10.1016/j.watres.2007.03.012.

A, Bonton & C, Bouchard & Barbeau, Benoit & Jedrzejak, Stephane. (2012). Comparative life cycle assessment of water treatment plants. *Desalination*. 284. 42-54.

Burek, P., Satoh, Y., Fischer, G., Kahil, M.T., Scherzer, A., Tramberend, S., Nava, L.F., Wada, Y., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Magnuszewski, P., Cosgrove, B. & Wiberg, D. (2016) *Water Futures and Solution – Fast Track Initiative (Final Report)* International Institute for Applied Systems Analysis. pp. 1-58.

Cáceres Huisacayna, Kathia Náthaly (2016) Beneficios ambientales del control de pérdidas en un sistema convencional de tratamiento de agua potable. Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

Cáceres Cebrecos, Ana Lucía (2016) Análisis de ciclo de vida comparativo de edificaciones multifamiliares en Lima. Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

Calle Cabrera, Vania Vanessa (2019) Análisis de Ciclo de Vida de una edificación de oficinas en Lima (Peru). Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

Campbell, Quentin & Bunt, J.R. & H, Kaisini & Kruger, D.J.. (2012). The preparation of activated carbon from South African coal. *Journal- South African Institute of Mining and Metallurgy*. 112. 37-44.

J. Chira La Rosa J.M. Kuroiwa (2016) SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA EN ZONA DE ALUVIONES. XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SETIEMBRE DE 2016.

Danish, Mohammed & Ahmad, Tanweer. (2018). A review on utilization of wood biomass as a sustainable precursor for activated carbon production and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 87. 1-21. 10.1016/j.rser.2018.02.003.

De Moel, Peter & Verberk, J.Q.J.C. & Dijk, J.. (2006). Drinking water: Principles and practices. 10.1142/6135.

DANIEL HOORNWEG, LORRAINE SUGAR AND CLAUDIA LORENA TREJOS GÓMEZ (2011) Cities and greenhouse gas emissions: moving forward

Ecoinvent (2019) About Ecoinvent. Ecoinvent Centre. <https://www.ecoinvent.org/about/about.html>

EL Comercio (2017) Sedapal: corta el agua por tercer día consecutivo tras huaicos <https://elcomercio.pe/lima/sedapal-corta-agua-tercer-dia-consecutivo-huaicos-145360>

El Comercio (2017) San Juan de Lurigancho: vecinos denuncian que siguen sin agua <https://elcomercio.pe/lima/san-juan-lurigancho-vecinos-denuncian-siguen-agua-407677>

ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO “EL NIÑO” ENFEN (2017) Informe Técnico Extraordinario N°001-2017/ENFEN EL NIÑO COSTERO 2017 http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/informes/imarpe_infteo_informe__tecnico_extraordinario_001_2017.pdf

Fan, Maohong & Brown, Robert & Sung, Shin & Huang, C.P. & Ong, Say & Van Leeuwen, Hans. (2003). Comparisons of Polymeric and Conventional Coagulants in Arsenic(V) Removal. *Water environment research : a research publication of the Water Environment Federation*. 75. 308-13. 10.2175/106143003X141114.

Finkbeiner, Matthias. (2014). The International Standards as the Constitution of Life Cycle Assessment: The ISO 14040 Series and its Offspring. 10.1007/978-94-017-8697-3_3.

Finkbeiner, Matthias & Ackermann, Robert & Bach, Vanessa & Berger, Markus & Brankatschk, Gerhard & Chang, Ya-Ju & Grinberg, Marina & Lehmann, Annkatrin & Martínez-Blanco, Julia & Minkov, Nikolay & Neugebauer, Sabrina & Scheumann, René & Schneider, Laura & Wolf, Kirana. (2014). Challenges in Life Cycle Assessment: An Overview of Current Gaps and Research Needs. 10.1007/978-94-017-8697-3.

Finnveden, Göran & Hauschild, Michael & Ekvall, Tomas & Guinée, Jeroen & Heijungs, Reinout & Hellweg, Stefanie & Koehler, Annette & Pennington, David & Suh, Sangwon.

(2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of environmental management*. 91. 1-21. 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.

Fondo de Agua para Lima y Callao (Aquafondo) (2016) Huella hídrica de los usuarios de agua de Lima Metropolitana <https://hdl.handle.net/20.500.12543/00.12543/2871>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2016) AQUASTAT website. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Fantke, P., Huijbregts, M., Margni, M., Hauschild, M., Jolliet, O., McKone, T.E., Rosenbaum, R.K., van de Meent, D., (2015). USEtox® 2.0 User Manual (Version 2), <http://usetox.org>

Friedrich, Elena. (2002). Life-cycle assessment as an environmental management tool in the production of potable water. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 46. 29-36. 10.2166/wst.2002.0198.

Fundación Futuro Latinoamericano (FFLA) (2015). Proceso de conformación del Consejo de Recursos Hídricos de la Cuenca Interregional Chillón, Rímac y Lurín, Perú. Una experiencia de gobernanza. Quito-Ecuador.

García-Torres, S. S. S. (2014). Evaluación ambiental durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar. Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

Guinée, Jeroen & Heijungs, Reinout & Huppes, Gjalt & Zamagni, Alessandra & Masoni, Paolo & Buonamici, Roberto & Ekvall, Tomas & Rydberg, Tomas. (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future †. *Environmental science & technology*. 45. 90-6. 10.1021/es101316v.

Godskesen, Berit & Zambrano, Kerly & Trautner, A & Johansen, N-B & Thiesson, L & Andersen, L & Clauson-Kaas, J & L Neidel, T & Rygaard, Martin & H Kløverpris, N & Albrechtsen, Hans-Jørgen. (2011). Life cycle assessment of three water systems in Copenhagen - A management tool of the future. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution8 Research*. 63. 565-72. 10.2166/wst.2011.258.

Godskesen, B., Hauschild, M.Z., Rygaard, M., Zambrano, K.C., Albrechtsen, H.J.: (2013) Life-cycle and freshwater withdrawal impact assessment of water supply technologies. *Water Res.* 47(7), 2363

Godskesen, Berit & Meron, Noa & Rygaard, Martin. (2018). LCA of drinking water supply. 10.1007/978-3-319-56475-3_33.

Goedkoop, Mark & Oele, Michiel & Leijting, Jorrit & Ponsioen, Tommie & Meijer, Ellen. (2016). Introduction to LCA with SimaPro. 80.

Gu, Hongmei & Bergman, Richard & Anderson, Nathaniel & Alanya Rosenbaum, Sevda. (2018). Life cycle assessment of activated carbon from woody biomass. Wood and Fiber Science. 50. 229-243. 10.22382/wfs-2018-024.

Hauschild, Michael & Bonou, Alexandra & Olsen, Stig. (2018). Life Cycle Interpretation. 10.1007/978-3-319-56475-3_12.

Heijungs, R. (1994).: A generic method for the identification of options for cleaner products. Ecol. Econ. 10, 69–81 doi:10.1016/0921-8009(94)90038-8

Huijbregts, Mark & Steinmann, Zoran & Elshout, Pieter & Stam, Gea & Verones, Francesca & Vieira, Marisa & Zijp, Michiel & Hollander, Anne & Zelm, Rosalie. (2016). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. The International Journal of Life Cycle Assessment. 22. 10.1007/s11367-016-1246-y.

Igos, Elorri & Dalle, Alice & Tiruta-Barna, Ligia & Benetto, Enrico & Baudin, Isabelle & Mery, Yoann. (2014). Life Cycle Assessment of water treatment: What is the contribution of infrastructure and operation at unit process level?. Journal of Cleaner Production. 65. 424–431. 10.1016/j.jclepro.2013.07.061.

INEI (2018) Anuario de Estadísticas Ambientales 2018. Extraído de: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1637/libro.pdf

INEI (2018) Perú: Crecimiento y distribución de la población, 2017. Extraído de: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1530/libro.pdf

Ioris, Antonio. (2017). Water Scarcity and the Exclusionary City: The Struggle for Water Justice in Lima, Peru. Water International. 41. 125-139. 10.1080/02508060.2016.1124515.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). CLIMATE CHANGE 2013 The Physical Science Basis. Extraído de: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf

2006a “ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – principles and framework”. Geneva, Switzerland

2006b “ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – requirements and guidelines”. Geneva, Switzerland

Jonker, Michiel & Suijkerbuijk, Martin & Schmitt, Heike & Sinnige, Theo. (2009). Ecotoxicological Effects of Activated Carbon Addition to Sediments. *Environmental science & technology*. 43. 5959-66. 10.1021/es900541p.

Kim, Mi & Jeong, In & Park, Sang & Kim, Jung. (2018). Analysis of environmental impact of activated carbon production from wood waste. *Environmental Engineering Research*. 24. 10.4491/eer.2018.104.

Klöpffer, Walter & Grahl, B. (2014). *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice*. Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice. 1-396. 10.1002/9783527655625.

La República (2016) Sedapal: Río Rímac tiene un volumen 50% menor al de otros años. La República. 14 de Febrero de 2016.

Larrea, Gustavo & Vázquez-Rowe, Ian & Gallice, Geoffrey. (2017). Life cycle assessment of the construction of an unpaved road in an undisturbed tropical rainforest area in the vicinity of Manu National Park, Peru. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 22. 10.1007/s11367-016-1221-7.

Maisch Guevara, Ernesto (1996) LA PRIMERA PLANTA DE FILTRACIÓN DE AGUA DE LA CIUDAD DE LIMA <https://sites.google.com/site/aguapotableirrigacion/home/lista-de-articulos-tecnicos>

Mary Ann Curran (2015). *Life Cycle Assessment Student Handbook*. 320 pg

Mcdonald, Robert & Weber, Katherine & Padowski, Julie & Flörke, Martina & Schneider, Christof & Green, Pamela & Gleeson, Tom & Eckman, Stephanie & Lehner, Bernhard & Balk, Deborah & Boucher, Timothy & Grill, Günther & Montgomery, Mark. (2014). Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Global Environmental Change*. 27. 96 - 105. 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.022.

McManus MC, Taylor CM, The changing nature of life cycle assessment, *Biomass and Bioenergy* (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.024>

Ministerio de Salud MINSA (2011) Reglamento de la calidad del agua para consumo humano.

Ministerio de Salud MINSA (2019) Registro Sanitario de Desinfectante de Agua para consumo humano en punto de uso (Vigentes) <http://www.digesa.minsa.gob.pe/Expedientes/Desinfectantes-Agua-consumo-humano.asp>

Mekonnen, Mesfin M. & Hoekstra Arjen Y. (2016) Four billion people facing severe water scarcity. *Sci Adv* 2. 1-8

Metameta (2014) The Amsterdam Dune Water Machine

http://metameta.nl/wp-content/uploads/2016/09/1_Amsterdam_Water_supply_Dunes_EN.pdf pg 16

Mohamed-Zine, Messaoud-Bouregghda & Hamouche, Aksas & Louhab, Krim. (2013). The study of potable water treatment process in Algeria (boudouaou station) -by the application of life cycle assessment (LCA). Journal of environmental health science and engineering. 11. 37. 10.1186/2052-336X-11-37.

Monroy, Oscar (2013) MANEJO SUSTENTABLE DEL AGUA EN MÉXICO Vol. 14 | Núm. 10 <http://www.revista.unam.mx/vol.14/num10/art37/index.html>

Observatorio del Agua (2019)

Organización Mundial de la Salud (OMS) (2019) Temas de salud: Agua <https://www.who.int/topics/water/es/>

Ortiz Rodriguez, Oscar & Villamizar, Raquel & García-Cáceres, Rafael. (2016). Life cycle assessment of four potable water treatment plants in northeastern Colombia. Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science. 11. 10.4136/ambi-agua.1759.

PELCAN (2019). Red Peruana Ciclo de Vida y Ecología Industrial. Pontificia Universidad Católica del Perú. Extraído de: <https://red.pucp.edu.pe/cicludevida/>

PHI UNESCO-LAC. (2006). Documento Técnico N°4. Evaluación de los Recursos Hídricos. Elaboración de los balances hídricos por cuencas hidrográficas. http://www.unesco.org/phi/biblioteca/bitstream/123456789/326/1/Manual_IMTA.pdf

Quispe, Isabel & Navia, Rodrigo & Kahhat, Ramzy. (2018). Life Cycle Assessment of rice husk as an energy source. A Peruvian case study. Journal of Cleaner Production. 209. 10.1016/j.jclepro.2018.10.312.

Rabiee, Ahmad. (2010). Acrylamide-Based Anionic Polyelectrolytes and Their Applications: A Survey. Journal of Vinyl and Additive Technology. 16. 111 - 119. 10.1002/vnl.20229.

Rebitzer, G & Ekvall, Tomas & Frischknecht, Rolf & Hunkeler, D & Norris, Gregory & Rydberg, Tomas & Schmidt, W-P & Suh, Sangwon & Weidema, Bo & W Pennington, D. (2004). Life Cycle Assessment Part 1: Framework, Goal and Scope Definition, Inventory Analysis, and Applications. Environment international. 30. 701-20. 10.1016/j.envint.2003.11.005.

Rosenbaum, Ralph & Bachmann, Till & Gold, Lois & Huijbregts, Mark & Jolliet, Olivier & Juraske, Ronnie & Koehler, Annette & Larsen, Henrik & MacLeod, Matthew & Margni,

Manuele & McKone, Thomas & Payet, Jerome & Schuhmacher, Marta & Van de meent, D. & Hauschild, Michael. (2008). USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment. 13. 532-546. 10.1007/s11367-008-0038-4.

Rosenbaum, Ralph & Georgiadis, Stylianos & Fantke, Peter. (2018). Uncertainty Management and Sensitivity Analysis. 10.1007/978-3-319-56475-3_11.

SEDAPAL (2004) Memoria Anual 2004. Extraído de

Sedapal (2016) http://www.sedapal.com.pe/ko/notas-de-prensa/-/asset_publisher/qCX7/content/bajo-caudal-de-agua-en-rios-rimac-y-chillon-por-falta-de-lluvias-en-la-sierra-central

SEDAPAL (2017) Memoria Anual 2016. Extraído de: <http://www.sedapal.com.pe:90/Infocomple/files/Memoria%20Anual%202016.pdf>

SEDAPAL (2017) Anuario Estadístico 2016. Extraído de: <http://repositorio.sedapal.com.pe/bitstream/SEDAPAL/46/1/Anuario%20Estad%3%ADstico%202016.pdf>

Sedapal (2019) Nuestra empresa: Hitos Históricos <http://www.sedapal.com.pe/hitos-historicos>

Senamhi (2019) Indicadores de sequías <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=lima&p=sequias>

SENAMHI (2019) Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>

Sharaai, Amir Hamzah. (2010). Life Cycle Impact Assessment (LCIA) in Potable Water Production in Malaysia: Potential Impact Analysis Contributed from Production and Contruction Phase Using Eco-indicator 99 Evaluation Method. World Applied Science Journal. 11. 1230-1237.

Sonnemann, Guido & Castells, Francesc & Schuhmacher, Marta & Hauschild, Michael. (2004). Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes. The International Journal of Life Cycle Assessment. 9. 206-207. 10.1007/BF02994195.

Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (2013) IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

The CEO Water Mandate (2014) Driving Harmonization of Water-Related Terminology. The CEO Water Mandate.

TILLMAN, Anne-Marie, EKVALL, Tomas, BAUMANN, Henrikke & RYDBERG, Tomas. (1994) "Choice of system boundaries in life cycle assessment". Journal of Cleaner Production, 2, pp 21 – 29.

Torre García, Andre (2018) Diseño y análisis ambiental de una planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Huaraz. Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

UNDESA (2017) La población mundial aumentará en 1.000 millones para 2030 Extraído de: <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-population-prospects-2017.html>

UNITED NATIONS (UN) (2018) 68% of the world population projected to live in urban areas by 2050 Extraído de: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>

Vázquez-Rowe, Ian & Kahhat, Ramzy & Lorenzo Toja, Yago. (2017). Natural disasters and climate change call for the urgent decentralization of urban water systems. Science of The Total Environment. 605-606. 246-250. 10.1016/j.scitotenv.2017.06.222.

Wei, Wei & Larrey-Lassalle, Pyrène & Faure, Thierry & Dumoulin, Nicolas & Roux, Philippe & Mathias, Jean-Denis. (2014). How to Conduct a Proper Sensitivity Analysis in Life Cycle Assessment: Taking into Account Correlations within LCI Data and Interactions within the LCA Calculation Model. Environmental science & technology. 49. 10.1021/es502128k.

Weidema, Bo & Cappellaro, Francesca & Carlson, Raul & Notten, Philippa & Pålsson, Ann-Christin & Patyk, Andreas & Regalini, Emanuele & Sacchetto, Francesco & Scalbi, Simona & Masoni, Paolo & Europa, Corso. (2003). Procedural guideline for collection, treatment, and quality documentation of LCA data.

Weidema, Bo & Hansen, Klaus. (2004). The Product, Functional Unit and Reference Flows in LCA.

World Wide Fund (WWF) Un Frágil Ciclo: agua, energía y población en Lima. 63pg.

<http://www.wwf.org.pe/?219571/unfragilcicloaguaenergíaypoblacinenlima#>

Yolanda Andía Cárdenas (2000) TRATAMIENTO DE AGUA COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN. SEDAPAL Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico.

García-Villada, Libertad & Rico, Marcos & Altamirano Jeschke, María & Sánchez-Martín, Laura & López-Rodas, Victoria & Costas, Eduardo. (2004). Occurrence of copper resistant mutants in the toxic cyanobacteria *Microcystis aeruginosa*: Characterisation and future implications in the use of copper sulphate as algaecide. *Water research*. 38. 2207-13. 10.1016/j.watres.2004.01.036.

Sedapal (2016) PROCESOS DE SELECCION CULMINADOS 2016 - 1ER TRIMESTRE LICITACION PUBLICA - CONCURSO PUBLICO - ADJUDICACION DIRECTA http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=519684ec-1063-4b6c-828e-a73aab7844ca&groupId=1593749

Vázquez-Rowe, Ian & Kahhat, Ramzy & Lorenzo Toja, Yago. (2017). Natural disasters and climate change call for the urgent decentralization of urban water systems. *Science of The Total Environment*. 605-606. 246-250. 10.1016/j.scitotenv.2017.06.222.

Vázquez-Rowe, Ian & Reyna, Janet & Garcia, Samy & Kahhat, Ramzy. (2015). Is climate change-centrism an optimal policy making strategy to set national electricity mixes?. *Applied Energy*. 159. 108-116. 10.1016/j.apenergy.2015.08.121.

Vázquez-Rowe, I., Kahhat, R., Quispe, I., & Bentín, M. (2016a). Environmental profile of green asparagus production in a hyper-arid zone in coastal Peru. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2505-2517.

Vázquez-Rowe, Ian & Cáceres, Ana & Torres-García, Jorge & Quispe, Isabel & Kahhat, Ramzy. (2016b). Life Cycle Assessment of the production of pisco in Peru. *Journal of Cleaner Production*. 142. 10.1016/j.jclepro.2016.11.136.

Vázquez-Rowe, Ian & Ziegler, Kurt & Laso, Jara & Quispe, Isabel & Aldaco, Rubén & Kahhat, Ramzy. (2018). Production of cement in Peru: Understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications. *Resources, Conservation and Recycling*. 142. 10.1016/j.resconrec.2018.12.017.

Vázquez-Rowe, Ian & Kahhat, Ramzy & Sánchez, Ignacio. (2019). Perú LCA: launching the Peruvian national life cycle database. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 24. 10.1007/s11367-019-01668-w.

Ziegler, Kurt & Margallo, María & Aldaco, Rubén & Vázquez-Rowe, Ian & Kahhat, Ramzy. (2019). Transitioning from open dumpsters to landfilling in Peru: Environmental benefits and challenges from a life-cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*. 229. 10.1016/j.jclepro.2019.05.015.



ANEXO 1

CODIGO DE MATERIAL N° 00001

I. DESCRIPCIÓN MÍNIMA:

CLORURO FÉRRICO EN SOLUCIÓN

II. DESCRIPCIÓN AMPLIADA:

CLORURO FÉRRICO EN SOLUCIÓN, PARA SER USADO EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA, CON FINES DE CONSUMO HUMANO.

III. TIPO MATERIAL:

SUMINISTRO DE MATERIAL.

IV. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

A. CALIDAD DEL PRODUCTO

- FÓRMULA QUÍMICA : $FeCl_3$.
- COLOR : MARRÓN ROJIZO OSCURO
- GRADO : COMERCIAL
- CONCENTRACIÓN DE CLORURO FÉRRICO (% $FeCl_3$): 38% A 45%
- CONCENTRACIÓN DE CLORURO FERROSO (% $FeCl_2$) : NO MAYOR DE 0,5 %
- ACIDEZ LIBRE (HCL) % POR MASA : NO MAYOR DE 0,5 %
- RESIDUO INSOLUBLE : NO MAYOR DE 0,5 %
- DENSIDAD : 1,40 G/CM³ - 1,45 G/CM³
- METALES PESADOS TOTALES (PB,CD,CU,MN,ZN)
- EXPRESADOS COMO PLOMO : NO MAYOR DE 0,03%

B. PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO

- PRESENTACIÓN EN FORMA LÍQUIDA.
- SE ABASTECERÁN EN TANQUES CISTERNAS PRECINTADOS DE MATERIAL APROPIADO, RESISTENTE AL ATAQUE QUÍMICO DEL PRODUCTO, DE UNA CAPACIDAD DE 28 A 30 TONELADAS APROXIMADAMENTE, QUE DESCARGAN EN LOS TANQUES DE PLANTA LA ATARJEA. EL TRASVASE DE LA SOLUCIÓN DE CLORURO FÉRRICO DEBE EFECTUARSE POR GRAVEDAD O CON PRESIÓN DE AIRE, ESTO ÚLTIMO DE ACUERDO A LAS NORMAS DE SEGURIDAD DE LA PRESIÓN MÁXIMA DE DISEÑO DE LOS CISTERNAS DE LOS CAMIONES DE TRASPORTE, APROXIMADAMENTE CON UN MÁXIMO DE 1,5 MPA.

C. CERTIFICADO

- EL PARTICIPANTE DEBERÁ INCLUIR EN SU PROPUESTA TÉCNICA, EL CERTIFICADO DE CALIDAD, QUE EMANA DEL FABRICANTE, DEL PRODUCTO OFERTADO, CON UNA VIGENCIA NO MAYOR A 3 MESES A LA FECHA DE PRESENTACIÓN DE PROPUESTAS.
- EL CONTRATISTA, EN LA ETAPA DE EJECUCIÓN CONTRACTUAL, DEBERÁ PRESENTAR PARA LA PRIMERA ENTREGA (PRIMERA ORDEN DE PEDIDO) UN CERTIFICADO DE CALIDAD OTORGADO POR UN LABORATORIO ACREDITADO QUE SE ENCUENTRE VIGENTE EN EL LISTADO PUBLICADO POR INACAL (INSTITUTO NACIONAL DE CALIDAD), SIENDO EL ALCANCE DE ACREDITACIÓN NO NECESARIAMENTE EN LOS ENSAYOS DEL PRODUCTO OFERTADO. EL CERTIFICADO DEBE TENER COMO MÁXIMO 3 MESES DE ANTIGÜEDAD A LA FECHA DE ENTREGA DEL PRODUCTO.
- EL CONTRATISTA, EN LA ETAPA DE EJECUCIÓN CONTRACTUAL, DEBERÁ PRESENTAR PARA CADA ENTREGA (CADA GUÍA DE REMISIÓN), EL CERTIFICADO DE CALIDAD DEL LOTE ENTREGADO, QUE EMANA DEL FABRICANTE.

D. NORMA TECNICA

EL PRODUCTO OFERTADO DEBE CUMPLIR CON LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y LOS REQUERIMIENTOS TÉCNICOS MÍNIMOS DE LAS BASES DEL PROCESO DE CONVOCATORIA. SE TOMARÁ COMO REFERENCIA LA NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 311.329:1997 "CLORURO FÉRRICO. COAGULANTE PARA TRATAMIENTO DE AGUA".

E. PRESENTACION DE MUESTRAS

- LOS PARTICIPANTES DEBERÁN ENTREGAR DOS MUESTRAS DE MEDIO LITRO Y UNA MUESTRA DE 100 KG PARA LAS PRUEBAS EN LOS LABORATORIOS:
- UN (01) FRASCO CONTENIENDO ½ LITRO DE CLORURO FÉRRICO EN SOLUCIÓN, SERÁ EVALUADO EN LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE SEDAPAL Y EN PRUEBA DE JARRAS.
- UN (01) FRASCO CONTENIENDO ½ LITRO DE CLORURO FÉRRICO EN SOLUCIÓN, SERÁ UTILIZADO COMO MUESTRA DE DIRIMENCIA, DE CORRESPONDER.

- CIEN (100) KG DE SULFATO DE CLORURO FÉRRICO EN SOLUCIÓN, QUE SERÁ EVALUADO EN PRUEBAS DE PLANTA PILOTO, EN LA ETAPA DE FLOCULACIÓN Y DECANTACIÓN. LAS MUESTRAS SE EVALUARÁN DE ACUERDO AL PROCEDIMIENTO GP PR 002 "INSPECCIÓN TÉCNICA DE PRODUCTOS QUÍMICOS ANTES Y DESPUÉS DE LA COMPRA".

V. UNIDAD DE MEDIDA:
TONELADAS

VI. VIDA ÚTIL:
GARANTÍA MÍNIMA DEL PRODUCTO DOS (2) AÑOS

VII. USO:
PARA SER USADO COMO COAGULANTE PRINCIPAL EN EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA, APLICADO EN EL MEZCLADOR RÁPIDO.

VIII. HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES:
SE REQUIERE HOJA DE SEGURIDAD (MSDS) DEL FABRICANTE DEL PRODUCTO. TAMBIÉN SE REQUIERE UN PLAN DE CONTINGENCIAS PARA EL TRANSPORTE Y/O ANTE DESASTRES NATURALES O ACCIDENTES.



CODIGO DE MATERIAL N° 00002**I. DESCRIPCION MINIMA**

SULFATO FERRICO, EN SOLUCION

II. DESCRIPCION AMPLIADA

SULFATO FERRICO, PARA SER USADO EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA, CON FINES DE CONSUMO HUMANO.

III. TIPO DE MATERIAL

SUMINISTR

IV. CARACTERISTICAS TECNICAS**A. CALIDAD DEL PRODUCTO**

FORMULA QUIMICA: $Fe_2(SO_4)_3$

PRESENTACION: SOLUCION

COLOR: CAFE OSCURO

%Fe+3: MAYOR 11%

%Fe+2: MENOR A 0.5%

ACIDEZ: LIBRE (COMO H_2SO_4 : MENOR A 3.5%)

CLORUROS: MENOR A 70 ppm, POR CADA 1% DE Fe+3

PH: MENOR A 2

RESIDUOS INSOLUBLES: MENOS A 0.1%

DENSIDAD (GR/CC): 1.49-1.63

B. PRESENTACION

EN TANQUES CISTERNAS, DEBIDAMENTE REVESTIDOS PARA EVITAR POSIBLES FUGAS DURANTE SU TRANSPORTE A LA PLANTA Y CONTARAN CON SUS RESPECTIVOS PRECINTOS DE SEGURIDAD.

ASIMISMO, EL TANQUE CISTERNA SE DEBE VISUALIZAR:

NOMBRE DEL PRODUCTO/QUIMICO

NOMBRE DEL PROVEEDOR

SIMBOLO DE NFPA

V. USO

PARA SER USADO COMO COAGULANTE EN EL PROCESO DE CLARIFICACION DEL AGUA, APLICADO EN LA MEZCLA RAPIDA EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA, CON FINES DE CONSUMO HUMANO.

GARANTIA DEL PRODUCTO:

EL POSTOR MEDIANTE DECLARACION JURADA SE COMPROMETE A ENTREGAR EN LA ETAPA DE EJECUCION CONTRACTUAL EL CERTIFICADO VIGENTE (VIGENCIA: HASTA TRES MESES A LA PRESENTACION DE PROPUESTAS) QUE ACREDITE EL CUMPLIMIENTO DE LAS CARACTERISTICAS TECNICAS REQUERIDAS, EL CUAL SERA EMITIDO POR UN LABORATORIO EXTERNO QUE CUENTE CON ACREDITACION ANTE INDECOPI.

PARA LAS ENTREGAS PARCIALES EL CONTRATISTA DEBERA DE ENTREGAR EL CERTIFICADO DE CALIDAD CORRESPONDIENTE DEL MATERIAL OFERTADO.

VI. UNIDAD DE MEDIDA

TONELADAS

VII. VIDA UTIL

UN (02) AÑOS MINIMO

VIII. HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES

SI SE REQUIERE LA PRESENTACION DE LA HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES.

CODIGO DE MATERIAL N° 00003

I. DESCRIPCIÓN MÍNIMA:

SULFATO DE ALUMINIO EN SOLUCIÓN AL 8% TIPO "B".

II. DESCRIPCIÓN AMPLIADA:

SULFATO DE ALUMINIO EN SOLUCIÓN AL 8% TIPO "B" PARA SER USADO EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA CON FINES DE CONSUMO HUMANO,

III. TIPO MATERIAL:

SUMINISTRO DE SULFATO DE ALUMINIO EN SOLUCIÓN AL 8% TIPO B

IV. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

A. CALIDAD DEL PRODUCTO

- FÓRMULA QUÍMICA : $Al_2(SO_4)_3$
- PRESENTACIÓN : SOLUCIÓN
- COLOR : PARDO AMARILLENTO
- GRADO : COMERCIAL
- CONCENTRACIÓN DE OXIDO DE ALUMINIO (% Al_2O_3) : 7.9% A 8.3%
- BASICIDAD (% Al_2O_3 LIBRE) : NO MAYOR DE 0.20%
- ACIDEZ (% H_2SO_4 LIBRE) : NO MAYOR DE 0.20%
- FIERRO TOTAL (% Fe_2O_3) : NO MAYOR A 0.35%
- RESIDUO INSOLUBLE (%) : NO MAYOR DE 1.0%
- DENSIDAD : 1,30 G/CM³ - 1,35 G/CM³

B. PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO

- PRESENTACIÓN EN FORMA LÍQUIDA.
- SE ABASTECERÁN EN CISTERNAS CARROTANQUE DE MATERIAL APROPIADO, RESISTENTE AL ATAQUE QUÍMICO DEL PRODUCTO, CON PRECINTOS DE SEGURIDAD, DE UNA CAPACIDAD DE 28 TONELADAS APROXIMADAMENTE, CONTARÁN CON TODOS LOS PERMISOS DE TRANSPORTE DE ACUERDO A LA NORMATIVA VIGENTE HASTA LA FECHA DE LA PUBLICACIÓN DE LA CONVOCATORIA DEL PROCESO DE SELECCIÓN. LAS CISTERNAS CARROTANQUE DESCARGARÁN EN LA PLANTA ATARJEA.

C. CERTIFICADO

- EL PARTICIPANTE DEBERÁ INCLUIR EN SU PROPUESTA TÉCNICA, EL CERTIFICADO DE CALIDAD, QUE EMANA DEL FABRICANTE, DEL PRODUCTO OFERTADO, CON UNA VIGENCIA NO MAYOR A 3 MESES A LA FECHA DE PRESENTACIÓN DE PROPUESTAS.
- EL CONTRATISTA, EN LA ETAPA DE EJECUCIÓN CONTRACTUAL, DEBERÁ PRESENTAR PARA LA PRIMERA ENTREGA (PRIMER PEDIDO DE BIENES) UN CERTIFICADO DE CALIDAD OTORGADO POR UN LABORATORIO ACREDITADO QUE SE ENCUENTRE VIGENTE EN EL LISTADO PUBLICADO POR INACAL (INSTITUTO NACIONAL DE CALIDAD), SIENDO EL ALCANCE DE ACREDITACIÓN NO NECESARIAMENTE EN LOS ENSAYOS DEL PRODUCTO OFERTADO. EL CERTIFICADO DEBE TENER COMO MÁXIMO 3 MESES DE ANTIGÜEDAD A LA FECHA DE ENTREGA DEL PRODUCTO.
- EL CONTRATISTA, EN LA ETAPA DE EJECUCIÓN CONTRACTUAL, DEBERÁ PRESENTAR PARA CADA ENTREGA (CADA GUÍA DE REMISIÓN), EL CERTIFICADO DE CALIDAD DEL LOTE ENTREGADO, QUE EMANA DEL FABRICANTE.
- EL CONTRATISTA, EN LA ETAPA DE EJECUCIÓN CONTRACTUAL, DEBERÁ PRESENTAR PARA CADA ENTREGA COPIA DE TODOS LOS PERMISOS DE TRANSPORTE O CIRCULACIÓN DEL CARROTANQUE, DE ACUERDO A LA NORMATIVA VIGENTE HASTA LA FECHA DE LA PUBLICACIÓN DE LA CONVOCATORIA DEL PROCESO DE SELECCIÓN.

D. NORMA TÉCNICA

EL PRODUCTO OFERTADO DEBE CUMPLIR CON LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y LOS REQUERIMIENTOS TÉCNICOS MÍNIMOS DE LAS BASES DEL PROCESO DE CONVOCATORIA. SE TOMARÁ COMO REFERENCIA LA NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 311.095.1997 "SULFATO DE ALUMINIO PARA TRATAMIENTO DE AGUA".

E. PRESENTACIÓN DE MUESTRAS

LOS PARTICIPANTES DEBERÁN ENTREGAR DOS MUESTRAS DE MEDIO LITRO Y UNA MUESTRA DE 100 KG. PARA LAS PRUEBAS EN LOS LABORATORIOS:

- UN (01) FRASCO CONTENIENDO ½ LITRO DE SULFATO DE ALUMINIO EN SOLUCIÓN AL 8%, SERÁ EVALUADO EN EL LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE SEDAPAL Y EN PRUEBA DE JARRAS.
- UN (01) FRASCO CONTENIENDO ½ LITRO DE SULFATO DE ALUMINIO EN SOLUCIÓN AL 8%,

SERÁ UTILIZADO COMO MUESTRA DE DIRIMENCIA, DE CORRESPONDER.

- CIEN (100) KG DE SULFATO DE ALUMINIO EN SOLUCIÓN AL 8%, QUE SERÁ EVALUADO EN PRUEBAS DE PLANTA PILOTO, EN LA ETAPA DE FLOCULACIÓN Y DECANTACIÓN.

LAS MUESTRAS SE EVALUARÁN DE ACUERDO AL PROCEDIMIENTO GPPR002 "INSPECCIÓN TÉCNICA DE PRODUCTOS QUÍMICOS ANTES Y DESPUÉS DE LA COMPRA".

V. UNIDAD DE MEDIDA:

TONELADAS

VI. VIDA ÚTIL:

GARANTÍA MÍNIMA DEL PRODUCTO DOS (02) AÑOS.

VII. USO:

PARA SER USADO COMO COAGULANTE PRINCIPAL EN EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA, APLICADO EN EL MEZCLADOR RÁPIDO.

VIII. HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES:

SE REQUIERE HOJA DE SEGURIDAD (MSDS) DEL FABRICANTE DEL PRODUCTO. TAMBIÉN SE REQUIERE UN PLAN DE CONTINGENCIAS PARA EL ALMACENAMIENTO, TRANSPORTE Y MANEJO ANTE DESASTRES NATURALES O ACCIDENTES, QUE CONTENGA LO SIGUIENTE:

- RESPUESTAS OPERATIVAS Y DURANTE EL TRANSPORTE
- RESPUESTA EN CASO DE DERRAME O FUGA
- RESPUESTA EN CASO DE SISMO
- RESPUESTA EN CASO DE INCENDIO
- CAPACITACIÓN DE PERSONAL
- TELÉFONOS DE EMERGENCIA
- HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

INFORMACIÓN ADICIONAL

1.- DE LAS MUESTRAS PARA EVALUACIÓN TÉCNICA

LAS MUESTRAS SE DEBEN ENTREGAR HASTA UN DÍA ANTES DE LA FECHA DE PRESENTACIÓN DE PROPUESTAS, DEBIENDO PRESENTAR CON SU PROPUESTA EL POSTOR, LA GUÍA DE REMISIÓN ORIGINAL DE ENTREGA DE MUESTRAS AL ÁREA EQUIPO GESTIÓN DE ALMACENES DE SEDAPAL.

SE DESCALIFICARÁ LAS PROPUESTAS DE LOS POSTORES, QUE NO HAYAN ENTREGADO LAS MUESTRAS DE ACUERDO EN LOS SIGUIENTES CUADROS.

CUADRO N° 1 EVALUACIÓN DE INSUMOS QUÍMICOS USADOS EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA

INSUMO QUÍMICO: SULFATO DE ALUMINIO EN SOLUCIÓN
VERIFICACIÓN DE REQUISITOS FÍSICOS Y QUÍMICOS :

VERIFICACIÓN DE REQUISITOS FUNCIONALES U OPERATIVOS

LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO LABORATORIO PLANTA PILOTO (JAR TEST) PLANTA PILOTO
X X X

LAS INSPECCIONES EN LABORATORIO DE PLANTA PILOTO (JAR TEST) Y LABORATORIO FÍSICO QUÍMICO PARA EL PRODUCTO QUÍMICO ESTÁN SUJETAS AL CUMPLIMIENTO DE LOS SIGUIENTES REQUERIMIENTOS TÉCNICOS INDICADOS EN EL CUADRO N° 2.

CUADRO N° 2 CRITERIOS DE EVALUACIÓN EN EL PROCESO DE CALIFICACIÓN DE INSUMOS QUÍMICOS ANTES DE LA COMPRA.

INSUMO QUÍMICO LAB. PLANTA PILOTO

(ENSAYO JAR TEST) PLANTA PILOTO CRITERIOS DE EVALUACIÓN

SULFATO DE ALUMINIO EN SOLUCIÓN

MUESTRA DE AGUA DE INGRESO A PLANTA Y/O MUESTRAS PREPARADAS DE:

50 - 100 NTU

100 - 150 NTU

150 - 200 NTU

LOS ENSAYOS SE REALIZARÁN CON EL AGUA DE INGRESO A LA PLANTA EN EL ENSAYO DE JAR TEST LA TURBIEDAD DEBE SER MENOR A 4 NTU EN AL MENOS UNO DE LOS VASOS DE PRUEBA, PARA CADA ENSAYO O MUESTRA PREPARADA.

EN EL ENSAYO EN PLANTA PILOTO COMO MÍNIMO EL 90% DE LOS REGISTROS DE TURBIEDAD DE AGUA DECANTADA, DURANTE UNA EVALUACIÓN DE 168 HORAS CONTINUAS, DEBE SER MENOR O IGUAL A 4 NTU.

LOS POSTORES CUYAS MUESTRAS NO CUMPLAN CON LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL CUADRO N° 2 SERÁN DESCALIFICADOS.



CODIGO DE MATERIAL N° 0005

I. DESCRIPCIÓN MÍNIMA:

CLORO X 68 KG.

II. DESCRIPCIÓN AMPLIADA:

CLORO X 68 KG.

III. TIPO MATERIAL:

SUMINISTRO DIVERSO

IV. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

- FORMULA QUIMICA : C12

- COLOR : AMARILLO VERDOSO
- CONCENTRACION : 99,5% (MINIMO)
- GRAVEDAD ESPECIFICA (COMO GAS SECO A 0°C Y 1ATM) :
2,482
- GRAVEDAD ESPECIFICA (LIQUIDO DE 0°C A 4°C) : 2,482
- IMPUREZAS Y OTROS GASES RESIDUALES : 0,1% (MAXIMO)
- HUMEDAD : MENOR A 150 PPM (0,015% DE PESO)

-PRESENTACION :

- LA PRESENTACION DEL CLORO ES COMO GAS LICUADO
- SE ABASTECERA EN CILINDROS DE ACERO DE 150 LIBRAS (68 KG.), PROVISTOS DE ACCESORIOS QUE ELIMINEN LOS PELIGROS DE EXPLOSION.
- LOS CILINDROS NO DEBEN LLEVAR SOLDADURAS O REPARACIONES POR SOLDADURA, NI DEFECTOS TALES COMO : ABOLLADURAS, RAJADURAS, LAMINACIONES U OTROS.
- CADA CILINDRO DEBERA LLEVAR GRABADO EN BAJO RELIEVE LO SIGUIENTE :
 - * CODIGO DE FABRICACION
 - * NUMERO DE SERIE
 - * TARA (INCLUYE LA VALVULA), EN UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE MEDIDAS.
 - * PRESION DE TRABAJO
- ROTULADO DE LOS CILINDROS DEBERA INDICAR LO SIGUIENTE:
 - * NOMBRE O MARCA REGISTRADA O RAZON SOCIAL DEL FABRICANTE O DEL RESPONSABLE DE LA COMERCIALIZACION DEL PRODUCTO.
 - * NOMBRE DEL PRODUCTO
 - * MASA NETA EN UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE MEDIDAS.
 - * FECHA DE PRUEBA HIDROSTATICA

DEBERA SER ENTREGADO EN LAS DIFERENTES PLANTAS DE TRATAMIENTO, SEGÚN CRONOGRAMA QUE SE INCLUIRA EN LAS BASES DEL PROCESO.

EN EL MISMO SENTIDO AL ALMACENAMIENTO, CADA PLANTA CUENTA CON SU RESPECTIVO AMBIENTE DE ALMACENAMIENTO.

V. UNIDAD DE MEDIDA:

KILOGRAMOS

VI. VIDA ÚTIL:

NO APLICA

VII. USO:

PARA SER UTILIZADO EN LA DESINFECCION DEL AGUA Y DESAGUE, DESPUES DE LA ETAPA DE FILTRACIÓN.

VIII. HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES:

SI REQUIERE HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES

CODIGO DE MATERIAL N° 00006

I. DESCRIPCIÓN MÍNIMA:
CLORO 907 KG.

II. DESCRIPCIÓN AMPLIADA:
CLORO 907 KG. PARA SER USADO EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA, CON FINES DE CONSUMO HUMANO.

III. TIPO MATERIAL:
SUMINISTRO DE CLORO 907 KG.

IV. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

A. CALIDAD DEL PRODUCTO

- FÓRMULA QUÍMICA:CL₂
- PRESENTACIÓN:GAS LICUADO
- COLOR:ÁMBAR (EN FASE LÍQUIDA) AMARILLO VERDOSO (EN FASE GAS)
- CONCENTRACIÓN:99.5% EN VOLUMEN (MÍNIMO)
- RESIDUOS NO VOLÁTILES:0.015% MÁXIMO EN PESO
- HUMEDAD:MÁXIMO 150 PPM (0.015% EN PESO)
- GRAVEDAD ESPECÍFICA (COMO GAS SECO A 0°C Y 1 ATM.):2,482
- GRAVEDAD ESPECÍFICA (COMO GAS SECO A 0°C A 4°C):1,468

B. PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO

- LA PRESENTACIÓN DEL CLORO ES COMO GAS LICUADO.
- SE ABASTECERÁ EN CILINDROS DE ACERO DE 2000 LIBRAS (907 KG.) PROVISTOS DE ACCESORIOS QUE GARANTICEN EL BUEN SELLADO DEL PRODUCTO Y SEGURIDAD DE LAS VÁLVULAS.
- LOS CILINDROS NO DEBEN LLEVAR SOLDADURAS O REPARACIONES POR SOLDADURAS, NI DEFECTOS TALES COMO: ABOLLADURAS, RAJADURAS, LAMINACIONES U OTROS QUE PUEDAN REPRESENTAR O PRESENTAR RIESGO DE FUGA.
- LOS CILINDROS DEBEN ADECUARSE A LOS KITS DE EMERGENCIA TIPO B UNIVERSALES.
- CADA CILINDRO DEBERÁ LLEVAR GRABADO EN BAJO RELIEVE LO SIGUIENTE:
- CÓDIGO DE FABRICACIÓN.
- NÚMERO DE SERIE.
- TARA (INC. LA VÁLVULA), EN UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE MEDIDAS.
- PRESIÓN DE TRABAJO.
- EL ROTULADO DE LOS CILINDROS DEBERÁ INDICAR LO SIGUIENTE:
- NOMBRE O MARCA REGISTRADA O RAZÓN SOCIAL DEL FABRICANTE O DEL RESPONSABLE DE LA COMERCIALIZACIÓN DEL PRODUCTO.
- NOMBRE DEL PRODUCTO.
- PESO NETO EN UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE MEDIDAS.
- FECHA DE PRUEBA HIDROSTÁTICA.
- FECHA DE CADUCIDAD, DE CORRESPONDER.
- LAS VÁLVULAS DEL SISTEMA, LOS CILINDROS DE CLORO 907 KG. Y LOS DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD DEBEN CUMPLIR LAS NORMAS TÉCNICAS DEL INSTITUTO DE CLORO AMERICANO. EL PROVEEDOR DEBE PRESENTAR PARA LOS ENVASES DE CLORO 907:
- CERTIFICADOS DE PRUEBA DE PRESIÓN MEDIANTE EXPANSIÓN HIDROSTÁTICA A 35.15 KG/CM²
O 500PSIG. Y PRUEBA DE HERMETICIDAD SEGÚN PRESIÓN NEUMÁTICA A 100PSIG.

C. CERTIFICADO

- EL CONTRATISTA, EN LA ETAPA DE EJECUCIÓN CONTRACTUAL, DEBERÁ PRESENTAR PARA LA PRIMERA ENTREGA (PRIMER PEDIDO DE BIENES) UN CERTIFICADO DE CALIDAD OTORGADO POR UN LABORATORIO ACREDITADO QUE SE ENCUENTRE VIGENTE EN EL LISTADO PUBLICADO POR INACAL (INSTITUTO NACIONAL DE CALIDAD), SIENDO EL ALCANCE DE ACREDITACIÓN NO NECESARIAMENTE EN LOS ENSAYOS DEL PRODUCTO OFERTADO. EL CERTIFICADO DEBE TENER COMO MÁXIMO 3 MESES DE ANTIGÜEDAD A LA FECHA DE ENTREGA DEL PRODUCTO.
- EL CONTRATISTA, EN LA ETAPA DE EJECUCIÓN CONTRACTUAL, DEBERÁ PRESENTAR PARA CADA ENTREGA (CADA GUÍA DE REMISIÓN), EL CERTIFICADO DE CALIDAD DEL LOTE ENTREGADO, QUE EMANA DEL FABRICANTE.

- EL CONTRATISTA, EN LA ETAPA DE EJECUCIÓN CONTRACTUAL, DEBERÁ PRESENTAR PARA CADA ENTREGA COPIA DE TODOS LOS PERMISOS DE TRANSPORTE O CIRCULACIÓN DEL VEHÍCULO QUE TRANSPORTA EL CLORO 907 KG., DE ACUERDO A LA NORMATIVA VIGENTE HASTA LA FECHA DE LA PUBLICACIÓN DE LA CONVOCATORIA DEL PROCESO DE SELECCIÓN.

D. NORMA TÉCNICA

EL PRODUCTO OFERTADO DEBE CUMPLIR CON LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y LOS REQUERIMIENTOS TÉCNICOS MÍNIMOS DE LAS BASES DEL PROCESO DE CONVOCATORIA. SE TOMARÁ COMO REFERENCIA LA NORMA TÉCNICA PERUANA NTP 311.256.1997 "CLORO PARA TRATAMIENTO DE AGUA".

V. UNIDAD DE MEDIDA:

KILOGRAMOS

VI. VIDA ÚTIL:

GARANTÍA MÍNIMA DEL PRODUCTO DOS (02) AÑOS.

VII. USO:

PARA SER USADO EN LA DESINFECCIÓN DEL AGUA, DESPUÉS DE LA ETAPA DE FILTRACIÓN.

VIII. HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES:

SE REQUIERE HOJA DE SEGURIDAD (MSDS) DEL FABRICANTE DEL PRODUCTO. TAMBIÉN SE REQUIERE UN PLAN DE CONTINGENCIAS PARA EL ALMACENAMIENTO, TRANSPORTE Y MANEJO ANTE DESASTRES NATURALES O ACCIDENTES, QUE CONTENGA LO SIGUIENTE:

- RESPUESTAS OPERATIVAS Y DURANTE EL TRANSPORTE
- RESPUESTA EN CASO DE DERRAME O FUGA
- RESPUESTA EN CASO DE SISMO
- RESPUESTA EN CASO DE INCENDIO
- CAPACITACIÓN DE PERSONAL
- TELÉFONOS DE EMERGENCIA
- HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD